



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
COORDENAÇÃO GERAL DE PESQUISA**

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA**

**RELATÓRIO FINAL**

**TÍTULO DO PROJETO:**

**Caracterização hidráulica do fosfogesso e misturas solo-fosfogesso**

**Autores:**

**Vitória Maria de Castro Borges, vitória\_borges\_@hotmail.com  
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha, marciamascarenha@gmail.com  
Sarah Barbacena Silva, sarah\_bs@hotmail.com  
Tubal Matos, tubal.matos@bol.com.br  
Manoel Porfirio Cordão Neto, mporfirio76@gmail.com  
Lilian Rezende, lrezende@eec.ufg.br**

**Unidade Acadêmica:**

**Escola de Engenharia Civil (EEC)**

**Palavras-chave:**

**Fosfogesso, reutilização de resíduos, solos não saturados, sucção, curva de retenção da água.**

Revisado pelo orientador.

Orientando: Vitória Maria de Castro Borges

Orientador: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

# **CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO FOSFOGESSO E MISTURAS SOLO-FOSFOGESSO**

**Vitoria Borges, Márcia Mascarenha, Sarah Barbacena, Tubal Matos, Manoel Porfírio Cordão Neto e LÍlian Rezende.**

## **1. INTRODUÇÃO**

A cidade de Catalão, em Goiás, se destaca na exploração das rochas fosfatadas para a produção do ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), que é utilizado na fabricação de fertilizantes. O ácido fosfórico é obtido a partir da reação de rochas fosfáticas com ácido sulfúrico e o fosfogesso ( $CaSO_4$ ) é um subproduto sólido resultante desses processos.

As indústrias geradoras do fosfogesso ficam responsáveis pela estocagem desse material, que geralmente são armazenados nos locais próximos a elas, ou raramente jogados em rios e oceanos. Este resíduo necessita de um cuidadoso monitoramento por se tratar de um material que contém elementos radioativos e alguns metais pesados em sua composição. Além disso, quando manejado de maneira inadequada, pode afetar as fontes de águas superficiais e subterrâneas, contaminar a atmosfera e provocar poluição visual, causando riscos à população e ao meio ambiente.

Diante do problema ambiental gerado pela produção excessiva desse resíduo, surge à preocupação em se reutilizar o mesmo de maneira adequada. Segundo Matos (2010), o fosfogesso pode ser aplicado como material de construção civil; na agricultura como corretivo de solo e fonte de nutrientes; na indústria de cimento como aditivo e em indústria química, como matéria prima para a produção de enxofre, ácido sulfúrico e sulfato de amônia.

O fosfogesso também possui um grande potencial para ser utilizado em obras geotécnicas, tais como: camadas de pavimento rodoviário, construções de aterros sanitários, camada final de terraplenagem, entre outros. Alguns estudos sobre a utilização do fosfogesso em mistura com solo, visando à melhoria de suas propriedades e uma futura aplicação nessas obras, foram feitos por Mesquita (2007), Rufo (2009) e Faria (2007).

Mesquita (2007) constatou que o fosfogesso puro não apresenta capacidade de suporte e por isso não deve ser usado em pavimentação, e a mistura com 50% de fosfogesso pode ser usada no máximo como reforço de subleito e na construção de aterros. Além disso, através de levantamento radiométrico, observou que as misturas não apresentam nenhum risco de

radiação quando compactado. Na pesquisa de Rufo (2009) verificou-se que, nas misturas solo-fosfogesso com teores de 10% e 20% de fosfogesso, houve um ganho de resistência do solo, sendo viável sua utilização em pavimentos. Porém, as misturas com teores acima de 30% de fosfogesso não são recomendadas para este tipo de obra.

No entanto, para viabilizar a inserção do resíduo fosfogesso no mercado e sua efetiva utilização em obras geotécnicas, serão necessários mais alguns estudos sobre o comportamento hidráulico e mecânico das misturas solo-fosfogesso.

