



ISSN: 1984-3151

ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO FOSFOGESSO COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS

FEASIBILITY STUDY OF THE USE OF PHOSPHOGYPSUM NOWADAYS AS RAW MATERIAL IN THE PRODUCTION OF CERAMIC MATERIALS

Rogério Alexandre Alves de Melo¹; Débora Guimarães da Silva²

- 1 Doutor em Engenharia Química. UFSCar-SP, 2000. Professor do Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. Belo Horizonte, MG, BR. rogerio.melo@prof.unibh.br.
- 2 Pós-Graduada em Avaliações de Impactos Ambientais e Recuperação de Áreas Degradadas. UniBH, 2013. Graduada em Engenharia Química. Centro Universitário de Belo Horizonte - UNIBH, 2012. FIAT. Belo Horizonte, MG, BR. debora-g-s@hotmail.com.

Recebido em: 12/03/2013 - Aprovado em: 12/11/2013 - Disponibilizado em: 30/11/2013

RESUMO: A indústria de ácido fosfórico gera anualmente milhões de toneladas de fosfogesso, que é disposto em pilhas a céu aberto por não existir um destino onde haja seu consumo em grandes quantidades e que seja economicamente viável. Cada vez mais, vêm sendo realizados estudos de sua aplicação nas mais variadas áreas industriais, principalmente na construção civil. Este trabalho tem como foco o estudo da aplicação do fosfogesso na fabricação de materiais cerâmicos.

PALAVRAS-CHAVE: Fosfogesso. Materiais Cerâmicos. Reaproveitamento de Resíduo Industrial.

ABSTRACT: The phosphoric acid industry annually generates millions of tons of phosphogypsum which is arranged in piles in the open because there is a destination where there is consumption in large quantities and economically feasible. Increasingly, studies have been carried out their application in various industrial areas, mainly in construction. This work focuses on the study and application of phosphogypsum in the manufacture of ceramics.

KEYWORDS: Phosphogypsum. Ceramics Materials. Reuse of Industrial Waste.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Fernandes, Luz e Castilhos (2010) o fosfogesso (sulfato de cálcio), subproduto da fabricação do ácido fosfórico, é originado do ataque do ácido sulfúrico aos minerais da rocha de fosfato. De acordo com as condições operacionais, tem-se a formação de três tipos distintos de fosfogesso: di-hidratado, hemi-hidratado, ou anidrita.

Do ponto de vista químico, o fosfogesso se assemelha ao gesso, sendo constituído principalmente por sulfato de cálcio, podendo conter elevados níveis de impureza provenientes e característicos da rocha

fosfatada. Tais impurezas podem levar a um acréscimo da radioatividade natural do fosfogesso devido à presença de elementos radioativos, tais como: urânio e tório (SANTOS, 2002).

Rufo (2009) descreve diversas aplicações para o fosfogesso, como na agricultura, construção civil e indústrias químicas. Mesmo diante das possibilidades de sua utilização em diferentes áreas, sua produção ainda supera seu consumo. No Brasil estima-se serem produzidas mais de 6 milhões de toneladas de fosfogesso por ano. Como consequência tem-se uma demanda de grandes áreas para sua disposição a céu aberto, levando a uma série de problemas ambientais,

como contaminação atmosférica por fluoretos, degradação de mananciais de água, solo e subsolo. O fosfogesso também pode ser diretamente descartado em rios e oceanos, levando a uma contaminação de difícil controle (MAZZILLI; SAUEIA, 1997).

A avaliação das formas de reaproveitamento do fosfogesso é de grande relevância econômica e social, uma vez que, ao lhe dar uma destinação correta, reduzem-se os custos de gerenciamento e manutenção das áreas destinadas a sua disposição e evitam-se os impactos ambientais provenientes de seu descarte inadequado. Outro ponto positivo de sua utilização como matéria-prima é a redução na exploração de recursos naturais, podendo, por exemplo, extinguir a exploração em jazidas naturais de gesso (CANUT, 2006; MATOS, 2011).

Vale salientar que este estudo visa contribuir para a destinação correta do resíduo fosfogesso (sulfato de cálcio) por meio de seu reaproveitamento como uma matéria-prima alternativa às usadas industrialmente. Como consequência, teve-se como objetivo o estudo da viabilidade do uso do fosfogesso em diferentes áreas procurando solucionar o problema de milhões de toneladas de fosfogesso que são geradas todos os anos e não possuem um destino adequado.

Para alcançar o objetivo fez-se necessário o estudo dos seguintes pontos:

1. Avaliar os impactos ambientais causados pela estocagem do fosfogesso em pilhas a céu aberto;
2. Realizar pesquisas acerca das possibilidades de aplicação do fosfogesso como matéria-prima alternativa em diferentes áreas;
3. Relacionar vantagens e desvantagens, em escala industrial, do uso do resíduo fosfogesso em substituição à exploração de recursos naturais;
4. Testar a viabilidade do uso do fosfogesso em misturas de argilas vermelhas na fabricação de materiais cerâmicos.

Cabe ressaltar que este estudo se justifica devido à crescente demanda por fertilizantes fosfatados e consequente aumento da produção de fosfogesso, a ponto de chamar a atenção a nível mundial quanto a sua disposição e desenvolvimento de alternativas viáveis para seu reaproveitamento. Os órgãos ambientais têm se tornado cada vez mais rigorosos quanto aos critérios de disposição de fosfogesso em pilhas de estocagem, de forma a se evitar uma contaminação ambiental. Isso leva as indústrias de fertilizantes a buscarem alternativas para a destinação do resíduo fosfogesso que, além de ambientalmente corretas, sejam economicamente viáveis. Em vista desses acontecimentos, os estudos que envolvem a destinação ou reutilização do fosfogesso possuem atualmente grande apelo tanto do aspecto sócio-econômico quanto do ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a execução deste estudo, foram adotados como referencial teórico artigos técnicos, dissertações e teses de doutorado com levantamentos acerca do impacto causado pela disposição do resíduo fosfogesso em pilhas de estocagem a céu aberto, conforme apresentado por Mazzilli e Saueia (1997), Santos (2002) e Saueia (1998). Fez-se também uso das normas técnicas: NBR 6.502, NBR 10.004, NBR 10.005, NBR 10.006 e NBR 10.007, para classificar o fosfogesso, da norma técnica NBR 13.818, para a especificação, e métodos de ensaios de placas cerâmicas. Dados sobre a geração, destino e empregabilidade do fosfogesso a nível nacional e mundial também foram analisados pelos trabalhos de Canut (2006); Fernandes; Luz e Castilhos (2010); Matos (2011), além de estudos que apresentam os resultados da aplicação direta do fosfogesso como substituinte da matéria-prima natural em diversas áreas, como nos trabalhos realizados por: Cajazeiras e Castilhos Junior (1998); Kobayashi e Parreira

(2001); Oliveira (2005); Rufo (2009); Duarte e Fernandes (2009). Este referencial teórico subsidiou a pesquisa de viabilidade do uso do fosfogesso sob a perspectiva de sua utilização em diferentes áreas na tentativa de solucionar o impasse ambiental causado pela disposição incorreta desse tipo de resíduo.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho foi dividida em três etapas, que consistiram em revisão bibliográfica sobre a viabilidade do uso do fosfogesso em diferentes áreas. Nessa etapa foram realizadas pesquisas sobre a produção do ácido fosfórico, bem como a produção do fosfogesso, suas formas de disposição e o impacto sócio-ambiental causado por sua disposição em pilhas a céu aberto. Posteriormente foram realizadas pesquisas sobre as áreas onde o fosfogesso é atualmente empregado. Em seguida foram avaliadas as vantagens e desvantagens do uso do fosfogesso, em escala industrial, como substituinte de matérias-primas provenientes de recursos naturais na fabricação de cerâmicas vermelhas. Por fim foram realizados testes laboratoriais quanto à adição do resíduo fosfogesso na proporção de 5%, 10% e 15% na confecção de tijolos maciços e blocos cerâmicos com argila vermelha.

