

Estudo da Deformabilidade do Fosfogesso Hemi-hidratado

Thiago Lopes dos Santos

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, thiagolopes.engcivil@gmail.com

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, marciamascarenha@gmail.com

Matheus Eliatan da Silva

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, matheuseliatan_@hotmail.com

RESUMO: Este artigo tem como objetivo verificar a influência do tratamento térmico do fosfogesso na deformabilidade das misturas, em sua estabilização ao longo do tempo e no seu potencial de colapso. Durante sua formação ele é classificado de três formas: anidro (A), hemi-hidratado (HH) e di-hidratado (DH), sendo que é possível também obter o HH por meio de tratamento térmico do DH. Estudos no laboratório de geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) utilizando o fosfogesso DH foram executadas e nelas foram utilizadas baixas quantidades de fosfogesso (menores que 20%) e as misturas apresentaram expansões e deformabilidades elevadas que não se estabilizam ao longo do tempo. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de adensamento oedométrico com fosfogesso HH, tanto na condição saturada quanto na condição não saturada, em amostras compactadas na energia Proctor intermediário. Os ensaios foram realizados em misturas constituídas de 50% de solo e 50% de fosfogesso, 50% de solo, 46% de fosfogesso e 6% de cal e 50% de solo, 41% de fosfogesso e 9% de cimento. As amostras de solo e fosfogesso foram coletadas nas cidades goianas de Aparecida de Goiânia e Catalão, respectivamente. Os resultados mostraram que as misturas, quando submetidas a tensões na condição não inundada, apresentam menor deformabilidade e mais rápida estabilização das tensões, ao contrário das mesmas amostras na condição saturada. As amostras apresentaram potenciais de colapso leves em geral e moderados apenas para tensões superiores à 800kPa, que não são usuais em engenharia. Assim este estudo conclui que a utilização de fosfogesso HH reduz a deformabilidade dos materiais e melhora a sua estabilização ao longo do tempo, embora não resolva o problema para altos valores de tensões (1600kPa).

1 INTRODUÇÃO

O fosfogesso é gerado a partir da produção do ácido fosfórico nas indústrias de adubos e fertilizantes fosfatados, necessitando assim de viabilizar seu aproveitamento. Ele é conhecido como gesso industrial devido a sua composição química ser a mesma do gesso natural e da gipsita. As indústrias de beneficiamento de minérios e de fertilizantes fosfatados que geram subprodutos como a bauxita e o fosfogesso, respectivamente, tem uma produção de 1 tonelada do material principal para 5 toneladas do fosfogesso. Dentre os problemas existentes com a produção demasiada destes subprodutos, está a reserva de grandes áreas para estocagem,

uma vez que esse subproduto apresenta traços de elementos radioativos e de metais pesados, o que pode ser prejudicial ao meio ambiente em longo prazo e pode acarretar em risco de contaminação do meio ambiente. (MESQUITA, 2007).

Durante sua formação ele pode ser classificado de três formas distintas: anidro (A), hemi-hidratado (HH) e di-hidratado (DH), sendo a última a mais comum delas, onde as moléculas de água presentes na reação se mantêm constantes. Em busca de novas aplicações para o uso do fosfogesso, foi implementado uma linha de pesquisa na Universidade Federal de Goiás (UFG), na área de pavimentação. Os estudos iniciaram com o

fosfogesso di-hidratado (DH) em misturas com solo, entre os anos de 2007 e 2013 e com o fosfogesso hemi-hidratado (HH) a partir de 2013.

Neste caminho, foram desenvolvidas diversas pesquisas com a incorporação máxima de apenas 20% do fosfogesso DH na mistura com o solo, e nesses casos as amostras possuíam alta expansão (Rufo, 2009) e deformabilidade elevada e sem estabilização ao longo do tempo (Chagas, 2011).

Assim, com o intuito de sanar essas deficiências, e aumentar o teor de fosfogesso utilizado nas misturas, Silva e Rezende (2013) propuseram o tratamento térmico do fosfogesso para transformá-lo em um fosfogesso hemi-hidratado (HH), adaptando a metodologia de Maccarini (1991). O processo de hemi-hidratação do fosfogesso é comumente utilizado na Europa, África e no Japão. Sendo que no Japão a maioria das fábricas de fertilizantes fosfatados já utiliza este método de forma direta, produzindo quantidades mais altas de P_2O_5 e uma dissolução mais eficaz da rocha fosfática, o que produz um fosfogesso de melhor qualidade e viabiliza sua aplicação em indústrias cimenteiras (Silvestre, 2002).