Por outro lado, tanto o resíduo fosfogesso quanto o solo utilizado na mistura estão no estado não saturado, ou seja, seus vazios são parcialmente ocupados pelo ar. Esta característica acarreta em mudanças de comportamento nestes materiais quando submetidos a alterações nos teores de umidade, pois essas alterações acarretam na redução da resistência nas ligações entre os grãos, ou seja, na sucção.

Tendo em vista que a sucção influencia de maneira significativa o comportamento hidro-mecânico das misturas solo-fosfogesso, esta variável deve ser considerada na definição da possibilidade de reutilização dessas misturas em obras geotécnicas.

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo a determinação das curvas de retenção da água no solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso, a fim de observar a influência da adição do fosfogesso no comportamento hidromecânico do solo, tendo em vista a possível utilização destas misturas em obras geotécnicas.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1. Materiais Utilizados**

Para a realização deste trabalho foi utilizado o solo originário de Aparecida de Goiânia e o fosfogesso di-hidratado proveniente de uma indústria de fertilizantes localizada na cidade de Catalão e três misturas destes materiais.

O solo é um silte de baixa compressibilidade e possui valores de massa específica dos grãos de  $2,80 \text{ g/cm}^3$ . A escolha deste solo é devido à construção de uma pista experimental executada com solo-fosfogesso nesta região.

De acordo com os estudos realizados por Rufo (2009), o fosfogesso é classificado como um silte de baixa compressibilidade (ML) e possui massa específica dos grãos de  $3,54 \text{ g/cm}^3$  e coeficiente de permeabilidade de  $2,40 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ . Estudos ambientais realizados por Mesquita (2007) classificam o material, conforme a NBR 10004/2004 Resíduos sólidos – Classificação, como pertencente à classe II A – não perigosos e não inerte.

A mistura solo-fosfogesso é composta de 90% solo + 10% fosfogesso, na mistura A, 80% solo + 20% fosfogesso na mistura B e 50% solo + 50% fosfogesso na mistura C. A mistura A e a mistura B foram escolhidas porque foram os teores utilizados nas pesquisas de Rufo (2009). Além disso, a mistura B foi utilizada na construção de uma pista experimental avaliada por Metogo (2010). A mistura C foi escolhida por ser a mais indicada para se avaliar a influência da adição de fosfogesso no solo em suas características hidromecânicas.

### 3.2. Ensaios de Laboratório

Para a realização dos ensaios de laboratório, os corpos de prova foram compactados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), na energia Proctor Intermediária. O solo, o fosfogesso e as misturas solo-fosfogesso foram compactados na umidade ótima ( $w_{ót}$ ) e peso específico seco máximo ( $\gamma_d$ ) definido nos estudos realizados para uma dissertação de mestrado ainda em andamento. Estes valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de umidade ótima e peso específico seco máximo.

<b>110 ° C</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>w_{ót}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Solo</b>	22.70	15,7
<b>Mistura A</b>	25,2	15,3
<b>Mistura B</b>	27.40	14,9
<b>Mistura C</b>	33.00	12,8
<b>Fosfogesso</b>	49.60	10,6

Segundo Ortiz (1997), existem três processos de obtenção do ácido fosfórico (di-hidratado, hemi-hidratado e anidro), os quais são função da temperatura empregada. Cada processo origina um tipo diferente de fosfogesso. No intervalo de temperatura de 70°C a 80°C, o fosfogesso formado será di-hidratado. Para temperaturas de 92°C a 120°C, se terá o

fosfogesso hemi-hidratado. E no caso de temperaturas superiores a 130°C, o fosfogesso será o anidro.

Como o fosfogesso utilizado nessa pesquisa é o fosfogesso di-hidratado, os valores de umidade das misturas e do fosfogesso devem ser determinados a uma temperatura de 70 °C, e não 110 ° C, uma vez que nesta temperatura a água retirada seria da estrutura do fosfogesso e não dos vazios do material.