4 ROCHA FOSFÁTICA

Conforme demonstrado por Matos (2011), o termo "rocha fosfática" é utilizado mundialmente para descrever qualquer ocorrência de material geológico que contenha um ou mais minerais de fosfato para uso comercial. As reservas de rocha fosfática mundiais possuem diferentes origens sob o ponto de vista geológico, podendo ser advindas de depósitos de origem ígnea, sedimentar, metamórfica e de depósitos biogénicos, sendo os depósitos de origem ígnea e

sedimentar os mais importantes do ponto de vista econômico.

Saueia (2006) informa que no Brasil cerca de 80% dos depósitos de rocha fosfática são de origem ígnea e concentram-se nas regiões sudeste e centro-oeste. Os teores de anidrido fosfórico (P_2O_5) das jazidas brasileiras são bastante variáveis, em média 12%, enquanto que em termos mundiais as jazidas de fosfato, na grande maioria de origem sedimentar, apresentam em média teores de 17% em P_2O_5 .

Uma vez que as rochas brasileiras apresentam uma baixa concentração de P_2O_5 , elas são beneficiadas de modo a se elevar o teor de fósforo a níveis adequados para a produção de ácido fosfórico e fertilizante, dando origem aos concentrados apatíticos. Esses concentrados são constituídos principalmente pelos minerais portadores de fósforo como:

- fluorapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6F_2$);
- hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) e o
- carbonato apatita ($Ca_{10}(PO_4)_6CO_3$),

e em menor quantidade os minerais contendo a presença de ferro, alumínio, sílica, magnésio, lantanídeos, entre outros. No Brasil a rocha mais comum é a fluorapatita (MATOS, 2011).

5 PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO

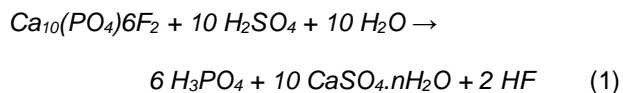
Fertilizantes são componentes essenciais para a comunidade agrícola mundial, em especial no Brasil, onde a base da economia encontra-se no campo. De acordo com Fernandes, Luz e Castilhos (2010), no país a produção anual de ácido fosfórico já ultrapassa a marca de 1,2 milhões de toneladas de P_2O_5 , chegando-se a uma geração de 5,6 milhões de toneladas anuais de fosfogesso.

Saueia (1998) relata que as indústrias de fertilizantes utilizam minérios apatíticos, provenientes de rochas

fosfatadas, como matéria-prima na produção do ácido fosfórico. No entanto, atualmente há dois processos para a produção do ácido fosfórico a partir dos concentrados apatíticos, o processo por via úmida e por via térmica. O processo por via úmida é o mais difundido, sendo utilizado por cerca de 85% das indústrias mundiais na produção de materiais fosfatados. (MATOS, 2011).

5.1 PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO POR VIA ÚMIDA

Conforme Matos (2011) a rota por via úmida na presença de ácido sulfúrico é a mais utilizada na produção do ácido fosfórico, podendo também ser empregado o ácido nítrico ou clorídrico, tendo como consequência a produção de fosfogesso. Na rota sulfúrica a rocha fosfática é atacada com ácido sulfúrico produzindo-se o superfosfato. No entanto, a fluorapatita é o principal constituinte do mineral fosfático no Brasil, sendo a reação global de ataque da rocha pelo ácido sulfúrico representada pela Equação 1, onde, $n=1/2$ (hemi-hidratado), $n=2$ (di-hidratado), ou $n=0$ (anidro) (RUFO, 2009).



O mesmo autor estabelece a possibilidade de obtenção de uma série de fosfatos de acordo com as condições de reação; ou seja, o tipo de ataque do ácido em relação à rocha fosfática. Tratando a rocha fosfática com quantidades de ácido sulfúrico suficientes apenas para dissolver o fosfato, obtém-se o superfosfato simples, e utilizando maiores quantidades de ácido tem-se o ácido fosfórico, fosfogesso e fluoreto de hidrogênio, conforme esquematizado pela Equação 1. O ácido fosfórico obtido pode ser concentrado a 72% de P_2O_5 , constituindo o chamado ácido superfosfórico, a 52%

para comercialização, e a 40% para a produção de fosfato de amônio (MATOS, 2011).

Todo o fosfogesso produzido é bombeado para uma área de armazenagem, onde a água ácida nele contida é drenada para um tanque para tratamento e/ou de volta ao processo, em seguida o fosfogesso é destinado à estocagem em pilhas a céu aberto, sendo esse método de disposição o mais utilizado pelas indústrias no mundo. O ácido fluorídrico formado de volta ao processo reage com impurezas de silicato formando SiF_4 , que em seguida é hidrolisado formando ácido fluorsilício (H_2SiF_6) (SAUEIA, 1998).

6 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO FOSFOGESSO

A temperatura na qual ocorre a reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfática afeta diretamente o tipo de fosfogesso que será gerado, podendo este ser di-hidratado, hemi-hidratado ou anidro. Quanto à produção de fosfogesso quatro processos são empregados industrialmente: processo di-hidratado, hemi-hidratado, hemi-di-hidratado e anidro. A diferença básica entre estes processos são as concentrações de ácido fosfórico resultante, a velocidade de dissolução da rocha fosfática e o processo de filtração utilizado (MATOS, 2011).

6.1 PROCESSO DI-HIDRATADO

Matos (2011) relata que o processo di-hidratado é o mais utilizado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados do Brasil e do mundo devido a sua relativa simplicidade em relação aos demais processos, possibilitando baixo custo, a flexibilidade do sistema e a utilização de diferentes tipos de rochas. No entanto Rufo (2009) afirma que neste processo se obtém o fosfogesso com maior teor de impurezas, tais como metais pesados e resíduos de ácidos fosfórico e sulfúrico.

No processo di-hidratado o ácido sulfúrico e ácido fosfórico de baixa concentração são adicionados ao reator juntamente com o concentrado fosfático. As temperaturas de processo são mantidas entre 70°C e 80°C, havendo resfriamento do sistema, uma vez que se trata de uma reação exotérmica. A polpa originada desta etapa segue para uma série de três etapas de filtração e lavagem. Na primeira etapa se obtém o H_3PO_4 com 28-30% de P_2O_5 , que é enviado para a estocagem. Na segunda etapa obtém-se o H_3PO_4 fraco, 20% de P_2O_5 , que é reciclado no reator; na terceira etapa, em que é feita a 2ª lavagem seguida da 3ª filtração, o filtrado retorna para realizar a 1ª lavagem e o subproduto sólido separado do fosfogesso é enviado para área de armazenagem. Estima-se que sejam geradas 5 toneladas de fosfogesso para cada tonelada de ácido fosfórico produzido através desse processo (MATOS, 2011).

Neste processo o fosfogesso formado é o di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), apresentando duas moléculas de água cristalizada. Sua composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Fosfogesso do tipo di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

Composição	(%)
CaO	32,50
SO ₃	44,00
P ₂ O ₅	0,65
F	1,20
SiO ₂	0,50
Fe ₂ O ₃	0,10
Al ₂ O ₃	0,10
H ₂ O cristalizada	19,00

Fonte - OLIVEIRA, 2005.

