

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO
RESÍDUO FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE
CONSTRUÇÃO**

Mariana Moreira Cavalcanti Canut

Belo Horizonte

2006

Mariana Moreira Cavalcanti Canut

ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Resíduos como Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Co-orientador: Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO FOSFOGESSO COMO
MATERIAL DE CONSTRUÇÃO**

Mariana Moreira Cavalcanti Canut

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes
DEMC/UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos
DEMET/UFMG – (Co-Orientador)

Prof. Dr^a. Vanusa Maria Feliciano Jacomino
CDTN/CNEN

Prof. Dr^a. Adriana Guerra Gumieri
DEMC/UFMG

Belo Horizonte, 13 de junho de 2006.

***À Deus,
à minha família
e ao Prof. Abdias.***

AGRADECIMENTOS

Não poderia de deixar de agradecer e mostrar minha gratidão a todos que contribuíram para essa grande conquista: o Título de Mestre.

A Deus, meu grande guia a todos os momentos. A minha família que propiciou as diretrizes necessárias para meu crescimento e formação.

Ao professor Abdias Magalhães Gomes não só pelos grandes ensinamentos de engenharia mas também pela lição de vida passada ao longo de quatro anos, deixo aqui minha profunda gratidão e admiração.

Ao professor Wander Luiz Vasconcelos por me mostrar que a engenharia vai muito além da escala macrométrica e pela oportunidade de trabalhar em seu laboratório.

À professora Vanusa Jacomino pelo carinho e pela determinação em levar nosso projeto FOSFOGESSO BRASIL a diante.

E também a todos os professores do Departamento de Materiais e Construção que estiveram sempre presentes e contribuíram com valiosos conhecimentos para a conclusão desse trabalho, em especial a professora Adriana Gumieri.

Aos grandes amigos e colegas Ângela Ferreira e Carlos Augusto Oliveira pelos eternos ensinamentos. Aos inesquecíveis colegas do Laboratório de Materiais Cerâmicos Juliana, Marcílio, Weber, Sônia, Henrique e Wilma. Aos funcionários do DEMC e a todos que colaboraram, diretamente ou indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
TABELA.....	xi
LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xii
RESUMO	xiv
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	18
3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1 Gesso Natural	21
4.1.1 Exploração Brasileira.....	23
4.1.2 Mercado Nacional e Mineiro	27
4.1.3 Microestrutura.....	29
4.1.4 Beneficiamento.....	31
4.1.4.1 Calcinação	31
4.1.4.2 Autoclavagem	33
4.1.5 Hidratação e Pega do Gesso	36
4.1.6 Propriedades	38
4.1.6.1 Isolamento Térmico e Resistência ao Fogo.....	39
4.1.6.2 Isolamento Acústico	40
4.1.6.3 Aderência a Substratos	41
4.1.6.4 Trabalhabilidade e Moldabilidade	42
4.1.6.5 Resistência Mecânica	43
4.1.7 Aplicações	44
4.1.8 Gestão dos Resíduos de Gesso.....	48
4.1.9 Prescrições Normativas.....	49
4.1.9.1 Prescrições Normativas Brasileiras	50
4.1.9.2 Prescrições Normativas Americanas	52
4.1.10 Variedades de Gesso Químico.....	53
4.2 O Fosfogesso.....	55
4.2.1 Resíduos	56
4.2.2 Classificação	58

4.2.3	Rocha Fosfatada	60
4.2.4	Radiotividade.....	62
4.2.5	Geração.....	65
4.2.6	Disposição	69
4.2.7	Possíveis Aplicações	71
4.2.7.1	Material de Construção Civil	71
4.2.7.2	Agricultura	72
4.2.7.3	Cimento.....	73
5	MATERIAIS E MÉTODOS	74
5.1	Seleção de Materiais	74
5.1.1	Gesso	74
5.1.2	Fosfogesso.....	74
5.2	Métodos.....	75
5.2.1	Caracterização das Amostras.....	78
5.2.1.1	Análises Térmicas.....	78
5.2.1.2	Granulometria a Laser	79
5.2.1.3	Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)	80
5.2.1.4	Porosimetria de Mercúrio	81
5.2.1.5	Espectroscopia de Infravermelho.....	82
5.2.1.6	Análise Química.....	82
5.2.1.7	Fluorescência de Raios X	83
5.2.1.8	Difratometria de Raios X	84
5.2.1.9	Picnometria a Hélio (He)	85
5.2.1.10	Picnometria de Mercúrio (Hg)	85
5.2.1.11	Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS.....	86
5.3	Ensaio Físicos Normalizados	87
5.3.1	Consistência Normal da Pasta	87
5.3.2	Tempos de Pega	88
5.4	Ensaio Mecânicos	88
5.4.1	Ensaio de Resistência à Compressão.....	89
5.4.2	Ensaio de Dureza	90
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
6.1	Análises nos Pós	92

6.1.1	Análises Térmicas	92
6.1.2	Granulometria a Laser.....	95
6.1.3	Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET).....	97
6.1.4	Espectroscopia de Infravermelho	101
6.1.5	Análise Química	103
6.1.6	Fluorescência de Raios X.....	105
6.1.7	Difratometria de Raios X	106
6.1.8	Picnometria à Hélio (He)	108
6.1.9	Microscopia eletrônica e EDS	108
6.2	Análise nas Composições.....	112
6.2.1	Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET).....	112
6.2.2	Porosimetria de Mercúrio	114
6.2.3	Picnometria à Hélio (He)	117
6.2.4	Picnometria de Mercúrio (Hg).....	118
6.2.5	Microscopia eletrônica e EDS	119
6.3	Consistência Normal.....	125
6.4	Tempos de Pega.....	127
6.5	Ensaio de Resistência à Compressão	129
6.6	Ensaio de Dureza	134
7	CONCLUSÃO.....	137
8	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	141
9	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Variedades de gipsita utilizadas na fabricação de gesso	26
Figura 4.2 - Célula cristalina do mineral gipsita	30
Figura 4.3 – Processos para obtenção do hemidrato alfa e beta	34
Figura 4.4 - (a) Partículas de hemidrato alfa e (b) hemidrato beta	35
Figura 4.5 - Exploração mundial de rocha fosfatada	61
Figura 4.6 – Série de decaimento do ^{238}U	63
Figura 4.7– Série de decaimento do ^{232}Th	64
Figura 4.8 - Processo de produção de P_2O_5 e geração do resíduo fosfogesso	66
Figura 4.9 – Exemplo de um perfil esquemático de rocha fosfática	68
Figura 4.10 - Armazenamento do fosfogesso.....	69
Figura 5.1– Difractometria de raios X.....	84
Figura 5.2– Retirada das amostra no interior dos corpos de prova.....	86
Figura 5.3– Teste de compressão em corpos de prova cúbicos	89
Figura 5.4– Ensaio de dureza	90
Figura 6.1 – Análise térmica do fosfogesso “in natura”	92
Figura 6.2- Análise térmica do fosfogesso beneficiado	94
Figura 6.3 - Análises térmica do gesso	95
Figura 6.4– Granulometria a laser das amostras de fosfogesso e gesso.....	96
Figura 6.5 – Distribuição do diâmetro médio de poros nas amostras.....	98
Figura 6.6 – Histerese das amostras de fosfogesso e gesso	99
Figura 6.7 – Modelagem geométrica das composições	100
Figura 6.8 – Espectro de infravermelho das amostras	101
Figura 6.9 – Espectro de difração das amostras de fosfogesso e gesso	107
Figura 6.10 – Densidade real das amostras de fosfogesso e de gesso	108
Figura 6.11 – Fotomicrografias das amostras (aumento de 30x)	109
Figura 6.12 – Fotomicrografias das amostras em pó (aumento de 500x)	111
Figura 6.13 – Distribuição do diâmetro médio dos poros nas composições... ..	113
Figura 6.14 – Histereses das composições de fosfogesso e gesso	114
Figura 6.15 – Distribuição do diâmetro de poros nas composições	116
Figura 6.16 – Densidade real das composições de gesso e fosfogesso.....	117

Figura 6.17 - Fotomicrografias das composições (aumento de 30x).....	120
Figura 6.18 – Fotomicrografia 100% fosfogesso (aumento de 1.200x)	122
Figura 6.19 – Fotomicrografia gesso traço 1:1,8 (aumento de 1.500x).....	122
Figura 6.20 – Fotomicrografia gesso traço 1:1 (aumento 1500x).....	123
Figura 6.21 - Fotomicrografia 75% fosfogesso 25%gesso (aumento 1200x) .	123
Figura 6.22 –Fotomicrografia 50% fosfogesso 50% gesso (aumento 1100x)	124
Figura 6.23 –Resistência a compressão nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias...	130
Figura 6.24 – Gráfico de resistência a compressão dos CPS	131
Figura 6.25- Fungos nos CPS com 50% fosfogesso e 50% gesso	132
Figura 6.26 – Resistência a compressão mistura “E” com uso de fungicida ..	133

TABELA

Tabela 4.1 – Consumo e valores de comercialização do gesso em MG.....	28
Tabela 4.2 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento	33
Tabela 4.3 – Classificação do gesso para construção civil.	51
Tabela 4.4 - Exigências químicas do gesso para construção civil.....	51
Tabela 4.5 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil. .	51
Tabela 4.6 - Normas para classificação de resíduos segundo a ABNT.	58
Tabela 4.7 – Análises química de fosfogesso (CHANG e MANTELL, 1990). ..	67
Tabela 4.8 - Composição típica da rocha fosfática de Itapira – MG	68
Tabela 5. 1 -Especificações de ensaios realizados em função do material	78
Tabela 5. 2 - Metodologias utilizadas na caracterização do materiais	83
Tabela 6.1 – Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} das amostras de gesso e fosfogesso ..	95
Tabela 6.2 – Análises de BET para as amostras de gesso e fosfogesso.....	97
Tabela 6.3 – Grupos funcionais presentes nas amostras	103
Tabela 6.4- Análise química das amostras de fosfogesso e gesso.....	104
Tabela 6.5 – Elementos presentes nas amostras de fosfogesso e gesso.....	106
Tabela 6.6 – EDS das partículas das amostras de fosfogesso e gesso.....	110
Tabela 6.7 – Adsorção física (Método BET) para as composições	112
Tabela 6.8 – Porosimetria de mercúrio para as composições.....	115
Tabela 6.9 – Picnometria de mercúrio das amostras de gesso e fosfogesso.	118
Tabela 6.10 – Resultado de EDS para as composições	121
Tabela 6.11 – Análises pontuais de EDS nas composições.....	125
Tabela 6.12 – Consistência normal para as misturas de gesso e fosfogesso	126
Tabela 6.13 – Tempo de pega das composições de fosfogesso e gesso	127
Tabela 6.14 – Resistência à compressão axial das composições.....	129
Tabela 6.15 – Resultado ensaio de compressão axial composição “F”	134
Tabela 6.16 – Resultados dos ensaio de dureza realizado.....	135

LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials (USA)
BET – Brunauer-Emmett-Teller
BS – British Standard
C₃A – Aluminato tricálcio
CaO – Óxido de cálcio
CaSO₄ – sulfato de cálcio
CaSO₄. 0,5H₂O – sulfato de cálcio hemidratado
CaSO₄. 2H₂O - sulfato de cálcio dihidratado
CFC – cúbica de face centrada
CNEN – Conselho Nacional de Energia Nuclear
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP – Corpo de prova
CREA – Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura
D₁₀ – 10% do total da amostra está abaixo do diâmetro encontrado
D₅₀ - 50% do total da amostra está abaixo do diâmetro encontrado
D₉₀ - 90% do total da amostra está abaixo do diâmetro encontrado
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX – Difração de raios X
DTA – Differential Thermal Analysis
DTG – Differential of Thermogravimetric Analysis
EDS – Energy Dispersive Spectrometry
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MPa – MegaPascal
NBR – Norma Brasileira Registrada
P₂O₅ – ácido fosfórico
RCD – Resíduo de Construção e Demolição
RF – Chapas Reforçadas

RILEM – Réunion Internationale des Laboratories d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Paris (França)

RU – Resistente à Umidade

Sindugesso – Sindicato das Indústrias e Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-metálicos do Estado de Pernambuco

SO₃ – anidrido sulfúrico

ST – Standard

TG – Thermogravimetric analysis

US\$ - dólar

USEPA - United State Environmental Protection Agency

– abertura nominal da peneira

ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO RESÍDUO FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

RESUMO

O reaproveitamento do resíduo fosfogesso, gerado na produção de ácido fosfórico a partir do beneficiamento de uma rocha fosfatada, é extremamente importante tanto do ponto de vista econômico-social quanto em relação à preservação ambiental, por se tratar de um resíduo abundante e cuja utilização poderá minimizar, ou até extinguir, a exploração de jazidas naturais de gesso.

O gesso é um material muito utilizado na construção civil, tendo como principais aplicações: a execução de revestimento de paredes; a fabricação de cimento e na produção de artefatos (placas, blocos, divisórias, molduras, etc). A utilização do fosfogesso em substituição ao consagrado e eficiente gesso natural, indicia ser viável e de extrema importância, uma vez que associa um material muito consumido pela indústria da construção civil, e um resíduo gerado em abundância e que, atualmente, não têm uma destinação final apropriada, em consonância com as exigências e a legislação ambientais em vigor.

O presente trabalho objetiva estudar e analisar a viabilidade técnica, com algumas conotações de cunho econômico, a substituição total ou parcial do gesso natural pelo fosfogesso na fabricação de materiais a serem empregados na construção civil. Para tal fim, foram realizados ensaios de caracterização físico-química do material, bem como ensaios mecânicos, tanto no fosfogesso quanto no gesso usualmente utilizado nas obras e construções.

A partir dos resultados apresentados foi possível observar que, a utilização do resíduo fosfogesso, como material de construção em substituição ao gesso natural, é extremamente viável.

ABSTRACT

The recycling of the phosphogypsum waste, generated in fertilizer production through the benefaction of the phosphatic rock, is very important as much from a social-economic point of view as regarding environmental preservation. It is an abundant waste which use could minimize, or even extinguish, the running of natural gypsum mines.

Gypsum materials are very utilized in the civil construction. Its primary application are: execution of the wall covering; cement manufacture and production of many artifacts (e.g. boards, bricks, frames, partitions). The phosphogypsum used in replacement of the efficient natural gypsum indicates an enormous viability and importance, since it associates a material highly consumed by civil construction industry and a waste, produced in large amounts that doesn't have any adequate final destination in agreement with the demands of the environmental legislation in force.

The present project purposes to study and analyze the technical viability, with some economic connotations, of full or partial replacement of the natural gypsum by the phosphogypsum in the production of materials to be used in the civil construction. In order to accomplish that, tests of physical and chemical characterization of the material have been executed, as well as mechanical tests with phosphogypsum and gypsum usually used in construction.

Through the presented results it was possible to observe that the use of phosphogypsum waste as a construction material in replacement of the natural gypsum is extremely viable.

1 INTRODUÇÃO

No mundo atual a geração sistemática de resíduos torna-se cada vez mais problemática, sendo grande a preocupação com a sua reutilização, a sua reciclagem, bem como o seu adequado armazenamento. Cada vez mais é importante o despertar da conscientização de empresas, de indústrias e da população, sobre como minimizar a sua geração. Assim, sendo esta geração inevitável, tornam-se necessários então, estudos e pesquisas para a viabilização do reaproveitamento de resíduos. Dentro desse contexto, pode-se destacar o fosfogesso, também denominado “gesso químico”, gerado na proporção de 4 a 6 toneladas para cada tonelada de ácido fosfórico produzido pela indústria de fertilizantes, e que apresenta grande potencial de aproveitamento e uso em substituição ao gesso natural, comumente consumido pela indústria da construção civil.

Entende-se por fosfogesso o resíduo, co-produto, sub-produto gerado a partir da produção de ácido fosfórico (P_2O_5) comumente utilizado na correção de solos agrícolas.

No Brasil, até o presente momento, o fosfogesso é considerado como um passivo ambiental, sendo normalmente gerado e armazenado na própria planta das indústrias de fertilizantes. A produção brasileira deste resíduo chega a mais de 4,5 milhões de toneladas por ano (MAZZILI, 2000), e as principais fábricas geradoras estão localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais.

Trata-se, na verdade, de um produto abundante nas indústrias de produção de fertilizantes, e a sua correta e responsável utilização irá evitar a deterioração ambiental de grandes áreas onde, normalmente, é armazenado. Também deve-se considerar que o setor da construção civil, no mundo atual, é reconhecido indiretamente como um dos responsáveis pelo impacto ambiental. Tal fato, se dá,

principalmente pela grande quantidade de recursos naturais explorados e que são transformados e beneficiados como material a ser empregue na construção civil, como é o caso das reservas naturais de gesso.

Em decorrência das informações acima mencionadas, constata-se que o aproveitamento do fosfogesso contribuirá para uma construção sustentável, tanto do ponto de vista econômico-social quanto do ambiental, ao proporcionar a redução do custo das edificações e construções, a partir da preservação dos recursos naturais.

2 OBJETIVOS

Visando contribuir para o reaproveitamento do resíduo fosfogesso, este trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e econômica da fabricação de materiais de construção a partir da substituição total e parcial do gesso natural, largamente utilizado na indústria da construção civil.

Desta forma, são os seguintes objetivos específicos a atingir:

- caracterização físico-química e morfológica do gesso bem como do fosfogesso;
- estabelecimento de uma diretriz para o beneficiamento eficaz do fosfogesso, com vista a tornar viável o seu emprego como material de construção;
- avaliação das propriedades físicas e mecânicas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, a partir do estudo de misturas proporcionadas pela substituição do gesso pelo resíduo fosfogesso;
- contribuir com dados técnicos/científicos para a regulamentação do uso do resíduo fosfogesso junto aos órgãos ambientais;

3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O estudo envolvendo o resíduo fosfogesso tem grande apelo tanto do aspecto sócio-econômico, quanto ambiental.

O crescente aumento da geração do resíduo fosfogesso preocupa cada vez mais os órgãos ambientais. O uso desse passivo ambiental na construção civil poderá contribuir com a minimização da disposição do mesmo em pilhas a partir de sua adequada destinação.

O crônico déficit de moradia no Brasil já poderia por si só justificar a aplicação deste material como matéria prima e insumo aplicável à construção civil, tanto na adição na fabricação de cimento, quanto sob a forma de pré-moldados, tais como: blocos, pisos, placas para forros e divisórias. Desta forma, obtém-se um produto menos oneroso e que minimiza a exploração das jazidas naturais de gipsita (matéria prima para a fabricação de gesso).

Um outro ponto a se destacar, relaciona-se com o custo inerente ao transporte do gesso do local onde é extraído e beneficiado, no caso a região de Araripina, Estado de Pernambuco, até os grandes centros consumidores (região sudeste do Brasil). O valor do frete comumente cobrado pelas transportadoras acaba por impactar significativamente o preço do produto final gesso. Assim sendo, o uso do fosfogesso, resíduo gerado em grande quantidade próxima aos centros consumidores, poderá economicamente viabilizar a sua utilização como insumo na fabricação de material de construção.

Não há como negar que o Brasil se enquadra no grupo de países que objetiva, através do princípio do desenvolvimento sustentável, a busca de soluções alternativas para preservar o meio ambiente e obtenção de uma legislação plausível que almeje a regulamentação de práticas de incentivo ao uso de

resíduos nas diversas áreas da cadeia de produção. A partir deste princípio, o presente estudo visa contribuir para a regulamentação ambiental em relação ao manuseio, beneficiamento e utilização do fosfogesso como substitutivo do gesso natural na indústria da construção civil.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir aborda temas, como o gesso e o fosfogesso, onde ficou evidenciada a escassez de dados encontrados na literatura científica sobretudo inerente ao resíduo fosfogesso. Artigos técnicos, dissertações e teses de doutoramento também foram consultados para a realização desta revisão.

O presente capítulo aborda o estado da arte do gesso, com ênfase à sua microestrutura, ao processo de beneficiamento bem como dos mecanismos de hidratação. As propriedades físico-químicas do gesso e sua aplicação como material também são referenciadas de maneira a dar o destaque de sua real importância para a indústria da construção civil.

Já o resíduo fosfogesso é relatado de forma mais abrangente, envolvendo desde seu processo de geração até sua disposição final, e focando suas propriedades físico-químicas e seu potencial radioativo, sendo este uma restrição do seu uso em alguns países, devido às taxas de exalação de radônio proporcionadas pelo seu uso. A partir da avaliação do estado da arte envolvendo gesso e fosfogesso, através da consulta de bibliografias recentes, será possível avaliar e destacar a similaridade entre as propriedades de ambos materiais. Essa similaridade permite evidenciar que o resíduo têm potencial de aplicabilidade na construção civil, em substituição ao gesso natural.

Alguns dos trabalhos apresentados neste capítulo serão objeto, no Capítulo 7, de uma análise crítica.

4.1 Gesso Natural

As rochas minerais que dão origem ao gesso foram formadas através de depósitos evaporíticos naturais originados de antigos oceanos. A formação geológica desses depósitos é explicada pela ocorrência de precipitação, seguida

de evaporação e conseqüente concentração dos sais (JORGENSEN, 1994). O seu uso mais antigo como material de construção foi detectado nas pirâmides do Egito. Após 3.500 anos, o gesso tornou-se um dos mais importantes minerais para a manufatura de materiais de construção (LEPREVOST, 1955; OLIVEIRA e RODRIGUES, 1990).

Na literatura clássica, a palavra gesso pode ser definida como “gipsita cozida a baixa temperatura, que faz pega com a água e é por isso empregada nas moldagens” (AURÉLIO, 1975). Já em termos técnicos, pode-se definir gesso como sendo um aglomerante¹ não-hidráulico² e aéreo³, de origem mineral, obtido da calcinação da gipsita em temperaturas em torno de 150°C. Este é constituído essencialmente por sulfatos de cálcio di-hidratado, geralmente acompanhado de uma certa proporção de impurezas, como a sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos e magnésio (BAUER, 2001).

Segundo LINHALES (2004), os termos “gipsita”, “gipso” e “gesso”, são freqüentemente usados como sinônimos. Todavia, a denominação gipsita é reconhecidamente a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso é o termo mais apropriado para designar o produto calcinado. A gipsita é uma rocha sedimentar, e em sua composição estão presentes, basicamente, a anidrita e algumas impurezas, geralmente argilo-minerais, calcita, dolomita e material orgânico. No Brasil, a matéria-prima é bastante pura, favorecendo a produção de gessos de alvura elevada (HINCAPIÉ *apud* ANTUNES, 1999).

A gipsita calcinada, o gesso, encontra a sua maior aplicação na indústria da construção civil, utilizada como material de acabamento, revestimento e matéria prima de pré-moldados. Em termos mundiais, a indústria cimenteira ainda é a maior consumidora de gesso, embora, em muitos países desenvolvidos, a

¹ Substâncias finamente pulverizadas que, pela mistura com a água, formam uma pasta que tem poder cimentante, isto é, podem ligar materiais pétreos (PETRUCCI, 1992)

² Derivados da calcinação da gipsita ou de carbonatos, onde seus produtos de hidratação não resistem à água.

³ Endurece quando exposto ao ar e não resiste à ação da água.

indústria de pré-moldados de gesso absorva a maior parte da gipsita produzida. (SINDUGESSO, 2004). Considerando as novas tecnologias e a inevitável expansão da capacidade e da necessidade de produção de pré-moldados à base de gesso é possível prever que nas primeiras décadas deste novo século, este segmento da indústria tornar-se-á o maior consumidor.

4.1.1 Exploração Brasileira

As minas brasileiras de gipsita localizam-se em oito estados⁴ das regiões Norte e Nordeste. Porém, a porção da reserva brasileira de gesso que apresenta melhor condição de aproveitamento econômico está situada na Bacia Sedimentar do Araripe, região de fronteira dos estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, com destaque para este último (LINHALES, 2004).

A produção na região, que recebeu o nome de pólo gesseiro de Araripe, teve início graças ao espírito empreendedor de alguns empresários da região sudeste do país, que identificaram uma demanda reprimida do material e anteviram na possibilidade de calcinar a gipsita utilizando os fornos das casas que produziam farinha de mandioca⁵ (SINDUGESSO, 2004).

Desde a década de 60, o estado de Pernambuco assumiu e vem mantendo a posição de maior produtor nacional de gipsita. O universo empresarial do pólo gesseiro de Araripe, inicialmente, era composto por alguns poucos pioneiros locais e por grupos cimenteiros de capital nacional⁶ (SINDUGESSO, 2004).

Em 1970 houve uma grande redução na demanda de gesso, quando o fosfogesso, por vantagem de preço e facilidade de obtenção, substituiu parcialmente a gipsita no parque cimenteiro do Estado de São Paulo (SINDUGESSO, 2004).

⁴ Pernambuco, Ceará, Maranhão, Amazonas, Tocantins, Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte.

⁵ Atividade agro industrial de grande tradição na região.

⁶ Grupo Itaú, José Ermírio de Moraes, Severino Pereira da Silva, Matarazzo, e João Santos.

Com a abertura da economia nacional ocorreram fusões e incorporações no segmento do gesso, que na mesma época passou a contar com a participação de grandes empresas do mercado internacional, que tinham uma atuação destacada nesse segmento. Entretanto, atualmente, o universo empresarial do pólo gesseiro de Araripe pode ser dividido em três segmentos:

- grupos internacionais (manufaturadores e cimenteiros): Lafarge, Knauf, BPB Placo e Holcim Brasil S.A.;
- grupos nacionais (cimenteiros): Grupo Votorantim e Grupo Nassau;
- pequenas e médias empresas (manufaturadores): controladas por empresários locais.

Os estudos estatísticos mostram que, ao final do ano 2000, existia no País um total de 65 minas de gipsita, sendo 36 ativas e 29 paralisadas. Desse total, 47 minas, sendo 28 ativas, estão localizadas apenas no estado de Pernambuco. O restante das minas está distribuído entre os estados de Ceará, Maranhão, Amazonas, Tocantins, Bahia e Piauí.

As minas localizadas na região da Bacia do Araripe apresentam melhores condições de lavra⁷ bem como adequada infra-estrutura⁸ e, ainda, uma maior proximidade do mercado consumidor, se comparado com outros estados produtores de gipsita. Elas ainda apresentam um condicionamento geológico bastante semelhante, daí porque todas elas são exploradas através do método de lavra a céu aberto, em cava “open pit”, desenvolvida segundo bancadas com altura variando de 5 a 10 metros (LYRA SOBRINHO *et al*, 2002).

A atividade econômica de exploração da gipsita em todo o pólo gesseiro indica que a mesma gera cerca de 12.000 empregos diretos, sendo 950 na mineração,

⁷ Menor razão de mineração e maior pureza do minério.

⁸ Fácil acesso, vias de escoamento asfaltadas e disponibilidade de energia elétrica.

3.900 na calcinação e 7.150 na fabricação de pré-moldados e 60.000 empregos indiretos (LYRA SOBRINHO *et al*, 2002).

A produção brasileira atinge cerca de 1,63 milhões de toneladas/ano e o país se destaca como 5º produtor mundial de gipsita (BALTAR *et al*, 2003), sendo que o Estado de Pernambuco é responsável por 89% deste total de produção.

O problema do transporte é ainda uma barreira para o pólo gesseiro de Araripe. Atualmente, o fluxo do transporte do gesso na região é eminentemente via rodoviária, face ao seu custo elevado e onerado pelas precárias condições da malha rodoviária brasileira, torna desta forma, o gesso cada vez mais oneroso.

Na Figura 4.1 pode-se observar os principais tipos de rocha encontradas no pólo gesseiro de Araripe, a saber:

- cocadinha (Figura 4.1a): um tipo de gipsita estratificada⁹ com raros filmes de argila verde;
- pedra Johnson e Estrelinha (Figura 4.1b). Pedra Johnson: variedade mais pura, com a coloração variando de branco a creme e que, caracteriza-se por apresentar uma estrutura com nódulos e estrelas. Estrelinha: gipsita que apresenta cristais radiados em forma de estrela;
- selenita (Figura 4.1c): variedade placosa, incolor e transparente;
- alabastro (Figura 4.1d): maciça e transparente, muito utilizada em esculturas. Tipo que se caracteriza por apresentar problemas na calcinação devido ao seu caráter fibroso que promove anisotropia¹⁰;
- anidrita (Figura 4.1e): variedade com coloração branca estratificada.

⁹ Aspecto estrutural característico das rochas sedimentares, que consiste na sua disposição em estratos ou camadas, lâminas, lentes, cunhas.

¹⁰ Condição de variabilidade de propriedades físicas de um corpo rochoso ou mineral em direções diferentes (UNB, 2004).

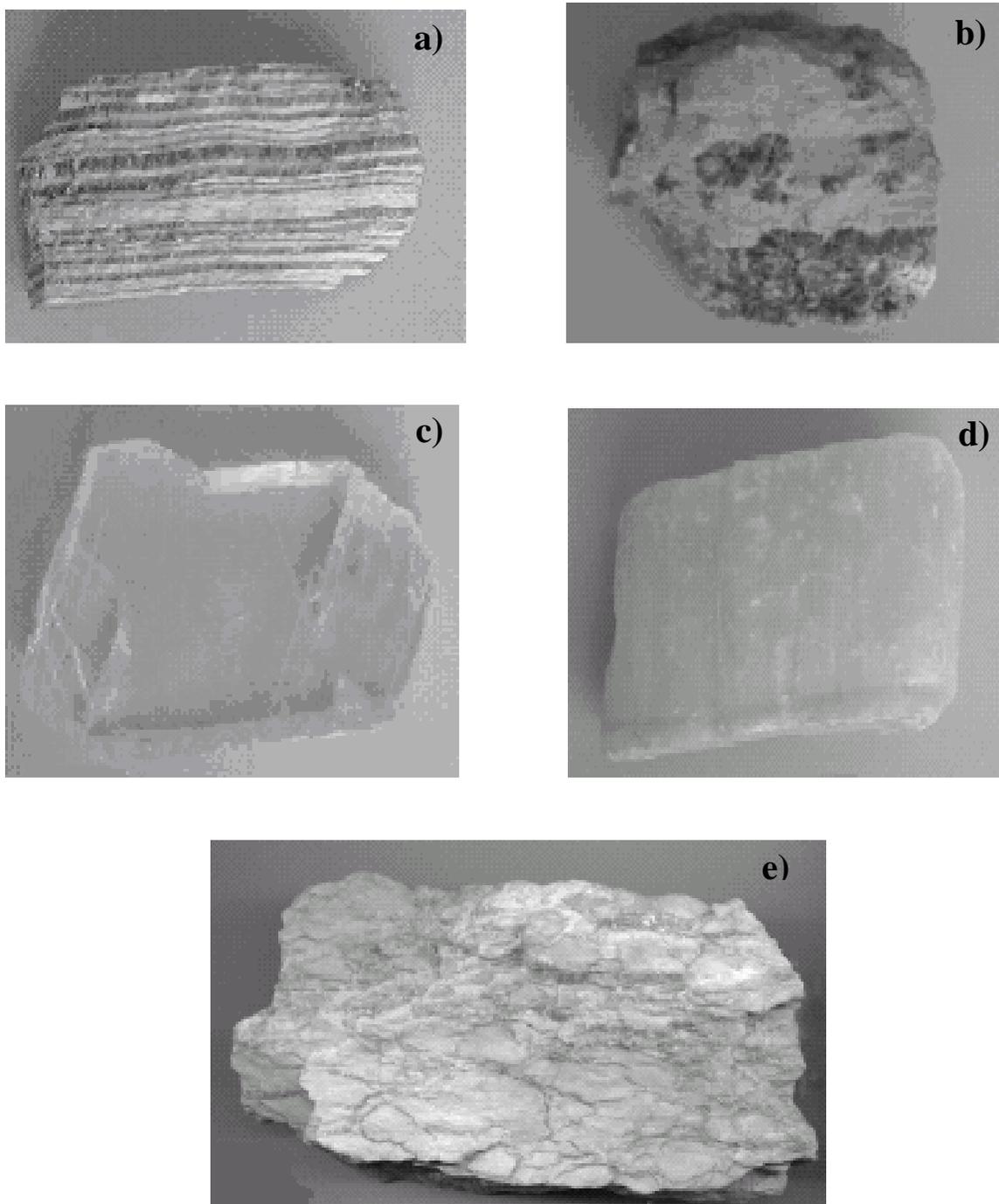


Figura 4.1 - Variedades de gipsita utilizadas na fabricação de gesso
(a) cocadinha (b) Jonhson e estrelinha (c) alabastro (d) alabastro (e) anidrita

FONTE: BALTAR *et al* (2003)

A variação “cocadinha” é utilizada na produção do gesso tipo beta e que será melhor abordado no item 4.1.3.2. A pedra Jonhson, mais pura, é usada na produção do gesso alfa (a ser abordado no item 4.1.3.2), e enquanto ambos os tipos, alabastro e anidrita, são utilizados na fabricação de cimento e na agricultura. (BALTAR *et al*, 2003).

4.1.2 Mercado Nacional e Mineiro

Atualmente, as atividades sequenciais da cadeia produtiva do gesso constituem o segmento mais dinâmico da economia dos municípios de Araripina, Trindade e Ipubi no Estado de Pernambuco, responsáveis por mais de 90% da produção nacional de gesso.

Na região de produção em Araripina, a matéria prima natural, a gipsita, é abundante e barata, cotada no ano 2000 em U\$ 4,17/ton (LYRA SOBRINHO, 2002). Normalmente, o preço do frete e transporte para a região sudeste pode equivaler a até 10 vezes o preço da matéria prima, e custa, atualmente, U\$ 51,00/ton.

Atualmente o mercado consumidor de gesso divide-se em dois seguimentos distintos. O primeiro a se destacar é constituído por empresas de beneficiamento. Estas empresas vendem o gesso na forma moída em embalagens de 40 quilos e classificados em dois tipos: “gesso rápido”¹¹ e “gesso lento”¹². O segundo seguimento trata-se das empresas produtoras de artefatos para gesso tais como placas, blocos e pisos.

Praticamente, a maioria do gesso consumido pela indústria da construção civil na Região Sudeste e Sul advêm do Estado de Pernambuco. Empresas fornecedoras de artefatos e consumidores de gesso (em especial construtoras) sediadas no

¹¹ Início de pega entre 4 e 10 e seu fim de pega é de 20 minutos a 40 minutos após a adição de água no material. Utilizado na confecção de artefatos para a construção civil.

¹² Início de pega após 10 minutos e fim de pega após 45 minutos (NBR 13207 (ABNT, 1994)). Utilizado para o uso como revestimento de edificações.

Estado de Minas foram contatadas, com o intuito de se obter dados inerentes às suas vendas bem como do consumo, e cujo resultado de tal pesquisa é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Consumo e valores de comercialização do gesso em MG

Empresa	*Gesso (US\$/ton)	*Frete (US\$/ton)	Consumo (ton/mês)
CRA Distribuidor e Arte em Gesso Ltda	40,00	50,00	120
Gesso Forro Ltda	40,00	50,00	90
Gesso Braga Ltda	40,00	50,00	150
Atelier do Gesso e Decorações Ltda	40,00	50,00	150
Acabamento e Assentamento Só Gesso	40,00	50,00	30
Gesso Campos Ltda	40,00	50,00	60
Forro Gesso S.E.	40,00	50,00	90
MRV Engenharia Ltda	40,00	50,00	140
Construtora Tenda	40,00	50,00	180
Empresas de gesso localizadas na cidade de Conceição dos Ouros/MG	-	-	13.000

* Valores cotados em dólar em setembro de 2005.