Para saber a relação entre os valores de umidade obtidos à temperatura de 70°C e 110° C nas misturas e no fosfogesso, foram realizados ensaios de umidade em um largo intervalo de teores de umidade. As relações lineares entre os valores de umidade a uma temperatura de 70°C e a 110°C estão apresentadas na Figura 1, onde é possível observar as equações das linhas de tendência.

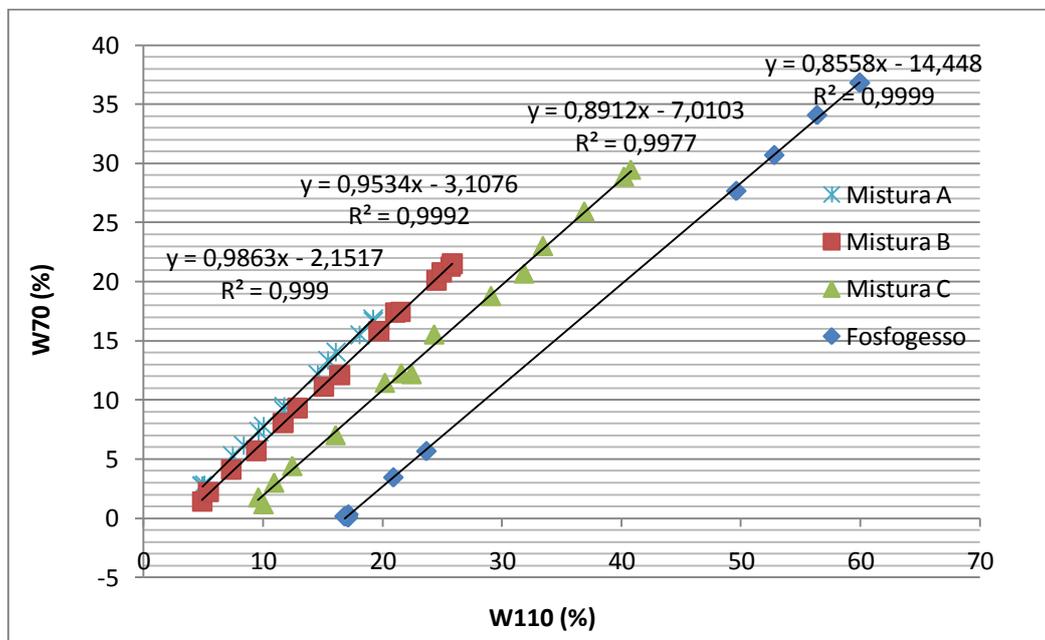


Figura 1 – Relação entre as umidades à temperatura de 70°C e a 110°C.

Como os valores da umidade ótima e massa específica seca máxima do fosfogesso e das misturas compactadas na energia intermediária foram obtidos com a umidade desse material sendo determinada a uma temperatura de 110 ° C, esses valores foram corrigidos por meio das equações apresentadas na Figura 1 e são apresentados na Tabela 2. São esses valores que foram utilizados como referência para a execução desse trabalho.

Tabela 2 – Valores de umidade ótima e peso específico seco máximo nas temperaturas de 70 ° C e 110° C.

Amostra	110°C		70°C	
	W <sub>ót</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ót</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
<b>Solo</b>	22.7	15,7	22.7	15,7
<b>Mistura A</b>	24.9	15,3	22.4	15,8
<b>Mistura B</b>	27.2	14,9	22.8	15,6
<b>Mistura C</b>	35.0	12,8	24.2	14,6
<b>Fosfogesso</b>	55.4	10,6	33.0	12,4

Com o intuito de verificar a influência das variações de umidade no comportamento das obras geotécnicas foram definidas as curvas de retenção da água nos materiais estudados, as quais definem a relação de água presente no solo e a sucção. Os ensaios foram realizados por meio do método do papel filtro, proposto por Marinho (1994). Este método é baseado no princípio de que, quando o solo está em contato com um material poroso, no caso o papel filtro, a água irá passar do solo para o papel até o equilíbrio, que pode levar até 15 dias.