Pode-se verificar que o componente químico presente em maior proporção é o óxido sulfúrico com 44%, seguido pelo óxido de cálcio com 32,5% (OLIVEIRA, 2005).

6.2 PROCESSO HEMI-HIDRATADO

Nos ensinamentos de Oliveira (2005), o processo hemi-hidratado é empregado na África, Europa e Japão, sendo desenvolvido a temperaturas que variam de 93°C a 132°C e concentrações de ácido fosfórico de 38% a 42%. O fosfogesso resultante possui uma molécula de água para cada duas moléculas de sulfato de cálcio, sendo denominado hemi-hidratado ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$); sua composição química é apresentada na Tabela 2. Para cada tonelada de ácido fosfórico são produzidas cerca de 4,3 toneladas de fosfogesso.

As vantagens do processo hemi-hidratado, quando este é comparado ao processo di-hidratado, são as concentrações mais elevadas de P_2O_5 , a dissolução mais rápida da rocha fosfática e a maior velocidade de filtração do ácido fosfórico. Esta maior concentração de P_2O_5 gera partículas mais finas de fosfogesso e com menores quantidades de impurezas oriundas da rocha fosfatada e do ácido sulfúrico (MATOS, 2011).

Tabela 2 - Composição do Fosfogesso do tipo hemi-hidratado ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$)

Composição	(%)
CaO	36,90
SO ₃	50,30
P ₂ O ₅	1,55
F	0,80
SiO ₂	0,70
Fe ₂ O ₃	0,10
Al ₂ O ₃	0,30
H ₂ O cristalizada	22,00*

Fonte - OLIVEIRA, 2005.

* Valor aproximado

Matos (2011) menciona que uma das desvantagens desse processo é a grande demanda por energia, uma vez que o processo é realizado a altas temperaturas. No entanto, o maior problema ocorre na etapa de filtração, pois algumas partículas de fosfogesso di-hidratadas presentes no meio fazem com que as partículas em condições hemi-hidratadas sejam reidratadas novamente, e para se evitar essa

reidratação utiliza-se temperaturas maiores durante o processo.

No Japão, as indústrias de fertilizantes fosfatados utilizam um método modificado deste processo, possibilitando a transformação direta do fosfogesso em matéria prima para a produção de cimento Portland, sem a necessidade de sua purificação. Este processo e o fosfogesso nele obtido são conhecidos como hemi-nissan. Todavia, sua implantação no Japão é estimulada devido ao pequeno número de jazidas de gipsita e à possibilidade de o fosfogesso hemi-nissan ser utilizado como substituto do gesso natural (OLIVEIRA, 2005).

6.3 PROCESSO HEMI-DI-HIDRATADO

O processo hemi-di-hidratado se desenvolve a temperaturas variando de 90°C a 100°C, nas quais são obtidas concentrações de ácido fosfórico entre 40% e 52%. Este é uma combinação das vantagens dos processos di-hidratado e hemi-hidratado, resultando em um processo simples, com baixo custo energético e geração de um resíduo na mesma proporção que no processo hemi-hidratado, porém com uma menor quantidade de impurezas. Uma desvantagem deste processo são os altos custos de manutenção dos equipamentos quando comparados com os do processo di-hidratado (OLIVEIRA, 2005).

Rufo (2009) descreve que o processo hemi-di-hidratado é similar ao processo di-hidratado, sendo que a diferença está na etapa de solubilização da rocha fosfática. Nesta etapa ocorre inicialmente a formação de fosfogesso hemi-hidratado, que posteriormente é recristalizado para a forma de di-hidratado e filtrado nessa condição, logo o fosfogesso produzido neste processo é do tipo di-hidratado, entretanto ele recebe o nome do processo utilizado.

Desta forma, ao se avaliar a composição química do fosfogesso hemi-di-hidratado, apresentada na Tabela

3, é possível notar que, embora tratando-se do mesmo tipo de fosfogesso obtido no processo di-hidratado, as composições químicas, apesar de similares, não são idênticas.

Tabela 3 - Composição do Fosfogesso do tipo hemi-di-hidratado (CaSO₄.2H₂O)

Composição	(%)
CaO	32,20
SO ₃	46,50
P ₂ O ₅	0,25
F	0,50
SiO ₂	0,40
Fe ₂ O ₃	0,05
Al ₂ O ₃	0,30
H ₂ O cristalizada	20,00

Fonte - OLIVEIRA, 2005.

6.4 PROCESSO ANIDRO

Nesse processo existe produção de fosfogesso anidro (CaSO₄), ou seja, não há a presença de moléculas de água em sua composição. É desenvolvido no intervalo de temperaturas de 120°C a 130°C, sendo que dos quatro processos este é o que gera a menor quantidade de resíduo, 3,5 toneladas de fosfogesso para cada tonelada de ácido fosfórico. Apesar de produzir menor quantidade de fosfogesso, poucas fábricas no mundo adotam esse processo devido aos altos custos de produção provocados pela corrosão acelerada de máquinas e equipamentos industriais e pelo alto consumo de energia. A concentração de P₂O₅ no ácido fosfórico produzido por este processo atinge aproximadamente 50% (OLIVEIRA, 2005).

7 CARACTERÍSTICAS DO FOSFOGESSO

7.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Para Kobayashi e Parreira (2001), o fosfogesso apresenta as características físicas de baixa permeabilidade, resistência à compressão e pouca durabilidade quando sujeito somente à estabilização

mecânica. No estudo realizado por tais autores o fosfogesso do tipo di-hidratado coletado na empresa Fosfértil, em Uberaba/MG, apresentou massa específica igual a $2,262 \text{ g/cm}^3$.

No que diz respeito à granulometria do fosfogesso, esta pode se apresentar segundo diferentes distribuições granulométricas, sendo o fosfogesso em sua maior parte um material com elevado percentual de partículas siltosas. O processo de fabricação do ácido fosfórico, a origem mineralógica da rocha fosfática e o tempo de lixiviação do fosfogesso em depósitos têm influência direta na sua granulometria final (RUFO, 2009).

No entanto, Oliveira (2005) menciona o grau de moagem durante a etapa inicial de produção do ácido fosfórico como sendo um dos fatores que determinam a composição granulométrica do fosfogesso. Ainda segundo o autor, as partículas mais grossas presentes no fosfogesso são constituídas de areias siltosas e de fragmentos não-reativos de rocha fosfática que não foram processados na reação com o ácido sulfúrico.

Segundo a norma da ABNT NBR 6.502 o silte é toda parcela de solo cujas partículas possuem diâmetros dentro da faixa granulométrica de 0,002 mm e 0,06 mm. Estudos mostram que a maioria das dimensões das partículas de fosfogesso está compreendida entre 0,02 a 0,5 mm, com mais de 75% do total das partículas passando na peneira nº 200 (0,074 mm), fazendo com que o fosfogesso apresente características granulométricas semelhantes ao silte. Na Figura 1 verifica-se a distribuição granulométrica do fosfogesso di-hidratado obtido na região de Uberaba/MG, onde é possível observar que 90% das partículas passam na peneira de nº 200 (KOBAYASHI; PARREIRA, 2001).

Chama-se silte ou limo todo e qualquer fragmento de mineral ou rocha menor do que areia fina e maior do que argila e que na escala de Wentworth, de amplo

uso em geologia, corresponde a diâmetro $> 4 \mu\text{m}$ e $< 64 \mu\text{m}$ ($1/256 = 0,004$ a $1/16 = 0,064$ mm) (ABNT, 1995).