Através do levantamento realizado envolvendo os potenciais consumidores de gesso do Estado de Minas Gerais, e que o utilize na produção de artefatos (placas, blocos, sancas, pisos, etc) foi possível detectar e descobrir a existência de um pólo localizado na cidade de Conceição dos Ouros. O total de empresas fabricantes de artefatos de gesso nesta cidade gira em torno de 100, com capacidade instalada para produzir de 1.000 a 2.000 placas/dia (quadradas de 60 cm de lado), gerando um consumo médio de 13.000 ton/mês de gesso do tipo “pega rápida”.

A partir de outras informações obtidas através de pesquisa mercadológica realizada no Estado de Minas Gerais foi possível estabelecer um consumo médio

superior a 25.000 ton/mês de gesso, realizado por empresas produtoras de artefatos para a construção civil.

O Sindicato da Indústria de Cal e Gesso de Minas Gerais foi procurado na expectativa de obtenção de informações que viesse contribuir com o trabalho, mas infelizmente a listagem das empresas associadas está desatualizada, fato agravado por não ser obrigatório a sindicalização das mesmas.

No Estado de Minas Gerais são poucas as empresas que se dedicam a fabricação de artefatos de gesso. A maior parte dos produtos, já industrializados, são provenientes do Estado de Pernambuco, chegando no estado a um preço mais competitivo do que caso viesse a ser produzido nas Minas Gerais, a partir da importação da matéria prima.

Vale a pena lembrar que, o trabalho de produção de artefatos de gesso, apesar de ser bastante artesanal, confere boa qualidade, onde é oportuno ressaltar que a alvura e durabilidade do gesso são exigências primordiais, para que os produtos sejam considerados como de qualidade.

4.1.3 Microestrutura

O termo microestrutura é utilizado para descrever as características estruturais encontradas nos materiais. As microestruturas podem ser caracterizadas pelo tipo, proporção e composição das fases presentes, e pela forma, tamanho, distribuição e orientação dos grãos (BRAGANÇA e BERGMANN, 2004).

No estudo dos materiais cerâmicos, a análise da microestrutura é empregada para explicar diferentes propriedades e, conseqüentemente, diferentes aplicações para os materiais. Uma amostra de um material de mesma composição química pode apresentar uma resistência à compressão bem superior à outra, mesmo que ambas tenham se submetido, aparentemente, ao mesmo processamento. Este

fato bastante comum na análise dos materiais, quase sempre encontra explicação ao estudar-se a microestrutura, observando-se, por exemplo, o tamanho e a forma dos grãos e o volume de poros, características essas acessíveis à técnicas de análise bastante simples.

A microestrutura da gipsita, em seu estado natural, é constituída de cristais geminados¹³ de sistema monoclinico (DANA, 1969). A célula unitária da gipsita é cúbica de face centrada (CFC), composta por 4 moléculas de SO_4^{2-} , 4 átomos de Ca^{2+} e 2 moléculas de água (vide Figura 4.2).

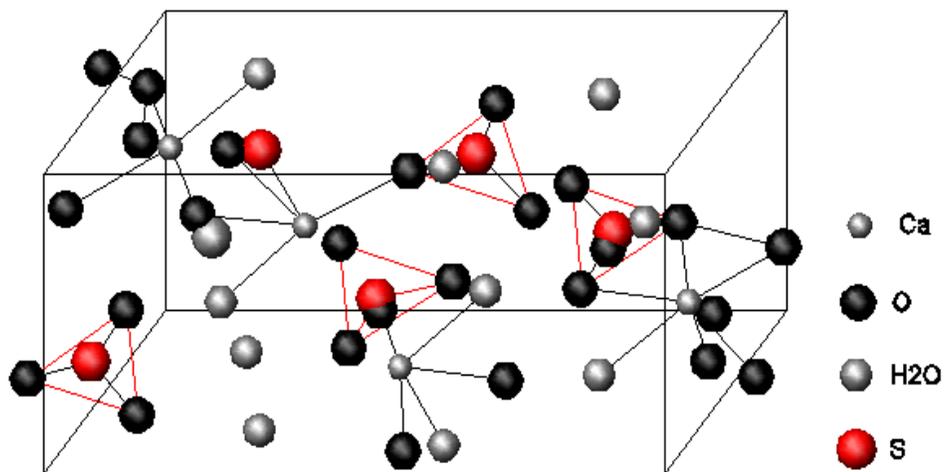


Figura 4.2 - Célula cristalina do mineral gipsita

A estrutura do sulfato de cálcio di-hidratado é essencialmente composta por duas camadas de grupos SO_4 . Estas estão unidas entre si fortemente por íons de cálcio formando um estrato. Estes estratos, estão por sua vez, devidamente unidos por uma camada de moléculas de água, cada uma das quais une um íon de cálcio com um oxigênio do seu mesmo estrato e com um outro oxigênio do estrato vizinho (ALTABA, 1980).

Os cristais de gipsita podem ser definidos de diversas formas, geralmente prismáticos, grossos, tabulares ou lenticulares, com forte curvatura de faces e

¹³ Seus cristais intercrescem de modo que certas direções do retículo são paralelas (DANA, 1969).

arestas (ALTABA,1980), podem ser encontrados incolor ou nas cores branca, bege ou amarelo, e são considerados minerais brandos, sendo possível riscá-los com a unha.

A microestrutura da gipsita pode ser modificada de acordo com o tipo de beneficiamento a que for submetida.

4.1.4 Beneficiamento

O beneficiamento¹⁴ da gipsita é essencial para a obtenção de um gesso com as propriedades adequadas para um uso específico, seja como aglomerantes ou até na medicina.

Comumente pode ser adotada uma das seguintes etapas:

4.1.4.1 Calcinação

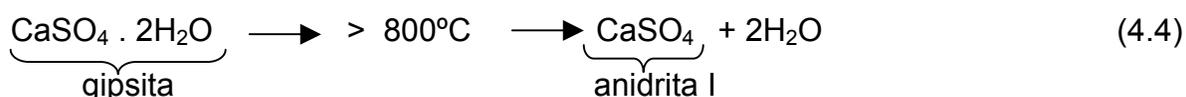
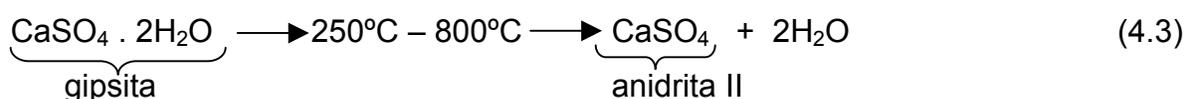
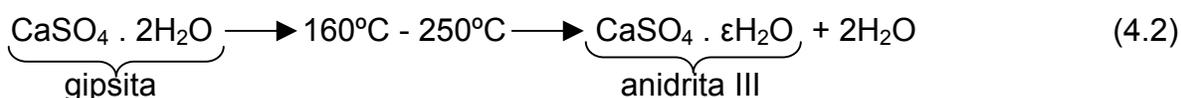
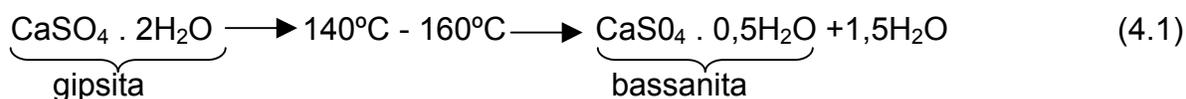
A calcinação é o processo de aquecimento térmico pelo qual a gipsita é desidratada. O material é submetido a uma temperatura da ordem de 140°C a 160°C, quando se deseja obter o hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). A anidrita III ou anidrita solúvel ($\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$)¹⁵ é obtida entre 160°C e 250°C e pode conter água de cristalização em baixo teor. Esta fase é solúvel, tal como o hemidrato, porém instável, transformando-se em hemidrato na presença da umidade contida no ar.

Quando a calcinação acontece em temperaturas entre 250°C a 800°C a anidrita III transforma-se em anidrita II (CaSO_4), cuja velocidade de hidratação é lenta (LINHALES, 2004). A anidrita I (CaSO_4) só é obtida em temperaturas acima de

¹⁴ Quando o material é submetido a tratamento entre eles: físico-químico, térmico e/ou mecânico, para que este assumam características propícias para o seu uso.

¹⁵ Sua fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ pode conter água de cristalização, embora em baixo teor, variável entre 0,06 e 0,11 moléculas de água.

800°C . As reações de desidratação da gipsita podem ser melhor observadas nas equações (Equação 4.1 a Equação 4.4):



Dependendo da temperatura e das condições em que foi realizada a calcinação, será gerado o gesso estuque, o gesso para reboco ou o gesso de alta resistência. O gesso estuque é obtido através do beneficiamento do gesso a temperaturas de 120°C a 180°C, sendo assim definido como um hemidrato ou anidrita III. Este é também chamado de gesso Paris e é muito aplicado na construção civil, sobretudo para fabricação de artefatos de gesso.

Na temperatura de 150°C a 700°C pode-se obter o gesso com endurecimento mais lento, comumente utilizado na execução de reboco simples, que pode substituir a cal aérea¹⁶ na produção de argamassas de revestimento (SILVA, 1991).

O gesso de alta resistência pode ser obtido a uma temperatura de 800° a 1000°C, ou seja, é uma anidrita I. O gesso anidro possui uma estrutura cristalina diferente. Vale a pena ressaltar que os cristais são da mesma substância, mas apresentam

¹⁶ Aglomerante aéreo que resulta da calcinação de pedras calcárias (PETRUCCI, 1992).

maior tamanho, tendo uma área específica menor, exigindo conseqüentemente, menos água (SILVA, 1991). O emprego deste tipo de gesso se dá comumente no interior de edifícios e das construções que devem ser particularmente resistentes. Em função da temperatura de beneficiamento a gipsita pode possuir uma fase e um sistema cristalino predominante. A mudança de fases decorridas das reações de desidratação da gipsita faz com que esta mude também o sistema cristalino como pode ser observado na Tabela 4.2 (DANA, 1969).

Tabela 4.2 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento

Fórmula	Sistema cristalino	Mineral
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico	Gipsita
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal	Hemidrato
$\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal	Anidrita III
CaSO_4	Ortorrômbica	Anidrita II
CaSO_4	Cúbica	Anidrita I

4.1.4.2 Autoclavagem

A autoclave é um equipamento utilizado para o tratamento de materiais através de calor, umidade e alta pressão. No caso do gesso, este equipamento é aplicado para a obtenção do gesso alfa (α). Já o gesso conhecido como hemidrato beta (β) é obtido através de calcinação a seco sob pressão atmosférica, ou baixa pressão.

O esquema de formação dos hemidratos, alfa e beta, pode ser obtido através das diferentes rotas apresentadas na Figura 4.3.

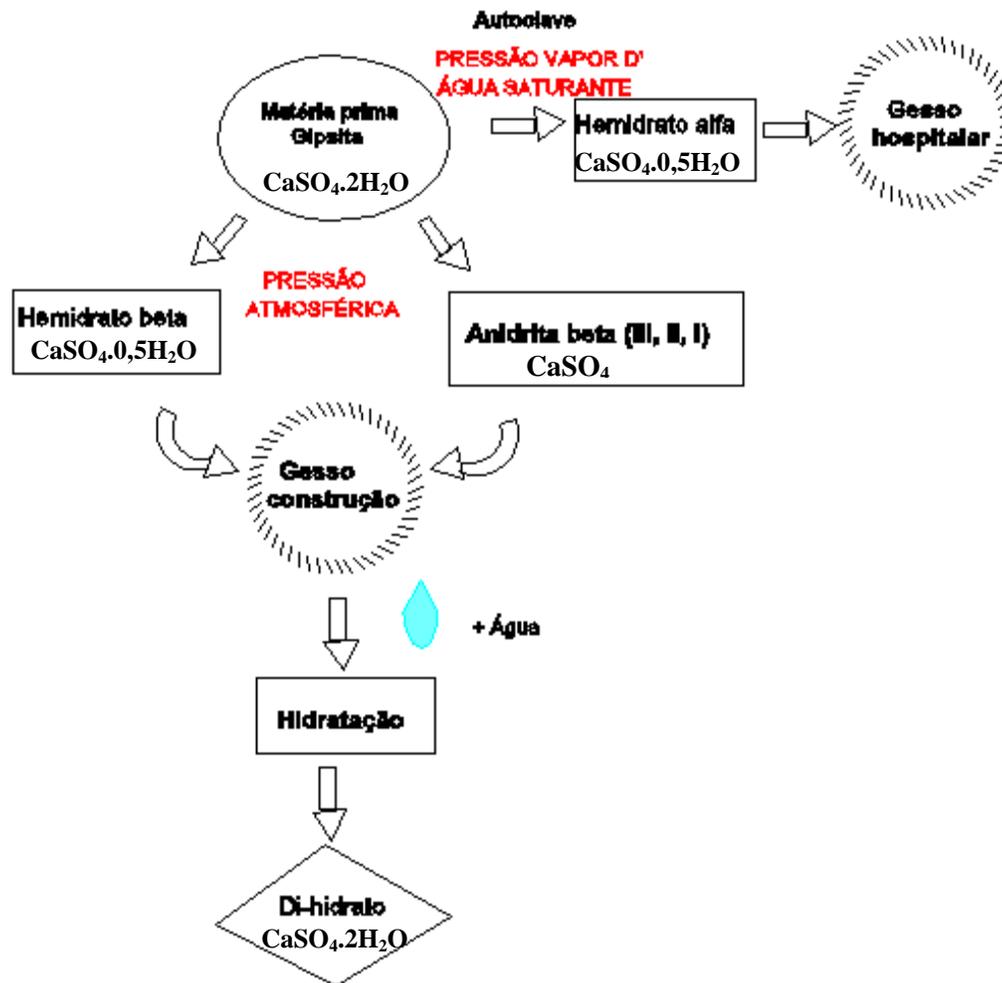


Figura 4.3 – Processos para obtenção do hemidrato alfa e beta

No caso específico dos hemidratos, sua microestrutura se distingue pelo grau de cristalização e pelo tamanho de cristais (TAYLOR, 1998). Os hemidratos alfa e beta possuem a mesma estrutura cristalina, entretanto, sua morfologia (tamanho e superfície do cristal) difere devido ao método de produção (Figuras 4.4a e 4.4b).

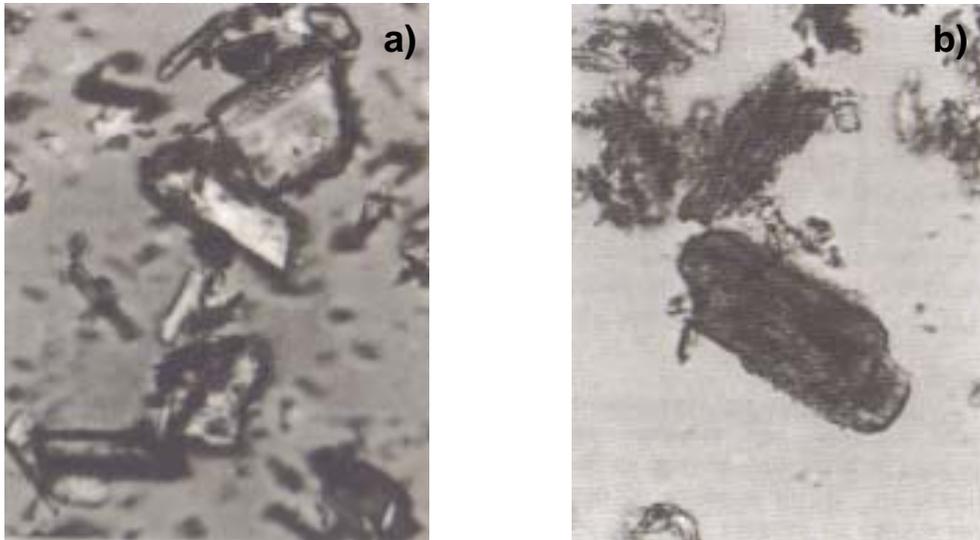


Figura 4.4 - (a) Partículas de hemidrato alfa e (b) hemidrato beta

FONTE: CINCOTTO *et al* (1985b).

Como pode-se observar na Figura 4.4a, as partículas de hemidrato alfa são nitidamente cristalinas e com textura lisa. Já as partículas de hemidrato beta são predominantemente sombrias, estriadas e preferencialmente arredondadas (Figura 4.4b). As diferenças morfológicas exercem influência sobre as propriedades da pasta e do gesso endurecido (CINCOTTO *et al*, 1985b).

O hemidrato beta é utilizado na indústria da construção civil, indústria cerâmica e indústria de modelagem. Dentre os tipos de gesso beta, destacam-se os de fundição e os de revestimento manual, sendo ambos produzidos no Brasil sem a adição de aditivos químicos (BALTAR *et al*, 2003).

O hemidrato alfa obtido com a calcinação em autoclave, passa por uma modificação na morfologia do gesso resultando em um produto mais homogêneo. Como consequência, após a mistura do hemidrato com água, obtém-se um produto com maior resistência mecânica e menor consistência. Esta última característica possibilita a trabalhabilidade da mistura com uma menor relação água/gesso. Pelo fato da resistência mecânica do gesso ser inversamente

proporcional à relação água/gesso e, conseqüentemente, à porosidade, as pastas produzidas com o hemidrato alfa são mais resistentes que as produzidas com o beta (NOLHIER *apud* ANTUNES, 1999).

O gesso alfa é caracterizado por apresentar cristais compactos, regulares e resistentes. Dentre as principais utilizações do gesso alfa estão: matrizes para indústria cerâmica; indústria de modelagem (usados por artistas plásticos); ortopedia; bandagens médicas; odontologia e na indústria automobilística (BALTAR *et al*, 2003).

4.1.5 Hidratação e Pega do Gesso

A hidratação do gesso ocorre a partir do momento que o gesso entra em contato com a água. Este dissolve-se e forma uma solução supersaturada de íons SO_4^{2-} e Ca^{2+} , ocorrendo a reação química exotérmica, formando assim, os cristais de di-hidrato.

A hidratação do gesso pode ser observada através da reação química expressa pela Equação 4. 5:



Os cristais di-hidratados crescem em forma de agulhas entrelaçadas. Com o entrelaçamento dos cristais que precipitaram da solução saturada, começa o endurecimento da pasta e esta passa a ganhar resistência mecânica (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997).

A velocidade da pega¹⁷ do gesso está diretamente ligada com os fatores:

¹⁷ Quando os cristais de di-hidrato começam a precipitar ocasionando um aumento na consistência da pasta (ANTUNES, 1999).

- Temperatura e tempo de calcinação:

A calcinação realizada em temperaturas mais elevadas ou durante um tempo maior, leva a formação de um material de pega mais lenta, porém com maior resistência (BAUER, 2001). O material super cozido, com predominância de sulfato de cálcio anidrito, não dá pega e por isso não possui valor aglutinante.

- Finura:

O tamanho das partículas influencia a cinética da reação. O aumento da área superficial específica do gesso faz com que este se torne mais reativo na preparação com a água, tornando-se assim um material com pega mais rápida. Com o aumento da área superficial é necessário também uma maior quantidade de água para envolver as partículas de gesso.

- Quantidade de água de amassamento:

A relação água/gesso é o parâmetro de maior influência na cinética da reação de hidratação e, conseqüentemente, na pega do gesso. Quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior o intervalo de tempo necessário para saturar a solução (ANTUNES, 1999).

- Presença de impurezas:

As impurezas podem ser incorporadas através da água de amassamento e/ou por resíduos de outras misturas ou propositalmente, como parte da mistura. Durante o preparo das pastas, as impurezas presentes aceleram a pega por atuarem como núcleos de cristalização (CLIFTON *apud* ANTUNES, 1999).

- Aditivos:

Os aditivos controladores de pega são produtos orgânicos ou inorgânicos que, adicionados em pequenas quantidades (<10%) à água de amassamento ou ao gesso em pó, atuam com finalidade de retardar ou aumentar o tempo de pega das pastas (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997).

Os aditivos aceleradores aumentam a solubilidade do hemidrato acelerando a hidratação, reduzindo, assim, a pega do material. Os aditivos retardadores atuam com finalidade de retardar o tempo de pega das pastas. No grupo dos orgânicos, os mais empregados são os ácidos carboxílicos e as proteínas. No grupo dos produtos inorgânicos destacam-se os fosfatos e boratos.

4.1.6 Propriedades

Quimicamente a gipsita é um sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cuja composição estequiométrica média é de 32,5% de CaO, 46,5% de SO_3 e 20,9% de H_2O (DANA, 1969).

Dentre as suas propriedades físicas destacam-se: a dureza 2 na escala Mohs; a densidade real de 2,35 g/cm³; o índice de refração 1,53 (LINHALES, 2004). No estado em que se encontra no mercado o gesso é um pó branco de elevada finura.

No item a seguir serão relatadas as propriedades intrínsecas do gesso que viabilizam a sua aplicação como material na construção civil tais como: isolamento térmico e acústico; a aderência a substrato; a trabalhabilidade, a moldabilidade e a resistência mecânica.

4.1.6.1 Isolamento Térmico e Resistência ao Fogo

O isolamento térmico de um local consiste basicamente no equilíbrio da temperatura indispensável ao bem estar do ser humano, obtido mediante a utilização de materiais classificados como de baixa condutibilidade térmica¹⁸, os materiais de construção devem ser criteriosamente selecionados com intuito de proporcionar conforto térmico ao ambiente construído.

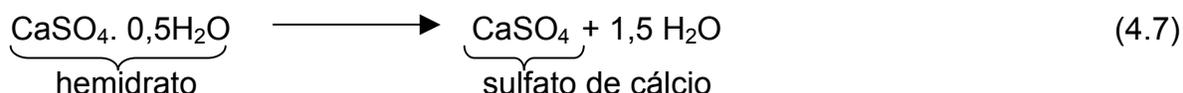
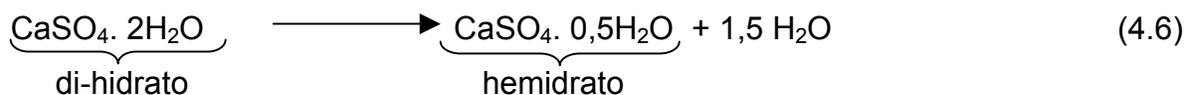
A condutibilidade térmica do gesso pode variar com a sua densidade, e é aproximadamente igual a 0,3 kcal/m².h.°C (PETRUCCI, 1992), e se comparado a outros materiais de construção, pode ser considerado um ótimo isolante térmico.

Em particular, quando utilizado no interior das habitações impede a formação de indesejáveis vapores de água. A propriedade de bom isolante térmico é evidenciada quando o gesso é utilizado no interior das habitações, impedindo a formação dos indesejáveis vapores de água que surgem sobre a superfície das alvenarias, ocasião em que se referencia a existência de uma “parede fria”. Por outro lado, pode-se dizer que o gesso é um dos materiais de construção com melhor resistência a deterioração pela ação do fogo. A resistência ao fogo na edificação é relacionada à estabilidade e integridade dos elementos que a constituem quando sujeitas à elevação de temperatura decorrente de sua ação (CINCOTTO *et al*, 1985a).

O bom desempenho do gesso contra a ação do fogo deve-se, sobretudo, ao fato de tratar-se de um material mineral, incombustível, e que, na opinião de alguns autores e pesquisadores, dispensa as demais verificações de reação ao fogo (SILVA, M. e SILVA, V., 2004), sem contar com o fato de apresentar duas reações endotérmicas de desidratação durante seu processo de queima (BELMILOUDI e MEUR, 2005).

¹⁸ Velocidade com que o calor é conduzido através de uma unidade volumétrica submetida a uma diferença unitária entre as duas faces, ou seja, a relação entre o fluxo do calor e o gradiente de temperatura (SILVA, 1991)

A primeira reação de desidratação ocorre aproximadamente entre 100°C e 120°C, quando o sulfato de cálcio di-hidratado é convertido em sulfato de cálcio hemidratado (Equação 4.6). Já a segunda reação de desidratação ocorre quando o sulfato de cálcio hemidratado é convertido para sulfato de cálcio (Equação 4.7).



Desta forma, o calor gerado pela elevação da temperatura durante um incêndio é inicialmente consumido pela evaporação das moléculas de água, o que retarda o aquecimento e, conseqüentemente, os danos à vedação. As particularidades de materiais confeccionados com o gesso se devem ao fato de que este contém 21% de água de cristalização em seu peso (BELMILOUDI e MEUR, 2005).

Segundo alguns autores (PATTON, 1978; SILVA, M. e SILVA, C., 2004), os produtos a base de gesso apresentam excelente resistência ao fogo. Já outros autores (TAYLOR, 2004; PETRUCCI, 1992) questionam a sua eficiência de combate ao fogo, mas enfatizam que a utilização de material a base de gesso na construção civil realmente proporciona o equilíbrio da temperatura, trazendo conforto térmico aos ambientes construídos, sem implicar gastos exagerados de energia.

4.1.6.2 Isolamento Acústico

O gesso possui a propriedade de absorção de energia acústica, contribuindo, assim, de diversas maneiras para a insonorização dos locais.

O desempenho acústico proveniente de elementos constituídos de gesso depende basicamente de sua capacidade de isolar, absorver ou descontinuar caminhos

para a transmissão do som (pontes acústicas). A dissipação de energia sonora processa-se, principalmente, pelo atrito gerado pela passagem do ar através dos poros do material absorvente, o qual deve ser leve, poroso e de baixa densidade (SILVA, M. e SILVA, G., 2004). Por isso, a alta porosidade dos materiais confeccionados com gesso está diretamente ligada a sua eficiência a ponto de ser considerado um excelente isolante acústico.

O isolamento relaciona-se também em grande medida com a massa da vedação. Portanto os materiais mais indicados para esta finalidade devem ser densos, para resistir à vibração resultante da incidência das ondas sonoras (SILVA, M. e SILVA, G., 2004).

4.1.6.3 Aderência a Substratos

A aderência é uma importante propriedade requerida pelo gesso a ser aplicado em revestimentos de tetos e paredes. Na aplicação das pastas frescas de gesso sobre um substrato, a propriedade de aderência é influenciada pelo bom desempenho do conjunto base-revestimento.

A forma como ocorre à adesão inicial depende tanto das características de trabalhabilidade da argamassa, quanto das características de porosidade, rugosidade da base ou de tratamento prévio que aumente a superfície de contato entre os materiais (CINCOTTO *et al*, 1995). Segundo OLIVEIRA (2004), a aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução do assentamento dos componentes da base.

Nos trabalhos em superfícies verticais e teto, é comum a prática do uso do gesso, devido à boa ligação entre este material e os diferentes tipos de substrato, tais como tijolos, pedras naturais e ferro, exceto em superfície de madeira. No caso de sua aplicação sobre superfícies metálicas, atenção especial deve ser dada a

proteção dos metais contra a corrosão, pois o pH (potencial hidrogeniônico) neutro do gesso associado a umidade local pode provocar perda de aderência (PETRUCCI, 1992). Nestas situações recomenda-se utilizar metais submetidos ao processo de proteção contra corrosão, como por exemplo a galvanização.

A avaliação da aderência dos revestimentos pode ser obtida através de ensaios “in situ” de arrancamento, também conhecido como “pull off test”, obtendo-se deste ensaio o valor da tensão necessária para se arrancar do paramento um disco metálico de 50 mm de diâmetro e 25 mm de altura, através de um dispositivo específico (GOMES, 1995).

HASELEIN *et al* (2002) observaram que a resistência ao arrancamento das pastilhas, coladas sobre revestimento em gesso e assentes sobre diversos tipos de substratos, era elevada, chegando a atingir valores de 1,5 MPa, bem superiores àqueles registrados em argamassas tradicionais de revestimento (reboco e emboço). Vale lembrar que a NBR 13749 - *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação* (ABNT, 1996) recomenda que a resistência de aderência à tração deve ser superior a 0,3 MPa.

4.1.6.4 Trabalhabilidade e Moldabilidade

A trabalhabilidade é considerada uma propriedade empírica comumente difícil de ser expressa, definida e entendida.

Em termos práticos, a trabalhabilidade significa a facilidade de manuseio por parte do operário que prepara e aplica a argamassa. Essa propriedade faz do gesso um produto moldável com aplicação milenar em revestimentos de paredes e tetos, na fabricação de adereços decorativos e de adornos.

A plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, sendo que a avaliação dessas propriedades em

alguns métodos de ensaio ocorre em simultâneo. A plasticidade é influenciada pelo teor de ar, pela natureza do aglomerante e pela intensidade de mistura das argamassas (CINCOTTO *et al*, 1995). Já a consistência é a propriedade pela qual a pasta tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco (CINCOTTO *et al*, 1995).

4.1.6.5 Resistência Mecânica

Resistência dos pré-moldados e produtos a base de gesso consiste da manutenção de integridade das mesmas quando submetidas a esforços, sejam eles de tração, compressão, cisalhamento ou até mesmo impacto e desgaste.

HINCAPIÉ e CINCOTTO (1997) relacionam a resistência mecânica dos produtos à base de gesso com o crescimento cristalino das agulhas da pasta de gesso. Segundo os autores, o crescimento cristalino do gesso pode ser crítico, ou seja, com poucos núcleos, resultando em cristais de tamanho grande, ou no caso de cristais formados a partir de numerosos núcleos, resultando assim pequenos cristais. As propriedades mecânicas são prejudicadas quando o arranjo cristalino é formado por cristais mais grossos.

As propriedades mecânicas são, também, diretamente proporcionais a relação água/gesso, na medida em que aumenta a porosidade dos produtos confeccionados com gesso. Assim sendo, a determinação dos adequados traços e misturas de gesso é de extrema importância e necessária para a obtenção de um produto final com bom desempenho mecânico.

Um outro fator que pode influenciar a resistência é o uso de aditivos tenso-ativos redutores de água, que alteram as forças de atração e repulsão das partículas. Esses aditivos têm seu princípio ativo baseado em duas cadeias: uma cadeia

hidrófila¹⁹ e outra hidrófoba²⁰ (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Quando um aditivo é incorporado ao gesso sua cadeia hidrófila é adsorvida pela superfície da partícula de gesso e, desta forma, não somente a tensão superficial da água é reduzida mas também as partículas de gesso tornam-se hidrófilas (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O uso de aditivos tenso-ativos proporciona uma redução da quantidade de água de amassamento, aumentando assim a resistência mecânica das pastas endurecidas de gesso. Este também é responsável pela boa hidratação das partículas de gesso.

Em termos gerais, a fraca resistência mecânica dos produtos à base de gesso, se comparado com o concreto e outros materiais cimentícios, e a sensibilidade à umidade fazem com que a utilização desse na construção se limite ao acabamento de paredes e tetos, bem como na fabricação de artefatos para vedação de interiores (OLIVEIRA, 1990).

Uma maneira de melhorar a resistência mecânica do gesso é através da adição de fibras poliméricas nas pastas de gesso, como foi observado em diversos trabalhos (TERRY *et al*, 2002; TANIGUTI, 1999).

Repetidas ações de desgaste sobre a superfície do gesso podem provocar perda de massa na superfície dos materiais à base de gesso, e assim sendo o rotula como um material de baixa resistência à abrasão, sendo esta uma das desvantagens dos materiais à base de gesso.

4.1.7 Aplicações

O gesso é um material bastante consumido e aplicado na indústria da construção civil, na odontologia e sobretudo na medicina. Mas é na construção civil que se registra o maior consumo, onde é muito utilizado em revestimentos, na fabricação

¹⁹ Afinidade com a água, apresenta alta solubilidade.

²⁰ Dificuldade em romper as fortes interações entre as moléculas de água, possui baixa solubilidade em água.

de cimento e na manufatura de pré-moldados e adornos.

Estimativas do Sumário Mineral 2000 (SINDUGESSO, 2004) calculam que o consumo do gesso no Brasil seja dividido na proporção de 55% para gesso (predominantemente placas e revestimentos) e 43% para cimento, sendo que, os 2% restantes são consumidos na fabricação de produtos para fins medicinais.

O uso do gesso como material de construção vem sendo intensificado, devido principalmente ao fator sócio-econômico, na medida em que é um produto que tem atendido às expectativas dos usuários e construtores, pois proporciona uma maior velocidade de aplicação e, por conseqüência, ajusta-se melhor aos apertados cronogramas de execução das obras, a um preço competitivo.

A seguir serão detalhados os principais seguimentos consumidores do gesso:

- Cimento:

A indústria cimenteira é uma das maiores consumidoras da gipsita. A gipsita é adicionada ao cimento Portland na etapa de moagem do clínquer para evitar a pega instantânea do C_3A^{21} (aluminato tricálcico) durante a hidratação do cimento, ou seja, a gipsita é responsável pelo retardo da pega de materiais confeccionados à base de cimento.

Nas fábricas de cimento utiliza-se a gipsita na proporção de 2 a 5% em massa de cimento. Segundo SMADI (1999), o uso do gesso no concreto deve ser regulado devido à alta instabilidade volumétrica (expansão) proporcionada pela formação da etringita em concretos e argamassas. A principal região brasileira produtora de cimento é a região Sudeste, apesar do elevado custo motivado pelo valor do frete que é influenciado pela grande distância que separa o pólo gesseiro de Pernambuco das fábricas de cimento dessa região (BALTAR *et al*, 2003). Em

²¹ Terminologia utilizada para abreviar o composto $3CaO.Al_2O_3$

algumas fábricas de cimento das regiões sul e sudeste do Brasil, a gipsita natural já é substituída pelo resíduo fosfogesso.

- Revestimento:

O gesso apresenta propriedades extremamente atraentes para o uso como revestimento, entre elas, a aderência em vários tipos de substratos e o endurecimento rápido que proporciona rapidez na execução dos serviços.

Além disso, destaca-se por proporcionar um excelente acabamento final nas paredes e tetos de construções, dispensando o uso de outro material de acabamento (SATO *et al*, 2001). Cabe lembrar que sua aplicação em ambientes externos não é recomendada, devido a sua alta solubilidade²² na presença de água.

- Pré-moldados:

A indústria da construção civil, em todo o mundo, encontra-se em um momento claramente dedicado à busca e implementação de estratégias de modernização do setor, em que a racionalização construtiva tem um papel fundamental. Nesse sentido, as tendências mais notáveis relacionam-se ao emprego de sistemas total ou parcialmente pré-fabricados, capazes de maximizar o potencial de racionalização embutido nos processos construtivos.

O gesso é principalmente usado na produção de artefatos de placas para forro e chapas acartonadas, as quais tem vastas aplicações na indústria da construção. As placas para forro destacam-se por proporcionarem um fechamento rápido, de fácil execução, e que permite acesso para a manutenção das instalações elétricas e hidráulicas e variações da configuração para ajuste do nível de desempenho

²² Aproximadamente 2,5 g/l (KORNDÖRFER, 2004)

final (SILVA, M. e SILVA, G., 2004). As placas para forro são geralmente encontradas no mercado brasileiro na proporção de 60cm x 60cm.

As placas pré-fabricadas também podem agregar características diferenciadas como hidrofugadas²³, reforçadas com fibras de vidro, texturizadas e acústicas.