Para os ensaios de papel filtro foram moldados corpos de prova por meio de anéis de moldagem, previamente pesados e medidos, a partir das amostras compactadas. Foram executadas curvas de retenção da água em trajetória de umedecimento, na qual os corpos de prova, depois de moldados na umidade ótima, foram secos ao ar até a umidade higroscópica, e a partir desta foi adicionada água por gotejamento para vários valores de umidade, até se atingir a máxima saturação possível.

Após se atingir a umidade desejada, os corpos de provas foram colocados em contato com o papel filtro, para a obtenção da sucção matricial, e também foram separados deste por um espaçador para a obtenção da sucção total. Então as amostras foram devidamente seladas com papel filme e papel alumínio, e foram mantidas em um ambiente fechado com pouca variação de umidade, para a ocorrência do equilíbrio de sucção entre os mesmos. Posteriormente, o papel filtro foi pesado de forma a não ocorrer perda significativa de umidade e, em seguida, seco em estufa por 24 horas, para a obtenção da massa seca. Com a relação entre a sucção e a umidade do material poroso, a sucção do solo pode ser obtida referindo-se à curva de calibração do papel filtro de baixo custo utilizado, a qual foi definida por Borges *et al* (2010).

Devido à grande faixa de variação de teores de umidade dos corpos de provas utilizados para a obtenção das curvas de retenção, ocorreu o surgimento de fungos nos papéis filtro utilizados, problema que ocorreu também nos ensaios executados em resíduos por Teixeira (2002) e por Bizarreta & de Campos (2010).

Visando verificar se o aparecimento de fungos no material alteraria os resultados dos ensaios a umidade do papel filtro foi determinada antes de colocá-lo em contato com os corpos de prova. E por fim, para a determinação dos índices de vazios dos corpos de provas, foi feito o ensaio de balança hidrostática seguindo o procedimento da NBR 10838 (ABNT, 1988).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos valores de umidade ótima e peso específico seco máximo das curvas de compactação citada na Tabela 2 foram feitas compactações para a obtenção dos corpos de provas utilizados para a execução dos ensaios de papel filtro. Os valores reais dos teores de umidade ótima ( $w_{ót}$ ), peso específico seco máximo ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ) e dos graus de saturação na umidade ótima ( $Sr_{ót}$ ) são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de umidade ótima ( $w_{ót}$ ), peso específico seco máximo ( $\gamma_d$ ), dos índices de vazios ( $e$ ) e do grau de saturação ( $Sr_{ót}$ ) obtidos pela compactação.

<b>Amostra</b>	<b><math>w_{ót}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>e</math></b>	<b><math>Sr_{ót}</math> (%)</b>
<b>Solo</b>	22,7	15,7	0,78	81,2
<b>Mistura A</b>	22,4	15,8	0,74	83,8
<b>Mistura B</b>	22,2	15,6	0,75	83,1
<b>Mistura C</b>	24,2	14,6	0,85	76,6
<b>Fosfogesso</b>	32,9	13,0	1,09	78,1

Como as curvas características foram realizadas utilizando o papel de filtro de baixo custo Quanty, as curvas de calibração utilizadas foram as propostas por Borges *et al* (2010),

as quais foram obtidas a partir das curvas de calibração utilizadas para o papel Whatman n° 42 de Chandler *et al.* (1992). As equações destas curvas de calibração são apresentadas a seguir.

$$\text{Para } w_f > 55 \quad \psi = e^{\left[ \frac{(161,44 - w_f)}{24,07} \right]} \quad (1)$$

$$\text{Para } w_f \leq 55 \quad \psi = e^{\left[ \frac{(79,782 - w_f)}{6,26} \right]} \quad (2)$$

Em que  $\psi$  é a sucção do solo e  $w_f$  a umidade do papel filtro.