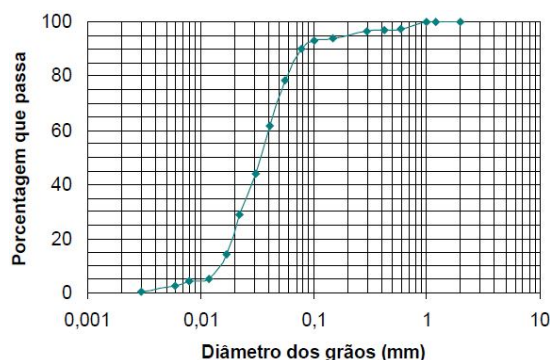


Figura 1 - Distribuição granulométrica do fosfogesso di-hidratado obtido na região de Uberaba/MG
Fonte - MATOS, 2011.

7.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Também conhecido como uma espécie de “gesso sujo”, o fosfogesso apresenta em sua composição química vários tipos de impurezas, sendo a concentração de gesso ou de sulfato de cálcio situada na faixa de 80% a 90%, e o percentual restante constituído de impurezas. Tais impurezas geralmente são formadas por metais pesados, como arsênio, bário, cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, selênio e prata, e elementos radioativos, como urânio, tório e rádio (OLIVEIRA, 2005).

Conforme citado por Rufo (2009), existem diferenças nas composições químicas de fosfogessos obtidos em diferentes indústrias de fertilizantes, uma vez que ela sofre influência da natureza da rocha fosfática e das operações industriais para obtenção do ácido fosfórico. Segundo Oliveira (2005), em geral as rochas fosfáticas nacionais apresentam teores de metais pesados, fluoretos, radioatividade e outras impurezas menores do que as rochas de outros países, mas ainda assim o fosfogesso brasileiro deve passar por processos de purificação antes de seu uso. Ainda o autor afirma que no processo por via úmida a

composição química do fosfogesso está relacionada com as reações químicas entre as matérias-primas e o grau de filtragem usado na separação do ácido fosfórico e fosfogesso.

Em estudo realizado por Kobayashi e Parreira (2001), o fosfogesso do tipo di-hidratado coletado na empresa Fosfértil, em Uberaba/MG, apresentou o valor de pH igual a 4,25. De modo geral depósitos mais antigos dão origem a fosfogessos menos ácidos devido aos processos naturais do intemperismo que ao longo do tempo vão eliminando por meio da lixiviação os ácidos fosfórico e sulfúrico, as impurezas solúveis em água, as substâncias voláteis e os metais pesados presentes na rocha fosfática. Na Tabela 4 é apresentada a composição química do fosfogesso di-hidratado coletado na empresa Fosfértil, onde verifica-se que, além dos metais pesados citados anteriormente, também estão presentes sílica, óxidos de ferro, de alumínio e de magnésio (MATOS, 2011).

Tabela 4 - Análise química do fosfogesso di-hidratado coletado na Indústria Fosfértil em Uberaba/MG.

Composição	(%)
CaO	31,96
SO ₃	44,00
P ₂ O ₅	0,78
Fe ₂ O ₃	0,17
Al ₂ O ₃	0,04
SiO ₂	1,58
TiO ₂	0,13
BaO	---
K ₂ O	0,03
MgO	---
Na ₂ O	0,05
F	0,26

Fonte - MATOS, 2011.

7.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E MORFOLÓGICAS

Em análises mineralógicas obtidas por difratometria de raios X Canut (2006) mostra que a microestrutura de amostras de fosfogesso coletadas na Fosfértil, em Uberaba/MG, caracterizam-se pela presença de fases cristalinas, havendo picos bem definidos do mineral gipsita, um sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO₄.2H₂O), conforme esquematizado na Figura 2. Tal resultado confirma a evidência de que o fosfogesso produzido na empresa, utilizando-se o processo produtivo di-hidratado, é do tipo di-hidratado. O autor ressalta que a microestrutura da gipsita, em seu estado natural, é constituída de cristais geminados de sistema monoclinico e sua célula unitária cúbica de face centrada (CFC), composta por 4 moléculas de SO₄²⁻, 4 átomos de Ca₂¹⁺ e 2 moléculas de água.

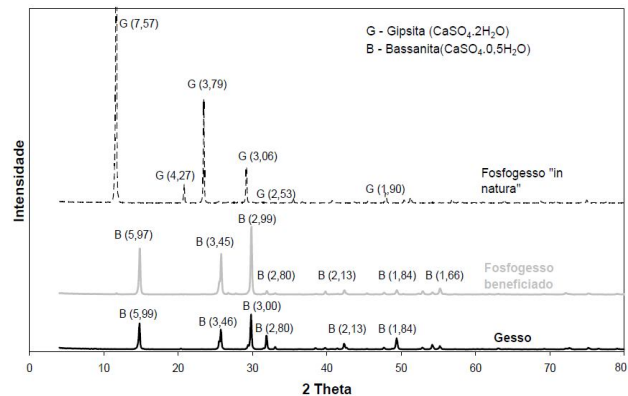


Figura 2 - Espectro de difração de fosfogesso e gesso

Fonte: CANUT, 2006.

Segundo Matos (2011), o tipo e tamanho dos cristais de fosfogesso formados são relevantes do ponto de vista econômico, uma vez que tais características determinam a quantidade de ácido fosfórico retida no fosfogesso durante a operação industrial. Ainda, segundo o autor, a morfologia do fosfogesso pode se apresentar de acordo com quatro formas distintas de cristais, dependendo do mineral e do processo usado na produção do ácido fosfórico; sendo elas:

- Cristais aciculares: comprimento entre 80 μm e 500 μm , largura entre 20 μm e 100 μm , e espessura entre 20 μm e 100 μm .
- Cristais tabulares: comprimento entre 40 μm e 200 μm ; largura entre 30 μm e 150 μm e espessura entre 5 μm e 10 μm .
- Cristais compactos: são cristais tabulares, nos quais a espessura atinge dezenas de microns.
- Agregados policristalinos: conjunto de cristais em forma de “ouriço”, apresentando forma esférica com diâmetro entre 50 μm e 100 μm .

Em estudo efetuado acerca do fosfogesso di-hidratado, coletado na empresa Fostérril, Kobayashi e Parreira (2001) realizaram microfotografias com o uso de Microscópio Eletrônico de Varredura, observando que para este fosfogesso as partículas são tabulares e de tamanho variando entre 10 a 100 μm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 3.

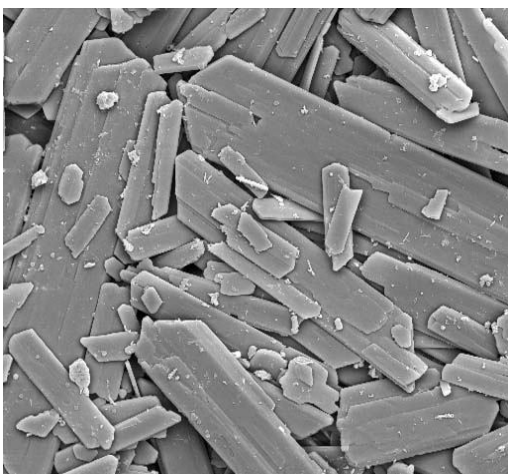


Figura 3 - Partículas tabulares de fosfogesso di-hidratado obtido na região de Uberaba/MG – aumento de 500X

Fonte - MATOS, 2011.

