



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Martins, Walter Contabile,¹; Araújo, Amanda Jakelline Dias.²; Dalto, Gustavo.³

RESUMO

Atualmente, a geração de resíduos vem sendo uma grande preocupação mundial, principalmente pelas empresas e indústrias. Um desses resíduos em questão é o fosfogesso. O fosfogesso, é um subproduto gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados, no decorrer do processo para obtenção do ácido fosfórico (H_3PO_4). Essa geração é inevitável, e a indústria de fosfato é bem importante e rentável para o Brasil. Hoje o fosfogesso que antes era um subproduto, se encontra em formas de novos produtos, como: agricultura, construção civil, entre outras. O presente trabalho verifica a aplicabilidade do fosfogesso na pavimentação viária, analisando o seu comportamento e eficiência. O fosfogesso em estudo, está localizado na planta Mosaic Fertilizantes no município de Uberaba no estado de Minas Gerais. Para o teste em campo foi designada uma área de 300 metros dentro da planta da Mosaic Fertilizantes, trabalhando com 20 cm de profundidade. Foram utilizados 15% de fosfogesso (sem tratamento), entorno de 60 toneladas, sua mistura foi realizada com uma máquina escarificadora e arado, após umidade ótima a área foi nivelada e compactada. A mistura do fosfogesso e solo obteve excelentes resultados em campo, atingindo os objetivos de alternativa de estabilização de solo, onde visualmente performou como esperado, podendo ser uma alternativa de aplicação. Houve uma redução na manutenção periódica, sem redução do volume de tráfego, conseqüente diminuição de máquinas, emissão de CO_2 , consumo de diesel e redução de custos.

PALAVRAS-CHAVE: Fosfogesso; Pavimentação; Estabilização de Solo; Construção civil; Resíduo.

ABSTRACT

Currently, waste generation has been a major global concern, especially for companies and industries. One of these wastes in question is phosphogypsum. Phosphogypsum is a byproduct generated by the phosphate fertilizer industries, during the process to obtain phosphoric acid (H_3PO_4). This generation is inevitable, and the phosphate industry is very important and profitable for Brazil. Today, phosphogypsum, which was previously a by-product, is found in the form of new products, such as: agriculture, civil construction, among others. The present work verifies the applicability of phosphogypsum in road paving, analyzing its behavior and efficiency. The phosphogypsum under study is located at the Mosaic Fertilizandos plant in the municipality of Uberaba in the state of Minas Gerais. For the field test, an area of 300 meters was designated within the Mosaic Fertilizers plant, working at a depth of 20 cm. 15% of phosphogypsum (untreated), around 60 tons, was used, mixing was carried out with a scarifying machine and plow, after optimum humidity the area was leveled and compacted. The mixture of phosphogypsum and soil obtained excellent results in the field, achieving the objectives of an alternative soil stabilization, where it visually performed as expected, and could be an alternative application. There was a reduction in periodic maintenance, without a reduction in traffic volume, a consequent reduction in machines, CO_2 emissions, diesel consumption and cost reduction.

KEY WORDS: Phosphogypsum; Paving; Soil Stabilization; Construction; Waste;

¹ walter.martins@mosaicco.com - Empresa Mosaic Fertilizantes

² amandajds14@hotmail.com

³ gustavo.dalto@mosaicco.com - Empresa Mosaic Fertilizantes



INTRODUÇÃO

Atualmente, a geração de resíduos vem sendo uma grande preocupação mundial, principalmente pelas empresas e indústrias, há uma crescente no pensamento de geração mínima. Resíduos que antes eram descartados de qualquer forma, hoje há toda uma cadeia de descarte, tornando possível a geração de novos produtos. Tudo isso também devido a medidas regulatórias e rigorização da fiscalização ambiental no Brasil (ESTER et al., 2004).

Um desses resíduos em questão é o fosfogesso. O fosfogesso, é um subproduto gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados, no decorrer do processo para obtenção do ácido fosfórico (H_3PO_4), a principal reação química que acontece no processo de formação do fosfogesso é o desgaste da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico (H_2SO_4) (TOLEDO; PEREIRA, 2001).