Para saber se a formação de fungo existente no papel filtro interferiria na determinação dos valores de sucção, foi executado o procedimento descrito na metodologia. Dessa forma, a massa seca dos fungos seria a massa seca do papel filtro obtida ao final do ensaio menos a massa seca do papel filtro antes do ensaio. A Figura 2 apresenta os valores da massa seca de fungo presentes nos papéis filtro utilizados na determinação da sucção matricial e total para as três misturas. Esses valores são relacionados aos graus de saturação das amostras.

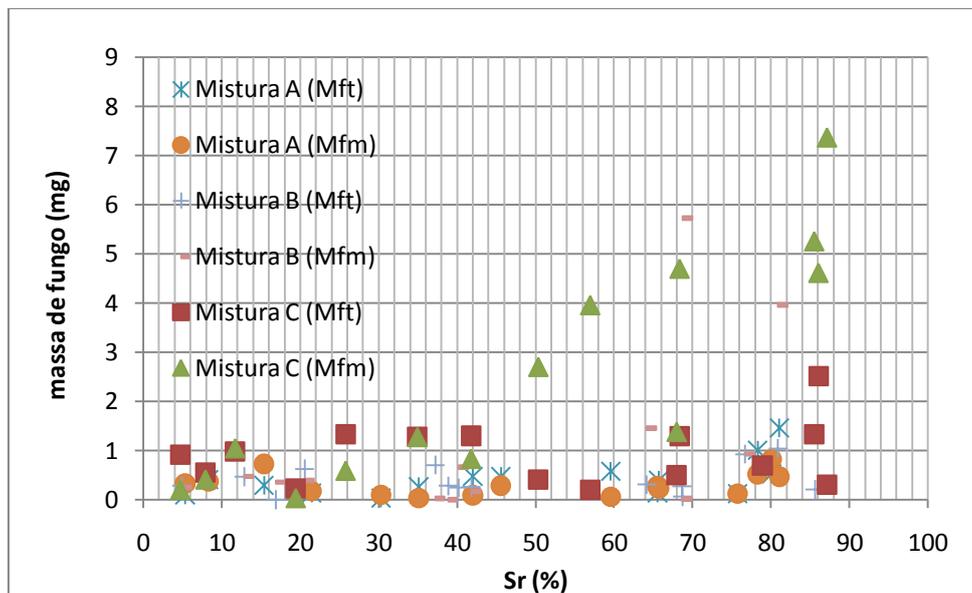


Figura 2 - Valores da massa de fungo para as misturas de solo e fosfógeno, relacionados aos graus de saturação das amostras.

A Figura 2 mostra que a massa seca de fungo nos ensaios de sucção total é sempre inferior a 2 mg para as três misturas, o que já seria um valor sem grande significância. Além disso, o que realmente interfere na curva de retenção do solo é a diferença entre a massa de fungo úmida e seca que, caso exista, é insignificante. Este procedimento não foi feito para a amostra com

100% de fosfogesso porque durante a execução dos ensaios para este caso não se tinha ciência do problema.

Por outro lado, a massa de fungo nos ensaios de sucção matricial é inferior a 2 mg na Mistura A, até o grau de saturação de 70% na Mistura B e até o grau de saturação de 50% na Mistura C. Neste caso, a massa de fungo irá influenciar na curva de retenção desses materiais, conforme explicado a seguir.

A Figura 3 apresenta as curvas de retenção para a Mistura B com os valores de sucção total e matricial. Verifica-se que esses valores de sucção são semelhantes até o grau de saturação em torno de 70%, que é o valor de saturação da mistura em que a massa de fungo começa a influenciar os valores de sucção matricial.