Neste contexto, tal resultado confirma o esperado pela bibliografia, uma vez que o fosfogesso obtido através da via úmida em geral consiste em cristais na forma tabular entrelaçados uns aos outros (MATOS, 2011).

7.4 CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS

Nas rochas fosfatadas encontram-se naturalmente em equilíbrio radioativo vários membros da série natural do Urânio (^{238}U), Tório (^{232}Th), Rádio (^{226}Ra) e Radônio (^{222}Rn). No entanto, após a digestão da rocha no processo por via úmida na produção de ácido fosfórico, o equilíbrio é quebrado, havendo a redistribuição dos radionuclídeos. Estima-se que aproximadamente 86% do ^{238}U e 70% do ^{232}Th seja incorporado ao fertilizante, enquanto 80% do ^{226}Ra vai para o fosfogesso (RUFO, 2009).

A origem da rocha fosfatada tem influência direta no tipo de elemento radioativo predominante. Rochas de origem sedimentar possuem uma maior concentração do nuclídeo da família do urânio, enquanto que rochas de origem magmática que possuem uma maior concentração do nuclídeo da família do tório, embora em menor atividade total do que os minerais sedimentares (MATOS, 2011).

O uso do fosfogesso sempre gera polêmicas acerca dos efeitos de sua radioatividade na saúde do homem. A exemplo Rufo (2009) cita o gás radônio ^{222}Rn , originado do decaimento do ^{226}Ra , que pode vir a causar doenças cancerígenas ao se aplicar o fosfogesso como material de construção, em especial nos ambientes onde a taxa de ventilação é baixa. As rochas fosfáticas brasileiras apresentam uma vantagem relação às demais, uma vez que estas são de origem magmática e possuem alto teor do elemento tório, como consequência tem-se uma baixa exalação de ^{222}Rn (CANUT, 2006).

Em estudos realizados por Santos (2002), as doses efetivas anuais decorrentes da inalação do radônio emanado das pilhas apresentaram-se inferiores ao limite de 1 mSv/ano de dose para indivíduo do público, variando entre $1,2 \times 10^{-2}$ mSv/ano a $7,2 \times 10^{-2}$ mSv/ano. Entretanto, segundo o autor, os resultados obtidos para a ingestão de águas de poços nas proximidades

das pilhas de fosfogesso mostraram que esta via de exposição é crítica, pois acarreta doses acima dos valores decorrentes da radiação de fundo da região e do limite de dose de 1mSv/ano, podendo chegar a 4,0mSv/ano.

Ainda segundo Santos (2002) a dose efetiva total, decorrente da exposição externa aos radionuclídeos presentes no fosfogesso, apresentou valor de $3,7 \times 10^{-1}$ mSv/ano, referente à contribuição conjunta dos radionuclídeos ^{228}Ra , ^{226}Ra e ^{210}Pb . Quanto ao solo, na área próxima às pilhas de fosfogesso, esta se apresentou próxima a $1,2 \times 10^{-1}$ mSv/ano, devido à contribuição dos radionuclídeos ^{228}Ra , ^{226}Ra e ^{40}K . Ambos os valores estão abaixo do limite permitido para indivíduo do público, de 1 mSv/ano. Ao se calcular a dose efetiva total proveniente de todos os meios de exposição aos radionuclídeos, esta se mostrou bem acima do limite de 1 mSv/ano, alcançando o valor de 6,9 mSv/ano.

8 PROPRIEDADES DO GESSO NATURAL

De acordo com Santos (2002), do ponto de vista químico, o fosfogesso se assemelha ao gesso natural (gipsita), sendo ambos constituídos principalmente por sulfato de cálcio e enxofre. 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 , enquanto que, segundo Oliveira (2005), para o fosfogesso di-hidratado tem-se a seguinte composição para os mesmos elementos: 32,5% de CaO, 44,0% de SO_3 e 19,0% de H_2O . Diante de tal similaridade espera-se que as propriedades intrínsecas do fosfogesso sejam próximas às do gesso natural.

Canut (2006) destaca dentre as propriedades físicas do gesso natural sua dureza de valor 2 na escala Mohs, a massa específica real de $2,35 \text{ g/cm}^3$ e o índice de refração de 1,53. O autor também cita outras

importantes propriedades do gesso que viabilizam a sua aplicação como matéria-prima na construção civil, as quais são descritas mais detalhadamente a seguir.

8.1 ISOLAMENTO ACÚSTICO

Canut (2006) informa que o gesso apresenta a propriedade de absorção de energia acústica, permitindo que ele seja utilizado na insonorização de ambientes. Sendo o gesso um material leve, poroso e de baixa densidade, a dissipação de energia sonora ocorre através do atrito gerado pela passagem do ar nos seus poros, logo, quanto mais poroso for o material produzido por gesso maior será sua eficiência como isolante acústico. Rocha (2007) relata que ao se misturar o gesso com vermiculita (mineral composto de silicatos hidratados de alumínio e magnésio) ou perlita (mineral de origem vulcânica composto principalmente de silicato de alumínio hidratado) é possível se obter melhores resultados no isolamento acústico.

8.2 ISOLAMENTO TÉRMICO

Segundo Canut (2006), a condutibilidade térmica do gesso varia de acordo com a sua massa específica, que é aproximadamente igual a $0,3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, mostrando-se um ótimo isolante térmico se comparado a outros materiais de construção. Ao ser utilizado no interior das habitações, o gesso se mostra como bom isolante térmico ao impedir 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”.

8.3 RESISTÊNCIA AO FOGO

Canut (2006) afirma que, por se tratar de um material mineral, incombustível, o gesso apresenta bom

desempenho contra a ação do fogo. Ele também apresenta duas reações endotérmicas de desidratação durante seu processo de queima, de forma que o calor gerado pela elevação da temperatura durante um incêndio é inicialmente consumida pela evaporação das moléculas de água. De acordo com Rocha (2007) tais propriedades térmicas permitem inclusive a utilização do gesso na confecção de portas corta-fogo.

8.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Em termos gerais, os produtos à base de gesso, se comparados com o concreto e outros materiais cimentícios, apresentam fraca resistência mecânica, fazendo com que sua utilização na construção se limite ao acabamento de paredes e tetos. Tal resistência está relacionada com o crescimento cristalino das agulhas da pasta de gesso, sendo as propriedades mecânicas prejudicadas quando o arranjo cristalino é formado por cristais grossos. A resistência mecânica também é afetada pela relação água/gesso, uma vez que a quantidade de água está diretamente ligada à porosidade final do material (CANUT, 2006).

Além disso, para o autor outro fator que influencia a resistência mecânica do gesso é o uso de aditivos tenso-ativos redutores de água. Ao se adicionar um aditivo ao gesso, sua cadeia hidrófila é adsorvida pela superfície da partícula de gesso, tornando as partículas de gesso hidrófilas, reduzindo a quantidade de água de amassamento e aumentando a resistência mecânica das pastas endurecidas de gesso. A adição de fibras poliméricas também melhora a resistência mecânica do gesso.

9 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO FOSFOGESSO

Segundo Canut (2006) é fundamental a classificação de um resíduo para a tomada de decisões quanto à manipulação, armazenagem, coleta, transporte e disposição final de tal resíduo. No Brasil as prescrições normativas da ABNT padronizam a classificação dos resíduos, sendo elas: NBR 10.004 - Resíduos Sólidos, NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos, NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos e NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos.

Segundo a norma brasileira NBR 10.004 os resíduos sólidos são definidos como:

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 (ABNT, 2004a).