Silva e Rezende (2013) verificaram que o tratamento térmico diminui a expansão e melhora o desempenho mecânico do material, porém as misturas ensaiadas por eles apresentam pouca trabalhabilidade e baixo teor de fosfogesso, o que dificultaria a sua utilização em campo.

Dando continuidade ao estudo anterior, Alves (2015) determinou um teor de fosfogesso HH que deve ser misturado somente ao solo e com o cimento, utilizando a máxima porcentagem do subproduto de forma a garantir a trabalhabilidade dessas misturas e menor expansão. Seguindo essa mesma linha, foi determinado também uma porcentagem de cal que atendessem os mesmos critérios, a fim de verificar sua viabilidade quando comparado às duas misturas anteriores.

A autora observou que o tratamento térmico reduz a expansão e melhora a resistência dos materiais. No entanto, não verificou sua influência na deformação e nem no potencial de colapso que tais amostras possam apresentar.

Assim, este trabalho tem como objetivo verificar a influência do tratamento térmico do fosfogesso na deformabilidade e estabilização ao longo do tempo por meio de ensaios de adensamento oedométrico, tanto na condição saturada quanto na condição não saturada e também analisar os seus potenciais de colapso.

2 METODOLOGIA

A seguir serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, as metodologias utilizadas para a coleta e preparação dos materiais utilizados, como foram definidas as misturas e como foram realizados os ensaios de adensamentos oedométricos apresentados.

2.1 Materiais Utilizados

O solo utilizado é um solo coletado em uma jazida localizada no bairro de Vila Brasília, na cidade de Aparecida de Goiânia – Goiás. Para a coleta do material foi retirada a camada superficial do solo composta por matéria orgânica. Esse material foi transportado para o laboratório da geotecnia da EECA da UFG, onde foi preparado para os ensaios que compõe este artigo.

O fosfogesso utilizado foi coletado na fábrica e enviado ao laboratório de geotecnia da EECA da UFG. O fosfogesso gerado na indústria de Catalão é um fosfogesso DH com deposição a seco. Porém, para a realização das pesquisas, este fosfogesso foi tratado termicamente transformando-o em fosfogesso HH adaptando-se a metodologia empregada por Maccarini (1991), que tratou termicamente amostras de fosfogesso DH a uma temperatura de 100 a 160°C durante o período de 2 horas, obtendo amostras de fosfogesso HH com qualidade. Neste trabalho a amostra foi tratada à temperatura de 130°C e até obter constância de massa, o que resultou em tempo de estufa de 72 horas, obtendo-se uma amostra homogênea, conforme executado por Silva e Rezende (2013).

Os estabilizantes químicos adicionados às misturas foram a cal e o cimento. A cal utilizada é a cal hidratada classificada como

CH-III, pois a cal dolomítica do tipo CH-I e a Cal Calcítica do tipo CH-I não obtiveram resultados satisfatórios em pesquisas anteriores. Já o cimento utilizado, foi o cimento Portland CP II Z-32 RS, que é composto com pozolana, que resiste ao ataque de sulfato.

2.2 Preparação das amostras e definição das misturas

O solo coletado foi secado, destorroado e peneirado na peneira de 4,8mm, conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986a). Posteriormente uma quantidade deste material foi peneirado na peneira de 2,0mm e como nada do material ficou retido nessas peneiras o mesmo foi tratado como um material fino para o ensaio de compactação.

Para a preparação do fosfogesso foi necessário a realização de sua secagem inicial e posteriormente o material foi homogeneizado e separado para ser feito seu tratamento térmico e em seguida armazenado em sacos plásticos, para não haver ganho de umidade. A cal e o cimento utilizados foram apenas estocados juntamente com estes materiais até o momento de utilização nas misturas estipuladas.

A proporção de fosfogesso utilizada na pesquisa foi definida após avaliação de misturas que apresentem uma plasticidade maior ou igual a 7 e em seguida uma expansão de no máximo 0,5%. Tais dados foram obtidos através dos ensaios de limites de consistência pelas NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984b) e pelo ensaio de mini-CBR e expansão pela ME-254 (DNER, 1997). Para a mistura sem estabilizante e com estabilizante de cimento, as porcentagens adotadas foram definidas por Alves (2015) e para a mistura com a estabilizante cal, as porcentagens foram definidas nesta pesquisa.