Atualmente o fosfogesso produzido é armazenado em formato de pilha, no qual é feito monitoramentos para que não haja contaminação ambiental, seja pelo ar, solo e água (SANTOS et al., 2006). A composição química média do fosfogesso é semelhante a 17,7% de enxofre (S), 30,9% de óxido de cálcio (CaO), 0,2% de flúor (F) e 0,7% de fósforo (P_2O_5) (RAIJ, 1988).

Segundo Mangin (1978) o nível de impurezas presentes no fosfogesso, vai depender da rocha fosfática de origem, como é a produção e eficiência da planta, outro fator é seu Ph, quanto maior o tempo de estocagem menor será sua acidez. Mesquita (2007) em seu estudo na pilha de gesso de Catalão, encontrou um Ph de 3,7 demonstrando que sua análise foi realizada em uma amostra recente. O fosfogesso possui propriedades bem similares ao gesso natural, variando sua densidade entre 2,27 e 2,40 g/cm (SENES, 1987).

Essa geração é inevitável, e a indústria de fosfato é bem importante e rentável para o Brasil. E hoje o fosfogesso que antes era um subproduto, se encontra em formas de novos produtos, como: agricultura, indústrias de cimento, construção civil. Essas aplicações do fosfogesso contribui significativamente para o desenvolvimento sustentável, visando os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental (OLAWUMI; CHAN, 2018).

O presente trabalho visa verificar a aplicabilidade do fosfogesso, sem tratamento (in natura) na pavimentação viária, como estabilização de solo, analisando o seu comportamento e eficiência. Atualmente, a empresa faz manutenções diárias devido ao tráfego interno de caminhões e por não ser um pavimento urbano tradicional. Em períodos de alto índice de chuvas essa manutenção possui a frequência aumentada e muitas vezes o tráfego é interrompido devido as questões de segurança. O teste foi realizado na planta da Mosaic Fertilizantes no município de Uberaba – MG, onde são necessários manutenções preventivas da via com a régua (máquina niveladora de terreno) diariamente, tendo como custos diários homem/hora e o consumo de combustível. A utilização do fosfogesso visa melhorar o perfil geotécnico, melhorando as condições do pavimento e consequentemente diminuir a manutenção.

Há trabalhos relacionando a utilização do fosfogesso na pavimentação, Mesquita (2007) e Metogo (2010) apresentaram resultados benéficos da utilização do fosfogesso. Metogo (2010), ressalta a importância de ter cuidados para controlar a expansão dessa mistura, limitando até 20%, já Mesquita (2007) recomenda que sejam utilizados teores de até no máximo 30%. Já o trabalho de Rufo



(2009), mostrou elevados valores de expansão, inviabilizando a mistura para tal finalidade, porém ele sugere a importância de medidas preventivas e de monitoramentos quando utilizados resíduos para pavimentação.

Um estudo feito por Silva e Rezende (2013) para avaliar as misturas com solo tropical, fosfogesso tratado termicamente (cimento e cal) para pavimentação. Elas mostraram que as misturas com fosfogesso tratado termicamente e cimento apresentaram resistência superior e menor expansibilidade em relação às misturas com di-hidratado. As autoras tiveram um retorno positivo do uso do fosfogesso como material de base e sub-base de pavimentos.

Já o trabalho da Alves (2015), a sua mistura de solo e fosfogesso TT mostrou elevadas resistências, mesmo após ser submetida à saturação, sugerindo que o cimento seja desnecessário na composição.

MATERIAIS E MÉTODOS

O fosfogesso em estudo, está localizado na planta Mosaic Fertilizantes localizado no município de Uberaba no estado de Minas Gerais. Também conhecido como gesso químico, é um resíduo industrial proveniente das rochas fosfáticas, principal componente de fertilizantes fosfatados (Figura 1). A principal reação química que acontece no processo de formação do fosfogesso é o ataque da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico (H_2SO_4) (TOLEDO; PEREIRA, 2001). Abaixo uma foto do fosfogesso, no qual é depositado em pilha (figura 1).