De acordo com a norma NBR 10.004, o resíduo fosfogesso é classificado como classe II B, sendo considerado como um resíduo inerte. Entende-se por resíduo inerte todo resíduo que quando amostrado de uma forma representativa, conforme descrito na NBR 10.007 (ABNT, 2004d), e submetido a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, segundo NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de portabilidade da água, desconsiderando os aspectos cor, turbidez, dureza e sabor (OLIVEIRA, 2005).

Quanto a sua radioatividade, um resíduo sólido pode ser classificado como "NORM" (Naturally Occurring Radioactive Materials) ou "TENORM" (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials). Define-se como "NORM" todos os minérios que contêm material radioativo de ocorrência natural e como "TENORM" os rejeitos e subprodutos contendo material radioativo de ocorrência natural concentrado tecnologicamente. Em razão da quebra do equilíbrio

radioativo da rocha fosfática durante o processo de produção de fertilizantes, o fosfogesso enquadra-se na classe de resíduos radioativos “TENORM” (CANUT, 2006).

10 DISPOSIÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

Canut (2006) cita duas maneiras utilizadas para o descarte final, a disposição em pilhas em áreas próximas às fábricas e o bombeamento para lagos, rios e oceanos. A disposição em pilhas é a mais utilizada pelas indústrias de fertilizantes de todo o mundo, podendo ocorrer de duas formas: “a úmido” ou “a seco”. Tal estocagem do fosfogesso é acompanhada de elevados gastos às empresas, uma vez que são exigidas grandes áreas e um rigoroso controle a fim de se reduzir os impactos ambientais (RUFO, 2009).

Na disposição “a úmido”, Figura 4, há a disposição de uma suspensão contendo água ácida e teores de sólidos variando de 5% a 20%. Essa suspensão é bombeada para lagoas de sedimentação, onde, após a decantação do fosfogesso, este é acumulado em pilhas. Nestas pilhas existe a drenagem da água ácida seguida pela sua recirculação na planta de produção de ácido fosfórico (OLIVEIRA, 2005).



Figura 4 - Disposição à úmido do fosfogesso
Fonte - CANUT, 2006.

Na disposição “a seco”, Figura 5, o fosfogesso, descartado na forma de torta, é transportado da

unidade de ácido fosfórico por correias ou caminhões até a área de disposição final, onde também é acumulado em pilhas (OLIVEIRA, 2005).

Matos (2011) menciona sérios problemas ambientais gerados a partir destes dois tipos de armazenamento, como a contaminação de corpos d’água e águas subterrâneas pela lixiviação, que gera uma água altamente ácida contendo níveis elevados de contaminantes diversos, como o flúor e fósforo; poluição visual pela formação de enormes áreas degradadas; poluição atmosférica e contaminação de solo e subsolo.



Figura 5 - Disposição a seco do fosfogesso
Fonte - MATOS, 2011.

Fernandes, Luz e Castilhos (2010) descrevem como formas de disposição final do fosfogesso o retorno à mina de extração de fosfato e descarregamento em rios e oceanos, sendo esta última forma praticada por poucas indústrias no mundo, devido ao impacto causado ao meio ambiente próximo ao local de lançamento.

Diante disso, sabe-se que unidades situadas em Marrocos e África do Sul fazem a descarga da lama de fosfogesso no Oceano Atlântico. A carga descarregada é diluída e jogada em áreas com fortes correntes marítimas e em costas não habitadas. No Brasil tal prática não é utilizada, uma vez que a maioria das plantas de ácido fosfórico existentes não está localizada próxima a corpos d’água capazes de

receber a carga de fosfogesso (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010).

De acordo com Fernandes, Luz e Castilhos (2010), os impactos pelo descarte do fosfogesso em oceanos ainda não foram totalmente avaliados, sabendo-se apenas que a solubilidade do gesso em água à temperatura ambiente é da ordem de 2,3 g/l, e na água do mar de 3,5 g/l. Se tal descarga for em mar aberto com correntes marítimas, o fosfogesso irá se dissolver lentamente, alterando muito pouco a concentração de elementos químicos do corpo aquático marítimo. O autor também cita que tal prática pode contribuir para a redução da influência de metais pesados, fluoretos, radionuclídeos e ácidos presentes na lama do fosfogesso através de sua diluição. Mas ressalta que se faz necessária a realização de estudos de longo prazo para avaliar os impactos no ambiente próximo à descarga do resíduo.

Quanto ao retorno à mina, Matos (2011) afirma que este só pode ser realizado de forma econômica se a unidade de produção de ácido fosfórico for próxima à mina. Segundo o autor existe uma unidade que utiliza esse tipo de disposição na Carolina do Norte, Estados Unidos, retornando o fosfogesso misturado com terra argilosa caulínica à mina, reduzindo a níveis mínimos os problemas ambientais, uma vez que a mistura fosfogesso argila é geotecnicamente estável.

11 USOS DO FOSFOGESSO NO BRASIL

Ainda não há no Brasil especificações técnicas sobre os critérios para a utilização industrial do fosfogesso. Estudos acerca das áreas de sua aplicação são fundamentais para se conhecer melhor o resíduo e aplicá-lo sem que haja danos ao meio ambiente ou à saúde humana. Atualmente existem várias áreas que podem fazer uso do fosfogesso como matéria-prima em seus processos produtivos, dentre as principais estão: a agricultura, a construção civil, a indústria

cimenteira e demais indústrias químicas (MATOS, 2011).

11.1 AGRICULTURA

Na agricultura o fosfogesso é utilizado como fonte de nutrientes para as plantas e para modificar certas propriedades físicas e químicas do solo. Ele reduz a saturação do alumínio tóxico e atua como fonte de cálcio para solos tropicais, permitindo um maior aprofundamento das raízes das plantas e melhor absorção de água dos nutrientes do solo. Vale salientar que em solos como alto teor de sódio ele é utilizado como redutor da alcalinidade e da salinidade, aumentando a solubilidade do carbonato de cálcio do solo, podendo também ser utilizado como fonte de enxofre para solos carentes desse elemento (RUFO, 2009).

Oliveira (2005) descreve que grande parte dos solos brasileiros apresenta deficiência em cálcio (MG, RJ, RS, SP) e enxofre (GO, MG, MS, PR, SP), cabendo o uso do fosfogesso para se aumentar a produtividade das safras. Através do uso do fosfogesso em culturas de soja e feijão em vários tipos de solo em São Paulo obteve-se um incremento de 28% a 37% na produtividade da soja, enquanto o feijão apresentou um aumento de produção variando de 13% a 54%. No caso de seu uso como fonte de cálcio, o amendoim se mostrou como a cultura anual mais promissora.

Seu uso na agricultura deve ocorrer de forma cautelosa, uma vez que ele pode se tornar uma fonte potencial de riscos ambientais, como, por exemplo, a assimilação de radionuclídeos e outros elementos pelas plantas e acúmulo radioativo no solo; contaminação de águas superficiais e subterrâneas, além de constituir uma fonte adicional de exposição à radiação para membros do público e trabalhadores, (RUFO, 2009; SANTOS, 2002).

11.2 INDÚSTRIA QUÍMICA

Conforme exposto por Oliveira (2005), o fosfogesso costuma ser muito utilizado nas indústrias químicas, entre elas na indústria cimenteira como agente retardador do tempo de pega, substituindo o gesso comum; indústria de papel, plásticos e tintas, como carga mineral funcional. O autor também relata a possível recuperação de aproximadamente uma tonelada de enxofre em cada seis toneladas de fosfogesso nas indústrias de ácido sulfúrico com a produção de sulfato de amônio, de ácido sulfúrico ou de enxofre elementar.

