

# ESTUDO DO COLAPSO DE MISTURAS SOLO, FOSFOGESSO E BENTONITA VISANDO O USO EM CAMADA DE BARREIRA HIDRÁULICA

## Study of soil, phosphogypsum and bentonite mixtures collapse for use in hydraulic barrier layer

Lidiane Santana de Moraes <sup>1</sup>, João Carneiro de Lima Júnior <sup>2</sup>, Gustavo Ferreira de Moraes <sup>3</sup>, Yago Isaias da Silva Borges <sup>4</sup>, Aline Flávia Nunes Remígio Antunes <sup>5</sup>, Márcia Maria dos Anjos Mascarenha <sup>6</sup>



### PALAVRAS CHAVE:

Bentonita;  
Barreira Hidráulica;  
Colapso;  
Dispersão;  
Fosfogesso.

### KEYWORDS:

Bentonite;  
Hydraulic Barrier;  
Collapse;  
Dispersion;  
Phosphogypsum.

**RESUMO:** O uso de fosfogesso e bentonita para estabilização de solos tropicais, visando a utilização em barreiras hidráulicas, tem apresentado resultados promissores em termos de permeabilidade, compatibilidade e resistência, mas não existem estudos sobre o potencial de colapso desses materiais. Dessa forma, o objetivo deste estudo é verificar o potencial de colapso de um solo tropical e suas misturas com fosfogesso e bentonita para aplicação em barreiras hidráulicas. Para atender esse objetivo, ensaios edométricos duplos foram executados em amostras compactadas na umidade ótima, em amostras de solo, solo+fosfogesso, solo+fosfogesso+bentonita (6%) e solo+fosfogesso+bentonita (9%). Ensaios de dispersão química foram realizados com água, NaCl, NaOH, álcool e HNO<sub>3</sub>, representando cenários de contaminação por soluções ácidas, básicas, sais e álcool. Os resultados do adensamento mostram que o solo e as misturas não são colapsíveis. Além disso, as misturas estudadas apresentaram deformações similares e menores quando comparadas a outros tipos de materiais reciclados. Pelo ensaio de dispersão verificou-se que a adição dos estabilizantes químicos diminui a dispersão das partículas em meio aquoso. Não foram observadas alterações estruturais significativas nas amostras inundadas com soluções de NaCl e etanol. Contudo, em condições de inundação por NaOH e HNO<sub>3</sub>, as misturas não possuem comportamento satisfatório. Dessa forma, o uso dessas misturas em barreiras hidráulicas não é recomendado quando o fluido percolante é ácido ou básico, especialmente na presença de sódio.

**ABSTRACT:** The use of phosphogypsum and bentonite in tropical soils stabilization, aiming at the use in hydraulic barriers, has been studied, and the results of permeability, compatibility and resistance have been promising, but there are no studies about collapse potential of these materials. Therefore, the objective of this study is to verify the collapse potential of tropical soil, phosphogypsum and bentonite mixtures for application in hydraulic barriers. In order to get it, double oedometric tests were carried out in compacted samples at optimum water content on soil's samples, soil+phosphogypsum, soil+phosphogypsum+bentonite (6%) and soil+phosphogypsum+bentonite (9%). Chemical dispersion tests were carried out with water, NaCl, NaOH, alcohol and HNO<sub>3</sub>, representing scenarios of contamination by solutions acidic, basic, salts and alcohols. The results of the oedometric tests show that the soil and the mixtures have not collapsed. In addition, the mixtures studied showed similar and smaller deformations when compared to other types of recycled materials. The dispersion test showed that the addition of chemical stabilizers reduces the dispersion of particles in aqueous medium. No significant structural changes were observed in samples flooded with NaCl and ethanol solutions. However, under NaOH and HNO<sub>3</sub> flood conditions, the mixtures do not perform satisfactorily. Therefore, the use of these mixtures in hydraulic barriers is not recommended when the percolating fluid is an acid or base, especially in the presence of sodium.