Figura 1: Pilha de fosfogesso de Uberaba/MG (MOSAIC, 2023)

Para o teste em campo (Figura 2) foi designada uma área de 300 metros, com 7 metros de largura, dentro da planta da Mosaic Fertilizantes em Uberaba, trabalhando com 20 cm de profundidade. O tráfego na área é industrial, composto por caminhões basculantes de 6 eixos com capacidade mínima de 20 toneladas. Os caminhões fazem o trecho carregado, transportando material em deslocamento. Foram instalados poços de monitoramento três meses antes do teste, esses poços servem para melhor acompanhamento e melhor possibilidade de análises de contaminação. Realizamos os ensaios conforme NBR 10004:2004, em laboratório externo e acreditado, de lixiviado



e solubilizado. Uma semana antes do teste foram retiradas amostras para análise, outra análise posterior a 90 dias e uma análise após 12 meses, um ano de teste.



Figura 2: Área de teste (MOSAIC, 2023)

Na primeira amostragem, meses antes do teste, todos os parâmetros analisados apresentaram resultados dentro dos padrões preconizados pela NBR 10004:2004 para lixiviados. Os parâmetros Alumínio Total, Ferro Total, Fluoreto Total, Manganês Total e Sulfato Total, apresentaram resultados fora dos padrões permitidos pela NBR 10004:2004 para solubilizados, podendo ser fatores potenciais impactados.

Em laboratório foi analisado o solo da área de testes e foi definida a melhor composição e proporção de adição de fosfogesso para atingir o desempenho esperado. Os resultados laboratoriais mostraram que o solo da área de testes é um tipo de solo argiloso. Com a adição 15% de fosfogesso foi possível encontrar um aumento de 10% de CBR. Além disso, os ensaios mostraram que o Fosfogesso não precisa de acerto de pH com cal para ser utilizado para estabilização de solos. A tabela (Tabela 1) apresenta as especificações para enquadramento do pavimento como base e sub-base pelo DNIT, e o resultado do presente trabalho

CAMADA	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
<i>SUB-BASE</i>	≥ 20	≤ 0,5
<i>BASE</i>	≥ 60	≤ 0,5
<i>Trabalho</i>	57	0,04

Tabela 1. Especificação DNIT vs trabalho (DNIT, 2006)

A avaliação da capacidade de absorver tráfego foi realizada conforme os seguintes testes e métodos normativos (tabela 2):



TESTE	TRÁFEGO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE	MÉTODO
ISC (CBR)	alta	> 70	%	DNER-ME 172/16
	média	40 to 70		
	baixa	< 40		
	Trabalho	57		
EXPANSÃO	alta	> 3	%	DNER-ME 172/16
	média	0,5 to 3		
	baixa	< 0,5		
	Trabalho	0,04		
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	alta	> 30	%	DNER-ME 122/94
	média	7 to 30		
	baixa	< 7		
	Trabalho	7,6		

Tabela 2. Especificação de tráfego vs método vs resultado obtido

O teste foi realizado na terceira semana de abril, entre os dias 17 e 22 de abril. No dia 17, toda a equipe participante do projeto se reuniu para alinhamento de detalhes, como a chegada do fosfogesso e maquinário necessário. No dia 18, após a abertura do solo (20 cm) foi adicionado a proporção de gesso (15%), sua mistura foi realizada com Escarificadora e Arado. Essa mistura é realizada até obter uma homogeneidade do material. Na Figura 3, podemos observar a mistura do solo com o fosfogesso, no qual foi utilizada a proporção de 60 toneladas do resíduo.

O solo argiloso predominante na região, possui uma grande facilidade de acúmulo de água e apesar do fosfogesso ter auxiliado nessa questão, foi necessário passar a escarificadora e a grade para auxiliar o solo na exposição ao sol, para alcançar a umidade ótima desejada. Foi determinado no laboratório que a umidade ótima do solo com o fosfogesso é de 15% a 19% de umidade, e dessa forma foi aplicado em campo. Primeiramente foi coletado amostras de solo ao longo do trecho de 300 metros, esse material foi passado na peneira para reduzir o tamanho dos grânulos, e depois foi utilizado um higrômetro para medir a umidade do solo.

Após a umidade ótima do material que estava em 19%, passou-se a régua niveladora em toda a área, e após sua nivelção, foi utilizado o rolo compactador, para compactar o terreno. No final da compactação, a área já se encontrava pronta para a passagem normal do tráfego.