11.3 CONSTRUÇÃO CIVIL

Na indústria da construção civil, o fosfogesso entra como substituto ao gesso natural, na fabricação de placas, blocos e painéis, na produção de gesso e na fabricação de agregados para concreto. Entretanto, a presença de flúor e enxofre nesse resíduo, em alguns casos, pode limitar sua utilização, por alterar o tempo de endurecimento da pasta de gesso ou, no caso do cimento, do tempo de pega do concreto. A presença de umidade excessiva também pode inviabilizar o uso econômico do fosfogesso, uma vez que se tem o aumento de consumo de energia para secagem do material (OLIVEIRA, 2005).

Quanto às implicações radiológicas, seu uso como material de construção é inviabilizado ao se considerar o efeito nocivo da inalação do radônio em ambientes onde todas as paredes de um quarto são constituídas exclusivamente de fosfogesso. No entanto a adoção de medidas mitigadoras, tais como misturar o fosfogesso com outros materiais de construção ou mesmo utilizar uma mistura de fosfogessos de várias procedências, pode implicar valores aceitáveis, permitindo sua utilização (SAUEIA, 1998).

11.3.1 PAVIMENTAÇÃO

Estudos desenvolvidos por Kobayashi e Parreira (2001) sobre expansibilidade e propriedades mecânicas da mistura fosfogesso e cimento mostraram que há pouca influência da energia de compactação na expansibilidade das misturas e que a imersão em água dos corpos de prova provocou quedas na resistência mecânica em comparação com os não-imersos. A partir de tais estudos verificou-se que misturas de fosfogesso e cimento podem ser utilizadas na construção de bases rodoviárias.

Ainda com o objetivo de utilizar materiais alternativos para fins de pavimentação, Rufo (2009) realizou estudos laboratoriais acerca da resistência mecânica e expansibilidade de misturas contendo solo tropical fino do estado de Goiás, cal e fosfogesso di-hidratado produzido no município de Catalão – GO em misturas com diferentes percentuais. A autora observou que em um dos solos estabilizados com fosfogesso e cal houve uma elevada plasticidade e expansão do material, inviabilizando a sua utilização em camadas de pavimento. Em contrapartida, nas misturas de solo e fosfogesso, foi observado que as características apresentadas viabilizam o uso das misturas em obras de pavimentação. Adicionalmente verificou-se que o risco de ocorrer contaminação do subsolo ou do lençol freático em obras rodoviárias com misturas de solo-fosfogesso é mínimo.

12 FOSFOGESSO/CERÂMICAS VERMELHAS

Na produção de cerâmicas vermelhas utiliza-se argila, cujos elementos básicos são os argilominerais, mistura de caulinita, illita, quartzo, mica, compostos de ferro, carbonatos e outros. A caulinita é o principal argilomineral componente das argilas, sendo responsável pela elevada resistência mecânica dos produtos cerâmicos. Quando pura, é pouco utilizada em cerâmica vermelha por necessitar de altas

temperaturas para adquirir melhor resistência, devendo ser misturada a outros tipos de argilas (DUARTE; FERNANDES, 2009).

Ao se utilizar o fosfogesso na produção de tijolos é necessária apenas a eliminação parcial de suas impurezas. Materiais cerâmicos com agregação de fosfogesso, em geral, apresentam boa qualidade, apesar de possuírem maior desgaste na parte externa após exposição às condições atmosféricas, sendo suas propriedades físicas e estruturais pouco influenciadas (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010).

Duarte e Fernandes (2009) realizaram estudo quanto à adição de fosfogesso na argila na proporção de 15% e 30%, observando um aumento significativo da resistência dos corpos de prova, o que torna viável a utilização do fosfogesso na produção de tijolos. Este aumento na resistência é justificado devido ao fosfogesso possuir granulometria menor e em formato de fios, enquanto que a argila é constituída de granulometrias maiores e cilíndricas. Ou seja, a presença de fosfogesso aumenta a superfície de contato entre as duas matérias-primas, o que, conseqüentemente, aumenta a resistência do produto final.

13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE TIJOLOS MACIÇOS E BLOCO DE VEDAÇÃO

Os tijolos maciços, também conhecidos como tijolos comuns, possuem a forma de um paralelepípedo-retângulo, sendo suas dimensões nominais estabelecidas na Norma Técnica NBR 8.041 (ANBT, 1983b).

Quanto à resistência à compressão, os tijolos maciços são divididos em três categorias. Os valores mínimos admitidos em cada categoria se encontram especificados na Tabela 5, sendo tais valores

definidos segundo a Norma Técnica NBR 6.460 (ANBT, 1983a).

Tabela 5 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria do tijolo maciço

Categoria	Resistência à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

Fonte - ABNT, 1983a.

Em relação aos blocos cerâmicos, estes são considerados componentes de alvenaria que possuem furos prismáticos e/ou cilíndricos perpendiculares às faces que os contêm. Eles podem ser classificados como de vedação, quando não têm a função de suportar outras cargas verticais, além de seu próprio peso, e pequenas cargas de ocupação ou estruturais, quando suportam cargas verticais além de seu próprio peso, compondo o arcabouço estrutural da edificação (ABNT, 1992).

As dimensões nominais dos blocos cerâmicos e resistência à compressão encontram-se especificadas na Norma Técnica NBR 7.171. Assim como no caso dos tijolos maciços os blocos cerâmicos são divididos em classes quanto ao valor da resistência mecânica, estando tais dados apresentados na Tabela 6 (ABNT, 1992).

Tabela 6 - Resistência mínima à compressão em relação à classe dos blocos cerâmicos

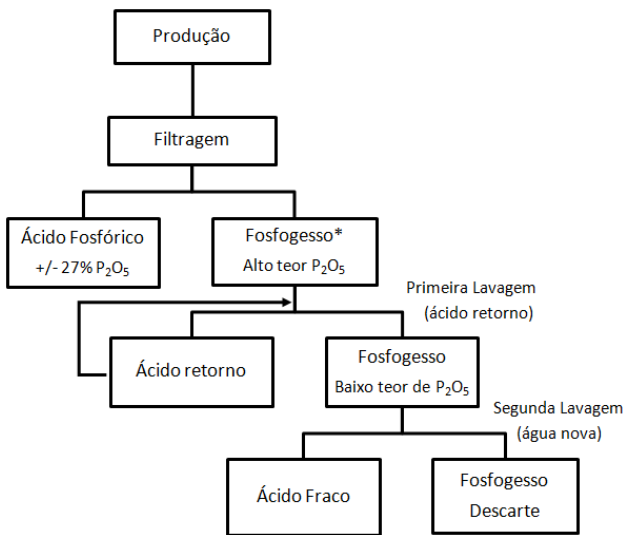
Classe	Resistência à compressão (MPa)
10	1,0
15	1,5
25	2,5
45	4,5
60	6,0
70	7,0
100	10,0

Fonte - ABNT, 1992.

14 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

A argila utilizada no experimento, doada pela indústria de materiais cerâmicos Parapuan, localizada em Pará de Minas/MG, é uma argila de várzea encontrada nas jazidas do município de Papagaios – MG, apresentando porcentagem inferior a 1% de impurezas passantes em peneiras de 325 meches (0,045mm).

O Fosfogesso utilizado na mistura foi doado pela empresa produtora de fertilizantes fosfatados Fosfértil, situada no município de Uberaba, Minas Gerais, estando esquematizado na Figura 6 o processo produtivo na indústria. De acordo com análises da empresa, o fosfogesso produzido é do tipo di-hidratado com alto teor de P_2O_5 e pH na faixa de 4,0 a 6,0, sua composição está relacionada na Tabela 4.