Realizou-se assim três tipos de misturas: solo com fosfogesso HH (Mistura 1); solo com fosfogesso HH e cimento (Mistura 2); e solo com fosfogesso HH e cal (Mistura 3). Para as misturas contendo apenas solo e fosfogesso HH, optou-se por realizar ensaios aproveitando ao máximo o fosfogesso, onde os parâmetros iniciais estipulados foram atendidos com 50% deste. Já para as misturas que continham

cimento, manteve-se as mesmas proporções de solo e reduziu-se a proporção de fosfogesso onde obteve-se uma porcentagem de 9% de cimento e de 41% fosfogesso, valores utilizados em Alves (2015). Por fim, as misturas com cal que atendeu as predefinições estipuladas foram de 6% e consequentemente o fosfogesso ficou 44% presente na mistura.

Definida as proporções de cada mistura foram realizados ensaios conforme a metodologia MCT, através do ensaio compactação em equipamentos miniatura pela ME-228 (DNER, 1994a), a fim de determinar a curva de compactação utilizada no ensaio de Mini-CBR e expansão pela ME-254 (DNER, 1997). Os valores de umidade ótima ($W_{ótima}$) e massa específica máxima aparente seca ($\gamma_{dmáx}$) utilizados na moldagem dos ensaios de adensamento estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de umidade ótima ($W_{ótima}$) e massa específica máxima aparente seca ($\gamma_{dmáx}$) das misturas.

Mistura	$W_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ g/cm ³
1	25,0	14,1
2	21,8	15,2
3	26,0	13,6

2.3 Ensaio de Adensamento Oedométrico

No ensaio de adensamento, as amostras foram compactadas na energia intermediária no teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima. Após a compactação foi feita a moldagem com a cravação do anel metálico no corpo de prova compactado e talhado até o anel conseguir ser cravado completamente, evitando espaços vazios entre o corpo de prova e o anel.

Depois de confeccionado o corpo de prova, foi realizada a montagem da célula de adensamento executado na seguinte sequência: pedra porosa, papel filtro, o anel com o corpo de prova após ser lubrificado com vaselina, papel filtro, segunda pedra porosa, cabeçote de aplicação de carga, o qual é apertando o suficiente para evitar vazamentos, conforme Figura 1.



Figura 1. Etapas de montagem do ensaio de adensamento

Depois de montada a célula de adensamento e retirada as devidas referências, como massa e umidade, a amostra foi colocada no sistema de aplicação de carga, previamente ajustada e nivelada onde instalou o extensômetro, e aplicou uma pressão de assentamento de aproximadamente 5 kPa, indicado para o solo em questão. Em seguida foi adicionado água destilada para as amostras ensaiadas na condição saturada e posteriormente o extensômetro foi zerado iniciado assim a aplicação das cargas estipuladas.

Foram realizadas leituras de até 48 horas para cada uma das cargas, conforme a pesquisa de Chagas (2014) sugere, devido a não estabilização das cargas no período de 24 horas. As cargas utilizadas no ensaio foram de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1600 kPa e descarregamentos intercalados de 400 kPa, 100 kPa e 25 kPa. Após o descarregamento retirou-se o anel do corpo de prova, enxugou as partes externas do anel quando na condição inundada e determinou-se sua massa e umidade final. Este processo foi realizado para as 3 misturas utilizadas nas condições não saturada e saturada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados de

adensamento. Primeiramente estão apresentadas as deformabilidades das misturas comparando as amostras saturadas e as não saturadas, em seguida será avaliado o potencial de colapso de cada uma das misturas e por fim é feita uma análise da estabilização da deformação ao longo dos carregamentos.

3.1 Deformabilidade das misturas

A Figura 2 apresenta as curvas de compressão para as misturas 1, 2 e 3, na condição saturada. Matos (2011) obteve uma deformação final de 23,6% em amostra constituída de 50% de fosfogesso DH e 50% de solo. Observa-se que a deformação do fosfogesso DH é muito superior a do fosfogesso HH. Isto acontece devido as particulas do fosfogesso HH apresentarem uma maior interação com o solo do que as placas do fosfogesso DH, conforme verificado por Alves (2015) após realização de ensaios de microscopia eletrônica de varredura. Ao comparar apenas as 3 misturas realizadas nesta pesquisa, observa-se que a Mistura 1 e a Mistura 3 apresentam valores de deformação similares (em torno de 14%) e a Mistura 2 é a menos deformável, com 11,5%. Ou seja, a adição de cal à amostra não diminui a deformabilidade desse material na condição saturada.