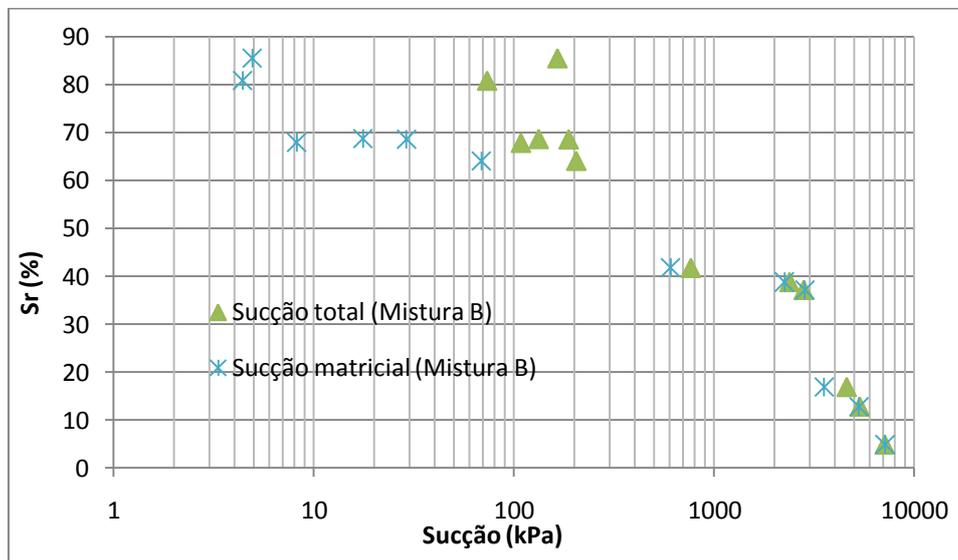


Figura 3 - Curvas de retenção para a Mistura B (Sucção total e matricial).

Dessa forma, acredita-se que os valores de sucção matricial e total desses materiais são semelhantes, sendo que a diferença verificada entre elas é devido à influência da presença de fungos nos papéis filtro. Este mesmo comportamento foi verificado para as outras misturas.

As Figuras 4 e 5 mostram as curvas características para o solo, o fosfogesso e as misturas solo-fosfogesso, em função da umidade e da saturação.

Observa-se na Figura 5 que com o aumento dos teores de fosfogesso ocorre para um mesmo grau de saturação uma diminuição dos valores de sucção. No entanto, para a mistura A as diferenças de sucção em relação à curva característica do solo são insignificantes, inclusive com um melhor comportamento da mistura para valores de saturação superiores a

65 %. Nota-se que a curva característica da amostra com 100% fosfogesso não foi bem definida devido às dificuldades em se obter pontos com elevada saturação.

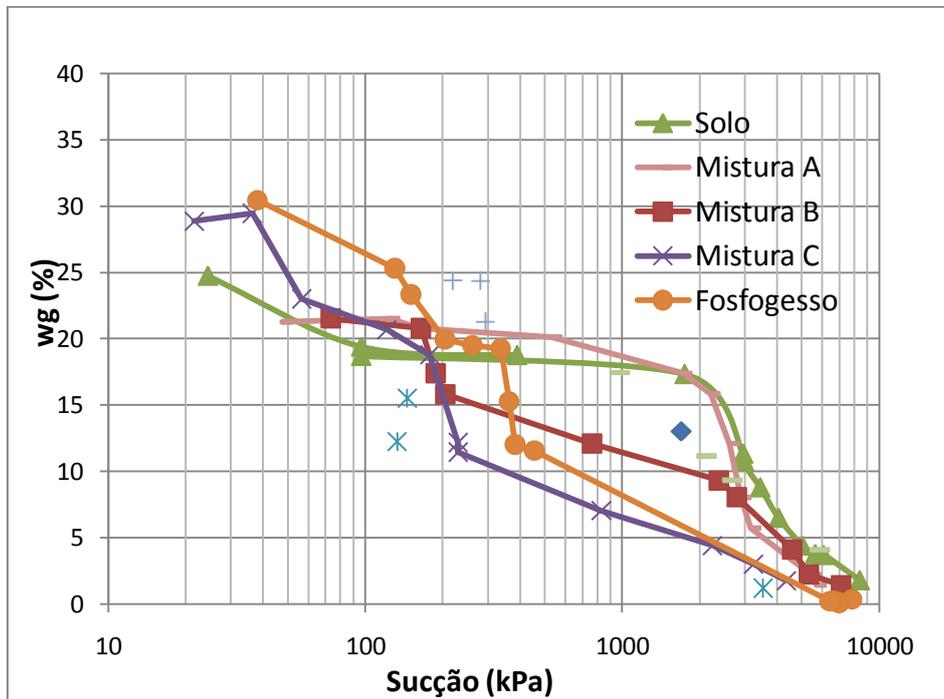


Figura 4 - Curvas características em função da umidade para o fosfogesso, solo e misturas.