\* Contato com os autores:

Publicado em 23 de junho de 2023

<sup>1</sup> e-mail: [lidianesmorais@gmail.com](mailto:lidianesmorais@gmail.com) ( L. S. de Moraes )

Bacharela em Engenharia Ambiental e Sanitária, Discente da Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>2</sup> e-mail: [joaojuniorucgto@gmail.com](mailto:joaojuniorucgto@gmail.com) ( J. C. de Lima Júnior )

Tecnólogo em Estradas, Técnico de Laboratório da Universidade Federal de Goiás

<sup>3</sup> e-mail: [gustavo.quim.ind@gmail.com](mailto:gustavo.quim.ind@gmail.com) ( G. F. de Moraes )

Mestrando em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Discente do Instituto Federal de Goiás (IFG)

<sup>4</sup> e-mail: [byagoisaias@yahoo.com.br](mailto:byagoisaias@yahoo.com.br) ( Y. I. S. Borges )

Doutorando em Engenharia Geotécnica, Discente Universidade de São Paulo (USP).

<sup>5</sup> e-mail: [eng.remigio@gmail.com](mailto:eng.remigio@gmail.com) ( A. F. N. R. Antunes )

Doutora em Geotecnia, Professora da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

<sup>6</sup> e-mail: [marciamascarenha@ufg.br](mailto:marciamascarenha@ufg.br) ( M. M. A. Mascarenha )

Doutora em Geotecnia, Autora correspondente, Professora da Universidade Federal de Goiás (UFG)

## 1. INTRODUÇÃO

Em um sistema de disposição de resíduos, para evitar a contaminação do lençol freático, é necessária a impermeabilização do terreno com o uso combinado de solo compactado e geomantas (barreiras hidráulicas). Estas barreiras devem resistir e não se deformar excessivamente, quando submetidas às tensões de sobrecarga das camadas subjacentes e pela interação com os fluidos percolantes. Assim, considerando a abundância e a resistência mecânica dos solos tropicais argilosos brasileiros, há um campo considerável para pesquisas relativas ao emprego de estabilizantes químicos que possam produzir boas misturas para uso em barreiras hidráulicas (Morandini e Leite, 2015; Portelinha et al., 2012). Dentre os possíveis materiais que atuam como estabilizantes pode-se citar a bentonita e o fosfogesso.

A bentonita é uma argila natural cujo argilomineral predominante é a montmorilonita. Dentre as características desse material destacam-se a sua granulometria extremamente fina, grande superfície específica, alta capacidade de troca catiônica (CTC), alto potencial expansivo e baixa condutividade hidráulica. (Morandini, Leite, 2012; 2015; Amadi e Eberemu, 2012; Amadi e Osinubi, 2017; De La Morena et al., 2018). Graças a essas propriedades a bentonita possui larga aplicação em obras geotécnicas, com destaque às barreiras hidráulicas.

O fosfogesso é um subproduto da indústria de fertilizante cuja composição química é idêntica à do gesso natural. De acordo com Silva et al. (2019) são produzidas anualmente 280 milhões de toneladas de fosfogesso, sendo que apenas 15% desse material, aproximadamente, é reutilizado como material de construção, utilizado na agricultura ou na produção de cimento. Devido a disponibilidade do fosfogesso, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos visando o seu uso na estabilização de solos tropicais, em suas formas hemi-hidratada – HH (Rezende et al., 2016; Silva et al., 2019) e di-hidratada – DH (Mascarenha et al., 2018; Ribeiro et al., 2018 e Borges, 2019). No geral, os estudos indicaram viabilidade técnica e ambiental, em determinados teores, para reutilização deste subproduto em suas diferentes formas.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo verificar o potencial de colapso de um solo tropical e de misturas deste solo, fosfogesso e bentonita, em amostras compactadas na umidade ótima, para uso como barreira hidráulica em revestimento de fundo de sistema de disposição de resíduos, por meio de variação do fluido percolante.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTUALIZAÇÃO