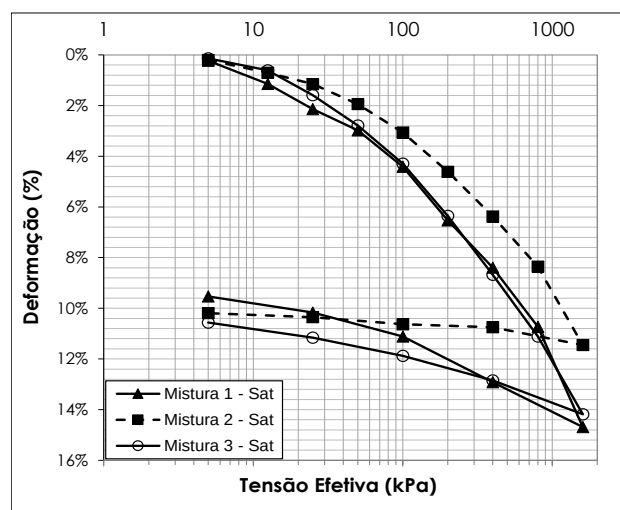


Figura 2. Curvas de compressão das misturas saturadas

A Figura 3 apresenta as curvas de compressão para as Misturas 1, 2 e 3 na condição não saturada. Matos (2011) obteve

uma deformação final de 19% em amostra constituída de 50% de fosfogesso DH e 50% de solo. Esse valor é bem maior dos valores encontrados nessa pesquisa, assim como na condição saturada. Observa-se que, ao contrário da condição saturada, as Misturas 2 e 3 possuem deformabilidade semelhantes (em torno de 7%) e a Mistura 1, sem estabilizante, possui um valor um pouco maior (de aproximadamente 9%). Recomenda-se estudar a influência da sucção na resistência da cal.

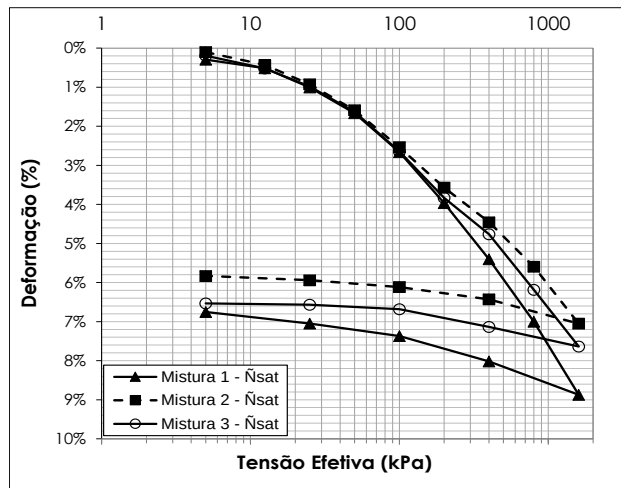


Figura 3. Curvas de compressão das misturas não saturadas

Observa-se também, ao comparar as Figuras 2 e 3, que as deformações sofridas pelas amostras saturadas foram superiores às não saturadas, sendo que as amostras não saturadas tiveram deformações menores do que 9% e as amostras saturadas chegaram a 15% de deformação.

3.2 Avaliação do potencial de colapso nas misturas

Foi analisado o potencial de colapso das amostras ensaiadas a fim de verificar os riscos que este material pode causar em futura aplicação em obra.

Para calcular o potencial de colapso das misturas foi utilizada a Equação 1, por meio da qual obteve-se a variação do índice de vazios ao longo dos carregamentos das misturas ensaiadas.

$$PC = \frac{\Delta e}{(1 + e_0)} 100 \quad (1)$$

Onde: Δe - Variação do Índice de Vazios
 e_0 - Índice de Vazios Inicial

Dessa maneira foi calculado os potenciais de colapso para cada tensão aplicada em cada uma das misturas ensaiadas. Através destes dados foi elaborada a Figura 4, que mostra potencial de colapso ao longo dos carregamentos a fim de visualizar qual amostra apresentou um potencial risco de colapso. Posteriormente foi comparado os dados obtidos com a Tabela 2 de Jennings e Knight (1975).