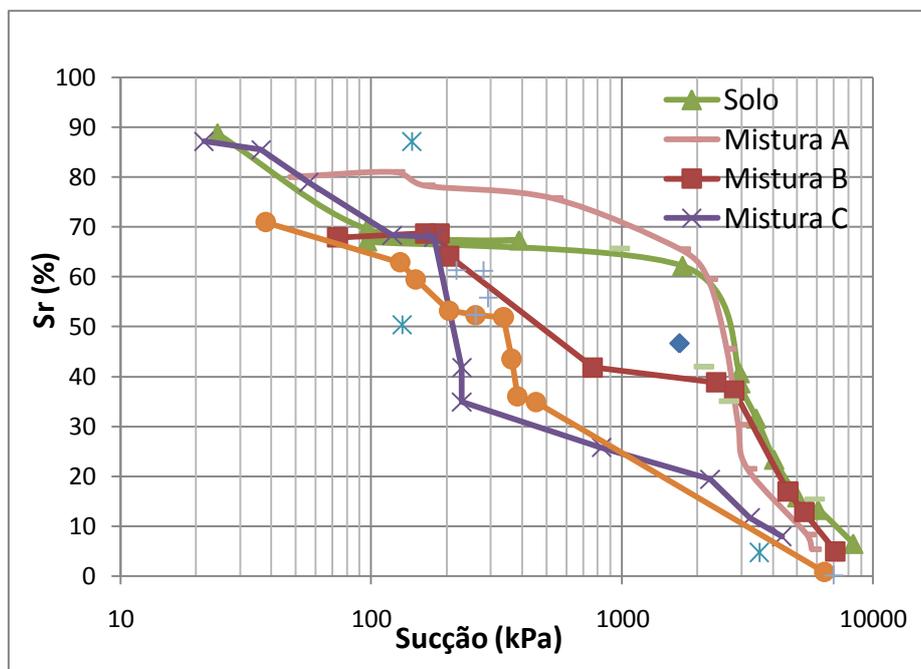


Figura 5 - Curva característica em função da saturação para o fosfogesso, solo e misturas.

A diminuição dos valores de sucção com os acréscimos dos teores de fosfogesso nas misturas inviabiliza a utilização do mesmo em misturas com solo, para obras que exigem mais resistência e menores valores de permeabilidade e compressibilidade, tendo em vista que a sucção pode inferir diretamente nestes parâmetros.

Porém a mistura A apresenta um comportamento parecido com o do solo, constatando que misturas com teores baixos de fosfogesso podem ser usadas em obras geotécnicas não necessariamente para melhorar o comportamento do solo, mas apenas para se obter uma destinação adequada ao resíduo, diminuindo os problemas ambientais causados pela disposição do mesmo.

Um problema observado neste material durante a realização dos ensaios foi a contração que este sofre quando o mesmo está em processo de secagem e esses valores são apresentados na Figura 6.