Figura 3: Etapas do processo de pavimentação (MOSAIC, 2023)

Após a entrega da área e a inauguração no dia 24 de abril, no mesmo dia passaram um total de 70 caminhões. No dia 25 de abril, um dia após a inauguração da área, passaram um total de 151 caminhões ao longo do dia. E todo esse tráfego seguiu sem a necessidade de passar a régua niveladora para acertar a área. A empresa que presta serviço dentro da Mosaic Fertilizantes de manutenção das vias, informou que geralmente passa a régua niveladora nas áreas todos os dias, geralmente para acertar o solo que vai acumulando em um determinado local (denominado como costelas de vaca). A passagem deste equipamento não configura como manutenção da via, apenas quando é necessário fazer toda a parte de compactação. Dentro da planta, gasta-se entorno de 40 minutos para passagem na régua niveladora, e para uma nova manutenção com compactação entorno de 7 dias, devido a utilização de mais maquinários.



Figura 4: Motoniveladora, ou Régua Niveladora. Fonte: <https://www.lafaetelocacao.com.br/produto/motoniveladora/>

Hoje a empresa que presta serviço dentro da Mosaic, tem o valor hora do operador de R\$ 17,00 e o maquinário com o gasto de combustível (diesel) de 13 Km/l. Com a utilização do fosfogesso, a ideia é reduzir a necessidade de manutenção dentro do complexo da Mosaic Fertilizantes, além disso, a empresa não fica inoperante em momentos de chuva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a entrega da área tratada com fosfogesso, foi passada a régua niveladora apenas uma vez no local do teste, o que já se configura como um excelente resultado. O fosfogesso possui muito potencial de uso como material de construção de bases ou sub-bases de pavimentos. Entretanto ele apresenta pouca resistência à compressão simples e pouca durabilidade quando é submetido a estabilidade mecânica devido à compactação (GUTTI et al., 1996). Entretanto ele vem tendo excelentes resultados na área do teste, suportando uma grande incidência de veículos leves e principalmente pesados, sem a necessidade de manutenção.

A aplicação do fosfogesso em base e sub-base em pavimentações é realidade em países como os Estados Unidos. Um monitoramento realizado por durante cinco anos indicaram resultados esplendidos na cidade de La Porte no estado do Texas, o local sofre de grande incidência de tráfego e ainda apresenta uma excelente capacidade de suporte, o local utilizou misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10%, respectivamente (CHANG et al., 1989).

Portanto, o fosfogesso surge como uma alternativa promissora viável para a pavimentação, possibilitando uma destinação ambientalmente adequada para esse resíduo e podendo reduzir assim a necessidade de exploração de recursos naturais para base e sub-base. Abaixo segue a proporção de caminhões passantes (Tabela 3) na pista antes e durante o teste, nos anos de 2023 e 2024.



<i>Resumo de Caminhões 2023/24*</i>	<i>Quantidade</i>
<i>Janeiro</i>	4506
<i>Fevereiro</i>	5256
<i>Março</i>	5658
<i>Abril</i>	5052
<i>Mai</i>	6114
<i>Junho</i>	6498
<i>Julho</i>	6148
<i>Agosto</i>	5514
<i>Setembro</i>	7298
<i>Outubro</i>	3814
<i>Novembro</i>	7036
<i>Dezembro</i>	7048
<i>Janeiro*</i>	5525
<i>Fevereiro*</i>	4956
<i>Março*</i>	4352
<i>Total</i>	84775

Tabela 3. Meses vs caminhões passantes na zona de teste

Abaixo, os registros fotográficos da avaliação da área pavimentada com fosfogesso ao longo do ano de 2023. OBS: primeira foto são sempre da área pavimentada com fosfogesso (esquerda) em comparação com a pista testemunha (direita) sem fosfogesso. Algumas datas possuem terceira foto, que são alterações na pista em relação ao acúmulo de chuvas.



Figura 5: Imagem de 6 de junho - 2023 (MOSAIC, 2023)

Até setembro, foram meses de estiagem. No início de outubro houve chuvas isoladas no qual tivemos o primeiro indicativo. Como pode observar abaixo, no dia 05 de outubro, a estrada onde não houve o tratamento com fosfogesso teve uma reação diferente da área com tratamento.



Figura 6: Imagem de 5 de outubro - 2023 (MOSAIC, 2023)

Em 27 de novembro, houve bastante chuva na região, e observou-se que a pista sem o tratamento acabou retendo bastante água, não sendo possível trafegar.