As chapas ou painéis acartonados são sistemas de vedações compostos por chapas leves em gesso montado sobre cartão (acartonado), estruturadas por perfis metálicos ou de madeira, fixas ou desmontáveis e geralmente monolíticas (SILVA, M. e SILVA, G., 2004). O papel cartão confere resistência à flexão aos painéis de gesso. No mercado atual existem as chapas de padrão Standard (ST) preparadas apenas com gesso, aditivos e cartão. As chapas resistentes à umidade (RU), nas quais o gesso recebe um tratamento com hidrofugantes e as chapas reforçadas (RF), nas quais o gesso recebe o reforço de fibra de vidro.

- Agricultura

Há vários anos o gesso tem sido utilizado como condicionador e melhorador de solos agrícolas, como fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S). O gesso pode ser aplicado em solos ácidos inférteis, solos sódicos e solos argilosos. Todavia, essas aplicações têm ocasionado melhorias nas radiculares de culturas e na infiltração de água em solos, resultando em melhores produções agrícolas e decréscimo de escoamento superficial e erosão (SUMNER, 1992).

- Medicina, Farmácia e Alimentação:

Além da construção civil, o gesso é aplicado na medicina, indústria farmacêutica e de alimentos. Utiliza-se o gesso na cirurgia, traumatologia, odontologia, como desinfetante e é também matéria-prima de muitos medicamentos. Já na indústria alimentícia, o gesso é utilizado no acondicionamento de água para fabricação de cerveja e na limpeza de vinhos.

²³ Resistentes à ação da água.

Cabe ressaltar que o gesso utilizado na indústria farmacêutica e de alimentação é o gesso de cristais do tipo alfa obtido através do processo de autoclavagem (abordado no sub-item 4.1.3.2).

4.1.8 Gestão dos Resíduos de Gesso

Segundo JOHN e CINCOTTO (2003), o desperdício estimado de gesso na Indústria da Construção Civil é de 45%, enquanto os fabricantes de gesso em pó estimam perdas em torno de 30% da massa de gesso.

A redução deste desperdício deve fazer parte do dia a dia das empresas, pois o custo do material perdido, aliado ao da gestão dos resíduos, pode afetar a competitividade da solução. A solução está basicamente associada ao aumento do tempo útil das argamassas de gesso e ao uso de mão de obra qualificada (JOHN e CINCOTTO,2003).

AGUIAR (2004) afirma que a presença de gesso em resíduos de concreto e de argamassa que serão aproveitados futuramente, pode provocar efeito danoso aos mesmos. O sulfato, presente no gesso, em presença de compostos de alumínio e de cálcio como o C_3A , por exemplo, podem levar a formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais. A maioria das normas limita o teor de sulfatos nos agregados a um valor máximo de 1% (JOHN e CINCOTTO, 2003). Sendo assim, o resíduo a base de gesso deve ser separado e ter destinação própria.

Importante salientar que a Resolução 307/02 do CONAMA²⁴ (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002) e a NBR 10004/04 – *Resíduos Sólidos - Classificação* classificam o gesso como resíduo não inerte e que, deste modo, não pode ser simplesmente depositado nos aterros de construção, contribuindo assim para a preocupação do meio técnico com este tipo de resíduo.

²⁴ Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso (CONAMA, 2002).

Em relação ao descarte das peças pré-moldadas e de gesso acartonado são seguramente mais fáceis de separar no processo de triagem de entulho para a produção de agregados reciclados, em função do seu tamanho e também por ficarem isoladas dos outros componentes construtivos (AGUIAR, 2004). No caso de revestimentos de gesso, a identificação do material e a tarefa de separar o gesso do substrato não são viáveis, pois o gesso apresenta elevada aderência a todos os tipos de base mineral (AGUIAR, 2004).

Com isso percebe-se a necessidade de separação dos resíduos de demolição e reforma a base de gesso antes do seu reaproveitamento, tornando necessária a elaboração de um adequado e apropriado plano de gerenciamento e separação desses resíduos. A ausência de procedimentos adequados pode introduzir a presença de contaminantes no resíduo, fato que pode inviabilizar a sua reutilização.

Empresas especializadas em reciclagem de gesso como a New West Recycling (Canadá), Knauf (Alemanha), Gipsrecycling (Dinamarca) já fazem parte do mercado de mundial gestão e reaproveitamento de resíduos de gesso (JOHN e CINCOTTO, 2004). O processo comumente demanda uma etapa de hidratação do resíduo gesso, resultando, dessa forma, num produto com composição exatamente igual ao mineral que o originou, no caso a gipsita. A grande vantagem do reaproveitamento deste resíduo é que ele induz a redução da exploração de jazidas naturais de gesso.

4.1.9 Prescrições Normativas

A falta de normatização e prescrições técnicas referentes ao resíduo fosfogesso, aliada a sua similaridade com o gesso induz com que as normas técnicas referentes focadas no gesso sejam consultadas e acessadas quando se trata de avaliar o resíduo. Atualmente, ainda não estão especificados nas normas brasileiras, os padrões mínimos de qualidade exigidos para o gesso disponível no

mercado, e em decorrência desta lacuna será realizada a seguir uma abordagem comparativa entre especificações e exigências contidas nas normas nacionais e americanas em relação ao gesso comumente utilizado na construção civil.

4.1.9.1 Prescrições Normativas Brasileiras

Para uma análise cética e crítica da legislação relativa ao gesso, realizou-se um estudo através de levantamento das normas aplicáveis e vigentes no Brasil. A partir deste levantamento foi possível estabelecer algumas considerações.

O gesso brasileiro, por ser extraído de várias jazidas e sobretudo, a partir de diferentes métodos de extração, é definido como uma material heterogêneo, ou seja, possui diferentes características e propriedades. As prescrições normativas brasileiras, propostas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), não estabelecem um critério definido para a classificação do gesso, e comumente focam apenas testes e ensaios relativos as seguintes propriedades citadas abaixo e descritas nas Tabelas 4.3 a 4.5:

- tempo de pega à realizar segundo NBR 12128 - *Gesso para construção: determinações das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991b);
- módulo de finura conforme NBR 12127 - *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas do pó* (ABNT, 1991a);
- composição química segundo a NBR 12130 – *Gesso para construção: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico* (ABNT, 1991d);
- propriedades físicas através da NBR 12127 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas do pó* (ABNT, 1991a);
- propriedades mecânicas segundo a NBR 12129 – *Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas* (ABNT, 1991c).

Tabela 4.3 – Classificação do gesso para construção civil.

Classificação do gesso	Tempo de pega (min)		Módulo de finura
	Início	Fim	
Gesso fino para revestimento	> 10	> 45	< 1,1
Gesso grosso para revestimento	> 10	> 45	> 1,1
Gesso fino para fundição	4 -10	20 - 45	< 1,1
Gesso grosso para fundição	4 -10	20 - 45	>1,1

FONTE: ABNT (1994)

Tabela 4.4 - Exigências químicas do gesso para construção civil.

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	Máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	Min. 38,0
Anidrito sulfúrico (SO ₃)	Min. 53,0

FONTE: ABNT (1994)

Tabela 4.5 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil.

Determinações físicas e mecânicas	Unidade	Limite
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	> 8,4
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	> 30,0
Massa unitária (NBR 12127)	kg/m ³	> 700,0

FONTE: ABNT (1994)

A partir desta resenha foi possível observar a escassez de parâmetros e informações contidas nas normas brasileiras relativas ao gesso, fato que reforça a necessidade da realização de mais estudos focados no uso do gesso para a indústria da construção civil, a partir da reformulação e revisão das normas vigentes no Brasil.

4.1.9.2 Prescrições Normativas Americanas

O exame detalhado das normas Americanas, e em especial a ASTM (American Society for Testing and Materials) relativas as prescrições e exigências físico-mecânicas aplicáveis ao gesso utilizado na construção, permite concluir que são em maior quantidade e contém exigências muito mais detalhadas do que as em vigor no Brasil. Dentre as normas, destacam-se:

- ASTM C 28 - *Standard specification for gypsum plasters* (ASTM, 2005b) que define a existência de quatro diferentes tipos de gesso para se utilizar no revestimento de tetos e paredes, a saber: gesso moído; gesso com fibras de madeira; gesso fino e gesso especial. A norma referencia as principais propriedades que o gesso a ser utilizado em revestimentos deve possuir:

- a) pelo menos 66% de $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ (bassanita),
- b) passar totalmente na peneira ASTM nº 14 (abertura da malha de 1,41mm) e pelo menos 60% na peneira ASTM nº 100 (abertura da malha de 0,149 mm),
- c) resistência à compressão igual ou superior a 84 kgf/cm² (8,4 MPa),
- d) início de pega entre 20 a 40 minutos, quando não adicionado o retardador;

- ASTM C 471M - *Test methods for chemical analysis of gypsum and gypsum products* (ASTM, 2001), especifica como deve ser realizada a análise química do gesso;

- ASTM C 1396 - *Specification for gypsum board* (ASTM, 2004a) que contempla exigências para o uso do gesso em placas de vedação.

A seguir, são apresentadas outras prescrições normativas propostas pela ASTM e que fazem referência a outras importantes propriedades do gesso a ser utilizado como material de construção, e que curiosamente são pouco utilizadas e consultadas no Brasil, a saber:

- ASTM C 35 - *Specification for inorganic aggregates for use in gypsum plaster* (ASTM, 2005c);
- ASTM C 11 - *Terminology relating to gypsum and related building materials and systems* (ASTM, 2005a);
- ASTM C 842 - *Specification for application of interior gypsum plaster* (ASTM, 2005d);
- ASTM E11 - *Specification for wire cloth and sieves for testing purposes* (ASTM, 2004c);
- ASTM C 472 - *Test methods for physical testing of gypsum, gypsum plasters, and gypsum concrete* (ASTM, 2004b).

Pela revisão bibliográfica realizada pode-se observar que a normalização e os requisitos de qualidade impostos ao gesso pelas normas em uso no Estados Unidos é mais completo, abrangente e zeloso, do que as contidas nas normas brasileiras, e em especial àquelas propostas pela ABNT.

4.1.10 Variedades de Gesso Químico

O gesso pode ser obtido de várias maneiras: na forma natural ou sintética, via processo químico, como subproduto ou resíduo. Esses podem ser denominados de gesso químico e são descritos a seguir:

- Borogesso

A hidratação de minerais a base de boro, o qual tem um enorme potencial nas indústrias químicas para fabricação do ácido bórico (H_3BO_3), gera o resíduo borogesso. Este é constituído basicamente de gesso, anidrido bórico (B_2O_3) e algumas impurezas. Aproximadamente 62% do boro mundial está localizado na parte oeste da Turquia, sendo que a geração do resíduo borogesso vem

causando vários problemas ambientais e de estocagem nesta região (ELBEYLI e PISKIN, 2004).

- Dessulfogesso

Gesso produzido como subproduto de dessulfurização de gás de combustão. Este sistema é utilizado nas indústrias de queima de carvão para redução de emissão de dióxido sulfúrico. O dióxido sulfúrico e trióxido sulfúrico são os maiores poluentes do ar e são obtidos durante a combustão do carvão (TAYLOR, 2004).

- Fluorgesso

É um subproduto da produção de ácido hidrofúrico através do ataque de ácido sulfúrico no mineral composto por cálcio e flúor, também conhecido como fluorspar. Aproximadamente 100.000 toneladas de fluorgesso são geradas anualmente nos Estados Unidos (TURNER FAIRBANK, 2004).

- Fosfogesso

Gesso gerado durante a fabricação de ácido fosfórico nas indústrias de fertilizantes. Este é o mais importante dos resíduos de gesso devido a grande quantidade gerada mundialmente.

- Titanogesso

Também conhecido como gesso vermelho devido à presença de ilemita (FeTiO_3) em sua composição. Este resíduo provém do processo industrial na produção de dióxido de titânio (TiO_2), onde o titânio é extraído da ilemita pela digestão do ácido sulfúrico e a neutralização ocorre com a adição de carbonato de cálcio que produz o resíduo de gesso (FAUZIAH *et al*, 1996). Na Malásia é estimada a geração anual de 400.000 toneladas desse resíduo (FAUZIAH *et al*, 1996).

4.2 O Fosfogesso

O termo fosfogesso é freqüentemente referenciado na literatura técnica como subproduto de gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético. Por conter resíduos de fósforo na sua composição (0,7% a 0,9%) este é chamado de fosfogesso (NUERNBERG, 2005). Todos estes termos se referem a um mesmo produto, diferente do gesso no seu estado natural.

O composto químico fosfogesso é um resíduo da obtenção de ácido fosfórico (P_2O_5), matéria prima para a produção de fertilizantes fosfatados²⁵. Sua geração é em proporções de 4 a 6 vezes maior que a do próprio ácido fosfórico, sendo assim considerado um grande passivo ambiental para as empresas produtoras de fertilizantes.

Em alguns países onde não são encontradas jazidas de gesso, o fosfogesso tem competido economicamente com esse mineral, como por exemplo no Japão (BARTL e ALBUQUERQUE, 1992), onde o material já é utilizado como gesso inclusive na produção de artefatos para a construção civil.

Uma alternativa para a preservação das jazidas naturais de gesso e obtenção de um produto mais acessível é o uso do resíduo fosfogesso em substituição ao gesso natural, pois apresenta propriedades físico-químicas similares às do gesso.

²⁵ Trata-se do produto resultante do tratamento químico do concentrado fosfático, que apresenta parte do P_2O_5 solúvel disponível para as plantas e que pode ter ainda outros constituintes nutrientes ou micronutrientes agregados (CONAMA,2002).

4.2.1 Resíduos

Na literatura atual a adoção dos termos: resíduo, rejeito ou subproduto é usualmente empregue para referenciar o material fosfogesso. Neste trabalho, adotou-se o termo “resíduo”, pois trata-se de um material que ainda não possui um uso técnico e ecologicamente correto e consolidado, nem devidamente aprovado por órgãos de fiscalização e controle ambiental.

A norma brasileira NBR 10004 - *Resíduos Sólidos: classificação* (ABNT, 2004a) define o que é resíduo sólido:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água”.

O reaproveitamento de um resíduo e o melhor aproveitamento das matérias-primas são vistos por especialistas como a única saída para a continuidade do processo tecnológico já implementado, pois atuam em perfeita sintonia com as necessidades do mundo atual (MINAS AMBIENTE, 1999).

Segundo o CONAMA (2002), a abordagem do reaproveitamento pode ter três enfoques distintos que são:

- reciclagem: o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;
- recuperação: extração de algumas substâncias dos resíduos como óxidos metálicos e etc;
- reutilização: o processo de reaplicação de um resíduo, sem envolver a transformação do mesmo.

A pesquisa visando o desenvolvimento de possíveis tecnologias e processos que viabilize o uso de um determinado resíduo é importante tal sob o ponto de vista econômico quanto social, na medida que o resíduo comumente é:

- abundante;
- de baixo custo de aquisição e por conseqüência induz a um baixo valor agregado;
- possui propriedades que atestem bom desempenho para uma determinada aplicação;
- solução contra a deterioração ambiental gerada pela estocagem realizada em grandes áreas.

Pode-se ressaltar que as indústrias da construção civil e da siderurgia ocupam um papel de destaque neste cenário. A reciclagem e reuso de materiais e a substituição dos produtos de alto impacto ambiental racionalmente utilizados podem aliviar a pesada contribuição do setor e contribuir para a não degradação ambiental. Pesquisas realizadas comprovam que é possível utilizar produtos econômicos e ecologicamente viáveis em substituição a matérias-primas.

Alguns comitês visando o uso de resíduos na construção civil foram criados a partir de 1970, como por exemplo, Comitê E-38, criado pela ASTM em 1974, que tem como principal objetivo desenvolver métodos e pesquisas relacionadas com aplicações de resíduos como fonte de energia e materiais. Destaca-se também o Comitê 37-DRC, criado em 1978 pela RILEM (Reunion International d'Essais et Matériaux) voltado para resíduos de demolição (CINCOTTO, 1988).

É importante a avaliação de algumas condições de ordem técnica, como fatores econômicos e fatores legais e normativos.

O custo da tecnologia e dos investimentos necessários, valor dos materiais recuperados, comparação entre os custos de tratamento de disposição final²⁶ são fatores importantes na decisão sobre o reaproveitamento ou não dos resíduos (CINCOTTO, 1988). Além disso, o cumprimento de exigências para certificação e licenciamento, como por exemplo, a obtenção de Licença para Transporte e Destinação do Resíduo Industrial, o qual é exigido pelo órgão de controle ambiental que aprova e autoriza a destinação do resíduo, é essencial para o uso legal do resíduo.

4.2.2 Classificação

A classificação de um resíduo é de fundamental importância para seu possível aproveitamento, pois as decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as etapas do tratamento deste tipo de material (manipulação, armazenagem, coleta, transporte e disposição final) deverão estar de acordo com a classificação dos mesmos. Através das prescrições normativas da ABNT é possível padronizar a classificação dos resíduos, tal como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Normas para classificação de resíduos segundo a ABNT.

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

A Norma Brasileira NBR 10004 - *Resíduos Sólidos: classificação* (ABNT, 2004a), classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais resíduos devem ter manuseio e destinação mais rigidamente controlados. Estes podem ser classificados como:

²⁶ Atividade intermediária ou final, com manejo e arranjo corretos dos resíduos

- classe I - perigosos;
- classe II - resíduos não perigosos, que pode ser dividida em:
 - a) classe II A - resíduos não inertes;
 - b) classe II B - resíduos inertes.

A partir desta norma, o resíduo fosfogesso é classificado como classe II B, considerado como um resíduo inerte. Observa-se que, a classificação de resíduos não pode ser baseada apenas no critério da disposição final, mas deve também considerar a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

As normas NBR 10005 e NBR 10006 mencionam sobre os ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos. O primeiro consiste na separação de certas substâncias contidas nos resíduos industriais, por meio de lavagem ou percolação. Já o ensaio de solubilização de resíduos é a identificação dos constituintes solubilizados em concentrações superiores ao padrão da água. Os resultados de ambos devem ser comparados aos limites máximos obtidos nos anexos da NBR 10004 .

Os resíduos considerados radioativos também podem ser classificados segundo os termos “NORM” (Naturally Occurring Radioactive Materials) e “TENORM” (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials). O “NORM” trata-se de minérios que contêm material radioativo de ocorrência natural. Já “TENORM” são os rejeitos e subprodutos contendo material radioativo de ocorrência natural concentrado tecnologicamente. O resíduo fosfogesso se enquadra no termo “TENORM”, pois ocorre uma quebra do equilíbrio radioativo da rocha fosfática no processo de produção de fertilizantes e geração do fosfogesso.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do governo de São Paulo, a preocupação com o uso indiscriminado do resíduo fosfogesso existe e deve ser avaliada através de projetos de pesquisas e trabalhos específicos a serem realizados envolvendo sempre o órgão responsável pelas ações de radioproteção no país (CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear), instituições acadêmicas e empresas responsáveis pela geração do resíduo.

4.2.3 Rocha Fosfatada

A indústria de fertilizantes fosfatados é baseada na exploração comercial de alguns depósitos de rochas fosfatadas. Essas rochas podem receber a denominação de rocha fosfática, fosfato natural, bem como concentrado fosfático. Os concentrados fosfáticos são comercialmente expressos sob a forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5) ou fosfato tricálcio ($Ca_3.(PO_4)_2$). A maioria dos minérios de fósforo dessas rochas pertence ao grupo da apatita²⁷, representado pela fórmula $Ca_5 (F, Cl, OH) (PO_4)_3$. Os depósitos de apatita têm uma mineralogia extremamente complexa, com impurezas de influência marcante no rendimento (recuperação) de fósforo nas plantas de beneficiamento desses minérios, resultando em altos custos de produção (SOUZA, 2004).

Em termos mundiais, o fósforo está contido nas rochas fosfatadas de depósitos de origens sedimentares, ígneos e biogênicos. Os depósitos sedimentares e os depósitos de origem ígnea, são os mais importantes do ponto de vista econômico. Os minérios de fosfatos originados de sedimentos marinhos estão localizados nos Estados Unidos, sudeste do México, Marrocos, noroeste do Saara e Oriente Médio. Já os minérios de fosfatos originários de depósitos ígneos estão presentes na África do Sul, Rússia, Finlândia e Brasil, entre outras áreas, como pode se observar na Figura 4.5.

²⁷ Mineral do grupo dos fosfatos, de cor variável, brilho vítreo, dureza cinco, densidade entre 3,1 a 3,2 g/cm³, com teor de P_2O_5 oscilando de 4 a 15% (ZAPATA e ROY,2004).

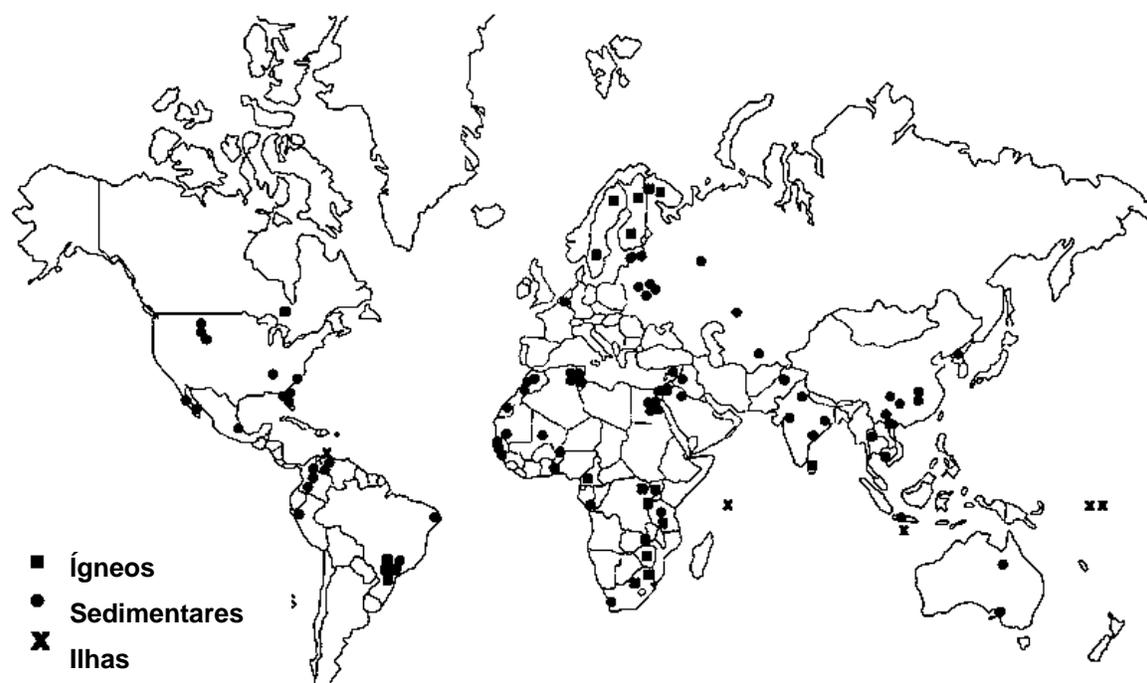


Figura 4.5 - Exploração mundial de rocha fosfatada

FONTE: ZAPATA e ROY (2004).

O potencial econômico da exploração da rocha fosfática no Brasil ainda é pequeno, aproximadamente 3% da exploração mundial, que é liderada pelos Estados Unidos, China, Marrocos e Rússia, que detêm aproximadamente 72% da produção mundial (ZAPATA e ROY, 2004).

As reservas fosfáticas brasileiras estão distribuídas nos estados produtores de Minas Gerais com 73,8%, Goiás com 8,3% e São Paulo com 7,3%, que juntos participam com 89,4% das reservas totais do país, seguido dos estados de Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba, com os 10,6% restantes (SOUZA, 2004). Os depósitos carbonatitos²⁸ brasileiros, mais importantes atualmente, estão nos Complexos de Tapira (MG), Ouvidor (GO), Cajati (SP) e o complexo alcalino carbonatito de Mairicuru (MA), sendo que cerca de 80% das jazidas fosfatadas naturais brasileiras são de origem de depósitos ígneos.

²⁸ Rocha ígnea rica em carbonato de cálcio (Ca), manganês (Mg) e/ou ferro (Fe) (UNB, 2005).

4.2.4 Radiotividade

Os minérios apáticos provenientes das rochas fosfatadas, freqüentemente contêm quantidades significativas de urânio, tório e demais elementos radioativos de suas principais cadeias de decaimento²⁹.

Nas rochas fosfatadas, os vários membros da série natural do Urânio (^{238}U), Tório (^{232}Th) e seus produtos de decaimento encontram-se em equilíbrio radioativo. Após a digestão da rocha, em plantas que utilizam o processo por via úmida para a produção de fertilizantes, o equilíbrio é quebrado, havendo redistribuição dos radionuclídeos³⁰. Aproximadamente 86% do ^{238}U e 70% do ^{232}Th vão para o fertilizante, enquanto 80% do ^{226}Ra vai para o fosfogesso (JACOMINO, 2003). Os radionuclídeos passam então a se comportar de acordo com suas propriedades químicas.

Com o processo, os elementos que se encontram na rocha matriz são redistribuídos nos produtos intermediários, finais e subprodutos. A série de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th , pode ser observada nas figuras a seguir (Figura 4.6 e Figura 4.7).

O gás radônio ^{222}Rn é resultado do decaimento do ^{226}Ra , uma impureza comumente encontrada no fosfogesso (RABI e SILVA, 2005). O uso do fosfogesso como material de construção, principalmente em ambientes onde a taxa de ventilação é baixa, pode provocar impactos radiológicos devido à exalação do gás ^{222}Rn ser um risco de se obter doenças cancerígenas (RABI e SILVA, 2005).

²⁹ Desintegração de um núcleo através da emissão de energia em forma de partículas ou radiação.

³⁰ Denominação que se dá normalmente aos átomos instáveis.

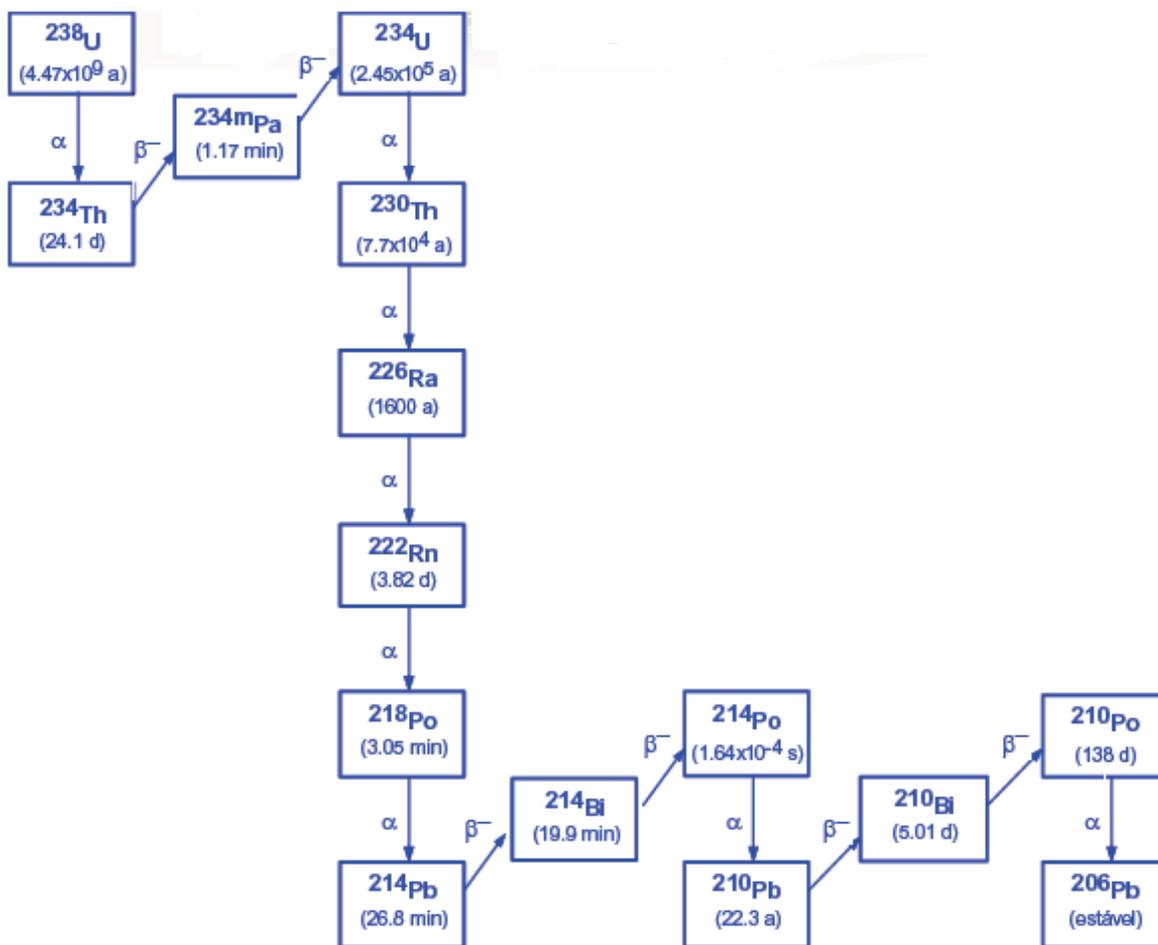


Figura 4.6 – Série de decaimento do ^{238}U

FONTE: MAZZILI, 2005

As normas brasileiras não estabelecem um limite máximo de exalação de ^{222}Rn , porém a USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) estabeleceu a média de $0,74 \text{ Bq} / \text{m}^2\text{s}$ ($20 \text{ pCi} / \text{m}^2\text{s}$) nas pilhas de fosfógeno em território americano (USEPA, 1998). Pelo fato de o Brasil não estabelecer faixas limites de emissão de radônio, a faixa aplicada é a mesma proposta pela USEPA.

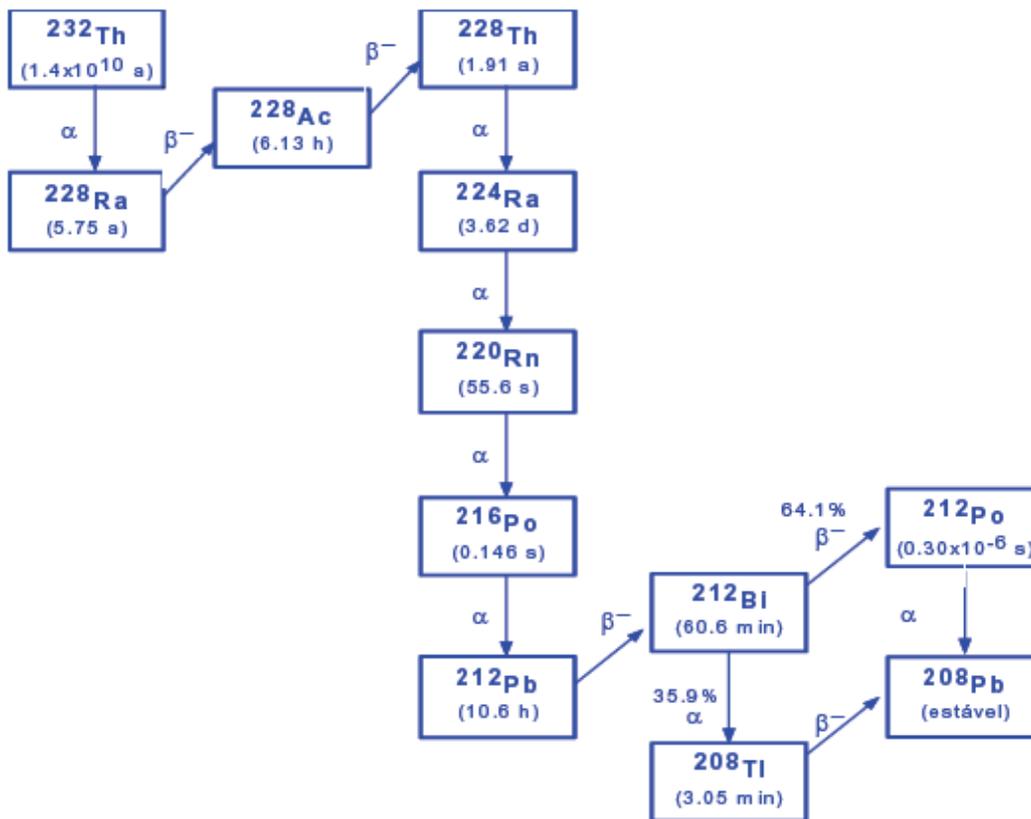


Figura 4.7– Série de decaimento do ^{232}Th

FONTE: MAZZILI, 2005

É importante ter em mente que esses dados são valores típicos de outros países, e que no caso do fosfogesso gerado em território brasileiro, a situação pode ser substancialmente diferente, motivado sobretudo, pelas condições de ventilação do ambiente. Assim sendo, as agências ambientais nacionais, devem estabelecer critérios bem específicos para a avaliação da periculosidade de resíduos, a partir de estudos prévios bem estruturados e confiáveis.

SINGHT (2002) obteve êxito com pesquisas e estudos que avaliaram a extração de impurezas contidas no fosfogesso através de soluções ácidas e lavagem do material para a aplicação deste na fabricação de cimento e gesso.

Segundo JACOMINO (2003), embora alguns autores (SINGHT, 2002; CEKINSKI, 2005) tenham publicado diferentes métodos para a remoção de fluoretos, metais pesados do fosfogesso, os mesmos se mostraram inviáveis sob o ponto de vista econômico.

O fosfogesso gerado no Brasil bem como a rocha mãe que dá origem ao resíduo, apresenta baixos níveis de radioatividade natural, abaixo do limite máximo fixado pela USEPA, segundo medições realizadas e objeto de citações em diversos trabalhos publicados (JACOMINO, 2003; SILVA, 2001; FREITAS, 1992; MAZZILI *et al*, 2000). O fato de a rocha fosfática brasileira ter alto teor do elemento tório pode explicar os baixos níveis de exalação de ^{222}Rn , ressaltando-se que o teor de radionuclídeos existentes na rocha é bastante influenciado pela característica geológica da mesma no local de sua extração.

Segundo MAZZILI (2005), a radioatividade medida no fosfogesso é da mesma magnitude das observadas nos fertilizantes, fato este que torna, viável o reaproveitamento do fosfogesso como insumo aplicável à construção civil.

4.2.5 Geração

Os fertilizantes, com formulações comerciais, denominados de NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) são obtidos de minerais fosfóricos provenientes de rochas fosfáticas (SILVA, 2001). Os fertilizantes são muito importantes para agricultura pois são fontes de nutrientes necessários ao crescimento e formação da planta.

A tecnologia para obtenção do ácido fosfórico consiste em desenvolver um meio reativo ideal, de forma a converter ao máximo o fósforo da rocha fosfática em ácido fosfórico. Além disso, as reações envolvidas permitem que os cristais de gesso desenvolvam condições necessárias de tipo e tamanho para minimizar as perdas na filtração (AQUINO, 2005).