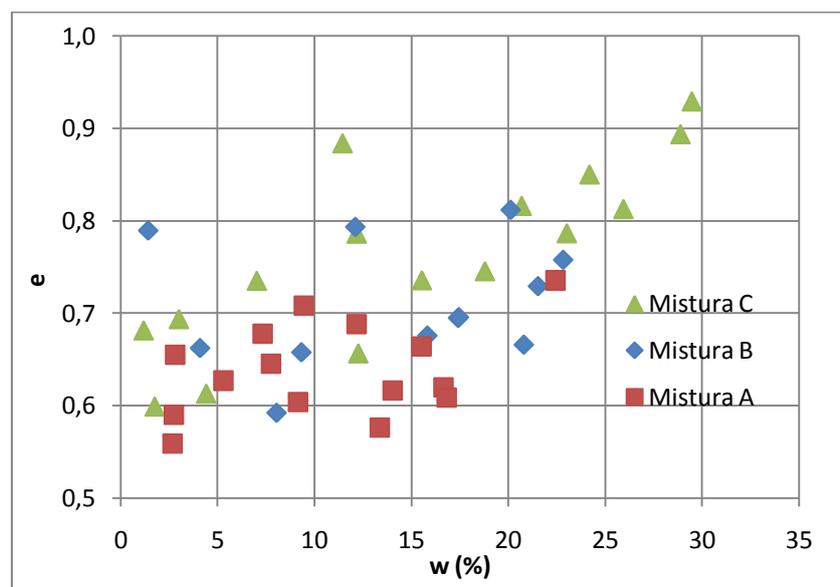


Figura 6 – Variação dos índices de vazios para diferentes teores de umidade.

Nesta figura pode-se verificar a tendência do material em sofrer contração quando seco ao ar. As deformações de contração das amostras variaram de 11 a 21 % para as três misturas. Vale ressaltar que a contração não resulta em trincas no material.

## 5. CONCLUSÃO

Entender o comportamento do fosfogesso em misturas com solo é de fundamental importância quando se pretende utilizar o resíduo em obras geotécnicas. Os resultados obtidos

nesse estudo são relevantes para a compreensão do comportamento hidráulico do solo quando em contato com o fosfogesso di-hidratado.

Os valores de sucção para um mesmo grau de saturação diminuem com o incremento do teor de fosfogesso. No entanto, para o solo e a mistura A essas diferenças não são significativas, possibilitando a utilização dessas misturas em obras geotécnicas, tendo em vista especialmente a necessidade de aproveitar este resíduo, resolvendo assim o problema ambiental e social de disposição desse material. Vale ressaltar a necessidade do estudo do comportamento hidráulico e mecânico destas misturas para uma conclusão mais definitiva.

Foi constatado também que a presença de fungos, devido ao teor de umidade nos papéis filtro utilizados nos ensaios, não alterou de maneira significativa os valores de sucção dos materiais.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT (1986b). Solo – Ensaio de compactação – NBR – 7182. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 10p.
- ABNT (2004a). Resíduos sólidos – Classificação – NBR – 10004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ, 71p.
- ABTN (1988). Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com o emprego da balança hidrostática – NBR – 10838. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ.
- BIZARRETA, J.C.O. & de CAMPOS, T.M.P. (2010). Water retention curve and shrinkage of a waste from the paper industry. Proc. 5th Internacional Conference on Unsaturated Soils (Unsat-2010), Barcelona, Espanha, 6 September 2010: 433-439.
- BORGES, C.R.; GITIRANA JR. G. F. N.; VARGAS, C.s A. L.; Guimarães, R.C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. Anais do COBRAMSEG 2010, Gramado, Brasil, 17 a 22 de agosto de 2010: vol. 1: 1-8p.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A Low-cost Method of Assessing Clay Desiccation for Lowrise Buildings. Proceedings, Institute of Civil Engineering, Vol.92, No. 2, pp. 82–89.
- FARIA, L.F. (2007). Estudos de materiais e tecnologias para pavimentação. Relatório Final, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 34p.

- MARINHO, F. A. M. (1994). Medida de sucção com o método do papel filtro. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação, Foz do Iguaçu, 2: 515-522p.
- MATOS, T. H. C. (2010). Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso. Seminário em Geotecnia I, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, UNB, Brasília, DF, 20p.
- MESQUITA, G. M. (2007). Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 144p.
- METOGO. D.A.N. (2010). Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico composto de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO.
- ORTIZ, J.A. (1997). Estudo de misturas de solo e fosfogesso com vistas a sua utilização em rodovias. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 179 p.
- TEIXEIRA, P.F. (2002). Investigações sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 106 p.