* Fosfogesso amostrado

Figura 6 - Fluxograma do processo produtivo Fosfértil

A fim de verificar se a adição do fosfogesso possui influência nas propriedades de resistência à compressão de materiais cerâmicos, foram realizados ensaios de tensão de ruptura à flexão em corpos de prova com adição de fosfogesso e dimensões: 75mm de comprimento, 28mm de largura e 18mm de altura. Todas as análises e ensaios foram realizados no

laboratório de cerâmica estrutural da Escola Senai Paulo de Tarso, localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Ao todo foram confeccionados 24 corpos de prova, sendo 6 deles constituídos de argila pura, sem adição de fosfogesso, identificados com a letra B (branco), e 6 corpos de provas para cada proporção de fosfogesso adicionada à argila, identificados com os números 5, 10 e 15, que representam as proporções 5%, 10% e 15% respectivamente. Os corpos de prova podem ser visualizados na Figura 7.



Figura 7 - Corpos de prova

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram deixados à temperatura ambiente por 12 dias para secagem. Após isso eles foram levados ao forno da indústria de materiais cerâmicos Parapuan sob uma temperatura de aproximadamente 1000°C (temperatura de queima de tijolos), com a finalidade de sua queima durante um intervalo de tempo de 73 horas.

Após a queima dos corpos de prova foi feita uma análise visual qualitativa quanto à sua coloração e textura. Avaliou-se também a presença de rupturas, trincas e deformações na estrutura final do material.

Os ensaios de tensão de ruptura à flexão (TRF) foram realizados após a secagem e a queima dos corpos de prova, utilizando o equipamento de medição de tensão, defletoômetro, com potência máxima de 60 Kgf. Esse teste teve como objetivo avaliar a resistência dos corpos de prova com argila pura e com diferentes concentrações de fosfogesso.

Os cálculos de tensão de ruptura à flexão dos corpos de prova foram feitos utilizando a Equação 2, de acordo com a norma técnica da ABNT NBR 13.818.

$$\text{TRF} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot a^2 \cdot b} \quad (2)$$

Onde: “TRF” definido como a tensão de ruptura à flexão (Kgf/cm²), “L” é definido como a distância entre os cutelos de apoio (5 cm para todos os corpos de prova), “a” e “b” representam, respectivamente, a espessura do corpo de prova (cm) e a largura do corpo de prova (cm) e “P”, a carga de ruptura (Kgf).

15 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada inspeção visual dos corpos de prova após o período de secagem, quando verificou-se que houve uma leve deformação devido à contração do material, não sendo verificadas trincas ou rachaduras, antes ou após a queima. Os corpos de prova apresentaram coloração clara e uniforme após a queima, sendo a coloração clara devido à argila utilizada. Não foram identificadas características peculiares a cada grupo de amostras que pudessem definir a proporção de fosfogesso utilizada.

No ensaio físico de tensão de ruptura à flexão houve a ruptura de apenas um corpo de prova, ao ser aplicada uma carga de 49 Kgf, sendo o corpo de prova rompido constituído apenas de argila. Uma vez que apenas uma amostra foi rompida e esta apresentava deformações em sua estrutura devido à contração do

material durante a secagem, não é possível afirmar que a resistência à compressão da argila utilizada no experimento é inferior a 60 kgf.

Uma vez que não houve a ruptura dos corpos de prova com fosfogesso, conclui-se que a resistência à compressão do material cerâmico com adição de 5%, 10% e 15% de fosfogesso foi superior a 60 Kgf. Entretanto, como não foi possível identificar a resistência à compressão do material constituído de argila pura, não se pode afirmar quanto à influência exercida pela adição de fosfogesso na cerâmica.

Apresentando resistência à compressão superior 60 kgf (5,88 MPa), tal material cerâmico poderá, portanto, ser utilizado na fabricação de tijolos maciços (categorias A, B e C) ou blocos de alvenaria de classes 10, 15, 25 e 45, sendo necessário submeter amostras a cargas superiores a 60 Kgf em testes de tensão de ruptura à flexão para se avaliar o enquadramento do material nas classes 70 e 100 dos blocos de alvenaria.

16 CONCLUSÃO

Uma vez que não foi possível quantificar a resistência à compressão da argila utilizada, conclui-se que não se pode opinar quanto à influência da adição de fosfogesso à argila na confecção de materiais cerâmicos. Entretanto, pode-se afirmar que a adição de fosfogesso não reduziu a resistência do material abaixo de 60 Kgf. Nesse contexto, tais resultados comprovam a viabilidade do uso do fosfogesso em cerâmicas, podendo o material com tais características ser empregado na fabricação de tijolos maciços de categorias A, B e C ou blocos de alvenaria de classes 10, 15, 25 e 60.

No entanto, constatou-se que, com o intuito de se avaliar a tensão de ruptura à flexão do material cerâmico produzido neste trabalho, deverão ser

utilizados equipamentos com carga de ruptura superior a 60 kgf. Vale destacar a importância da utilização desse resíduo na produção de tijolos, uma vez que não só as empresas que o geraram serão beneficiadas, como também haverá a preservação ambiental ao se evitar a degradação de grandes áreas onde há a extração de matéria-prima para confecção de materiais cerâmicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Parapuan e Vale (Fosfertil) por proporcionarem as respectivas matérias-primas, fosfogesso e argila vermelha, utilizados no estudo.

Aos colaboradores da Escola Senai Paulo de Tarso pela atenção dedicada na realização dos ensaios físicos das amostras preparadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6.502: Rochas e solos: terminologia*. Rio de Janeiro, 1995.18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA; *NBR 6.460: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - Verificação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1983a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA; *NBR 7.171: Bloco cerâmico para alvenaria - Especificação*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA; *NBR 8.041: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - Forma e dimensões - Padronização*. Rio de Janeiro, 1983b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004. Resíduos sólidos, classificação*. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004d. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA; *NBR 13.818: Placas cerâmicas para revestimento -*

Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

CAJAZEIRAS, Ana Pinto; CASTILHOS JÚNIOR, Armando Borges de. *Reutilização do fosfogesso na construção civil - Aspectos ambientais*. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26. 1998, Lima, Peru.

CANUT, Mariana Moreira Cavalcanti. *Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção*. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

DUARTE, C. N.; FERNANDES, G. *Adição de Fosfogesso em Cerâmica Vermelha para Fabricação de Tijolos*. Revista Processos Químicos Jul / Dez de 2009.

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

KOBAYASHI, A. R. K.; PARREIRA, A. B. *Avaliação da influência do tipo de cimento na expansibilidade das misturas de fosfogesso e cimento*. Revista Transportes, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 67-86, nov. 2001.

MATOS, T. H. C. *Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso*. 2011. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MAZZILLI, B.; SAUEIA, C. H. R. *Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material*

de construção. Revista Ambiente Construído, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 17-22, jul/dez, 1997.

OLIVEIRA, S. M. F. *Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária*. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ROCHA, C. A. L. *O gesso na indústria da construção civil: Considerações econômicas sobre utilização de blocos de gesso*. 2007. 103f. Dissertação (Mestrado em Economia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco.

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

SANTOS, A. J. G. *Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb* . 2002. 184 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

SAUEIA, C. H. R. *Distribuição Elementar e de Radionuclídeos na Produção e Uso de Fertilizantes Fosfatados no Brasil*. 2006. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, SP.