O processo de produção do ácido fosfórico é via úmida através do ataque da rocha fosfática com ácido sulfúrico concentrado em uma temperatura de aproximadamente 70°C (SILVA, 2001), conforme o diagrama abaixo (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Processo de produção de P_2O_5 e geração do resíduo fosfogesso

O processo pode ser definido através da Equação (4.9) (MALAVOLTA, 1992):



(Apatita + Ácido sulfúrico + Água \rightarrow Fosfogesso + Ácido fosfórico + Ácido fluorídrico)

A reação entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico pode ser obtida através de três diferentes processos:

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

O processo di-hidratado é largamente utilizado em todo o mundo e atualmente o processo mais empregado no Brasil e requer um custo de capital relativamente baixo mas, ao mesmo tempo, é o processo onde produz o fosfogesso com maior teor de impurezas (CHANG e MANTELL, 1990).

O processo hemidratado produz 40 a 52% de P_2O_5 comparado a 28 a 30% daquele produzido pelo processo di-hidratado (CHANG e MANTELL, 1990). No entanto os custos do processo hemidratado são mais elevados, pois o produto final é mais puro e o gasto de energia é maior.

Já o processo hemi di-hidratado combina as vantagens do processo di-hidrato (geração de um resíduo isento de impurezas) e a produção do processo hemidratado, ou seja, requer menos energia. Na Tabela (4.7), pode se observar um comparativo das análises químicas comparativas do fosfogesso gerado a partir dos processos referenciados.

Tabela 4.7 – Análises química de fosfogesso (CHANG e MANTELL, 1990).

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

A cada tonelada de P_2O_5 na forma de ácido fosfórico produzido, obtém-se de 4 a 6 toneladas de fosfogesso, dependendo da composição da rocha fosfática (BARTL e ALBUQUERQUE, 1992). Atualmente, no estado americano da Flórida localiza-se o maior depósito de fosfogesso do mundo, que já atinge cerca de 1 bilhão de toneladas (SILVA, 2001). No Brasil, a geração oriunda dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Goiás, atualmente, é da ordem de 6.500.000 toneladas por ano.

O perfil esquemático de uma mina padrão pode ser visualizado na Figura 4.9.

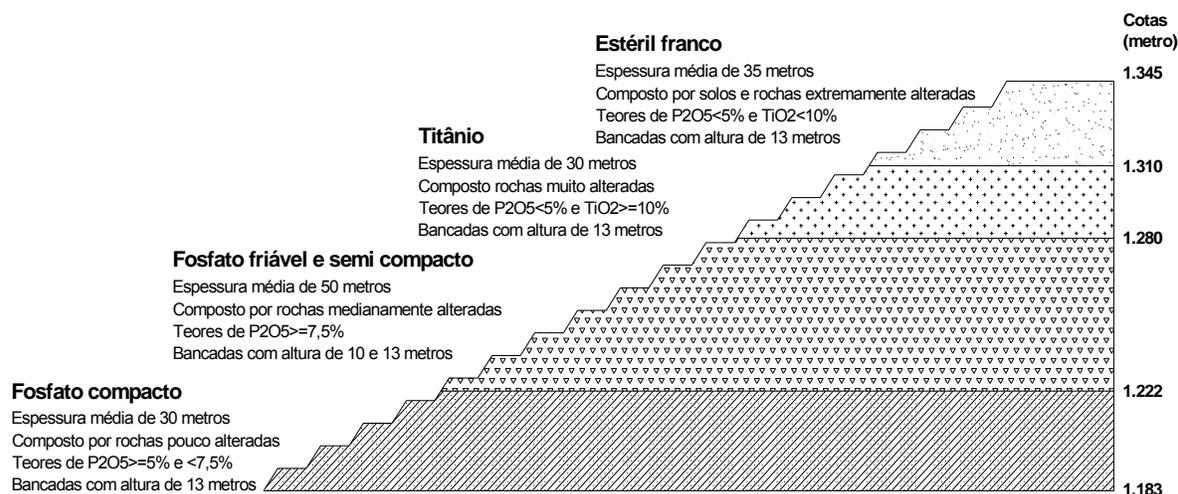


Figura 4.9 – Exemplo de um perfil esquemático de rocha fosfática
FONTE: FOSFÉRTIL, 2005

A exploração é feita na camada de fosfato friável e semi-compactado, a aproximadamente 100 metros da superfície, onde o teor médio de corte é de 8,2% P₂O₅ concentrado. Um exemplo de composição média de uma rocha fosfática (FOSFÉRTIL,2005) pode ser observado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Composição típica da rocha fosfática de Itapira – MG

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

FONTE: FOSFÉRTIL, 2005

4.2.6 Disposição

O descarte final do fosfogesso pode ser feito de duas maneiras: disposição em pilhas em áreas próximas às fábricas ou através de bombeamento para lagos, rios e oceanos (FREITAS,1992).

A maneira de descarte mais adequada depende da disponibilidade e do custo de áreas apropriadas, bem como da localização das fábricas de ácido fosfórico e, finalmente, da legislação ambiental vigente.

A disposição em áreas próximas às fábricas é a forma mais comum de descarte do fosfogesso, e é freqüentemente adotado em quase todo mundo. Nesta situação existem duas alternativas: “a úmido” ou “a seco”.

A disposição final realizada “a úmido” 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 (FREITAS,1992) (vide Figura 4.10).



Figura 4.10 - Armazenamento do fosfogesso.

As lagoas de sedimentação são limitadas por diques construídos com o próprio fosfogesso. A água ácida é separada e drenada para lagoas chamadas de “lagoas pulmões”. Estas lagoas funcionam para coletar a água da chuva e também a água escoada da polpa de fosfogesso para a recirculação na planta da fábrica de ácido fosfórico.

O excesso de água das “lagoas pulmões” é geralmente enviado para estações de tratamento. O tratamento da água contaminada, para ser reutilizada para consumo, é muito dispendioso e por isso evitado pelas empresas fabricantes de ácido fosfórico.

A estocagem final do resíduo fosfogesso é sempre acompanhada de elevados gastos às empresas. A disposição em pilhas, exige quase sempre, a disponibilidade de grandes áreas, que, dependendo do preço das terras, pode elevar muito o custo da disposição (FREITAS,1992). Por exigência dos órgãos ambientais, deve ser realizado um projeto de impermeabilização bem como estrutural das pilhas, como forma de evitar possíveis acidentes no local. O monitoramento das pilhas através de profissionais especializados também se faz necessário. As áreas de estocagem, preferencialmente, devem estar localizadas próximas às fábricas, caso o contrário o gasto operacional pode ser até cinco vezes maior (FREITAS,1992).

Segundo a Resolução 307/02 do CONAMA (2002), o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando em todos os casos em que seja possível, as condições de reutilização e de reciclagem.

Constatada a abundância e a falha no aproveitamento e armazenamento do material em pauta, priorizou-se, neste trabalho, a busca por uma alternativa economicamente viável para o reaproveitamento do fosfogesso depositado no Brasil.

4.2.7 Possíveis Aplicações

4.2.7.1 Material de Construção Civil

O fosfogesso, devido à semelhança de suas propriedades física e química com o gesso, pode vir a ser substituto deste na fabricação de placas para forro, painéis, divisórias, blocos pré-moldados, pisos e revestimentos. Em diversos países como o Japão, devido à escassez de matéria-prima gipsita, o fosfogesso é naturalmente utilizado como gesso em materiais de construção.

Na Pontifícia Universidade Católica de Poços de Caldas no Estado de Minas Gerais, a construção de uma casa modelo com estrutura metálica e vedação com uso de divisórias de fosfogesso já é uma realidade. Neste trabalho estão sendo avaliados todos os parâmetros relativos às divisórias fabricadas com o fosfogesso, envolvendo estudos relativos à exalação de radônio até as propriedades físicas e mecânicas do novo material.

Na cidade de São Carlos, uma empresa concebeu um novo método de fabricação de pré-moldados à base de gesso e fosfogesso denominado de "UCOS". O novo método desenvolvido consiste na hidratação do hemidrato com somente 20% da massa de água em relação a sua massa. Em seguida, o gesso hidratado é compactado e finalmente seco a 50°C (ROSSETO, 2005). Esse processo é capaz de produzir pré-fabricados à base de fosfogesso com resistência à compressão de até 100 MPa e resistência à tração de até 35 MPa (ROSSETO, 2005).

O uso de fosfogesso em base e sub-base de pavimentos urbanos e rodoviários já é realidade em alguns países. Nos Estados Unidos, trechos de rodovias foram construídos utilizando o resíduo fosfogesso. Um exemplo do sucesso alcançado pelo uso do fosfogesso está localizado na cidade de La Porte no estado do Texas. Testes e monitoramentos realizados ao longo de 5 anos, após a construção de um trecho da malha viária, sinalizaram e indicaram que o pavimento sob tráfego

intenso ainda apresenta boa capacidade de suporte ocasião em que utilizou-se na base misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10%, respectivamente (CHANG, 1990).

4.2.7.2 Agricultura

Atualmente o maior consumidor nacional do fosfogesso é a agricultura, dados do ano de 2004 (AQUINO, 2005) mostram um consumo de 4,5 milhões de toneladas por ano de fosfogesso aplicados diversas regiões do país.

Na agricultura o fosfogesso é chamado de gesso agrícola. Este é largamente utilizado como fonte de nutrientes para plantas e em vários processos físico-químicos no perfil do solo como condicionador e melhorador de solos sódicos e solos argilosos (NUERNBERG *et al*, 2005).

O fosfogesso é também uma grande fonte de nutrientes, tais como Ca (cálcio) e S (enxofre). O cálcio desempenha papel fundamental como acondicionador do ambiente radicular, cujos efeitos são observados no crescimento das raízes quanto na resistência de frutos em pós-colheita durante a armazenagem (NUEMBERG *et al*, 2005). Já o enxofre é responsável por funções vitais nas plantas, pois é componente dos aminoácidos, participando do metabolismo e está ligado às vitaminas presentes nas plantas (NUEMBERG *et al*, 2005). Também deve se salientar as quantidades substanciais de fósforo (P) presentes no fosfogesso, resquício do processo de fabricação de fertilizantes fosfatados, que podem ser benéficas às plantas quando aplicadas em ideais proporções (SUMNER, 1992).

O fosfogesso também é utilizado como condicionador de solos agrícolas, promovendo reduções significativas na resistência da camada compactada de solos altamente intemperizados. Além disso, quando aplicado na superfície do solo é dissolvido pela chuva e ajuda da infiltração da água infiltrada evitando o

encrostamento superficial e favorecendo a germinação das sementes (NUEMBERG *et al*, 2005). O fosfogesso pode, também, ser usado para reduzir a saturação do alumínio tóxico e como fonte de cálcio para alguns sub solos (SUMNER, 1992), desta forma permite um maior aprofundamento das raízes das plantas, resultando num melhor aproveitamento da água e dos nutrientes.

4.2.7.3 Cimento

Uma grande fonte de aplicação do resíduo fosfogesso é a indústria cimenteira. O consumo de fosfogesso por parte das indústrias cimenteiras nacionais chega a 1,7 milhões de toneladas por ano (AQUINO, 2005).

Para ser aplicado na indústria cimenteira o fosfogesso necessita de um índice de acidez superior a 4 e um teor de ácido fosfórico (P_2O_5) menor que 0,8%. Um alto pH pode contribuir para despassivação de armaduras em estruturas de concreto armado e redução da resistência inicial dos concretos. Já o alto teor de P_2O_5 contribui para o aumento do tempo de pega dos cimentos produzidos.

Segundo SMADI *et al* (1999) algumas impurezas encontradas no fosfogesso podem também alterar as propriedades dos concretos e argamassas produzidos pelo cimento ativado com fosfogesso, sobretudo na redução na resistência inicial e no retardo do tempo de pega.

Trabalhos realizados por uma empresa brasileira de fertilizantes mostram uma heterogeneidade do fosfogesso em relação aos quesitos índice de acidez e teor de P_2O_5 . A média do índice de pH é de 7,11 e do teor de ácido fosfórico 1,2% (FOSFÉRTIL, 2005). Esta situação pode ser melhorada a partir da lavagem e do beneficiamento do fosfogesso.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho, apresentada a seguir, foi elaborada a partir da necessidade de caracterização do resíduo fosfogesso, visando a realização de uma análise comparativa com o tradicional gesso empregado na construção civil.

5.1 Seleção de Materiais

5.1.1 Gesso

O gesso utilizado no presente trabalho foi o *Qualigesso 30*, que se encontra disponível no mercado em embalagem de 40 kg e que se caracteriza por ser de pega rápida, recomendado principalmente, para a fabricação de artefatos e pré-moldados, tais como: placas, blocos e pisos.

5.1.2 Fosfogesso

Para a realização do presente trabalho foi utilizado o fosfogesso originário de uma grande empresa brasileira situada no município mineiro de Uberaba, que se destaca por ser a maior produtora de fertilizantes do Brasil e por estar localizada próxima a grandes centros urbanos³¹.

Para a realização do trabalho proposto, foram também levantados dados acerca da disposição e geração do fosfogesso. Verificou-se que o material coletado estava disposto em pilhas de até 30 metros e sua estocagem, até o início do ano de 2006, correspondia a aproximadamente 40 milhões de toneladas.

A coleta e amostragem do fosfogesso foram realizadas pela própria empresa geradora do resíduo, sendo o material coletado, adequadamente ensacado e transportado em sacos de 40 kg.

³¹ São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

5.2 Métodos

No presente trabalho foram estudados 3 tipos de materiais : fosfogesso “in natura”, fosfogesso beneficiado e gesso, assim identificados:

- fosfogesso “in natura” tal como foi gerado e não contemplando “à posteriori” nenhum tipo de beneficiamento;

- fosfogesso beneficiado (desidratação e peneiramento) a partir das seguintes etapas:

- a) aquecimento até a temperatura de 60°C durante 24 horas, objetivando retirar o excesso de água livre,
- b) após resfriamento efetuou-se uma separação granulométrica mediante a utilização de peneira com abertura de malha de 0,71 mm (Tyler 24), com intuito de separar apenas os grumos formados,
- c) material passante na peneira Tyler 24, submetido a 180°C por 1 hora;

- gesso, comercializado como *Qualigesso 30*, gesso de pega rápida.

Os ensaios de análise térmica e difratometria de raios X para as amostras de fosfogesso “in natura”, submetidas a diferentes temperaturas de calcinação, foram fundamentais para se estabelecer a temperatura de beneficiamento de 180°C durante 1 hora.

A partir do fosfogesso beneficiado e do gesso coletado no mercado mineiro, foram confeccionadas pastas com a substituição parcial e total do gesso pelo resíduo fosfogesso, nas seguintes proporções:

- composição “A”: traço em massa representando a mistura de 1 (uma) parte de H₂O para 1 parte de fosfogesso beneficiado (1:1);

- composição “B”: traço em massa representando a mistura de 1 (uma) parte de H₂O para 1,80 partes de gesso (1:1,8);
- composição “C”: traço em massa representando a mistura de 1 (uma) parte de H₂O para 1 parte de gesso (1:1);
- composição “D”: traço em massa, representando a mistura de 1 (uma) parte de H₂O para 0,3 partes de gesso e 0,9 partes de fosfogesso beneficiado (1:0,3:0,9), o que corresponde ao uso combinado do aglomerante na proporção de 75% de fosfogesso beneficiado e 25% de gesso;
- composição “E”: traço em massa, representando a mistura de 1 (uma) parte de H₂O para 0,65 partes de fosfogesso beneficiado e 0,65 partes de gesso (1:0,65:0,65), o que corresponde ao uso combinado do aglomerante na proporção de 50% de fosfogesso beneficiado e 50% de gesso.

Os traços referenciados nas composições “A”, “B”, “D” e “E” foram obtidos a partir do ensaio da pasta de consistência normal, ocasião em que se define a quantidade de água necessária para que uma determinada sonda (no caso a agulha de Vicat) alcance uma penetração, no interior do molde, de 30 ± 2 mm. É importante salientar, que os traços encontrados para cada composição, de acordo com o ensaio mencionado, são de diferentes proporções. Cada material e mistura requer uma determinada quantidade de água, para que a pasta confeccionada alcance uma boa consistência e trabalhabilidade, viabilizando desta forma a moldagem. No caso da composição “C”, esta foi definida a partir de valores referenciados em outros trabalhos de pesquisa, de forma a possibilitar uma análise comparativa de tendências e comportamentos dos resultados expressos.

As composições propostas foram confeccionadas, com o objetivo de avaliar as propriedades físicas e mecânicas das pastas a partir da substituição parcial e total do gesso pelo resíduo fosfogesso.

As pastas foram preparadas conforme os procedimentos propostos pela NBR 12129 - *Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas* (ABNT, 1991c). A primeira etapa consiste no polvilhamento durante 1 minuto da amostra sobre a água destilada a ser utilizada no traço. Após essa etapa deixar a mistura em repouso durante 2 minutos e depois misturar a pasta durante 1 minuto. Para essa etapa foi utilizada uma argamassadeira com movimentos circulares e contínuos.

A última etapa foi a moldagem dos corpos de prova cúbicos com 50 mm de lado, utilizando óleo desmoldante de base vegetal, referenciado como Rheofinich FR 300, nos moldes.

Os moldes foram preenchidos em 2 camadas de modo a evitar o aprisionamento de ar na pasta, e depois rasados, nivelados e identificados. Antes dos ensaios de resistência e dureza, os corpos de prova foram colocados em um dessecador contendo sílica gel por 24 horas.

Os ensaios físico-químicos bem como os ensaios mecânicos foram realizados nos Departamentos de Química, Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais e Construção da Universidade Federal de Minas Gerais.

Na Tabela 5.1 são especificados os ensaios que foram realizados nas amostras estudadas.

Tabela 5. 1 -Especificações de ensaios realizados em função do material

Ensaio	Fosfogesso “in natura”, fosfogesso beneficiado e gesso (pós)	Composições (pastas)
Análises térmicas	X	
Granulometria a laser	X	
Adsorção física (Método BET)	X	X
Porosimetria de mercúrio		X
Espectroscopia de infravermelho	X	
Análise química	X	
Fluorescência de raios X	X	
Difratometria de raios X	X	
Picnometria à hélio	X	X
Picnometria de mercúrio		X
MEV e EDS	X	X
Consistência normal		X
Tempo de pega		X
Resistência à compressão		X
Ensaio de dureza		X

5.2.1 Caracterização das Amostras

As amostras foram objeto de uma detalhada caracterização, que contemplou:

5.2.1.1 Análises Térmicas

As análises térmicas são representadas por duas técnicas: a análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTA).

A TG baseia-se no estudo da variação da massa da amostra em função do tempo ou da temperatura. A perda de massa da amostra pode-se dar devido à remoção de misturas adsorvidas, grupos hidroxilas ou substâncias voláteis. O ganho de

massa é atribuído ao processo de oxidação (PADILHA e AMBROZIO, 1985). Já na DTA, comumente são efetuadas medições das diferenças de temperatura entre a amostra e uma substância inerte, tomada como referência, quando ambas são submetidas a um mesmo aquecimento. As mudanças de temperatura da amostra são geradas pelas reações entálpicas, endotérmicas ou exotérmicas, em função da mudança de fase; de reações de desidratação; da decomposição; da oxidação e de outras reações químicas (BRANDÃO, 2004).

As análises demandam amostras de massa em torno de 10 mg investidas em atmosfera dinâmica de N_2 ($25\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$) e taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura de 950°C , sendo utilizado cadinho de platina, pois esse material é inerte até altas temperaturas. As análises foram realizadas a partir do equipamento da marca NETZSCH modelo STA409EP.

Essas técnicas foram fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho, pois através delas foi possível propor uma temperatura ideal e mais adequada para a realização do beneficiamento no fosfogesso, no caso a etapa de aquecimento.

5.2.1.2 Granulometria a Laser

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras, presumivelmente representativas dos sedimentos, e no tratamento estatístico dessa informação.

As medidas foram realizadas em soluções líquidas, contendo material particulado a ser analisado em suspensão, homogeneizado com dispersante hexametáfosfato em pequena quantidade (0,5% da massa total da amostra). A solução foi agitada e dispersa por um agitador, sendo a contagem efetuada via microcomputador. O tempo de medida total é inferior a três minutos e a faixa de leitura é entre $0,5$ e $500\ \mu\text{m}$, ou seja, partículas finas.

Os resultados são expressos em curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) versus diâmetro das partículas (μm) e em tabelas dos diâmetros D_{10} , D_{50} , D_{90} .

A análise granulométrica foi realizada com o auxílio do granulômetro a laser da marca CILAS modelo 1064.

5.2.1.3 Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)

A técnica de adsorção³² e dessorção³³ de gás nitrogênio (N_2) é utilizada para a determinação da área superficial específica, volume de poros, tamanho médio de poros e inclusive forma das partículas.

Normalmente, o gás utilizado é o nitrogênio (N_2), gás de área conhecida de aproximadamente 16 \AA^2 . Este é adsorvido pela superfície do material a ser analisado, formando assim, uma monocamada completa (isoterma de adsorção). A retirada de nitrogênio é realizada através de vácuo (isoterma de dessorção). Obtém-se, então, a histerese de adsorção e dessorção das amostras.

O ensaio foi realizado através do aparelho da marca QUANTACHROME, modelo Autosorb 1. O equipamento permite a medição de meso-poros dos materiais, em diâmetro de poros variando entre 20 a 500 \AA .

Após a obtenção dos resultados do ensaio de adsorção e dessorção física das composições de fosfogesso e gesso, foi realizada a modelagem geométrica da estrutura dos corpos de prova, com auxílio do AUTOCAD e do programa POROS, desenvolvido dentro do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (REIS, 2000).

O programa é realizado a partir de algumas condições de contorno: os poros dos materiais a serem analisados são de forma cilíndrica; toda a porosidade do

³² Incorporação de átomo ou molécula na superfície. Pode ser química ou física.

³³ Remoção de átomo ou molécula na superfície

material deve ser aberta; a estrutura de poros é interconectada.

5.2.1.4 Porosimetria de Mercúrio

O método de porosimetria de mercúrio consiste em determinar o espectro de dimensões de poros de um material, injetando-se mercúrio sob pressão crescente na amostra submetida a vácuo e medindo-se o volume do mercúrio penetrante em função da pressão aplicada, de acordo com a equação de Washburn (SATO *et al*, 2001) (Equação 5.1).

$$D = \frac{-4\gamma \cdot \cos \theta}{P} \quad (5.1)$$

onde:

D= diâmetro do poro, em μm ;

γ = tensão superficial do líquido, igual a $485 \cdot 10^{-3}$ N/cm;

θ = ângulo de contato entre o líquido e a superfície, fixado em $140,5^\circ$;

P= pressão hidrostática da coluna de mercúrio na cápsula da amostra em Pa.

A porosidade aparente foi determinada para pastas com idade de 28 dias. Foram retiradas amostras do interior dos corpos de prova que em seguida foram submetidas a aquecimento, em estufa, durante 72 horas a uma temperatura de 100°C , objetivando eliminar toda umidade que pudesse interferir nos resultados da porosidade das pastas.

As análises foram realizadas utilizando o equipamento da marca MICROMERICTS, modelo AutoPore III 9420. O equipamento é ideal para medir diâmetro de poros em escala macrométrica, para diâmetros maiores que 50 nm. A distribuição dos poros presentes na pastas é obtida através da relação entre o diâmetro do poro e o volume de mercúrio injetado.

5.2.1.5 Espectroscopia de Infravermelho

A espectroscopia de absorção tem como objetivo a determinação dos grupos funcionais existentes nas amostras a serem analisadas (COATES, 2000). Cada grupo absorve uma energia em frequência característica de radiação.

A análise foi realizada mediante a homogeneização das amostras com o solvente brometo de potássio (KBr). A quantidade de KBr utilizada foi 10x a mais que a quantidade de amostra, pelo método de refletância difusa com o espectrômetro da marca PERKIN-ELMER SPECTROMETER modelo Spectrum 1000. O equipamento foi programado para fazer medidas a partir do limite superior de 4000 cm^{-1} até o inferior 400 cm^{-1} (baseado no KBr). Por essa razão, a região espectral é representada do maior valor para o menor (COATES, 2000).

Os resultados foram apresentados através de espectro de transmitância, sendo o eixo das abscissas o comprimento de onda (cm^{-1}) e das ordenadas a intensidade de transmissão.

5.2.1.6 Análise Química

A caracterização química das amostras foi realizada conforme as metodologias listadas na Tabela 5.2.

Tabela 5. 2 - Metodologias utilizadas na caracterização do materiais

Elementos	Metodologia
Ca	Volumetria, por complexão, com EDTA.
Si	Gravimetria, desidratação com HCl, fluorização com HF.
Al, Ti, Fe, Mg, Mn, Cu, Zn, Na, K	Espectrofotometria de absorção atômica, equipamento AANALYST 300, PERKIN-ELMER, modo chama.
C	Combustão direta, com detecção por infravermelho, equipamento CS-244, LECO.
P	Espectrometria de absorção molecular, equipamento MICRONAL - B382.
PPC	Calcinação a 1000°C, até peso constante.

5.2.1.7 Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios X é um método de análise química elementar não-destrutiva que se baseia no fato de os elementos químicos emitirem radiação característica quando sujeitos à excitação apropriada (BRANDÃO, 2004). Essa excitação é provocada pela incidência de radiação proveniente de um tubo de raios X. A espectrometria de raios X pode analisar, aproximadamente, 80 elementos da tabela periódica através de cristais analisadores com diferentes distâncias interplanares (d) que satisfaçam a equação de Bragg (Equação 5.2).

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \text{sen}\theta \quad (5.2)$$

onde:

n – ordem de difração (representado por um nº inteiro);

λ – comprimento de onda da radiação;

d – distância interplanar;

θ – complemento do ângulo de incidência.

A análise de fluorescência foi realizada utilizando um espectrômetro de raios-X PHILIPS, modelo PW-2500.

5.2.1.8 Difratometria de Raios X

A difratometria de raios X consiste em um método analítico que se aplica às substâncias cristalinas. Substâncias amorfas por possuírem carência de periodicidade nos arranjos cristalinos apresentam dificuldades nas análises por difração de raios X.

Na análise difratométrica, um feixe de raios X de alta intensidade incide nas amostras em pó. Variando-se o ângulo de incidência dos raios X, através da rotação da amostra a uma velocidade pré-determinada, obtém-se o registro dos planos cristalográficos da amostra (Figura 5.1). Conhecendo-se o comprimento de onda das radiações X, é possível através da equação de Bragg, determinar os valores das distâncias interplanares (d) para cada banda de difração.

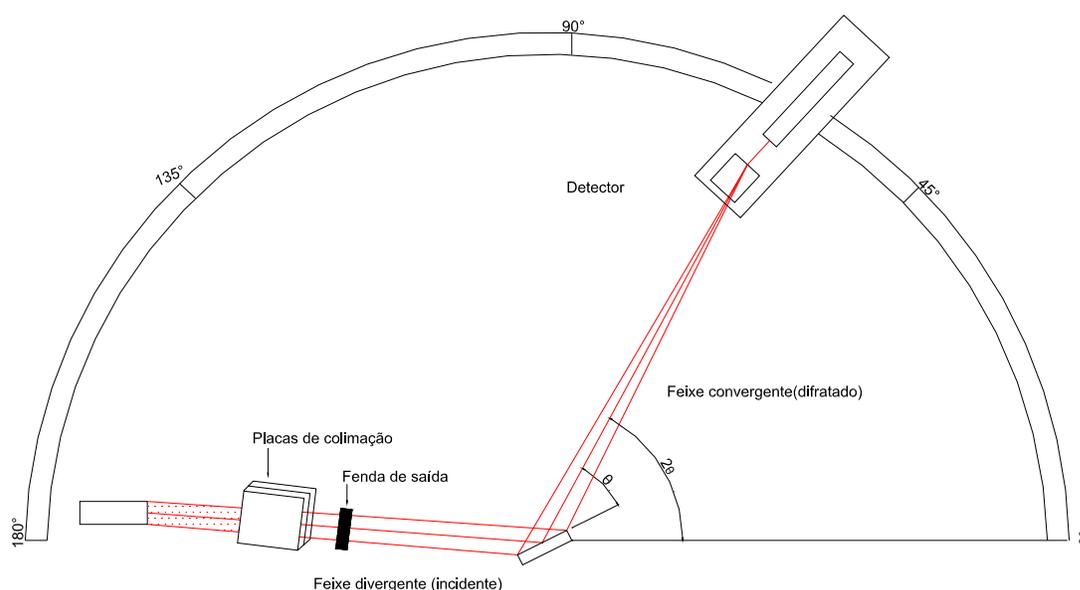


Figura 5.1– Difratometria de raios X

Para esta análise, utilizou-se o difratômetro da marca PHILIPS, modelo PW- 3710 (radiação $CuK\alpha$, corrente de 30 mA e voltagem de 40kV, varredura com passo de 0,060 e tempo de coleta de 1,0 segundo por passo). Na análise das fases cristalinas, os valores de “d” (distância interplanar) foram considerados com aproximação de $\pm 0,01 \text{ \AA}$.

5.2.1.9 Picnometria a Hélio (He)

O método de picnometria utilizando gás hélio consiste na determinação da densidade real do material, com a amostra em estado de pó, considerando assim os poros abertos da partícula do material.

Para este ensaio foram utilizadas amostras do fosfogesso “in natura”, beneficiado e gesso além das composições selecionadas de gesso e fosfogesso que foram moídas até atingiram a forma de pó, na idade de 28 dias. O aparelho utilizado foi o Multipycnometer da marca QUANTACHROME.

5.2.1.10 Picnometria de Mercúrio (Hg)

O ensaio de picnometria de mercúrio consiste na medida da densidade volumétrica do material. O ensaio é realizado através do preenchimento de um recipiente propício com mercúrio, mergulha-se a amostra do material e coleta-se o excesso de mercúrio deslocado pelo volume dessa amostra. Pelo princípio de Arquimedes, o volume do material é equivalente ao do mercúrio deslocado. De posse da massa e com os resultados de seu volume, tem-se então a densidade volumétrica do material. O mercúrio devido à sua alta tensão superficial (0,465 N/m) não penetra nos poros abertos. (VASCONCELOS, 1999).

O ensaio de picnometria de mercúrio foi realizado com as amostras retiradas do interior dos corpos de provas cúbicos, conforme mostrado na Figura 5.2.

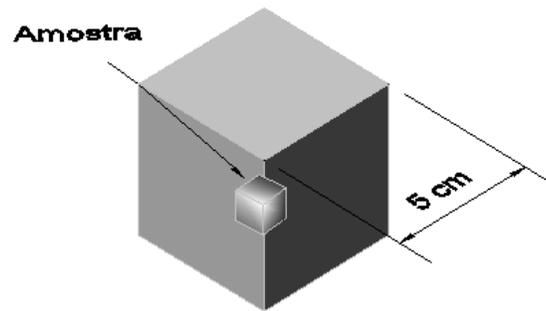


Figura 5.2– Retirada das amostra no interior dos corpos de prova

5.2.1.11 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

Através das imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura em escala microscópica (MEV), pode se obter ferramentas para análise da morfologia do material. Essa investigação é importante para assegurar que a associação entre a estrutura e as propriedades do material estejam suficientemente compreendidas e, a partir deste conhecimento, é possível prever e avaliar seu comportamento macro.

O processo de preparação da amostra é importante para a otimização da análise. Com isso, é necessário o cobrimento da superfície da amostra por uma película metálica ou de carbono, sendo estes, bons condutores de elétrons (BRANDÃO, 2004).

Um feixe de elétrons é convertido a um ponto que incide na superfície da amostra. Parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem (PHIL e RAINFORTH, 1994). A microscopia possui dois tipos de detectores, um de elétrons secundários e outro de elétrons retro-espalhados.

Os elétrons secundários são gerados em volume pequeno e de mesmo diâmetro do feixe de elétrons incidentes. Possuem excelente resolução de imagem, podendo atingir aumentos elevados (30.000x a 100.000x). O contraste da imagem

gerada por elétrons secundários depende da massa específica e da topografia da amostra.

Já os elétrons retro-espalhados são gerados em volume maior e mais profundo que os elétrons secundários, sendo assim, responsáveis por imagem com média resolução. O contraste depende, além da massa específica e da topografia, da composição química (média do número atômico) do material da amostra.

Acoplado ao MEV, o espectrômetro dispersivo em energia (EDS – Energy Dispersive Spectrometry) analisa os elementos químicos encontrados na amostra pontualmente ou em uma área pré-determinada pela microscopia eletrônica de varredura.

As amostras deste estudo, foram preparadas através do cobrimento de sua superfície com uma película de carbono e as imagens foram geradas através de elétrons secundários. O aparelho utilizado foi da marca JEOL, modelo JSM-6360 LV.

5.3 Ensaio Físicos Normalizados

Os ensaios físicos do gesso foram realizados seguindo as prescrições e metodologia de análise contidas na normalização brasileira proposta pela ABNT.

5.3.1 Consistência Normal da Pasta

A consistência normal da pasta de gesso foi obtida a partir da metodologia de ensaio proposta pela norma NBR 12128 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991b). Esta norma propõe o uso do aparelho de Vicat modificado, acoplado com uma sonda de 10 mm de diâmetro que é adaptada em uma haste de fixação. Uma pasta preparada com a amostra de gesso e água é misturada de acordo com o método de ensaio e colocada no

molde. A sonda é colocada em contato com a superfície superior da pasta e solta em seguida. Sob a ação de um peso, a sonda penetra na pasta a uma profundidade. Quando for obtida uma penetração de (30 ± 2) mm, a consistência da pasta é considerada normal. A proporção de água e gesso obtida, através do ensaio de consistência normal, é a ideal para a confecção de uma pasta consistente e trabalhável para posterior confecção de corpos de prova.

O ensaio de consistência normal foi realizado utilizando as composições das referenciadas no item 5.2.

5.3.2 Tempos de Pega

O início de pega foi determinado segundo a norma NBR 12128 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991b), através do aparelho de Vicat. Os tempos de pega do gesso foram medidos usando uma agulha circular com diâmetro de $(1,13 \pm 0,05)$ mm. Essa agulha, sob a ação de um peso específico, é usada para penetrar na pasta de consistência normal colocada num molde especial. O início de pega é caracterizado pelo instante em que a agulha estaciona a 1 mm da base, sendo expresso pelo tempo decorrido desde quando o material entra em contato com a água. Segundo a citada norma, o fim de pega é definido pelo momento em que a agulha, aplicada suavemente sobre a pasta, não penetrar mais na superfície do corpo de prova.

5.4 Ensaio Mecânicos

Para o presente trabalho, as composições de fosfogesso e gesso foram avaliadas através de ensaios destrutivos de resistência à compressão e de dureza das pastas.

5.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios de compressão foram realizados através da confecção de corpos de prova cúbicos (50 x 50) mm de acordo com a norma NBR 12129 – *Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas* (ABNT, 1991c).

O ensaio deve ser realizado em ambiente com temperatura igual a $(24 \pm 4^\circ)\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65 \pm 5\%$. A água destilada foi utilizada nos ensaios, conforme critérios exigidos pelas prescrições normativas brasileiras.

Os ensaios foram conduzidos considerando-se os corpos de prova moldados de acordo com as composições descritas no item 5.2.

Para o ensaio foi utilizada a prensa elétrica da marca MTS 815 Rock Mechanics Test System (Figura 5.3) acoplada a um computador. Os resultados foram obtidos em KN e posteriormente transformados em MPa.