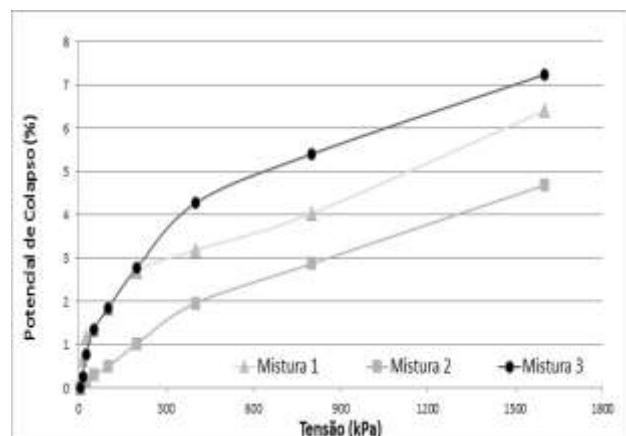


Figura 4. Potencial de colapso das misturas.

Ao comparar os dados obtidos com a Tabela 2, observa-se que na tensão de 800 kPa as Misturas 1 e 2 apresentam leves problemas de potencial de colapso. Quando analisa-se as tensões de 1600 kPa apenas a Mistura 2, contendo cimento, se encaixa nesta faixa de risco, enquanto as Misturas 1 e 3 estão na faixa de risco de problemas moderados. Estes dados são apresentados na Tabela 3, com a respectiva classificação através da metodologia utilizada. Dessa forma, pode-se considerar que as Misturas são adequadas para utilização em obras, visto que as Misturas 1 e 3 só apresentaram gravidade moderada para níveis de tensões não usuais em geotecnia (acima de 800 kPa).

Tabela 2. Classificação de colapsibilidade nas obras de engenharia (Jennings e Knight, 1975)

Potencial Colapso (%)	Gravidade dos problemas
0 a 1	Sem Problema
1 a 5	Problema Leve
5 a 10	Problema Moderado
10 a 20	Problema Grave
>20	Problema Muito Grave

Tabela 3. Classificação do Potencial de Colapso para as tensões aplicadas utilizando a metodologia de Jennings e Knight (1975).

	Tensões (kPa)	PC (%)	Gravidade dos problemas pela metodologia de Jennings e Knight (1975)
Mistura 1	12,5	0,66	Sem Problema
	25,0	1,17	Leve
	50,0	1,36	Leve
	100,0	1,83	Leve
	200,0	2,69	Leve
	400,0	3,18	Leve
	800,0	4,03	Leve
	1600,0	6,40	Moderado
Mistura 2	12,5	0,17	Sem Problema
	25,0	0,22	Sem Problema
	50,0	0,30	Sem Problema
	100,0	0,48	Sem Problema
	200,0	1,02	Leve
	400,0	1,96	Leve
	800,0	2,87	Leve
	1600,0	4,68	Leve
Mistura 3	12,5	0,25	Sem Problema
	25,0	0,78	Sem Problema
	50,0	1,33	Leve
	100,0	1,84	Leve
	200,0	2,78	Leve
	400,0	4,27	Leve
	800,0	5,40	Moderado
	1600,0	7,24	Moderado

3.3 Deformação ao longo do tempo

Ao analisar a questão da estabilidade das deformações das misturas, optou-se por verificar a carga de 1600 kPa, que foi a maior tensão aplicada nos ensaios. Essa carga ficou submetida nas amostras pelo período de 48 horas.

Foi feito o comparativo da estabilização das cargas para as misturas não saturadas e saturadas como pode-se observar nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Na Figura 5 nota-se que ouve uma tendência de estabilização para as Misturas 2 e 3, que são as misturas com estabilizantes químicos. A

Mistura 1 não se estabilizou nesse período, passando da marca de 2,5% de deformação.

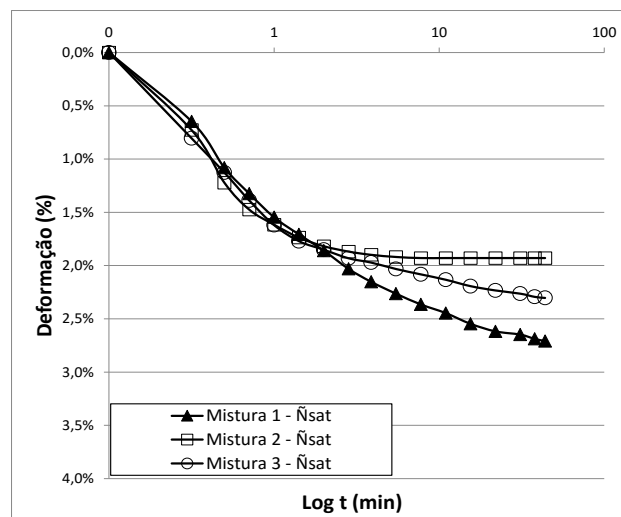


Figura 5. Deformabilidade ao longo do tempo na tensão de 1600 kPa para misturas não saturadas.