Figura 7: Imagem de 27 de novembro - 2023 (MOSAIC, 2023)

Houve continuidade de chuvas na cidade de Uberaba entre os meses de novembro a janeiro, aumentando a quantidade de água retida no solo na pista sem fosfogesso, inclusive aumentando mais uma parte com possibilidade de atolamento e sequente interdição de operação. As fotos a seguir demonstram o comportamento do ano de 2024:



Figura 8: Imagem de 15 de fevereiro - 2024 (MOSAIC, 2023)



Figura 9: Imagem de 7 de março - 2024 (MOSAIC, 2023)

As amostras iniciais de gesso e solo indicaram a possibilidade de contribuição dos parâmetros de Alumínio Dissolvido (Al), Arsênio Dissolvido (As), Fluoreto e Sulfato. Instalou-se 2 poços a jusante do teste para monitoramento. Ao comparar a análise inicial com as análises de 90 dias e 360 dias, é possível considerar que as análises dos poços de monitoramento não evidenciaram aumento significativo dos parâmetros.



CONCLUSÃO

Para este teste em questão, com o determinado tipo de solo (argiloso), a estabilização de solo feita com 15% de adição de fosfogesso (in natura) em sua composição foi promissora. Totalizou-se 84775 caminhões (carregados com aproximadamente 20 toneladas cada) em 10 dias de testes, aproximadamente 15.800 toneladas sobre a zona de teste. Utilizou-se então, aproximadamente o consumo de 20 toneladas de material a cada 100 m de via, portanto um consumo de 200 kg/m de fosfogesso in natura.

Houve apenas uma manutenção preventiva com a régua (máquina niveladora de terreno) evitou-se um total de R\$170,00 (1h/dia) no trecho por 10 dias. Como não houve passagem de maquinário corretivo, um custo evitado no trecho de 300 metros de cerca de 0,02 Litros de Diesel por equipamento totalizando 15,8 L de diesel não utilizados.

Estes resultados são promissores como alternativas em estradas vicinais, não pavimentadas. A utilização do fosfogesso como estabilização de solo precisa ser mais aprofundada, todavia neste teste, prolongou a vida útil do sistema em 1 ano de teste, reduzindo manutenção e sendo uma alternativa “barata” as atuais, com alguns custos evitados significativos. O teste também possibilitou vislumbrar mais uma aplicação para o fosfogesso que é uma alternativa para o passivo ambiental. As análises dos poços de monitoramento, na área escolhida, não evidenciaram colaboração da contaminação do solo pelo material.

REFERÊNCIAS

- ALVES, K. C. S. K. **Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- PARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 2006. 274p
- ESTER et al. Cultural change and environmentalism: a cross-national approach of mass publics and decision makers. **Revista Ambiente e Sociedade**, São Paulo, vol. 7, n. 2, 2004.
- MANGIN, S. Généralités. **Le phosphogypse**: utilisation d'un sous-produit industriels em technique routière. Laboratoire Central de Ponts e Chaussées, Numéro spécial VII, 1978, p.p. 7-15.
- MESQUITA, G.M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.
- METOGO, D. A. N. **Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico executado com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal**. 2010. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2010.
- OLAWUMI, T., & CHAN, D. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, 183(2018), pp.231-250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.1620959-6526>.
- RAIJ, B.V. **Gesso Agrícola na Melhoria do Ambiente Radicular no Subsolo**. ANDA- Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. São Paulo, 1988. 88 p.
- RUFO, R. C., **Estudo Laboratorial De Misturas De Fosfogesso, Solo Tropical E Cal Para Fins De Pavimentação**, Goiânia, GO: UFG, 2009. 155 p.



SANTOS, A.J.G.; SILVA, P.S.C; MAZZILI, B. P; FAVARO, D.I. Radiological Characterization of disposed phosphogypsum in Brazil: Evaluation of the occupation exposure and environmental impact. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, p. 179-185, 2006.

SENES, Consultantes Limited. **An analysis of tohe major environmental and health concerns of phosphogypsum tailings in Canada and methods for their reduction.** Ontario. Min, Environ, and Environ. Canadá, 1987.

SILVA, M. V.; REZENDE, L. R. **Estudos laboratoriais de misturas com solo tropical, fosfogesso anidro, cimento e cal para pavimentação.** Relatório de Iniciação Científica. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico.** São Paulo. p.p. 27-64. 2001.