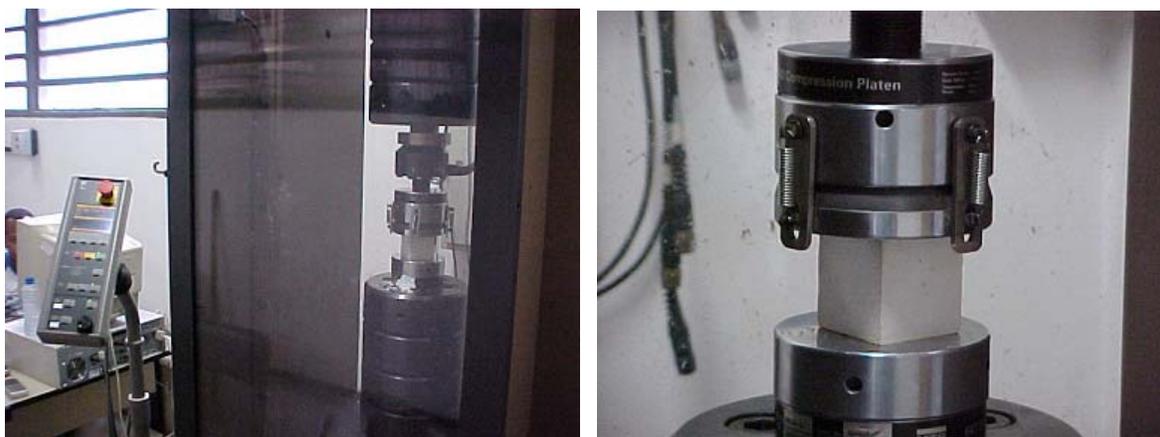


Figura 5.3– Teste de compressão em corpos de prova cúbicos

Os resultados são expressos através da média da resistência à compressão de três corpos de prova, sendo que o resultado individual não deve diferir mais que 15% da média calculada. Com o propósito de se obter resultados de confiabilidade

foram testados 6 corpos de prova, para cada composição ensaiada, nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias.

5.4.2 Ensaio de Dureza

A dureza de um material é geralmente definida pela resistência que ele oferece a penetração de uma ponta de material, com forma e dimensões padronizadas. Esta ponta padronizada, denominada penetrador, é comprimida sobre a superfície da peça sob a ação de uma determinada carga, que relacionada a impressão produzida obtém-se uma indicação da sua dureza (XAVIER, 1972).

O ensaio de dureza foi realizado com o durômetro da marca Zörn, modelo 1702, em corpos de prova confeccionados com as 5 (cinco) composições selecionadas. O ensaio consiste de um ensaio dinâmico onde-se aplica um penetrador esférico com diâmetro de 10 mm e uma energia de impacto de 1,23 joules. A impressão na superfície da amostra, no caso uma calota, teve o seu diâmetro medido com auxílio de lente de escala graduada com aumento de 10x. Na Figura 5.4 observa-se o durômetro e os corpos de prova utilizados nos experimentos.



Figura 5.4– Ensaio de dureza

Uma correlação foi obtida através da equação 5.3, onde mediante o prévio conhecimento do valor do diâmetro da impressão, expresso em mm, calcula-se o valor da dureza prevista pela NBR, expressa em N/mm²:

$$D = \frac{127}{L} \quad (5.3)$$

onde:

- D = dureza expressa em N/mm²;
- L = diâmetro da impressão medida via durômetro Zörn, expressa em “mm”.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análises nos Pós

6.1.1 Análises Térmicas

Os resultados das análises térmicas de TG e DTA realizados são apresentadas nas Figura 6.1, 6.2 e 6.3 para o fosfogesso “in natura”; fosfogesso beneficiado e, gesso, respectivamente.

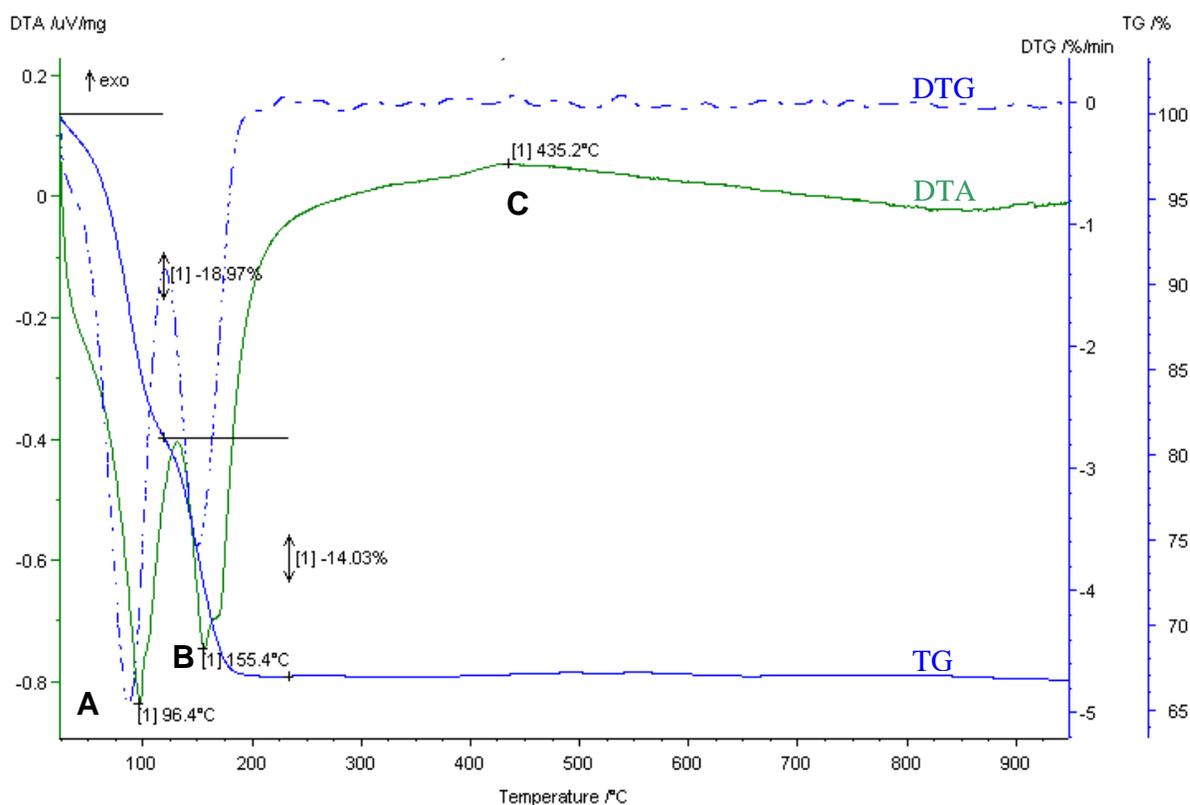


Figura 6.1 – Análise térmica do fosfogesso “in natura”.

Em relação à Figura 6.1 foi possível observar que:

- os picos endotérmicos “A” (96,4°C) e “B” (155,4°C), gerados a partir dos resultados da análise térmica diferencial, representam a reação de formação da bassanita e anidrita III. SEBAHI *et al* (1997) interpreta esses picos como sendo

modificações da estrutura cristalina do material. O primeiro pico corresponde à perda de água livre na temperatura de 96,4°C (“A”). Já o pico “B” (155,4°C) corresponde à perda de água estrutural;

- o pico “C” (435,2°C) exotérmico se dá devido a transformação da anidrita solúvel (anidrita III) em insolúvel (anidrita II);

- a partir dos resultados obtidos pela análise termogravimétrica pode-se observar uma perda de 33% massa da amostra de fosfogesso “in natura”. Essa perda de massa se dá devido à perda de água livre e estrutural e/ou algum componente volátil da massa total da amostra;

- a curva tracejada corresponde à derivada da curva termogravimétrica (DTG), e nessa observa-se a coincidência dos picos com os obtidos na curva da análise térmica diferencial.

Devido à quantidade de água envolvida no processo, por via úmida, de geração do resíduo fosfogesso, é necessário submetê-lo ao processo beneficiamento tal como referenciado no sub-item 4.1.3.1.

A partir dos resultados de análise térmica definiu-se a temperatura a ser adotada no beneficiamento do fosfogesso “in natura”, no caso 180° C, viabilizando a obtenção da bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), que é o mineral presente no gesso normamente consumido pela indústria da construção civil.

A partir da Figura 6.2, para o fosfogesso beneficiado observa-se que:

- o pico “D” (46,5°C) representa a liberação do restante da água livre existente na amostra de fosfogesso beneficiado. Já o pico referenciado pela letra “E” (161,9°C) se dá devido à transformação endotérmica de formação da anidrita III;

- o pico exotérmico há 495,9°C (“F”) é resultado da transição da anidrita III para anidrita II;

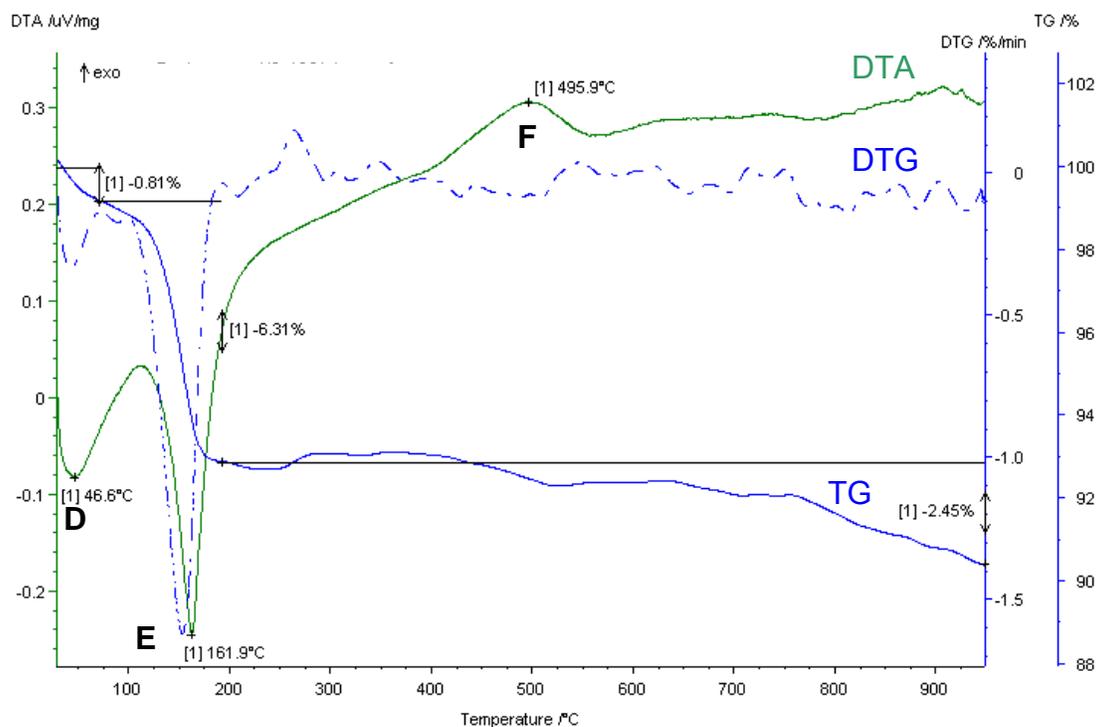


Figura 6.2- Análise térmica do fosfogesso beneficiado

- comparativamente, a perda de massa registrada é de 9,57%, menor no fosfogesso beneficiado do que no “in natura”, atingindo valores 70% a menos, fato este considerado normal, na medida em que existe grande quantidade de água livre no fosfogesso “in natura” oriunda do seu processo de geração..

A partir dos resultados das análises térmicas para as amostras de gesso, gráfico da Figura 6.3, é possível detectar:

- a presença de dois picos endotérmicos (“G” e “H”) representam a desidratação do gesso. Pelo fato do gesso ser um produto obtido através de processo que inclui a desidratação da gipsita, o pico “G” é pequeno se comparado com o pico “A” da amostra de fosfogesso “in natura” observado na Figura 6.1;

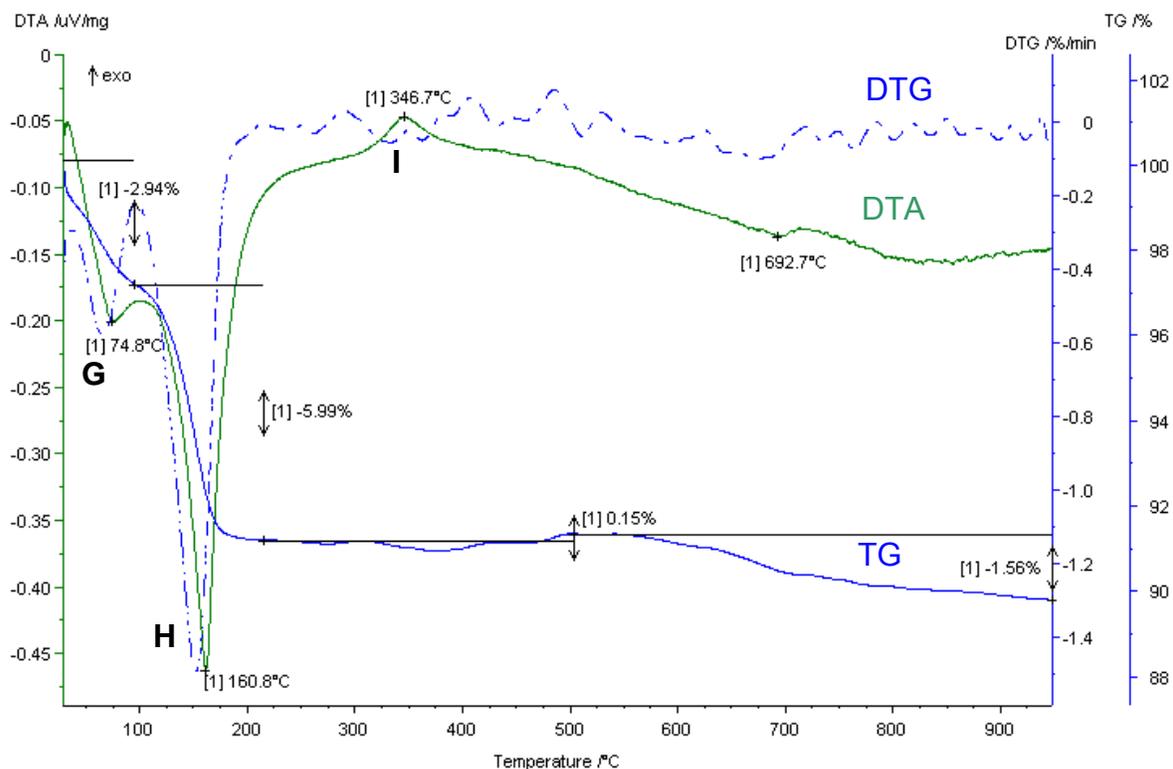


Figura 6.3 - Análises térmica do gesso

- a reação de formação da anidrita II se dá no pico “I” (346,7°C);
- a perda de massa na amostra de gesso foi de 8,83%, valor muito próximo ao da amostra de fosfogesso beneficiado.

6.1.2 Granulometria a Laser

Com os resultados da granulometria a laser foi possível obter os diâmetros D_{10}^{34} , D_{50} e D_{90} para as amostras de fosfogesso e gesso (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} das amostras de gesso e fosfogesso

Amostra	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
Fosfogesso “in natura”	5,8	30,7	65,0
Fosfogesso beneficiado	6,2	25,7	62,5
Gesso	2,0	23,4	60,0

³⁴ D_{10} – 10% do total da massa do material analisado possui grãos com diâmetro abaixo do valor encontrado.

Os resultados indicam que tanto o fosfogesso “in natura”, fosfogesso beneficiado e gesso são materiais finos, na medida que possuem 90% da sua massa com diâmetros menores que 65 μm . 50% da massa das amostras de gesso e fosfogesso estão abaixo de 23,4 μm e 30,7 μm respectivamente. Observa-se, também, que a diferença entre os resultados dos diâmetros D_{10} , D_{50} , D_{90} é pequena, indicando que os três materiais são granulometricamente semelhantes.

Na Figura 6.4 é possível visualizar as curvas de percentagem retida acumulada das partículas (%) x diâmetro (μm).

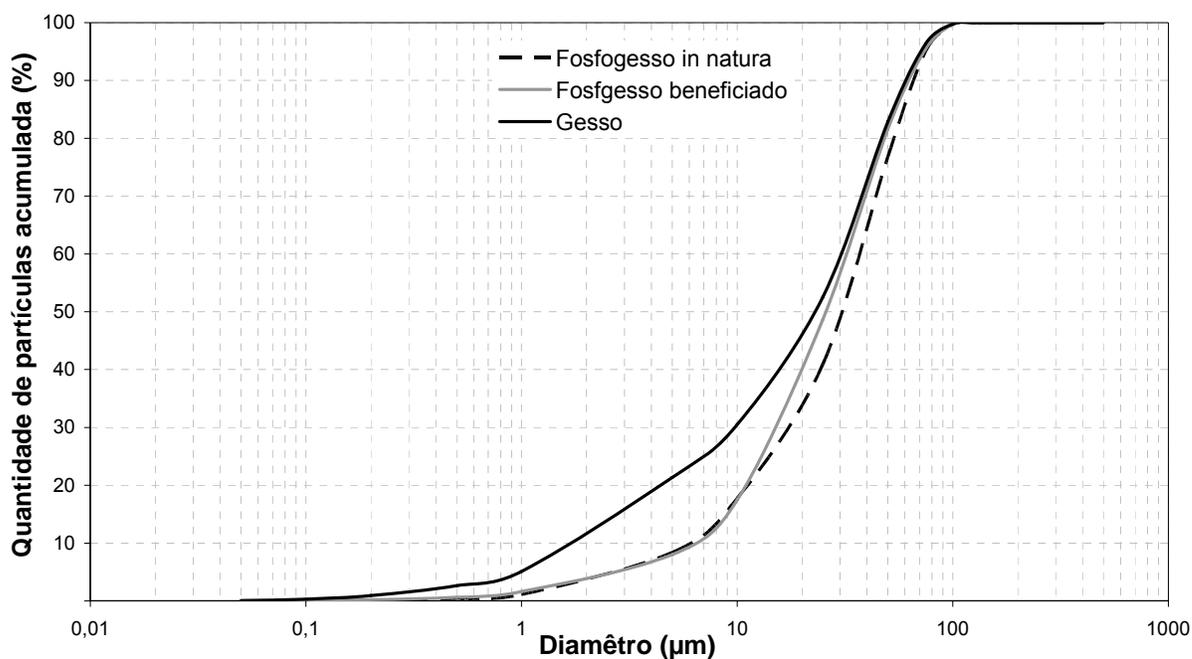


Figura 6.4– Granulometria a laser das amostras de fosfogesso e gesso

Através da Figura 6.4 é possível concluir que o gesso apresenta maior número de partículas acumuladas entre os diâmetros de 1 μm e 10 μm do que as amostras de fosfogesso “in natura” e beneficiado, sendo assim ligeiramente mais fino. As amostras de fosfogesso e gesso podem ser consideradas como constituídos eminentemente de finas partículas, normalmente entre 1 e 100 μm .

O beneficiamento do resíduo fosfogesso através do uso da peneira de 0,71 mm não alterou os resultados apresentados, fato que comprova que o único objetivo deste peneiramento foi o de reduzir e retirar os grumos por ventura existentes no resíduo fosfogesso, formados ao longo do seu processo de geração e armazenamento.

Pelo fato das partículas de gesso e fosfogesso apresentarem uma forma lamelar, o ensaio de granulometria a laser não é o mais adequado para medir o diâmetro desses materiais, pois a medida é realizada conforme a posição que as partículas atravessam o feixe de laser. Neste sentido, o ensaio de adsorção e dessorção física irá proporcionar uma análise mais confiável.

6.1.3 Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)

Para a determinação da superfície específica, do volume total de poros e do diâmetro médio de poros das amostras de gesso e fosfogesso, foi utilizada a adsorção e dessorção física pelo método BET, cujo resultados são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Análises de BET para as amostras de gesso e fosfogesso.

Amostra	Área Superficial Específica (m²/g)	Volume Total de Poros (cm³/g)	Diâmetro Médio de Poros (Å)
Fosfogesso “in natura”	17,50	0,05	107,00
Fosfogesso beneficiado	10,50	0,06	236,00
Gesso	2,80	0,01	97,00

A partir da análise da Tabela 6.2, é possível observar que a área superficial específica das partículas de gesso é aproximadamente 4 vezes menor que a do fosfogesso beneficiado.

Após o beneficiamento do fosfogesso houve um aumento do volume total e no diâmetro médio dos poros das partículas, o que pode ter ocorrido devido à perda de água ou de algum outro componente do fosfogesso quando este foi submetido à desidratação.

As curvas de distribuição de volume de poros ($(dV/d\log D)$) versus diâmetro de poros (Å) obtidas para as dessorções cumulativas de N_2 pelas amostras de fosfogesso e gesso, são mostradas na Figura 6.5.

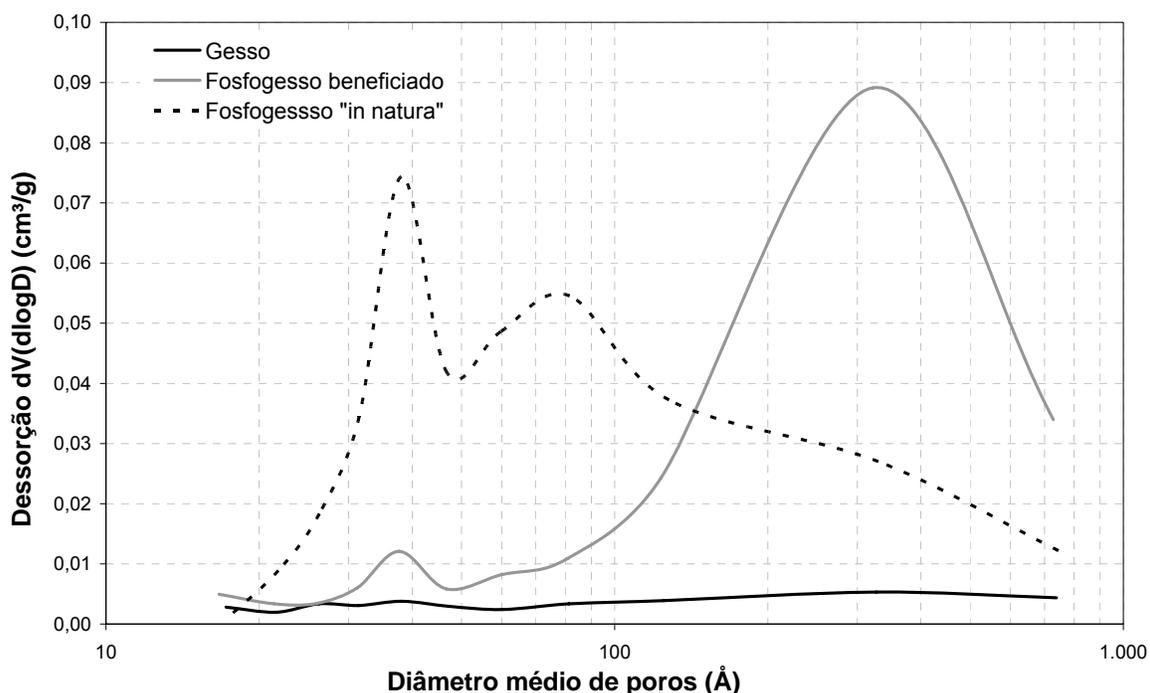


Figura 6.5 – Distribuição do diâmetro médio de poros nas amostras

Pode-se constatar pelo exame da Figura 6.5, que a amostra de fosfogesso beneficiado apresentou diâmetro médio de poros situados na faixa de 100 a 700 Å, apresentando assim, uma estrutura meso-porosa (diâmetro de 20 a 500 Å) a macro-porosa (diâmetro maior que 500 Å). Os poros do fosfogesso antes do beneficiamento poderiam ter sido ocupados pelo grupo hidroxila (OH^-) e/ou algum componente do fosfogesso, que após o beneficiamento volatilizou, deixando assim, um sítio vazio em suas partículas.

Já o fosfogesso “in natura” apresentou diâmetro médio de poros na faixa de 30 a 100 Å, sendo considerado um material meso-poroso. O gesso apresentou uma estrutura com poros regulares e bem distribuídos.

As histereses de adsorção e dessorção das amostras analisadas podem ser observadas no gráfico volume adsorvido de nitrogênio versus pressão relativa (vide Figura 6.6).

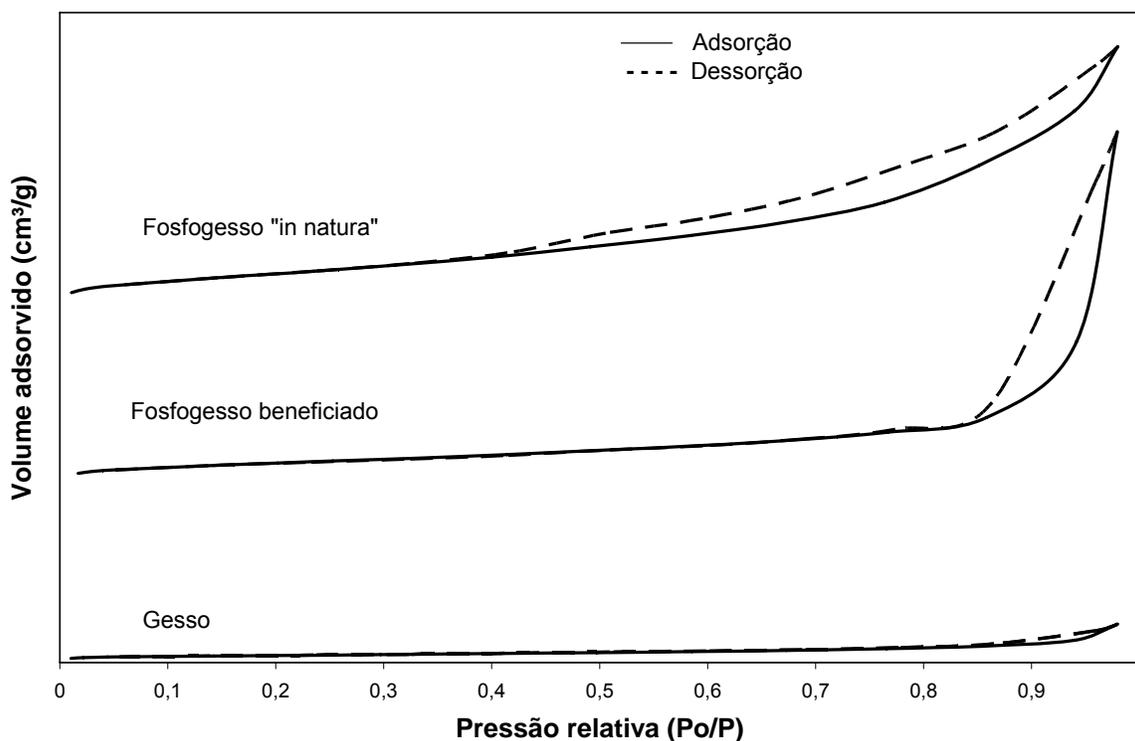


Figura 6.6 – Histerese das amostras de fosfogesso e gesso

Ao analisar as histereses, é possível concluir que as amostras pois apresentam certa porosidade, pois apontam uma diferença entre as curvas de adsorção e dessorção.

O efeito histerese fica bem caracterizado para as amostras de fosfogesso, enquanto que no gesso observa-se uma pequena diferença entre as curvas de dessorção e adsorção, fato que indica a existência de um material com menor

porosidade, se comparado com o fosfogesso. As isotermas do fosfogesso beneficiado, de acordo com a literatura, são típicas de um material meso-poroso.

Para melhor interpretação dos resultados obtidos pelas análises de adsorção e dessorção física foi realizada a modelagem geométrica, através do programa POROS, dos corpos de provas confeccionados com gesso e fosfogesso, conforme pode-se observar na Figura 6.7.

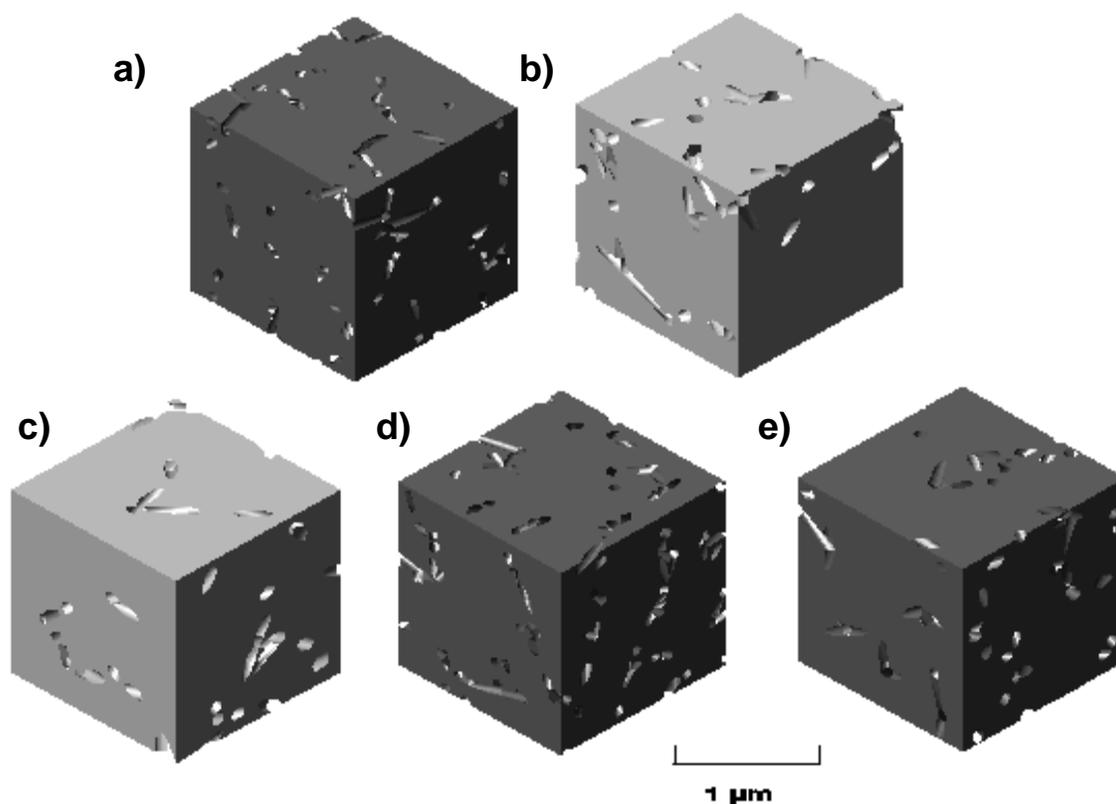


Figura 6.7 – Modelagem geométrica das composições

(a) 100% fosfogesso (b) 100% gesso 1:1,8 (c) 100% gesso 1:1
(d) 75% fosfogesso 25% gesso (e) 50% fosfogesso 50% gesso

Através da Figura 6.7 é possível visualizar melhor a porosidade aparente e a conectividade de poros em escala micrométrica, das amostras confeccionadas com fosfogesso e gesso. As composições com alta proporção de fosfogesso (“A” e “D”) apresentam porosidade elevada em relação as composições à base de

gesso (“B” e “C”). Entretanto, a amostra representativa da composição “E”, 50% fosfogesso e 50% de gesso, apresenta grau de micro-porosidade muito similar às amostras das composições “B” e “C”.

Observa-se também que a composição referenciada como “C” (gesso, traço 1:1) apresenta uma maior porosidade que a composição “B” (gesso, traço 1:1,8), esse fato deve-se a alta quantidade de água de amassamento nas pastas de gesso 1:1.

6.1.4 Espectroscopia de Infravermelho

A partir dos espectros da transmitância, pode-se analisar os grupos funcionais presentes nas amostras de fosfogesso e gesso (Figura 6.8).

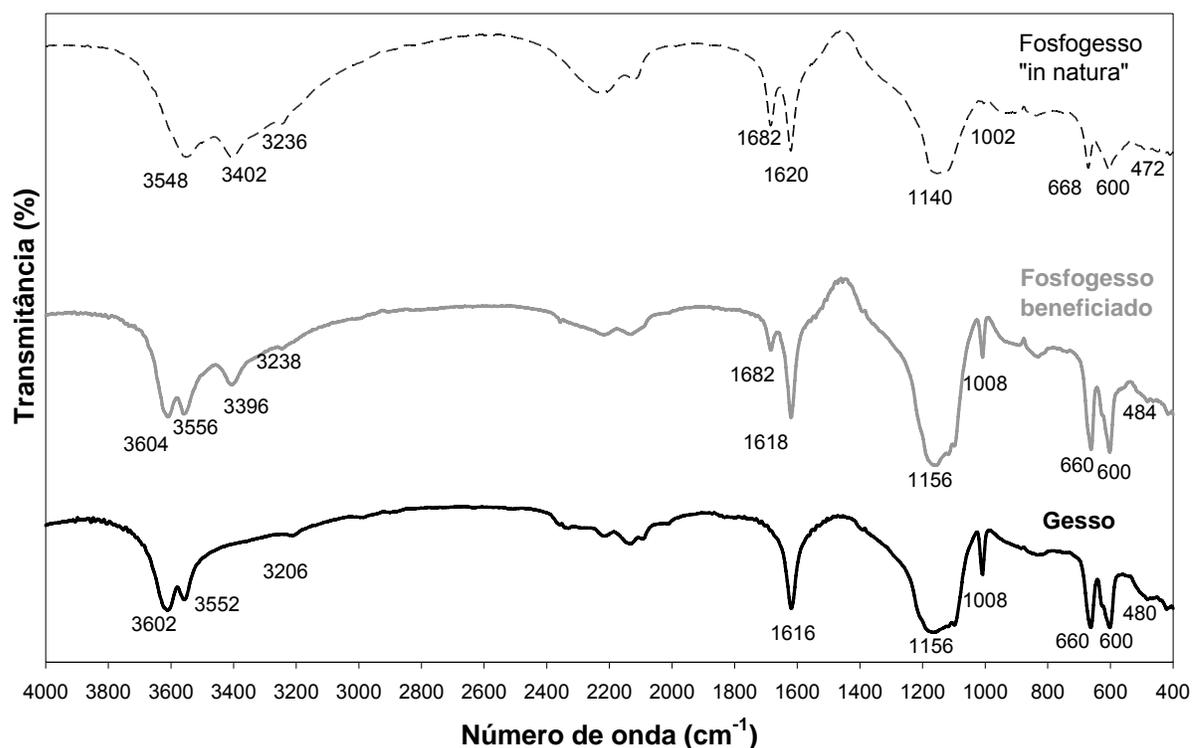


Figura 6.8 – Espectro de infravermelho das amostras

Através dos resultados da espectrometria de infravermelho por transmitância é possível concluir que tanto o fosfogesso quanto o gesso apresentam praticamente as mesmas bandas, algumas maiores e/ou mais deslocadas que as outras.

A presença de água nas amostras pode ser detectada através de duas bandas: uma na região de $3.600 - 3.200 \text{ cm}^{-1}$ e na região de 1.650 cm^{-1} (MANDAL e MANDAL, 2002). As bandas de estiramento (stretching bands) presentes na região de 3.400 e 3.600 cm^{-1} são associadas ao grupo OH. O fosfogesso “in natura” apresenta um deslocamento e alargamento da banda OH (3402 e 3548) quando comparado com o gesso e fosfogesso beneficiado. Pode-se observar que o fosfogesso é um material hidrofílico, ou seja possui afinidade com a água.