Na Figura 6 é possível observar que todas as misturas não se estabilizaram no período analisado, sendo que as Misturas 1 e 3 passaram de 5% de deformação nesse período. Tais ocorrências são consideradas características de um adensamento secundário, que trata-se de deformações na estrutura do solo e não pelo acrescimento das tensões. Segundo Chagas (2011), isto ocorre devido à quebra de grãos das placas do fosfogesso DH. O que parece ocorrer até com o fosfogesso HH, que não mais possui forma de placas.

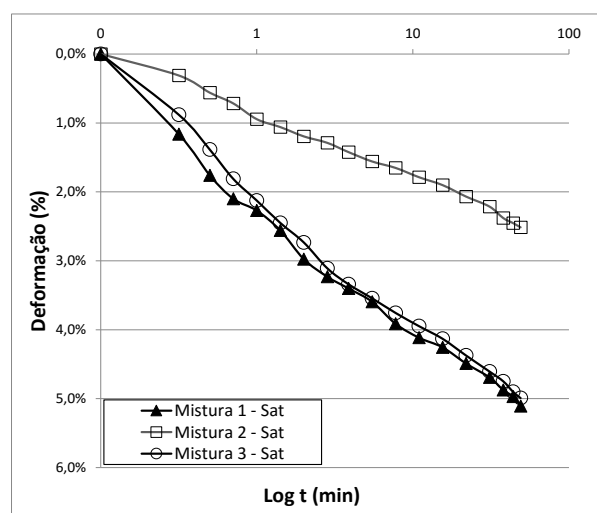


Figura 6. Deformabilidade ao longo do tempo na tensão de 1600 kPa para misturas saturadas

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que as misturas quando submetidas a tensões na condição não saturada, apresenta um comportamento mais resistente e uma estabilização das tensões mais rápida do que na condição saturada. Tal fator pode ser justificado, além da sucção, pela reidratação de fosfogesso HH.

As amostras apresentaram potenciais de colapso leve e moderados conforme o aumento das tensões aplicadas. Vale ressaltar que o colapso moderado foi obtido apenas para níveis de tensões não usuais em obras de geotecnia. A Mistura 2, com cimento, apresentou o melhor desempenho.

Quanto a análise da estabilização da deformação ao longo do tempo, observou-se que as misturas sem estabilizante obtiveram uma deformabilidade não estável, tanto na condição saturada quanto na condição não saturada. Nas misturas com estabilizantes, a não estabilização ocorreu somente na condição saturada. Vale ressaltar que a análise foi executada com a tensão de 1600 kPa, que não é usual em obras de geotecnia.

Os valores de deformabilidade foram menores que as obtidas em estudos anteriores contendo fosfogesso DH.

Pode-se concluir que, considerando o critério de compressibilidade das amostras, a utilização de fosfogesso HH não resolve o problema de estabilização das deformações, mas reduz significativamente seus valores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a instituição de fomento CAPES, à Universidade Federal de Goiás, à LTEC e à AngloAmerican pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira De Normas Técnicas. (1986a). *NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* Rio de Janeiro, 9 p.
- ABNT_____. (1984a). *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 6 p.
- ABNT_____. (1984b). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 3 p.
- Alves, K. C. S. K.; (2015). *Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás. 122 f.
- Chagas, J. V. R. (2014). *Análise da deformabilidade do fosfogesso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.
- DNER: Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. (1994). *ME-228: Solos – compactação em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro, 14p.
- DNER_____.(1997). *ME-254: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão*. Rio de Janeiro, 14p.
- Jennings, J. E. B. e Knight, K. (1975). *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to a collapse of grain structure*. Proceedings IV Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, pp, 99-105.
- Maccarini, M. (1991). *Propriedades física, química e mecânica do fosfogesso da indústria carboquímica catarinense*. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS (REGEO'91). Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, p.p. 147-157.
- Matos, T. H. C. (2011). *Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 118 f.
- Mesquita, G.M. (2007). *Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação*. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.
- Rufo, R. C. (2009). *Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo Tropical e cal para fins de pavimentação*. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.
- Silva, M. V.; Rezende, L. R. (2013). *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.
- Silvestre, O. B. J.; (2002). *Fosfogesso estabilizado com Cimento para aplicação na construção rodoviária – A influência do tipo do cimento na resistência e deformabilidade da mistura*