A presença de duas bandas em 1680 cm^{-1} e 1620 cm^{-1} nas amostras de fosfogesso se dá devido a presença de duas moléculas de água na composição do fosfogesso. Observa-se, na Figura 6.8, que a banda 1682 cm^{-1} do fosfogesso “in natura” é mais intensa e que o gesso não possui essa banda.

As bandas localizadas na região de $1.100 - 1200 \text{ cm}^{-1}$, tanto nas amostras de fosfogesso como no gesso, pertencem ao grupo SO_4^{2-} (FARMER, 1974). Comumente uma ou mais bandas nessa região indicam uma baixa simetria entre as ligações do anion SO_4 com as moléculas de água (MANDAL e MANDAL, 2002).

A banda 1008 cm^{-1} , evidenciada com mais intensidade nas amostras de fosfogesso beneficiado e gesso, representa o grupo sulfato de cálcio hemidratado (FARMER, 1974). Pode-se observar que o fosfogesso “in natura”, por apresentar 2 moléculas de água em sua composição, apresenta uma banda deslocada (1002 cm^{-1}) e de baixa intensidade, se comparada com as demais amostras.

As vibrações ocorridas entre $668 - 600$ são devidas aos defeitos de vibração de valência O-S (COATES, 2000). O fosfogesso beneficiado e o gesso apresentam

as duas bandas na região de 660 cm^{-1} e 600 cm^{-1} . Portanto, o fosfogesso apresenta um pequeno deslocamento apresentando suas bandas em 668 cm^{-1} e 600 cm^{-1} . Segundo os autores MANDAL e MANDAL (2002), o deslocamento da banda pode ser devido a mudança de configuração do íon SO_4 referente a perturbação do íon pela suas moléculas vizinhas de H_2O .

Na tabela 6.3 é possível observar as bandas do espectro de infravermelho.

Tabela 6.3 – Grupos funcionais presentes nas amostras

Amostras	$\nu(\text{O-H})$	$\delta(\text{O-H})$	$\nu(\text{S-O})$	$\nu(\text{S-O})$	$\nu(\text{S-O})$	$\nu(\text{S-O})$
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3548	1682			668	
(Fosfogesso “in natura”)	3402	1620	1140	1002	600	472
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	3604	1682			660	484
(Fosfogesso beneficiado)	3552	1618	1156	1008	600	408
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (gesso)	3602				660	480
	3552	1616	1156	1008	600	416

A diferença entre as amostras foi perceptível nas bandas de absorção de água do espectro de infravermelho. Os resultados apresentados não indicaram nenhuma impureza contida nas amostras de fosfogesso.

6.1.5 Análise Química

Os resultados da análise química das amostras de fosfogesso e gesso podem ser visualizados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4- Análise química das amostras de fosfogesso e gesso

Óxidos	Fosfogesso	Fosfogesso	Gesso (%)
	“in natura”(%)	Beneficiado (%)	
SO ₄	58,120	66,810	65,610
CaO	40,120	40,970	39,880
SiO ₂	1,990	1,960	0,192
TiO ₂	1,620	1,650	-
P ₂ O ₅	1,170	1,080	-
MgO	0,102	0,106	0,291
Al ₂ O ₃	0,098	0,125	0,136
Fe ₂ O ₃	0,602	0,579	0,166
Na ₂ O	0,049	0,035	-
K ₂ O	0,031	0,028	0,033
ZnO	0,001	-	-
Cu ₂ O	0,005	-	-
MnO ₃	0,031	0,033	0,016
PPC(%)	23,100	9,640	12,40

É fato que as amostras de fosfogesso analisadas possuem algum tipo de contaminação, mesmo que em baixas concentrações.

Tendo em vista que o gesso é composto basicamente por sulfato (SO₄) e óxido de cálcio (CaO), antes de afirmar que os contaminantes do fosfogesso estão acima do limite aceitável, deve-se avaliar sobretudo sua aplicação. Por exemplo, para o uso em cimento o fosfogesso não deve ter o teor de pentóxido de fósforo (P₂O₅) maior que 0,8%, fato que irá proporcionar um aumento do tempo de pega dos cimentos, e por conseqüência aos concretos com ele produzidos. Pelo resultado, observa-se que o fosfogesso beneficiado tem teor de P₂O₅ de 1,08%, valor acima do limite exigido pelas cimenteiras (FOSFÉRTIL, 2005). Vale lembrar que, o fosfogesso é um material heterogêneo e essa percentagem pode variar em função de sua origem.

O óxido de ferro (Fe_2O_3) presente nas amostras de fosfogesso, em percentuais baixos menores que 0,602%, não interfere na qualidade final dos cimentos e por consequência dos concretos. Já o óxido de titânio (TiO_2), em baixa concentração, não afeta diretamente o uso do fosfogesso em cimento, entretanto sabe-se que a indústria cimenteira preocupa com a presença desse óxido pois se associado a outros materiais pode afetar negativamente na reação de endurecimento da pasta de cimento, diminuindo assim a resistência mecânica dos produtos à base de cimento.

Os traços de metais pesados encontrados nas amostras de fosfogesso, tais como os óxidos de Fe (ferro), Mn (manganês), Cu (cobre), Al (alumínio) e Ti (titânio) podem ser tóxicos e prejudiciais ao solo, a água e aos alimentos, quando aplicado na agricultura. Vale a pena ressaltar, que não foi detectada a presença de flúor nas amostras de fosfogesso analisadas.

De modo geral, para aplicação na indústria de pré-moldados o fosfogesso apresenta uma composição química que não interfere na qualidade final dos produtos fabricados. Porém, estudos específicos devem ser realizados com o objetivo de melhor avaliar tal influência.

6.1.6 Fluorescência de Raios X

Através de fluorescência de raios X, determinaram-se os principais elementos químicos que compõem as amostras, tal como apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Elementos presentes nas amostras de fosfogesso e gesso.

Amostras	Elementos	Elementos	Elementos	Traço
	Altos	Médios	Baixos	
Fosfogesso “in natura”	S, O	Ca	P	Si, Al, Mg, Na, Fe, Ce, Ti, La, K, Sr, Zr, Pr
Fosfogesso Beneficiado	S, O	Ca	P	Si, Al, Mg, Na, Fe, Ce, Ti, La, Sr, Pr
Gesso	S, O	Ca		Si, Al, Mg, K, Zn, Cu, Fe, Mn, Sr

Os elementos identificados na fluorescência de raios X para as amostras de fosfogesso e gesso foram basicamente os mesmos, diferenciando apenas traços de alguns elementos encontrados (Si, Al, e etc), bem como baixos teores de fósforo (P). É notório a presença de elementos, da série “terras raras” no fosfogesso, tais como lantânio (La), praseodímio (Pr) e cério (Ce).

Era de se esperar, tal qual mostrado na Tabela 6.5, a baixa incidência do elemento fósforo nas amostras de fosfogesso, na medida em que, durante o processo de obtenção do fertilizante e, por consequência, da geração do fosfogesso a partir da rocha fosfática, é desejável que o fertilizante tenha a maior concentração possível do elemento “fósforo”, deixando, desta forma, pequenos resquícios para o resíduo gerado.

6.1.7 Difractometria de Raios X

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 6.9.

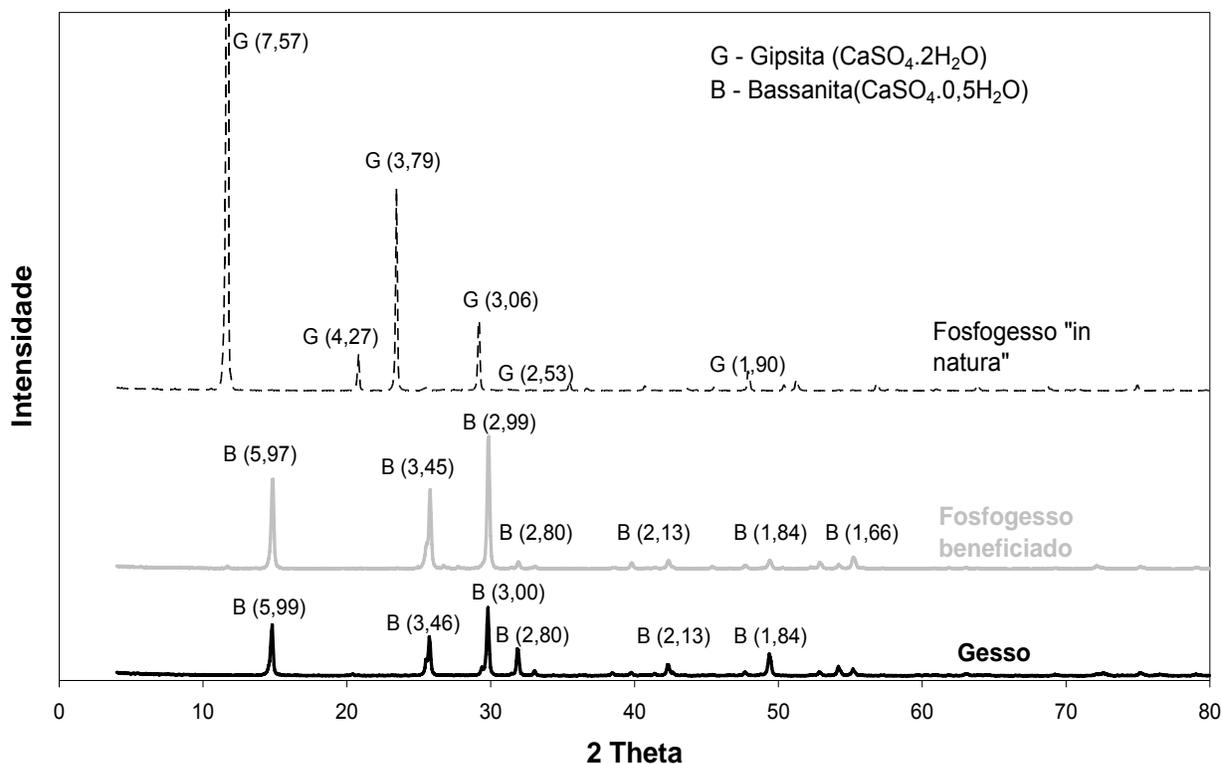


Figura 6.9 – Espectro de difração das amostras de fosfogesso e gesso

É notório, a partir da obtenção dos espectros de difratometria de raios X, que tanto a microestrutura das amostras do gesso quanto a do fosfogesso caracterizam-se pela presença de fases cristalinas, originando, assim, picos bem definidos dos minerais bassanita e gipsita (Figura 6.9).

Na amostra do fosfogesso "in natura", pode-se observar a predominância de picos característicos da gipsita, mineral na fórmula de sulfato de cálcio di-hidratado, ou seja, composto por duas moléculas de água. Já em relação à amostra referenciada como fosfogesso beneficiado, submetida a aquecimento em temperatura de 180°C durante 1 hora, houve uma alteração dos picos característicos, com ocorrência do mineral bassanita, composto por 0,5 molécula de água. No caso do gesso também foi predominante os picos característicos do mineral bassanita.

É importante observar a coincidência dos picos do gesso e do fosfogesso após o beneficiamento. Isso se dá devido à perda de água e, conseqüente, mudança de fase da gipsita, presente no fosfogesso “in natura”, para bassanita presente no fosfogesso beneficiado.

6.1.8 Picnometria à Hélio (He)

Com os ensaios de picnometria à hélio foi possível se obter a densidade real do fosfogesso “in natura”, do fosfogesso beneficiado e do gesso (Figura 6.10)

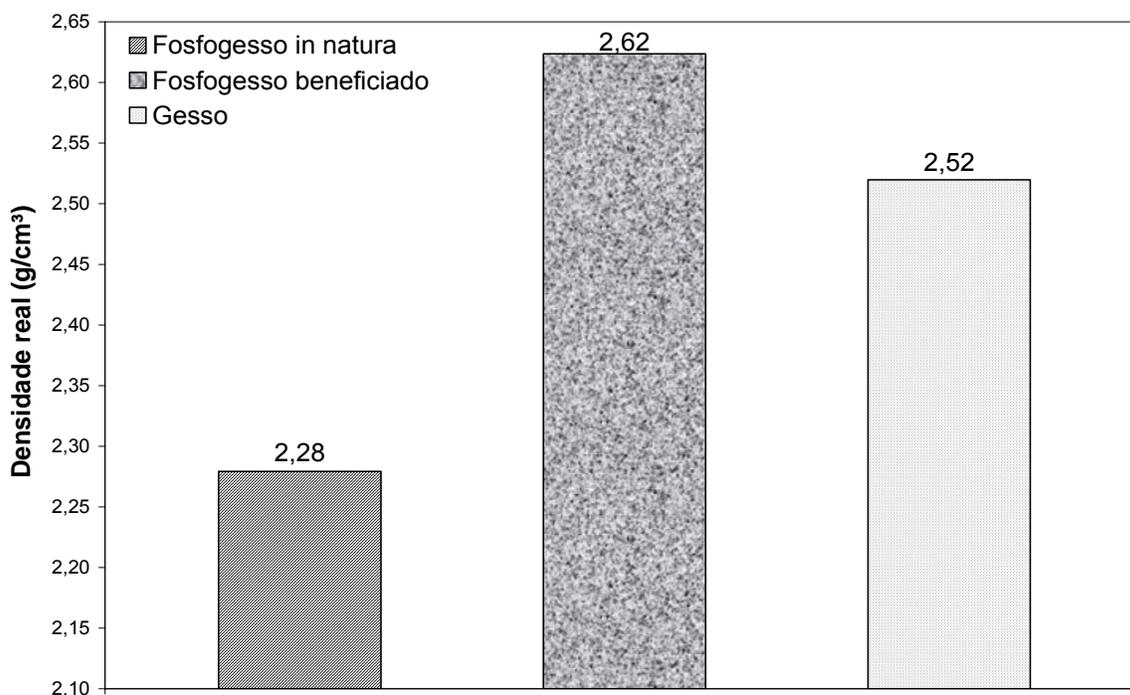


Figura 6.10 – Densidade real das amostras de fosfogesso e de gesso

Foi observado um aumento na densidade real do fosfogesso beneficiado, cujo valor se aproximou do gesso (Figura 6.10).

6.1.9 Microscopia eletrônica e EDS

A partir da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar a morfologia das partículas do gesso e fosfogesso através das

fotomicrografias. Para isso, foram utilizadas amostras na forma de pó, no caso do fosfogesso “in natura” e beneficiado e gesso.

Fotomicrografias com aumento de 30x foram utilizadas para a análise do material são apresentadas na Figura 6.11.

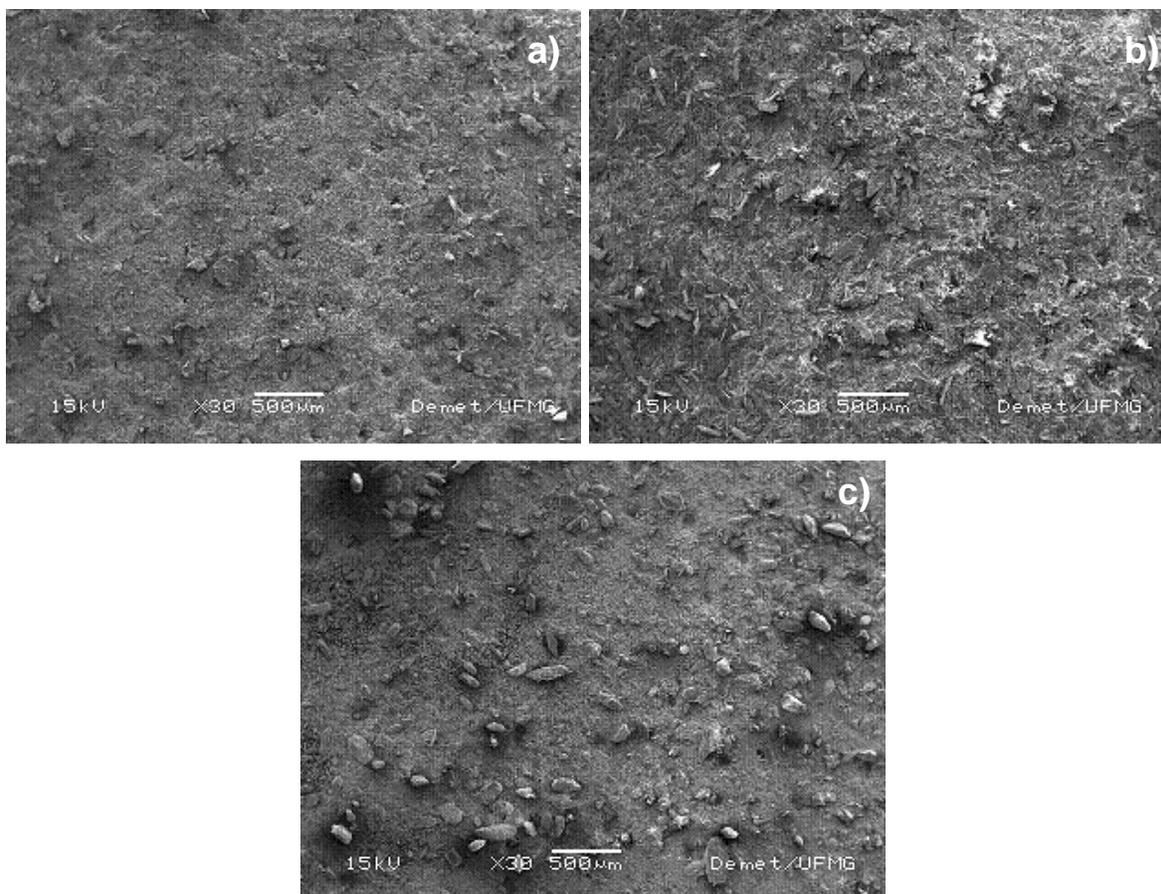


Figura 6.11 – Fotomicrografias das amostras (aumento de 30x)
(a) fosfogesso “in natura” (b) fosfogesso beneficiado (c) gesso

Nas partículas do fosfogesso “in natura” foi possível observar que devido à quantidade de água envolvida no processo via úmida de geração do resíduo fosfogesso, e em razão de não terem sido submetidas a nenhum tipo de beneficiamento, estas apresentam um aspecto coeso, como observado na Figura 6.11a.

Já o fosfogesso submetido a desidratação apresenta as partículas mais soltas (Figura 6.11b). No gesso (Figura 6.11c), devido a baixa área superficial específica da amostra (vide Tabela 6.2), pode-se observar a formação de pequenos aglomerados.

A composição química da área das fotomicrografias observadas na Figura 6.11 foi avaliada através do espectrômetro dispersivo em energia (EDS), como pode ser observado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – EDS das partículas das amostras de fosfogesso e gesso

Elemento	Fosfogesso “in natura” (Área a)	Fosfogesso beneficiado (Área b)	Gesso (Área c)
O	38,67	31,50	32,64
Si	0,79	0,78	-
P	1,53	1,33	-
S	25,40	29,11	29,21
Ca	33,60	37,48	38,16
Total	100 %	100%	100%

Conforme se observa na Tabela 6.6, o fosfogesso e o gesso são basicamente compostos de cálcio (Ca) e enxofre (S). No entanto, para o resíduo fosfogesso foram encontrados, em baixo teor, os elementos fósforo (P) e silício (S), confirmando assim a análise química (Tabela 6.4) e de fluorescência de raios X das amostras (Tabela 6.5).

Na Figura 6.12 é possível visualizar a morfologia das partículas do fosfogesso e do gesso para um aumento de 500x.

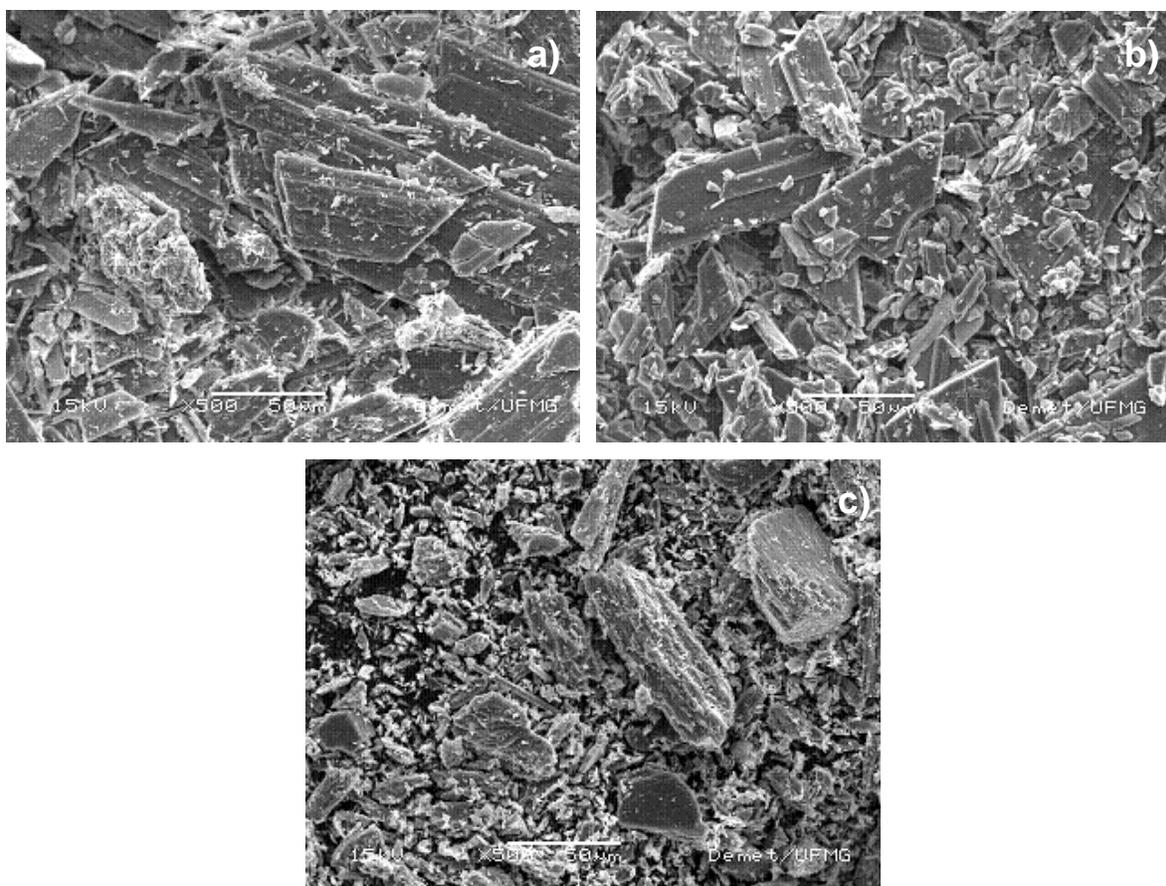


Figura 6.12 – Fotomicrografias das amostras em pó (aumento de 500x)
(a) fosfogesso “in natura” (b) fosfogesso beneficiado (c) gesso.

Através das fotomicrografias do fosfogesso “in natura” (Figura 6.12a) e do fosfogesso beneficiado (Figura 6.12b), pode-se observar que a morfologia das partículas de fosfogesso passou de lamelar estriada para lamelar lisa. Tal situação é devida ao beneficiamento do fosfogesso que perdeu a água adsorvida na superfície de suas partículas, deixando assim as mesmas com aspecto mais liso.

Observa-se, também, que as partículas de gesso (Figura 6.12c) são menores que a do fosfogesso, quando observadas em aumento de 500x, fato que confirma a tendência manifestada nos ensaios de adsorção física (Método BET) e granulometria a laser.

6.2 Análise nas Composições

6.2.1 Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)

Os resultados dos ensaios realizados nas misturas envolvendo composições de fosfogesso beneficiado e gesso são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Adsorção física (Método BET) para as composições

Composição ³⁵	Área Superficial Específica (m ² /g)	Volume Total de Poros (cm ³ /g)	Diâmetro Médio de Poros (Å)
“A”	20,40	0,04	74
“B”	16,50	0,04	90
“C”	13,83	0,04	102
“D”	20,70	0,04	77
“E”	14,80	0,03	92

Verifica-se, pela Tabela 6.7, que o volume total de poros foi de 0,04 cm³/g para as todas as amostras, exceto para aquela confeccionada com 50% fosfogesso e 50% gesso (composição “E”), que, no caso, foi de 0,03 cm³/g.

Observa-se que à medida que o teor de fosfogesso é reduzido o diâmetro médio dos poros aumenta (composição “A”, “D” e “E”). Ou seja o fosfogesso reduz o diâmetro médio das pastas. Para as composições “B” e “C”, o tamanho dos poros aumenta com o aumento da quantidade de água, conforme esperado.

O gráfico da distribuição do tamanho de poros, obtido pela dessorção de N₂ para as composições, pode ser observado na Figura 6.13.

³⁵

Composição “A” – 100% fosfogesso
 Composição “B” – 100% gesso, traço 1:1,8 (água:gesso)
 Composição “C” – 100% gesso, traço 1:1 (água:gesso)
 Composição “D” – 75% fosfogesso e 25% gesso
 Composição “E” – 50% fosfogesso e 50% gesso

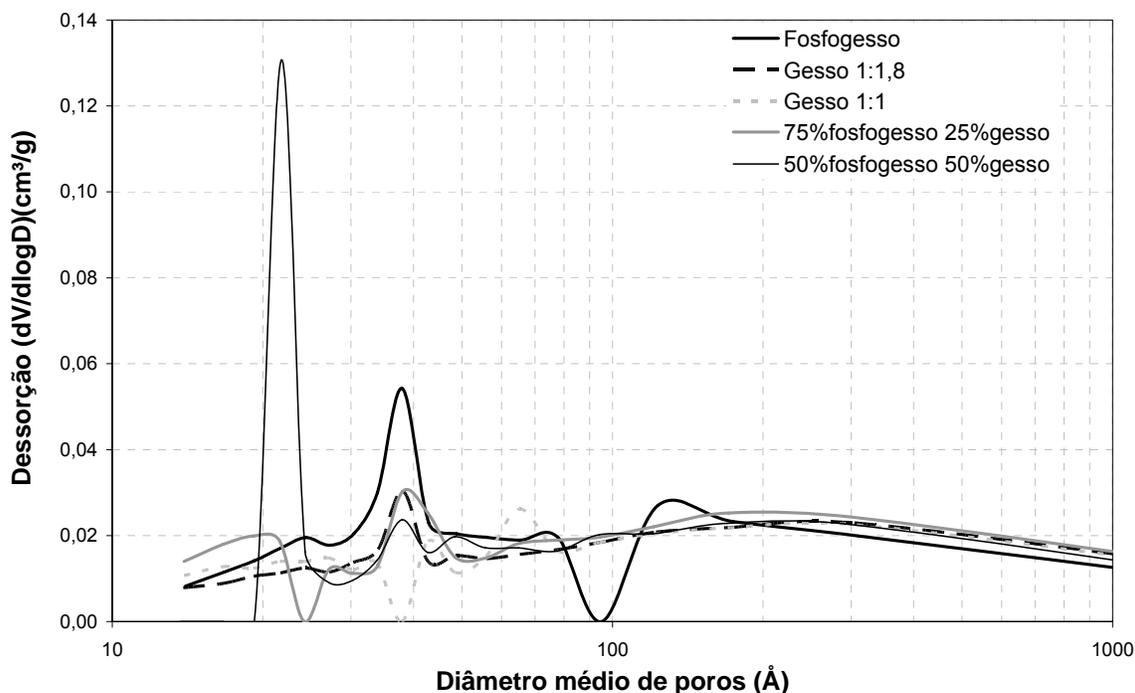


Figura 6.13 – Distribuição do diâmetro médio dos poros nas composições

Observa-se que as amostras apresentam diâmetro médio na faixa de mesoporos. A composição “E” (50% fosfogesso e 50% gesso) apresenta uma distribuição mais concentrada entre os diâmetros de 20 a 30 Å. Entretanto, a amostra confeccionada com fosfogesso (composição “A”) apresenta distribuição irregular de poros.

Vale a pena salientar que o ensaio de adsorção e dessorção física pelo Método BET é ideal para amostras meso-porosas (20 a 500 Å). Para completar os resultados, foi necessário realizar ensaios de porosimetria de mercúrio nas composições, com intuito de avaliar a macro-porosidade (diâmetro acima de 500 Å) das pastas.

As curvas das isotermas de adsorção e dessorção são apresentadas na Figura 6.14.

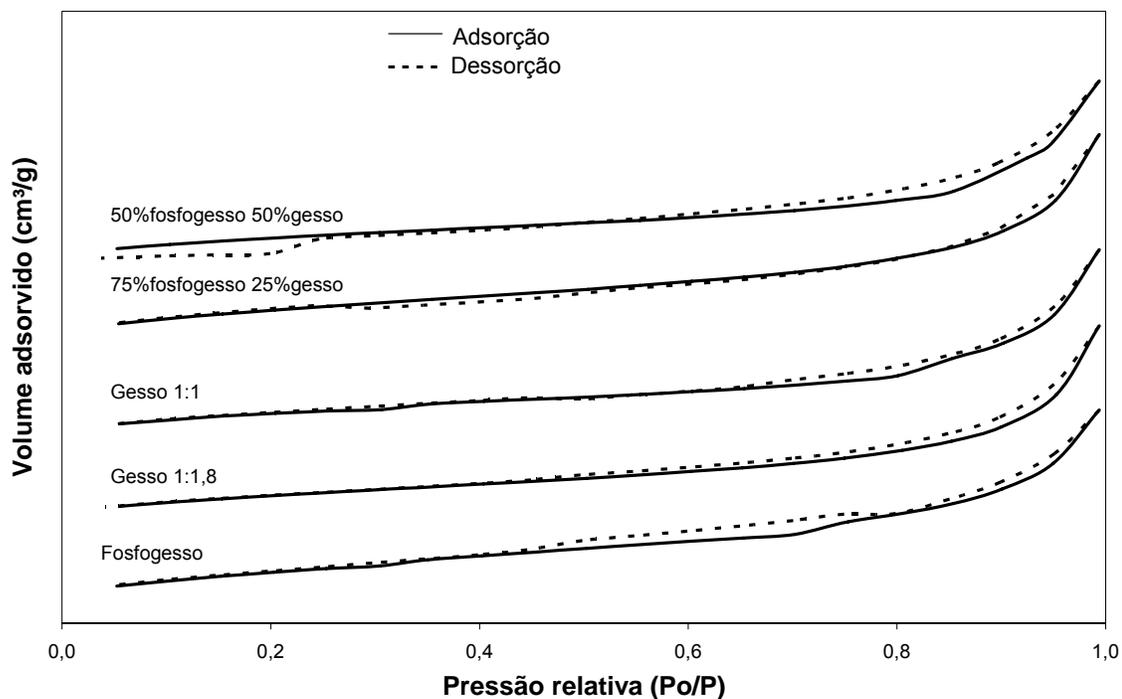


Figura 6.14 – Histereses das composições de fosfogesso e gesso

Verifica-se, pela Figura 6.14, a formação de histereses em todas as composições avaliadas. Pode-se dizer, com base em dados referenciados na literatura, que as histereses obtidas para as composições são típicas de amostras meso-porosas (entre 20 a 500 Å), cujos poros têm formato eminentemente cilíndrico.

6.2.2 Porosimetria de Mercúrio

Na Tabela 6.8, é possível observar os resultados da análise de porosimetria de mercúrio para as composições selecionadas, na idade de 28 dias.

Tabela 6.8 – Porosimetria de mercúrio para as composições

Composição³⁶	Massa da amostra (g)	Vol. Total de mercúrio introduzido (cm³/g)	Área total de poros (m²/g)	Diâmetro médio dos poros (µm)	Porosidade (%)
“A”	0,80	0,90	19,48	0,18	65,2
“B”	1,25	0,54	16,09	0,13	55,8
“C”	0,92	0,85	15,61	0,22	62,7
“D”	0,93	0,78	28,52	0,11	65,4
“E”	1,12	0,71	21,00	0,14	62,8

Ao analisar a Tabela 6.8 é possível observar que:

- a relação água/gesso e o tipo de material são fatores determinantes na porosidade final das composições. Como exemplo, pode-se observar através da Tabela 6.8 que a composição “C”, representada pela amostra confeccionadas com gesso 1:1, apresenta percentagem de porosidade de 62,7%, valor superior ao encontrado para a composição “B” (100% gesso, traço de 1:1,8), que foi de 55,8%;
- as composições “A”, “D” e “E”, contendo fosfogesso em suas misturas, também apresentaram elevados valores de porosidade.

Vale ressaltar que o ensaio de porosimetria de mercúrio é ideal para materiais com diâmetro de poros na faixa de macroporos, ou seja acima de 50 nm. As curvas de distribuição de diâmetro de poros para as composições de fosfogesso e gesso podem ser observadas através do gráfico de volume intrusido de mercúrio versus diâmetro médio de poros, exposto na Figura 6.15.

36

Composição “A” – 100% fosfogesso
 Composição “B” – 100% gesso, traço 1:1,8 (água:gesso)
 Composição “C” – 100% gesso, traço 1:1 (água:gesso)
 Composição “D” – 75% fosfogesso e 25% gesso
 Composição “E” – 50% fosfogesso e 50% gesso

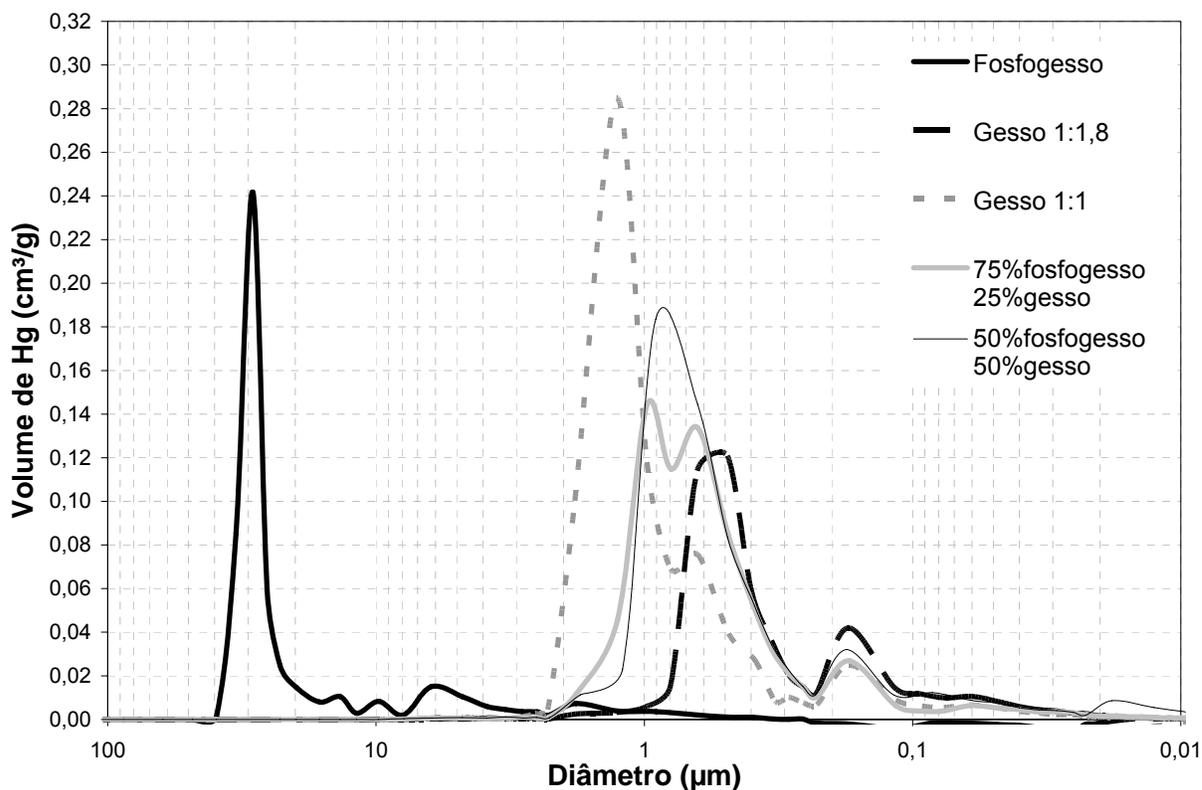


Figura 6.15 – Distribuição do diâmetro de poros nas composições

Na Figura 6.15, observar-se que a distribuição de diâmetros de poros foi afetada pelo fator água/gesso. A composição referenciada como “C”, confeccionada com gesso traço 1:1, apresentou uma faixa de porosidade entre 0,1 e 2,5 μm . Entretanto para a composição “B” (gesso traço 1:1,8) identificou-se os diâmetros dos poros entre 0,1 e 0,9 μm .

As composições “D” e “E” apresentaram resultados de distribuição de poros semelhantes, ambas dentro da faixa de 0,1 μm e 2 μm . É importante destacar que a composição “A” (100% fosfogesso) apresentou resultados elevados se comparada com as demais composições, atingindo uma faixa de diâmetro de poros entre 20 a 40 μm . A elevada porosidade apresentada pela composição “A” possivelmente contribuirá para a queda da resistência a compressão das argamassas confeccionadas com essa mistura.

6.2.3 Picnometria à Hélio (He)

A densidade real das composições selecionadas (Figura 6.16), foi obtida através da análise de picnometria à hélio, a partir da transformação das pastas sólidas em pó (trituração em cadinho apropriado através de soquete).

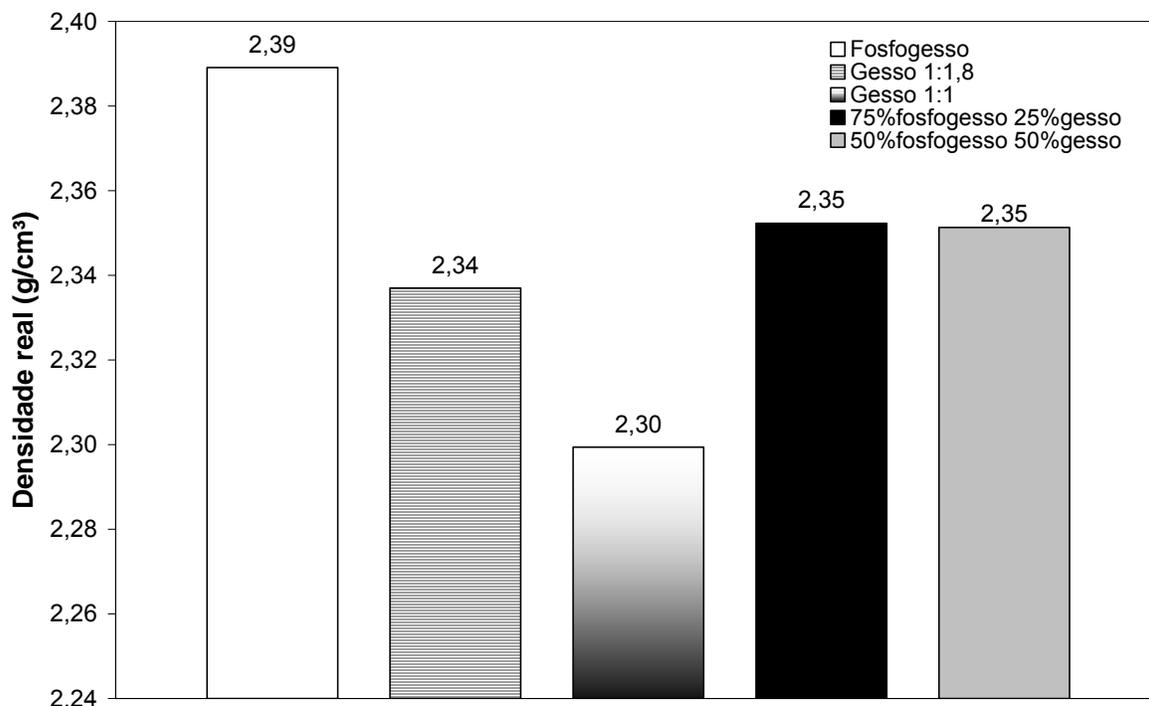


Figura 6.16 – Densidade real das composições de gesso e fosfogesso

Através do gráfico apresentado na Figura 6.16, é possível concluir que a densidade real das amostras, representativas das composições, têm valores muito próximos.

As composições que utilizaram o fosfogesso apresentam uma densidade real menor do que aquelas confeccionadas com o gesso, com valores de 2,39 g/cm³ para as amostras com 100% de fosfogesso (composição “A”) e 2,35 g/cm³ para as com 50% fosfogesso e 50% gesso (composição “E”).

6.2.4 Picnometria de Mercúrio (Hg)

Os resultados de picnometria de mercúrio podem ser observados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Picnometria de mercúrio das amostras de gesso e fosfogesso

Composição ³⁶	Peso amostra	Peso Hg	Peso Hg + amostra	Volume deslocado	Densidade volumétrica	Média (g/cm ³)
	(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	
“A”	1,03	437,95	438,98	1,30	0,79	0,75
	0,26	438,05	433,55	0,35	0,75	
	0,15	438,01	435,27	0,22	0,71	
“B”	0,14	437,93	436,44	0,12	1,16	1,15
	0,42	438,42	433,65	0,39	1,10	
	1,63	438,20	421,65	1,35	1,20	
“C”	0,26	437,66	433,75	0,31	0,84	0,85
	1,20	438,33	420,92	1,38	0,87	
	0,13	437,95	435,95	0,16	0,83	
“D”	0,16	438,07	435,70	0,19	0,84	0,85
	0,19	437,40	434,60	0,22	0,85	
	1,65	437,81	413,39	1,94	0,85	
“E”	0,41	437,43	432,56	0,39	1,04	1,01
	0,20	438,45	435,92	0,20	0,99	
	1,46	437,30	419,61	1,42	1,02	

Observa-se que a média dos valores encontrados para densidade aparente da composição “A” (100% fosfogesso) é de 0,75 g/cm³, valor menor do que o encontrado para a composição “B” (gesso, traço 1:1,8), que é de 1,15 g/cm³ (Tabela 6.9).

Conforme apresentado na Tabela 6.9, a composição “C” (gesso traço 1:1) resultou em uma amostra com menor valor de densidade volumétrica se comparada com a composição “B” (gesso, traço 1:1,8), devido ao elevado fator água/gesso. Apesar da composição “E” apresentar diâmetro médio de poros maior que a composição “D” (Tabela 6.8), a sua massa unitária é maior.

6.2.5 Microscopia eletrônica e EDS

As fotomicrografias das amostras representativas das composições avaliadas, na idade de 28 dias com aumento de 30x, podem ser avaliadas através da Figura 6.17.

A partir da Figura 6.17, observa-se que a porosidade varia nos produtos que contém ou não o fosfogesso. As composições contendo fosfogesso apresentam uma maior porosidade e uma superfície mais irregular conforme mostrado nas Figura 6.17a, 6.17d e 6.17e, quando comparada com as amostras à base de gesso (Figura 6.17b e Figura 6.17c).

O teor de água utilizado nas composições também influencia a porosidade das pastas endurecidas. As amostras de gesso 1:1 (composição “C”) apresentam uma maior porosidade, na medida que seu traço possui maior proporção de água que o gesso proporcionado no traço 1:1,8 (composição “B”). Como já foi observado anteriormente, o fator água/gesso é proporcional a porosidade, ou seja, com o aumento do fator água/gesso há um aumento da porosidade das amostras. A alta porosidade (vide Tabela 6.8) afeta diretamente a resistência mecânica dos produtos confeccionados com o uso de fosfogesso beneficiado.

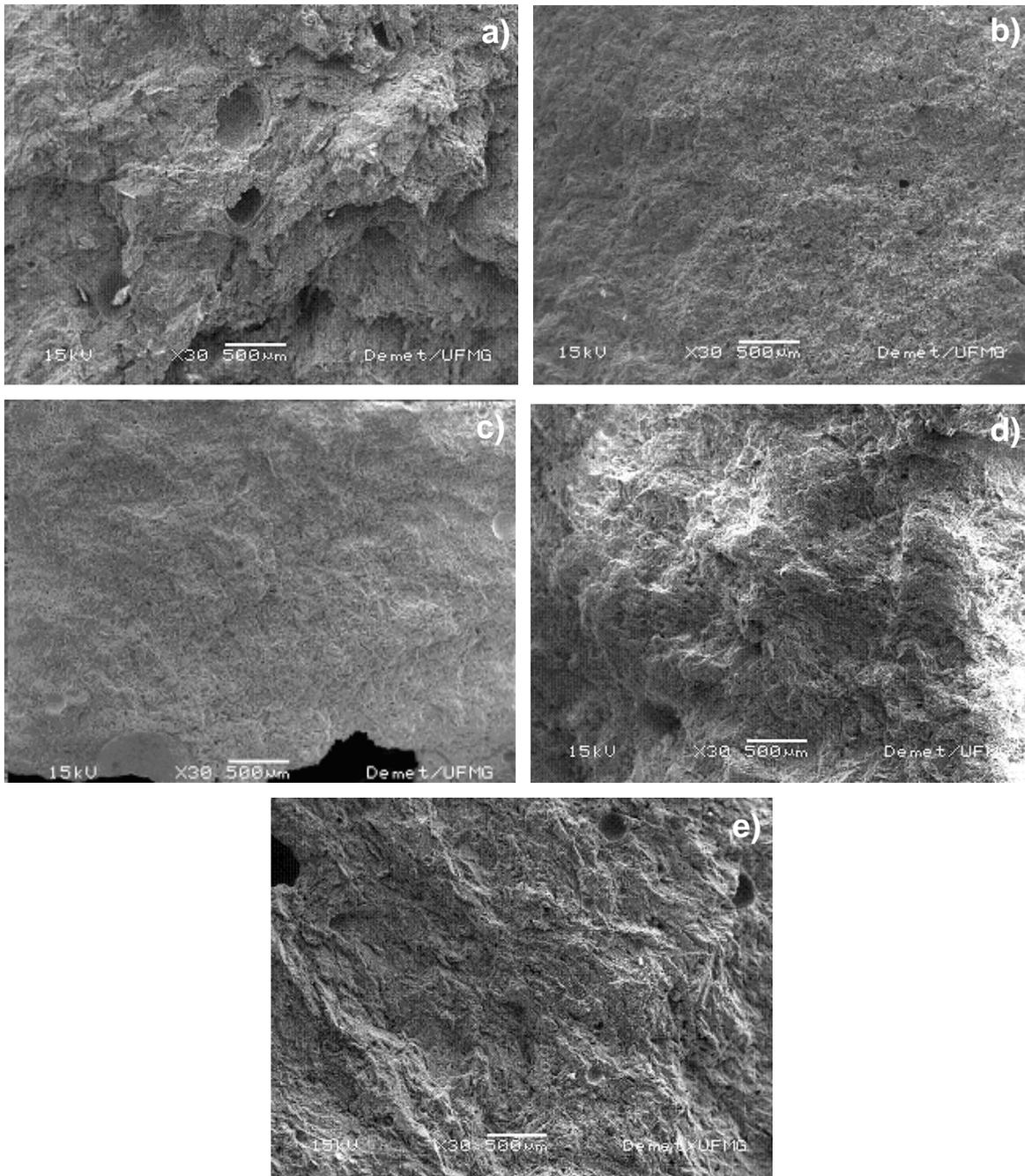


Figura 6.17 - Fotomicrografias das composições (aumento de 30x)

(a) 100% fosfogesso (b) 100% gesso 1:1,8, (c) 100% gesso 1:1

(d) 75% fosfogesso e 25% gesso (e) 50% fosfogesso e 50% gesso.

Na Tabela 6.10 é apresentado o resultado da espectrometria dispersiva em energia (EDS) sobre a totalidade das áreas das microfotografias analisadas e apresentadas na Figura 6.17 .

Tabela 6.10 – Resultado de EDS para as composições

Elemento	Fosfogesso (%)	Gesso 1:1,8(%)	Gesso 1:1 (%)	75% fosfogesso 25% gesso (%)	50% fosfogesso 50% gesso (%)
O	31,73	33,55	36,84	33,89	34,71
Si	0,49	-	-	0,56	0,44
P	1,08	-	-	0,95	0,91
S	28,19	28,23	26,33	27,83	27,76
Ca	38,50	38,22	36,83	36,78	36,18
Total	100	100	100	100	100

Pode-se notar a presença de fósforo e silício em baixos teores nas composições contendo fosfogesso, diferentemente das amostras com 100% gesso, fato que confirma assim as análises químicas realizadas com o material aglomerante, apresentadas na Tabela 6.4.

A morfologia das argamassas obtidas a partir das fotomicrografias (aumentos de 1100, 1200 e 1500 x) são apresentadas nas Figuras 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21, respectivamente.

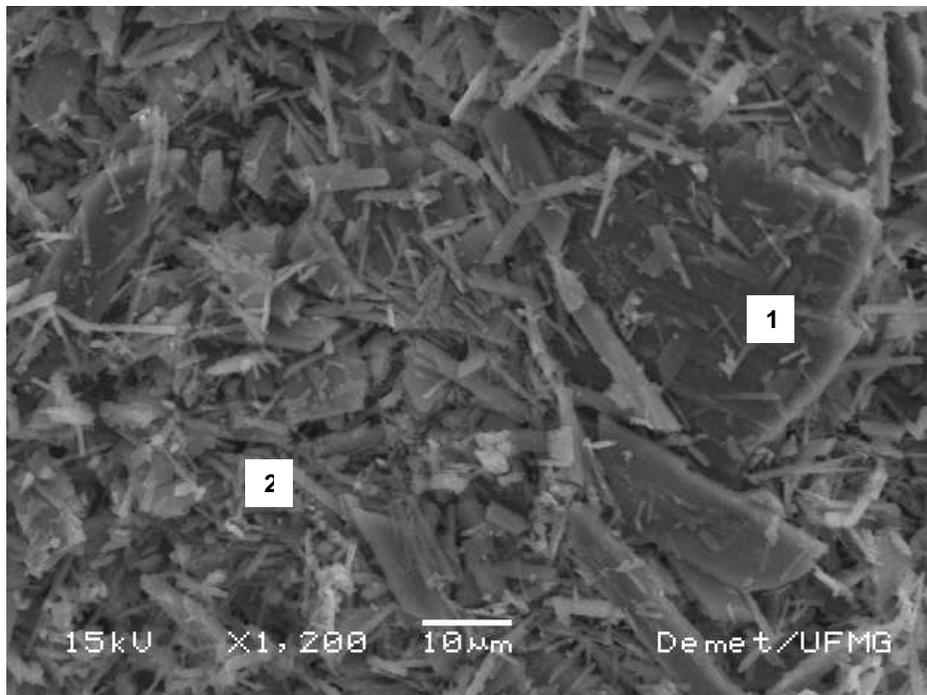


Figura 6.18 – Fotomicrografia 100% fosfogesso (aumento de 1.200x)

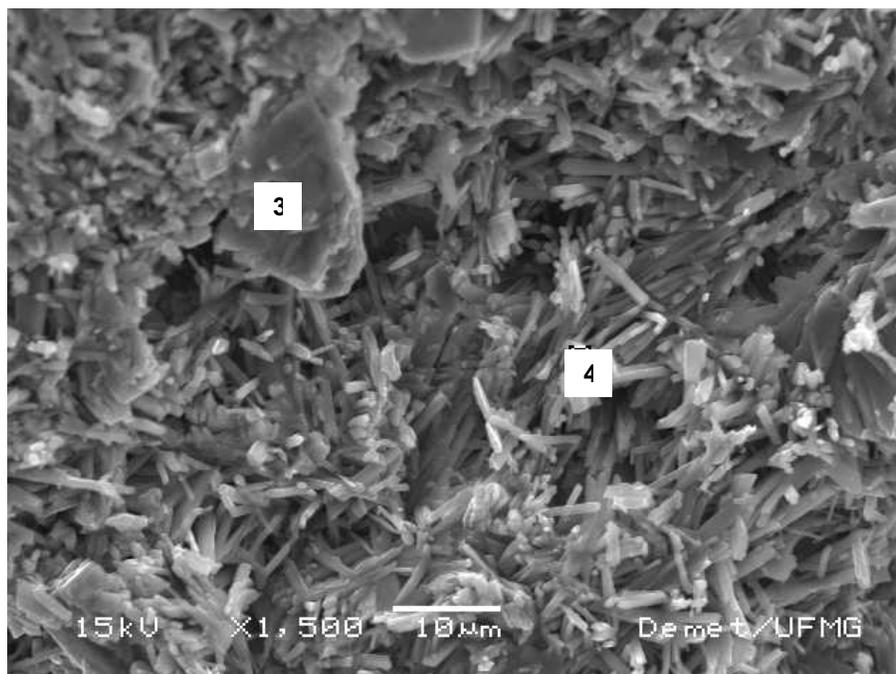


Figura 6.19 – Fotomicrografia gesso traço 1:1,8 (aumento de 1.500x)

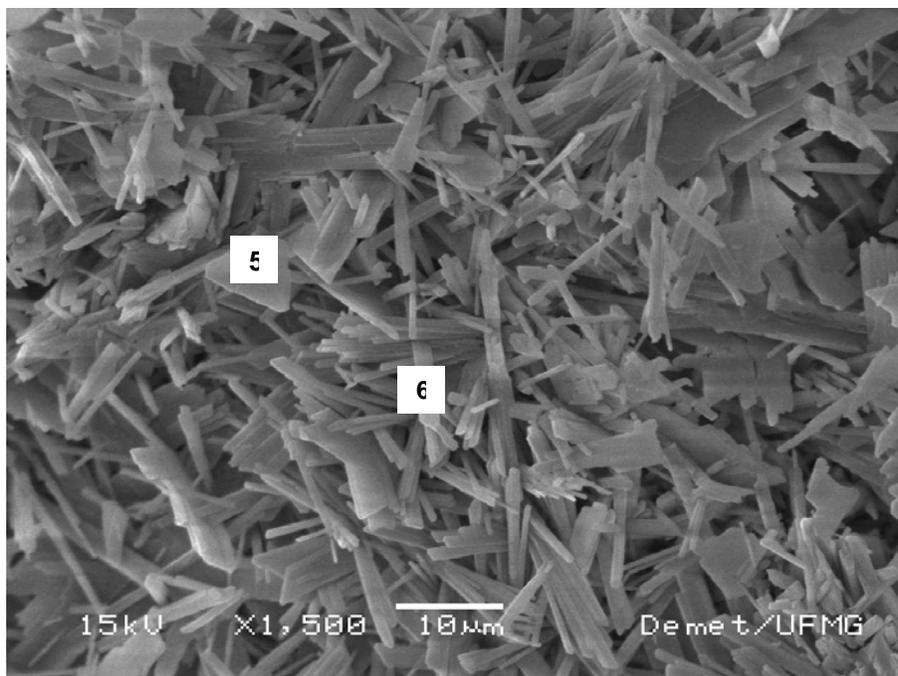


Figura 6.20 – Fotomicrografia gesso traço 1:1 (aumento 1500x)

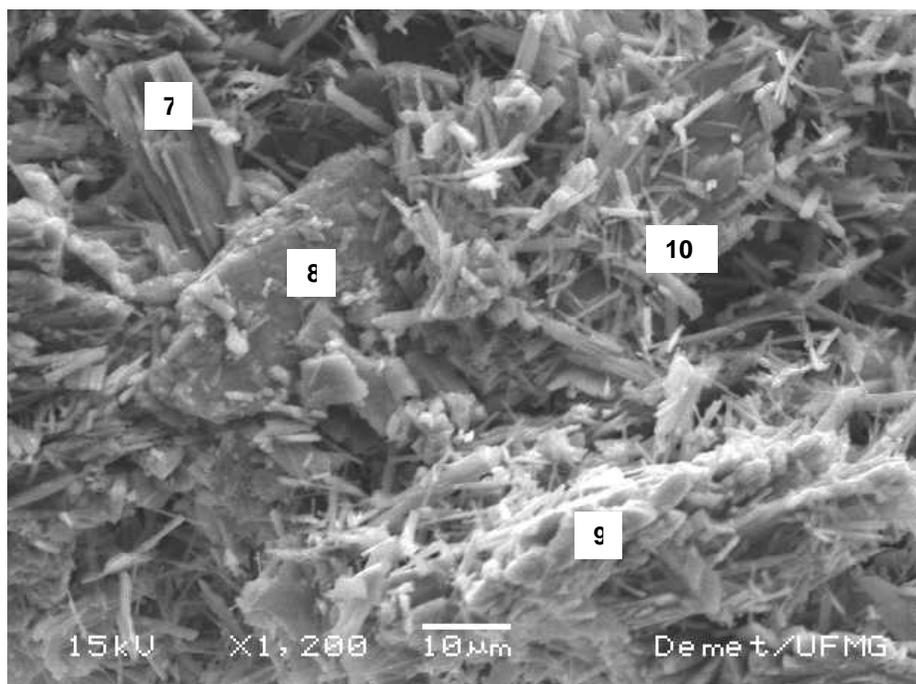


Figura 6.21 - Fotomicrografia 75% fosfogesso 25%gesso (aumento 1200x)

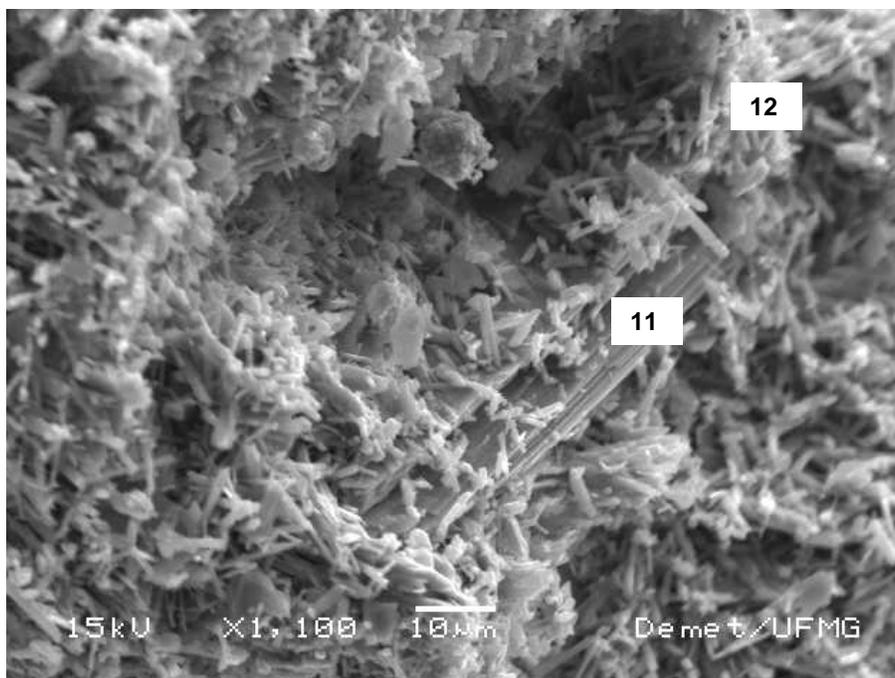


Figura 6.22 –Fotomicrografia 50% fosfogesso 50% gesso (aumento 1100x)

As amostras de gesso e de fosfogesso são compostas de cristais nas formas de bastões e agulhas inter cruzadas, que são formados no processo de hidratação da bassanita e são responsáveis pela coesão da massa (Figura 6.18 a Figura 6.22).

Pode-se observar nas Figuras 6.19 e 6.20, com o aumento de 1500x, que os cristais de di-hidratos para o mesmo material apresentam morfologia e tamanho diferenciado devido a diferença de traço. Para o gesso com traço 1:1,8 houve um crescimento rápido dos cristais e em maior numero por unidade de volume, já o gesso com traço 1:1 houve um crescimento lento dos cristais, favorecendo, assim a formação de cristais mais grossos.

Vale a pena salientar que a morfologia dos cristais vai definir as propriedades mecânicas das composições, como já foi citado anteriormente (item 4.1.6.5). Nestas situações, as propriedades mecânicas são reduzidas quando o arranjo cristalino é formado por cristais mais grossos (HINCAIPÉ e CINCOTTO, 1997). Mesmo com um menor aumento é possível observar que as amostras

confeccionadas com uso de fosfogesso também apresentam a formação de cristais maiores (Figuras 6.18, 6.21 e 6.22).

Os resultados das análises pontuais, via EDS, são apresentados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Análises pontuais de EDS nas composições

Elemento	Pontos (%)										
	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12
O	12,75	23,61	19,43	37,82	29,77	34,95	39,36	37,44	39,89	36,77	30,36
Si	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	-	1,11	-	-	-	1,16	1,21	0,92	0,88	-	0,95
S	36,64	31,38	35,01	27,28	29,02	29,48	27,42	28,13	26,70	27,58	30,39
Ca	50,61	43,90	45,56	34,89	40,21	34,41	32,01	33,52	32,53	35,65	38,30
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Na Tabela 6.11 observa-se a incidência do elemento fósforo nas amostras a base de fosfogesso. As porcentagens dos elementos dos pontos analisadas variaram conforme a mistura confeccionada.

Os resultados das análises de EDS atestam e confirmam as análises anteriormente realizadas, através dos ensaios de análise química (Tabela 6.4) e fluorescência de raios X (Tabela 6.5).

6.3 Consistência Normal

Através dos ensaios de consistência normal foi possível obter o traço ideal para as composições selecionadas no trabalho, conforme mostrado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Consistência normal para as misturas de gesso e fosfogesso

Composição	Traço	Penetração (mm)	Fator água/gesso	Composição (peso seco)		
				Água (ml)	Gesso (g)	Fosfogesso (g)
“A”	1 ^(a) :1 ^(g) *	29	1,00 ^(a/g) **	342,86	-	342,86
“B”	1:1,8	31	0,56	279,07	502,33	-
“C”	1:1	-	1,00	342,86	342,86	-
“D”	1:1,2	32	0,77	324,33	97,30	291,89
“E”	1:1,3	30	0,83	315,89	205,32	205,32

*a:g – água:gesso

**a/g – água/gesso

Inúmeros ensaios foram realizados objetivando encontrar, tal como recomendado pela metodologia de ensaio proposta pela norma NBR 12128/91 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta*, o correto proporcionamento entre a água e o gesso, obtendo-se o traço de 1:1,8, cuja mistura é considerada muito rica em gesso. Vale a pena ressaltar que, na embalagem do produto é especificada e recomendada a proporção de 1:1,33 (água:gesso), valor diferente do resultado obtido no trabalho, que foi de 1:1,8 (água:gesso).

A partir do trabalho realizado, foi possível extrair importantes informações, de cunho prático, acerca do uso e manipulação, em laboratório, do gesso produzido no Brasil. Dentre elas destaca-se:

- o gesso em pó sofre interferência da umidade relativa do ar, acarretando em alterações nas propriedades físicas em função da reação com a água. De modo a evitar essas alterações e garantir uma maior homogeneidade do produto, sua embalagem deve ser mantida fechada e em ambiente com umidade relativa do ar em torno de $65 \pm 5\%$;

- a ausência, na embalagem do gesso, de informações técnicas, mínimas e necessárias, para a sua correta utilização.

Como forma de comparar os resultados apresentados em bibliografias referentes ao gesso (SATO *et al*, 2001; HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997; CINCOTTO *et al*, 1985c) bem como entre os materiais analisados nesse trabalho, o gesso e o fosfogesso, corpos de prova foram confeccionados a partir de um novo traço escolhido, na proporção de uma parte de água para uma de gesso (composição “C”). Entretanto, devido ao estado líquido da mistura confeccionada com esta proporção, na etapa de moldagem da pasta foi necessária a espera de 5 minutos a mais que o tempo estipulado em norma, para conseguir moldar o material. Observa-se que para o novo traço 1:1 (água:gesso) não foi levada em consideração as prescrições normativas da NBR 12128 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991B).

6.4 Tempos de Pega

Os tempos de início e fim de pega encontrados foram expressos pela média de duas determinações realizadas sobre as composições selecionadas (Tabela 6.13).

Tabela 6.13 – Tempo de pega das composições de fosfogesso e gesso

Composições	Traço	Início de pega (minutos)	Fim de pega (minutos)
100% fosfogesso	1:1,0	9' 30"	9360' 00"
100% gesso	1:1,8	6' 30"	12' 30"
100% gesso	1:1,0	13' 00"	22' 00"
75% fosfogesso 25% gesso	1:1,2	8' 00"	17' 00"
50% fosfogesso 50% gesso	1:1,3	7' 00"	13' 00"

No caso do gesso de pega rápida, a norma NBR 13207- *Gesso para construção civil* (ABNT, 1994) propõe que o tempo de início de pega deve estar compreendido

entre 4 e 10 minutos, e o fim de pega entre 20 a 45 minutos. Já no caso do gesso de pega lenta a prescrição é de início de pega maior que 10 minutos, e o fim de pega maior que 45 minutos.

Através dos resultados observados na Tabela 6.13, é possível concluir que:

- o tempo de início de pega obtido na composição “C” (100% gesso com água/gesso de 1:1) foi de 13 minutos, valor acima do proposto para gesso de pega rápida de acordo com a NBR-13207. Para as demais composições, o tempo de início de pega se situou dentro da faixa normalizada, que é de 4 a 10 minutos;
- o fim de pega das composições testadas foram inferiores ao valor máximo recomendado pela norma proposto NBR-13207, exceto no caso da composição “A” (100% fosfogesso), cujo valor atingiu 6 dias e 12 horas (9360 minutos), bem acima do tempo proposto pela citada norma;
- o início e fim de pega das composições “B” e “E” são semelhantes, indicando que misturas que sejam desenvolvidas a partir da substituição parcial do gesso por fosfogesso beneficiado é viável, no que tange a quesitos de moldabilidade e produção de artefatos. É oportuno frisar que a composição “B” (100% gesso) é considerada pelo mercado como uma mistura que atende às necessidades dos fabricantes de artefatos e pré-fabricados, bem como dos aplicadores em revestimento interno de paredes.

Vale a pena salientar o fato de, no decorrer do processo de mistura das pastas e conseqüente moldagem dos corpos de prova (pasta no estado fresco), foi observada uma melhoria na consistência e trabalhabilidade das mesmas quando utilizou-se o gesso como matéria prima. Esse fato, se dá devido as características do aglomerante gesso, que possui uma menor área superficial específica; menor densidade e massa específica real e, finalmente, precipita a formação de cristais di-hidratados com dimensões reduzidas.

6.5 Ensaio de Resistência à Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova cúbicos, obtidos através das composições, nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, podem ser analisados através da Tabela 6.14. Para este ensaio foram avaliados 6 corpos de prova para cada composição, sendo que os valores referenciados na tabela foram obtidos a partir da média aritmética de 2 resultados.

Tabela 6.14 – Resistência à compressão axial das composições

Dias	Fosfogesso		Gesso1:1,8		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.

Os valores de resistência média a compressão versus idade podem ser melhor visualizados nos gráficos apresentados nas Figura 6.23 e 6.24.

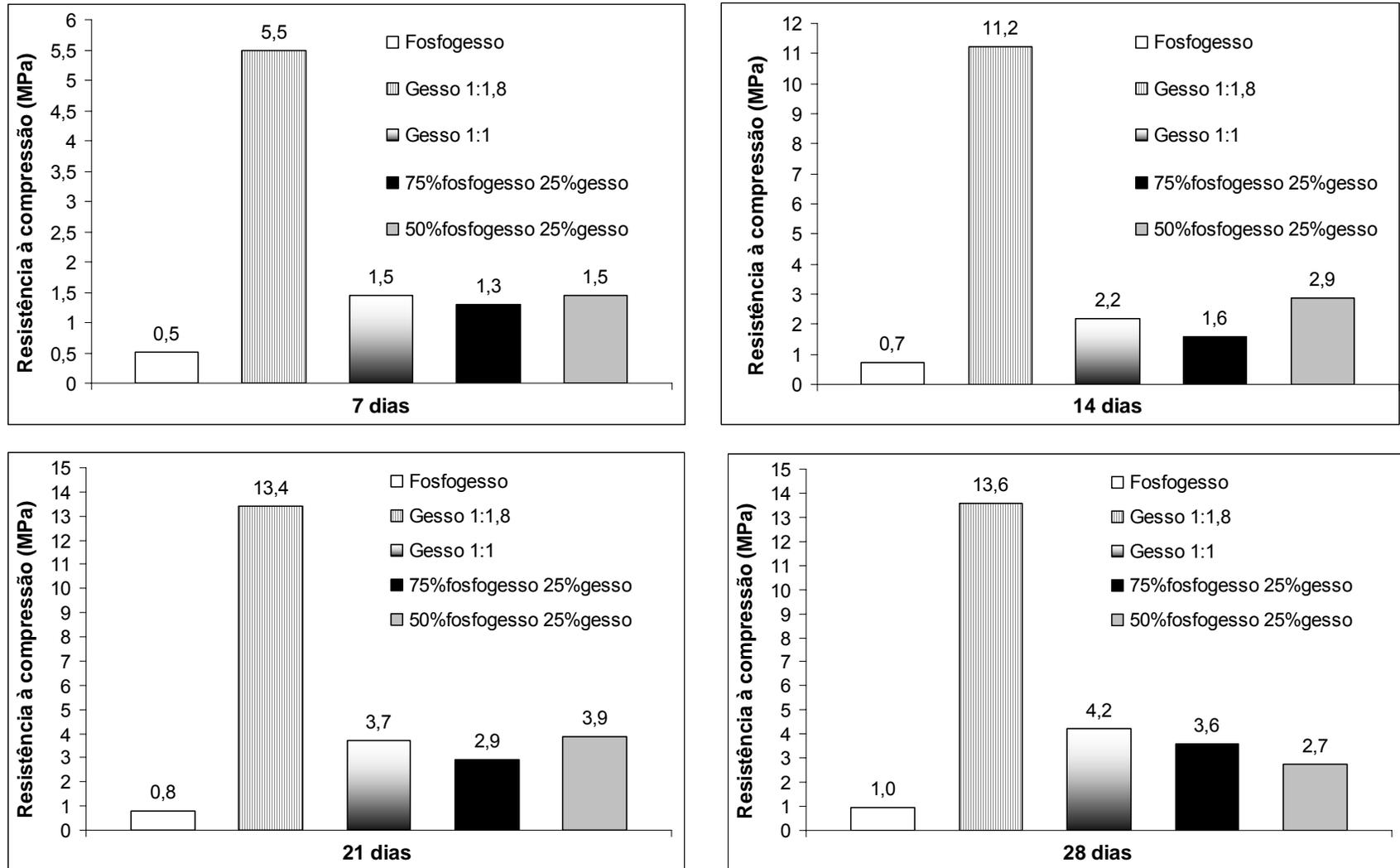


Figura 6.23 –Resistência a compressão nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias

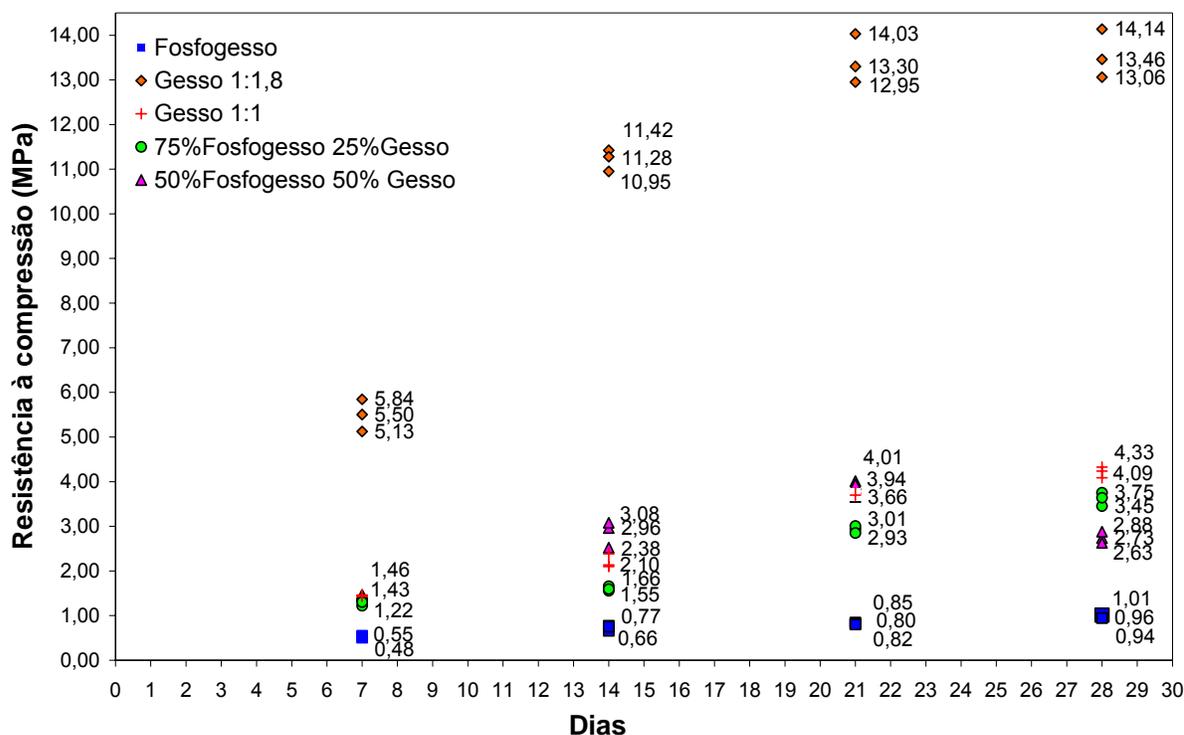


Figura 6.24 – Gráfico de resistência a compressão dos CPS

A partir dos gráficos de resistência a compressão é possível observar que:

- a composição “B” (gesso traço 1:1,8) apresentou o melhor resultado de resistência a compressão, alcançando o valor de 13,6 MPa aos 28 dias, atestando assim a boa resistência mecânica proporcionada pelo gesso frequentemente utilizado na indústria da construção civil. O alto consumo de gesso utilizado nesta composição foi um fator importante para os bons resultados alcançados de resistência à compressão. Confirmando este fato, os corpos de prova confeccionadas com a composição “C” (gesso, traço 1:1) resultaram em uma média de compressão de 4,2 MPa na idade de 28 dias;

- nenhuma composição avaliada nos ensaios de resistência à compressão, exceto a composição “B” (gesso, traço 1:1,8), atingiu a resistência superior a 8,4 MPa para idade de 28 dias, exigida pela norma NBR 13207– *Gesso para construção civil* (ABNT, 1994);

- a composição “E” apresentou uma redução na resistência à compressão entre a idade de 21 dias e 28. Tal fato, foi motivado pela presença de fungos à superfície dos corpos de prova (Figura 6.25).

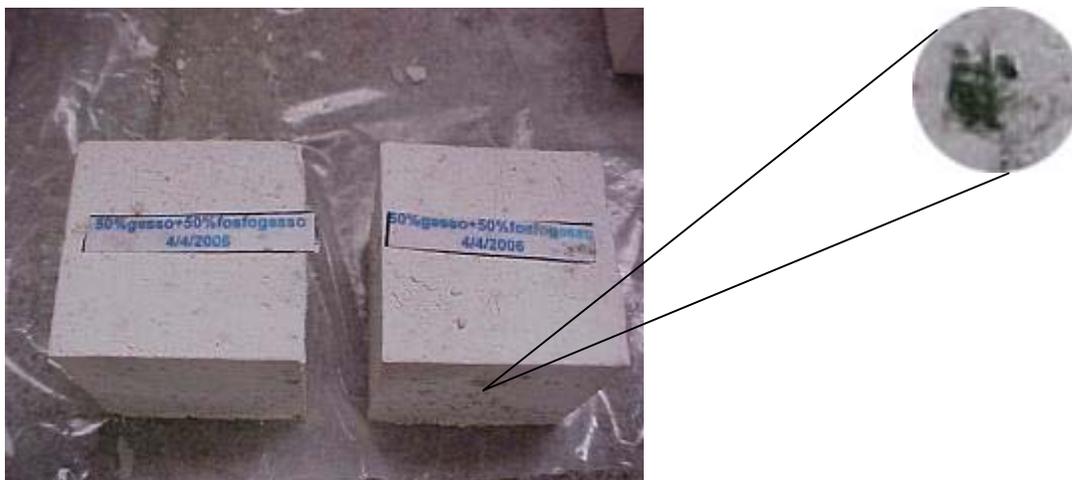


Figura 6.25- Fungos nos CPS com 50% fosfogesso e 50% gesso

A presença de fungos pode explicar o aumento da porosidade na superfície dos corpos de prova confeccionados com a composição “E” e, por conseqüência, a redução da resistência à compressão aos 28 dias. Por este fato, novos corpos de provas foram moldados a partir do uso de um aditivo fungicida, aplicado sobre a superfície dos corpos de prova, minimizando a nociva influência do fungo na resistência à compressão. O fungicida utilizado é a base de um saponáceo, proporcionado em 1 ml de fungicida para 10 ml de água.

Os novos resultados de resistência à compressão para os corpos de prova confeccionados a partir da composição “E”, rompidos aos 28 dias, podem ser observados na Figura 6.26.

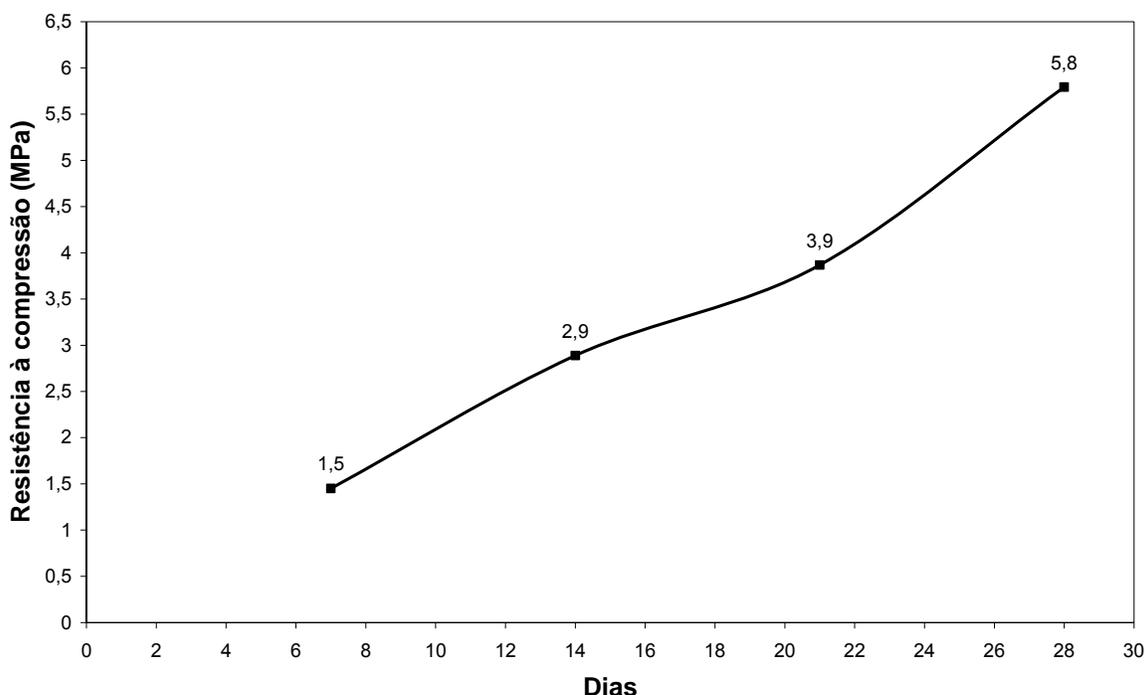


Figura 6.26 – Resistência a compressão mistura “E” com uso de fungicida

Preliminarmente, o uso do fungicida impediu que ocorresse a queda na resistência dos corpos de prova entre 21 e 28 dias. Na Figura 6.26 foi possível verificar que a média da resistência para 3 CPS na idade de 28 dias foi de 5,8 MPa.

A partir da realização do ensaio de consistência normal da pasta no estado fresco das misturas preliminarmente selecionadas, e em função destes resultados que indicavam menores valores de relação água/gesso, foi necessário avaliar o comportamento mecânico, expresso pela análise da resistência à compressão, do gesso na dosagem proposta pelo fabricante e impressa na embalagem do produto.

Assim sendo, foram moldados corpos de prova de uma mistura, referenciada como “F” contendo água e gesso na proporção de 1 : 1,33, e cujos resultados são apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Resultado ensaio de compressão axial composição “F”

Composição “F” 1 : 1,33	Resistência à compressão	
	Carga (KN)	Tensão (MPa)
Idade 28 dias	21,13	8,50
	20,95	8,50
	21,57	8,60

Conclui-se, a partir da Tabela 6.15, que a resistência média (8,5 MPa) auferida pelo gesso na mistura indicada pelo fabricante, e na idade de 28 dias, é superior ao valor mínimo exigido pela norma brasileira, no caso 8,4 MPa.

Uma solução que pode viabilizar a utilização de inúmeras misturas proporcionadas com fosfogesso beneficiado e gesso, é através do uso de aditivo redutor de água, que implicaria na redução da quantidade de água demandada às misturas, e por conseqüência aumentaria as resistências à compressão, sem interferência na sua moldabilidade e trabalhabilidade. Tal estudo poderá ser objeto de um trabalho futuro.

6.6 Ensaio de Dureza

Os resultados do ensaio comparativo de dureza para as composições de fosfogesso e gesso podem ser observados na Tabela 6.16.

É possível efetuar um comparativo entre o diâmetro das impressões registradas na superfície dos corpos de prova pelo durômetro Zörn e os valores correspondentes das durezas propostas pela NBR- 12129 (ABNT, 1991).

Tabela 6.16 – Resultados dos ensaio de dureza realizado.

Composição	Traço (água:gesso)	Diâmetro da impressão (mm)	*Dureza (N/mm ²)
100% fosfogesso	1:1	12,0	11,0
		11,0	
		11,0	
100% gesso	1:1,8	2,4	48,0
		2,8	
		2,6	
100% gesso	1:1	4,8	25,9
		5,1	
		4,8	
100% gesso	1:1,33	4,1	31,0**
		4,1	
		4,0	
75% fosfogesso e 25% gesso	1:1,2	6,8	19,0
		6,4	
		6,7	
50% fosfogesso e 50% gesso	1:1,3	4,6	27,4
		4,6	
		4,7	

* valor médio obtido a partir da correlação entre o teste de dureza Zörn e a NBR 13207

**valor obtido pelo fabricante

A composição “A” (100% fosfogesso), apresentou uma dureza média de 11 N/mm², valor considerado muito abaixo do valor exigido por norma que é de 30N/mm, inviabilizando assim a sua utilização como material de revestimento, divisória e blocos aplicáveis à construção civil.

Já os corpos de prova da composição “E” (50%fosfogesso e 50%gesso e traço 1:1,3), apesar de apresentar um resultado, por comparação, ainda abaixo do valor recomendado pela norma (27,4 N/mm²), tem potencial de utilização, sobretudo, se

comparado com o resultado da composição “C”, constituída eminentemente à base de gesso e proporcionado em mistura de 1 parte de água para 1 de gesso, que apresentou um valor de dureza inferior (25,9 N/mm²).

Outro fato que reforça a idéia de que misturas de fosfogesso com o gesso natural são viáveis à aplicação em revestimentos e blocos, a partir da especificação mínima de dureza exigida pela norma brasileira, é encontrado no tardo da embalagem de gesso fabricado no Brasil e utilizado neste trabalho, no caso o Qualigesso 30, que recomenda a seguinte dosagem e proporção (“in verbis”): *“dosagem: aproximadamente 30 litros de água para 40 kg de gesso”*.

Desta forma, é notório que a embalagem induz o consumidor a utilizar uma mistura na proporção água/gesso (1:1,33) que irá gerar uma pasta, no estado fresco, menos consistente, e por que não dizer, mais fluida. Vale a pena ressaltar a dificuldade de se utilizar a mistura proposta e impressa na embalagem, fato que inviabiliza a aplicação do gesso tanto como revestimento (dificuldades de lançamento), quanto como artefatos (dificuldade na moldagem).

7 CONCLUSÃO

No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões extraídas deste trabalho, que focou a análise e viabilidade da substituição do gesso pelo resíduo fosfogesso como material de construção.

Entender e conhecer a microestrutura do gesso, do fosfogesso, bem como de produtos derivados, é importante chave para a compreensão das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Desta forma, a etapa de caracterização apresentada neste trabalho foi fundamental para a análise crítica conclusiva.

Os resultados obtidos nesse estudo são válidos apenas para o fosfogesso gerado através do processo di-hidratado e a partir das metodologias adotadas, e permite concluir que, é possível ser utilizado como material de construção, sobretudo na fabricação de blocos, placas de vedação e rebaixo de tetos, argamassas, etc.

A partir da caracterização micro-estrutural realizada, foi possível concluir:

- o fosfogesso beneficiado e “in natura” têm composição semelhante ao gesso tradicional de pega rápida consumido pela indústria da construção civil. A pequena diferença registrada deve-se a presença de resquícios de elementos químicos no fosfogesso, sobretudo fósforo e os ditos “terras raras”;
- as impurezas (Ce, Ti, La, Sr, Zr, Pr) presentes no fosfogesso, por serem de baixo teores, possivelmente não irão interferir na qualidade do produto final à base de fosfogesso. Já no caso do elemento fósforo presente, poderá alterar algumas das propriedades de possíveis produtos e artefatos confeccionados a partir do uso de fosfogesso, como é o caso específico do cimento;
- a partir dos resultados obtidos através das análises térmicas (TG e DTA) das amostras foi possível observar a presença de grande concentração de água livre nas amostras de fosfogesso “in natura”, e desta forma, viabilizou-se estabelecer a temperatura ideal para efetuar o seu beneficiamento e desidratação. É importante

ressaltar que, a partir de um correto beneficiamento (peneiramento e desidratação), o fosfogesso adquire propriedades que o torna tecnicamente viável à ser utilizado como material na construção civil em substituição do gesso de pega rápida;

- o resultado de granulometria a laser atestou que os materiais estudados, gesso, fosfogesso “in natura” e beneficiado, são finos, todo ele abaixo de 100 μm . Já na adsorção física (Método BET) foi possível observar que a área superficial específica do gesso é aproximadamente quatro vezes menor que a do fosfogesso;

- nos ensaios de difração de raios X pode-se observar que após a desidratação do fosfogesso este passa a ter mineralogia semelhante a do gesso, caracterizado pela presença marcante do mineral sulfato de cálcio hemidratado (bassanita);

- a partir da análise das fotomicrografias de MEV observa-se que a morfologia apresentada pelas partículas de fosfogesso, tanto beneficiado como “in natura”, é similar às apresentadas pelo gesso de pega rápida. Visualizou-se também a existência de água adsorvida na superfície somente nas partículas de fosfogesso “in natura”. No que se refere às amostras obtidas a partir das composições selecionadas, foi possível visualizar a formação dos cristais di-hidratados, bem como observar o nível de porosidade das mesmas, que indicou uma tendência: amostras mais porosas propiciaram menores resistências e durezas. Pode-se dizer que a porosidade das amostras é influenciada pelo tipo de material e pela proporção de água e gesso utilizada na mistura;

- o teste de consistência normal, realizado em cada uma das composições estudadas, conduziu à diferentes relações de proporcionamento entre a água e o gesso. Tal fato reforça a tese de que, comumente, existe um único traço ideal para a relação água/gesso, e que é fortemente influenciado pelo tipo de aglomerante utilizado;

- através dos ensaios de tempo de pega constatou-se que composições contendo 100% de fosfogesso beneficiado não são adequadas para uso na fabricação de

artefatos e em revestimento de paredes, devido ao elevado tempo requerido pela pasta para atingir o fim de pega. Entretanto, pequenos percentuais de substituição do fosfogesso pelo gesso de pega rápida proporciona um tempo de fim de pega dentro da faixa recomendada pela normalização e pelo mercado consumidor;

- em relação ao comportamento das pastas, no estado fresco, foi observado que as pastas confeccionadas com uso do gesso de pega rápida apresentaram uma melhor consistência e trabalhabilidade se comparada com àquelas que continham o fosfogesso em sua mistura, entretanto, tal fato não inviabiliza a sua utilização;

Os ensaios de resistência à compressão axial e dureza foram primordiais na definição clara se as composições estudadas, com e sem fosfogesso, podem ser aplicáveis na construção civil. De uma forma geral, à luz das recomendações normativas brasileiras, conclui-se que:

- o comportamento de misturas contendo somente gesso e outras com substituição por fosfogesso, foram semelhantes, indicando a viabilidade do uso do fosfogesso beneficiado como matéria prima a ser utilizada na fabricação, por exemplo: de peças pré-moldadas; blocos de alvenaria; divisórias; painéis acartonados e placas de rebaixo de teto.

Com relação às conclusões extraídas a partir da revisão de literatura realizada foi possível constatar que:

- com base nos dados obtidos através da revisão bibliográfica realizada no presente trabalho, é importante salientar que a presença de radionuclídeos tanto no fosfogesso “in natura” como beneficiado, encontra-se dentro do nível prescrito pelas agências de radioproteção (CNEN, CDTN, etc). Portanto não apresenta riscos de contaminação por radioatividade para os usuários, manipuladores, etc. Entretanto, trabalhos e medições devem ser realizadas como forma de avaliar o seu comportamento radioativo quando sob a forma de blocos, placas e revestimentos utilizados na construção civil;

- em relação à necessidade de regulamentação, por parte dos órgãos ambientais (FEAM, CETESB, etc), com foco no licenciamento do uso do fosfogesso como material de construção, deverá ser levado à termo pelas empresas geradoras do resíduo, e que deverá envolver, necessariamente, outras pesquisas e trabalhos específicos. Este trabalho inevitavelmente irá passar pela avaliação do impacto ambiental gerado no entorno das pilhas de fosfogesso localizadas próxima à geração, efetuando medições do nível de radioatividade local, da lixiviação no solo, contaminação lençol freático, etc, além dos trabalhos específicos a serem realizados na unidade de beneficiamento do fosfogesso “in natura”, cujo projeto e “lay out” também deverão ser objetos de especificações e de detalhamento específico, com a possibilidade de geração de patentes;

- os produtores e distribuidores brasileiros de gesso, de pega rápida e lenta, não fornecem nas suas sacarias, “home-page”, catálogos ou através de qualquer outro meio de comunicação, informações técnicas detalhadas dos produtos por eles fabricados. Tal fato ficou evidenciado durante a revisão bibliográfica realizada, ocasião em que, na maioria das vezes, nenhum representante legal destas empresas estava habilitado a fornecer qualquer tipo de informação técnica referenciada pela norma Brasileira ABNT NBR 13.207 – *Gesso para construção civil*, fato considerado preocupante para usuários e atores ligados à indústria da construção civil.

8 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Alguns aspectos a serem estudados e necessários para a definição de utilização do resíduo fosfogesso como material de construção, não foram contemplados nesta pesquisa, portanto sendo necessário a realização de estudos complementares. Como sugestão propõe-se:

- caracterização ambiental do fosfogesso através de análises de lixiviação e solubilização em acordo com a legislação vigente (NBR 10005 e NBR 10006);
- avaliação detalhada (origem, contaminação, malefícios, etc) da presença de fungos em artefatos de gesso fabricados com o resíduo fosfogesso;
- avaliar processo de lixiviação e percolação do fosfogesso em solos no entorno das pilhas de armazenamento, bem como em situações específicas, tais como quando utilizado na correção de solos;
- uso de aditivos redutores de água em misturas e composições que contenha o fosfogesso;
- fabricar artefatos (blocos, placas, divisórias, etc) a partir da substituição do gesso pelo fosfogesso, com conseqüente avaliação do comportamento físico e mecânico dos produtos, em consonância com a durabilidade requerida;
- avaliar o comportamento dos cimentos produzidos, no Brasil, a partir do uso e adição do fosfogesso “in natura” ou beneficiado”;
- avaliar o potencial de ativação química proporcionado pelo fosfogesso em escórias de alto forno e aciaria;
- projetar uma planta industrial focada na realização do beneficiamento do fosfogesso “in natura” para utilização na indústria da construção civil.

9 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

AGUIAR, G. *Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção*. 2004. 310 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 11: terminology relating to gypsum and related building materials and systems*. Philadelphia, 2005a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 1396: specification for gypsum board*. Philadelphia, 2004a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 28: standard specification for gypsum plasters*. Philadelphia, 2005b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 35: specification for inorganic aggregates for use in gypsum plaste*. Philadelphia, 2005c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 471M: test methods for chemical analysis of gypsum and gypsum products*. Philadelphia, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 472: test methods for physical testing of gypsum, gypsum plasters, and gypsum concrete*. Philadelphia, 2004b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 842*: specification for application of interior gypsum plaster. Philadelphia, 2005d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 11*: specification for wire cloth and sieves for testing purposes. Philadelphia, 2004c.

ANTUNES, R. P. N. *Estudo da cal hidratada nas pastas de gesso*. 1999.145 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

AQUINO, P.E. A produção de ácido fosfórico e a geração de fosfogesso. In: DESAFIOS TECNOLÓGICOS PARA O REAPROVEITAMENTO DO FOSFOGESSO, 1., 2005. Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...* Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 21 jan. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004*: resíduos sólidos classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005*: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006*: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10007*: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520*: apresentação de citações em Documentos. Rio de Janeiro, 1992. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12127*: gesso para construção: determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 1991a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12128*: gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro, 1991b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12129*: gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 1991c. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12130*: gesso para construção: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrito. Rio de Janeiro, 1991d. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13207*: gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13749*: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação. Rio de Janeiro, 1996. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 1472*: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023*: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2000. 22 p.

AURÉLIO. Aurélio Buarque de Holanda Ferreira. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. 1975. 387 p.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. *Diagnóstico do pólo gesso de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para a fabricação de cimento*. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia de Minas. 2003. p.1-10. Disponível em: <http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/MAGALHAESCarlos_IVIBERMAC.pdf>. Acesso: 12 de maio 2005.

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

BAUER, L.A.F. *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2001. 448 p.

BELMILOUDI, A.; MEUR, G.L. Mathematical and numerical analysis of desydratation of gypsum plasterboards exposed to fire. *Elsevier: applied mathematics and computation* 163, p. 1023 -1041, 2005.

BRAGANÇA,S.R.; BERGMANN, C.P. Microestrutura e propriedades de porcelanas. *SciELO: Cerâmica*, n. 50, p. 291- 299, 2004.

BRANDÃO, P. R. G. *Métodos de Instrumentação e Análise*. Apostila do curso de pós graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, 2004. 127 p.

CEKINSKI, E. Rotas industriais para recuperação do enxofre do fosfogesso. In: DESAFIOS TECNOLÓGICOS PARA O REAPROVEITAMENTO DO FOSFOGESSO, 1., 2005. Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...* Belo Horizonte:

UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 21 jan. 2006.

CHANG, W.F.; MANTELL, M.I. *Engineering properties and construction applications of phosphogypsum*. Florida Institute of Phosphate Research. Coral Gables: Florida, 1990. 201 p. ISBN 87024-28-4.

CINCOTTO, M. A.; MARQUES, J. C.; HELENE, P. R. L. Propriedades das Argamassas Cimento: Cal: Areia. In: SEMINÁRIO SOBRE ARGAMASSAS. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 1985a.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de Revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. BOLETIM INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT), n.68. São Paulo: IPT. 1995.

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M.C. O gesso como material de construção – composição química (1ª parte). In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Tecnologia das Edificações. São Paulo, 1985b. p. 23-26.

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M.C. O gesso como material de construção – propriedades físicas e químicas (2ª parte). In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Tecnologia das Edificações. São Paulo, 1985c. p. 17-20, 1985c.

CINCOTTO, M.A.C. A utilização de sub-produtos e resíduos na construção civil. *In: TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES*. São Paulo : Pini, 1988.

CLIFTON, J.R. Some aspects of the setting and hardening of gypsum plaster. In: TECHNICAL NOTE n. 755, National Bureau of Standards. 1973 *apud* ANTUNES, R. P. N. Estudo da cal hidratada nas pastas de gesso. 1999.145 f. Dissertação

(Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COATES, J. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. In: ENCYCLOPEDIA of Analytical Chemistry. USA: Ed. R.A. Meyers. John Wiley & Sons Ltda., 2000. p.10815 – 10837.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 2 jul. 2005.

DANA, J.D. *Manual de Mineralogia*. v.1. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969. 642 p.

ELBELY, I.Y. PISKIN, S. 2004. Kinetic study of the thermal dehydration of borogypsum. *Elsevier: Journal of Hazardous Materials*, n.116, p. 111-117, 2004.

FARMER, V.C. The infrared spectra of minerals. In: MINERALOGICAL SOCIETY MONOGRAPH 4. London: Department of Spectrochemistry, Macaulay Institute for Soil Research, 1974. p. 423-443.

FAUZIAH, I.; ZAUZYAH, S.; JAMAL, T. Characterization and land application of red gypsum: a waste product from the titanium dioxide industry. *Elsevier: The Science of the Total Environment*, n. 188, p.243-251,1996.

FOSFÉRTIL. Avaliação da qualidade química do gesso fornecido pela Fosfertil com relação aos parâmetros: índice de acidez e teores de P₂O₅. 2005. p.12. Material de apoio.

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

GOMES, A. M. *Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios*. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico (IST), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1995.

HASELEIN, R.C.; CALEGARI, L.; ALBERTI, L.F.; MINELLO, A.L. ANAXIMANDRO DA SILVA, P. PINTOS, R.G.F. Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. *Ciência Florestal*, v.12, 2002. p.81-88. ISSN 0103-9954.

HINCAPIÉ, A.M.; CINCOTTO, M.A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. *Ambiente construído*, v.1. São Paulo, 1997. p.7-17. Semestral. ISSN 1415-8876.

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

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A. de; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C. M. de; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. *Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal*. 1. ed Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002, 302 p.

JOHN, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. Alternativa de gestão dos resíduos de gesso. In: CONTRIBUIÇÃO APRESENTADA A DISCUSSÃO DA REFORMULAÇÃO DA RESOLUÇÃO CONAMA 307: RELATIVA A GESTÃO DO GESSO, 9., 2003, São Paulo. *Trabalhos técnicos...* Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/>> Acesso em: 12 de jul. 2005.

JORGENSEN, D.B. Gypsum and anhydrite. In: INDUSTRIAL MINERAL ROCKS. Carr, D.D. (Editor). Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1994.

KORNDÖRFER, G. H. *Gesso agrícola*. Instituto de Ciências Agrárias Universidade de Uberlândia. p.1-7. 2004.

LEPREVOST, A. Gesso. BOLETIM INSTITUTO DE BIOLOGIA E PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IBPT). Curitiba: IBPT.1955. p.1-97.

LINDQUIST, T.J.; STANFORD, C.M.; KNOX, E. Influence of surface hardener on gypsum abrasion resistance and water sorption. *Elsevier: The journal of prosthetic dentistry*, v.90, n.5, p. 441-446, 2003.

LINDQUIST, T.J.; STANFORD, C.M.; MOSTAFAVI, H.; XIE, X.J. Abrasion resistance of a resin-impregnated type IV gypsum in comparison conventional products. *Elsevier: The journal of prosthetic dentistry*, v.87, n. 3, p. 319-322, 2002.

LINHALES, F. *Caracterização do gesso*. 2003. 22 f. Trabalho curso de pós-graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

LYRA SOBRINHO, A.C.P.L.; AMARAL, A.J.R.; DANTAS, J.O.C.; DANTAS, J.R.A. *Gipsita*. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Pernambuco, 2002. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/y5053f/y5053f00.htm>>. Acesso em: 27 jun. 2005.

MALAVOLTA, E. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta – perguntas e respostas. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. *Anais...* Uberaba: IBRAFOS, 1992. p.41-66.

MANDAL, P.K; MANDAL, T.K. Anion water in gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and hemihidrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). *Elsevier: Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 313-312, 2002.

MASUERO, A.B. *et al.* Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE SÓLIDOS INDÚSTRIAS, 2000, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2000. p. 1-19.

MAZZILLI B. P. A radioatividade do fosfogesso. In: DESAFIOS TECNOLÓGICOS PARA O REAPROVEITAMENTO DO FOSFOGESSO, 1., 2005. Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...* Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 21 jan. 2006.

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

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MINAS AMBIENTE. Ensino e desenvolvimento tecnológico para controle ambiental na indústria: pesquisa tecnologia para controle ambiental em unidades independentes de produção de ferro-gusa de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1999, 140 p. Relatório Técnico.

NOLHIER, M. *Construire en Plâtre*. Paris, L'Harmattan, 1986 *apud* ANTUNES, R. P. N. Estudo da cal hidratada nas pastas de gesso. 1999.145 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

OLIVEIRA, C.A. S. *Comportamento físico e avaliação microestrutural de argamassas produzidas a partir da mistura exaurida gerada na indústria de magnésio metálico*. 2004. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, C.M. de; RODRIGUES, M.C.X. Característica de alguns gessos nacionais utilizados na construção civil. TÉCNICA, n. 371, 1990. p.33-52.

PADILHA, A.F.; AMBROZIO FILHO, F. *Técnicas de análise microestrutural*. 1.ed. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 1985. 190 p.

PATTON, W.J. *Materiais de construção para engenharia civil*. São Paulo: EPU: Editora da Universidade de São Paulo, 1978. 366 p.

PETRUCCI, E. *Materiais de construção II*. Documento de apoio nº10. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. 1992. p. 1487-1559.

PHIL,W.E.L.D.; RAINFORTH, W.M. *Ceramic microstructures: property control by processsing*. Chapman &Hall, 1994. p.125-221. ISBN 0412431408.

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

REIS, S.C. *Aplicação de modelagem geométrica computacional na obtenção, visualização e análise de estrutura de poros de materiais*. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

ROSSETO, H. Método de processamento do fosfogesso em corpos de alta resistência mecânica. In: DESAFIOS TECNOLÓGICOS PARA O REAPROVEITAMENTO DO FOSFOGESSO, 1., 2005. Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...* Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 21 jan. 2006.

SATO, N.M.N.; ANTUNES, R.PN.; JOHN, V.M. Influência da porosidade nos processos de fixação e transporte de água em pastas de gesso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. *Anais...* Brasília: Universidade de Brasília, 2001. p.485 - 497.

SEBBAHI, S.; CHAMEIKH, M.L.O.; SAHBAN, F.; ARIDE, J.; BENARAFAL, L.; BELKBIR, L. Thermal behavior of Moroccan phosphogypsum. *Elsevier: Thermochemica Acta*, n. 302, p.69-75. 1997.

SILVA, M.G. da; SILVA, V.G da. Painéis de vedação. In: _____. *Painéis de gesso acartonado*. Manual:. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2004. p. 51-59.

SILVA, M.R. *Materiais de construção*. 2. ed. São Paulo: PINI, 1991. 33 p.

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

Sindicato das Indústrias e Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-metálicos do Estado de Pernambuco (SINDUGESSO). *Mercado de gipsita e gesso no Brasil*. Pernambuco, 2004. Disponível em: <<http://www.sindugesso.org.br/jornal/>>. Acesso em: 7 jul. 2004.

SINGHT, M. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture. *Elsevier: Cement and Concrete Research*, n.32, p.1033-1038, 2002.

SINGHT, M.; GARG, M. Relationship between mechanical properties and porosity of water-resistant gypsum binder. *Elsevier: Cement and Concrete Research*, n.3., p. 449-456.1996.

SMADI, M.M. HADDAD, R.H. AKOUR, A.M. Potencial use of phosphogypsum in concrete. *Elsevier: Cement and Concrete Research*, n. 29, p. 1419-1425, 1999.

SOUZA, A.E. Fosfato. In: BALANÇO MINERAL BRASILEIRO 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/>>. Acesso em: 17 jun. 2004.

SOUZA, D. G. de. LOBATO, E. REIN, T. A. Uso de gesso agrícola nos solos do cerrado. CIRCULAR TÉCNICA 32. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (EMBRAPA), 2005. p. 7-18. ISSN 1517-0187.

SUMNER, M. E. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos.. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA,2.,1992, Uberaba. *Anais...* Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 7-40.

TANIGUTI, E.K. *Método construtivo de vedação interna de chapas de gesso acartonado*.1999. 316 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TAYLOR L. Gypsum chairman of the board. In: INDUSTRIAL MINERALS. Features Editor, n. 439, 2004.p. 38-47.

TAYLOR, H.F.W. *Cement chemistry*. New York, 1998. ISBN 0 7277 2592 0.

TURNER FAIRBANK. *Sulfate Wastes*. Highway Research Center, 2004. Disponível em: <<http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/sw2.htm>> Acesso em: 24 de jun.2005.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL AGENCY (USEPA). Code of Federal Regulation. Title 40, v.17, July 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/radiation/neshaps/subpartr/more.htm/>>. Acesso em: 24 jun. 2005.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UNB). *Glossário*. Disponível em : <www.unb.br/ig/glossario/verbete>. Acesso em 13 jun. 2005.

VASCONCELOS, W. L. *Porosidade dos materiais cerâmicos*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. (Notas de aula da disciplina Processamento de Materiais Cerâmicos).

XAVIER, T.H. *Ensaio de dureza*. Departamento de Materiais e Construção. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 1972. 98 p.

ZAPATA, F.; ROY R.N. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. BULLETIN FAO ENGRAIS ET NUTRITION VÉGÉTALE 13. Itália. 2004. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/>>. Acesso em: 23 jun. 2005.