O fosfogesso contém em sua composição impurezas como fluoretos, fosfatos, matéria orgânica, alumínio, ferro, metais pesados tóxicos e elementos radioativos – que podem contaminar o meio ambiente. No entanto, de acordo com Mesquita (2007), o fosfogesso brasileiro é enquadrado como sendo Classe II-A: não-perigoso e não-inerte, de acordo com a classificação de resíduos sólidos da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os estudos de monitoramento de águas subterrâneas realizados por Chang et al. (1989) indicaram que não há impacto mensurável nas águas subterrâneas ambientais devido a aplicação desse material em pavimentação. Além disso, para avaliar o potencial de contaminação de águas subterrâneas, Mascarenha et al. (2018) promoveram análises químicas em amostras de água percolada através do solo, do fosfogesso DH e de misturas solo+fosfogesso em diversos teores. As amostras contendo 10% de fosfogesso DH apresentaram teores de cádmio, chumbo e cobre acima dos valores da Resolução 396 (CONAMA, 2008), sendo que teores similares estavam presentes na água da Caesb usada no estudo. Apenas o teor do manganês dessa mistura está acima do estabelecido pela referida resolução e do teor de água da Caesb,

sendo que o mesmo ocorre para o solo puro. Teores acima de 10% de fosfogesso DH não são recomendados devido ao alto teor de ferro encontrado nessas misturas.

Investigações realizadas por Nisti et al. (2015) mostram que a adição de fosfogesso aos solos não contribui para o aumento de radionuclídeos (urânio e tório) e de teores de metais na água. Campos et al. (2017) também constataram que a reciclagem de fosfogesso brasileiro como material de construção – para utilização na fabricação de placas e tijolos – não apresenta riscos à saúde, nem do ponto de vista radiológico (com relação às emissões gama), nem com relação à inalação de Radônio.

Com o intuito de aumentar as possibilidades do uso desse material, Ribeiro et al. (2018) verificaram a possibilidade do uso de fosfogesso HH em camadas de cobertura de sistema de disposição de resíduos. Os autores observaram que a mistura de solo e fosfogesso HH, em teor de 50%, quando compactada na energia Proctor Intermediária, apresenta condições favoráveis de utilização como barreira hidráulica de sistemas de cobertura, uma vez que possui coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , não sendo necessária a adição de composto bentonítico para melhora desse coeficiente. Os autores também observaram que essa mesma mistura tem menor variação volumétrica e de massa durante os ciclos de ressecamento e umedecimento, e conseqüentemente de permeabilidade. Embora o fosfogesso HH apresente melhor comportamento hidromecânico e pode ser utilizado em maiores proporções (Rezende et al., 2016) defende-se a importância de verificar a possibilidade do uso do fosfogesso na forma como sai da indústria (DH), devido aos altos investimentos e custos associados à produção desse tipo de fosfogesso (Chen et al., 2019).

Borges (2019) desenvolveu pesquisas com o intuito de verificar a possibilidade de uso desse material em barreira impermeabilizante de revestimento de fundo de sistema de disposição de resíduos. O autor estudou misturas de solo, fosfogesso DH e bentonita, nas seguintes proporções: 100% de solo; 90% de solo + 10% de fosfogesso; 87% de solo + 10% de fosfogesso + 3% de bentonita, 84% de solo + 10% de fosfogesso + 6% de bentonita, 97% de solo + 3% de bentonita 94% de solo + 6% de bentonita, cujas porcentagens são em massa seca da mistura. Foram executados ensaios mecânicos (compactação e resistência à compressão simples) e ensaios hidráulicos (permeabilidade com água, etanol, ácido nítrico, hidróxido de sódio e cloreto de sódio) no solo e nas diversas misturas. Os resultados indicaram que a amostra contendo 6% de bentonita e a amostra contendo 10% de fosfogesso e 6% de bentonita foram consideradas aceitáveis para uso em barreiras hidráulicas, segundo os critérios hidromecânicos (coeficientes de permeabilidade iguais ou menores a  $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , independente do fluido de percolação, e valores de resistência à compressão simples iguais ou superiores a  $200 \text{ kN.m}^{-2}$ ).

Para que as misturas constituídas de solo, fosfogesso e bentonita possam ser utilizadas como barreira impermeabilizante para contaminantes, além dos critérios mencionados anteriormente, deve-se verificar a possibilidade de ocorrência de colapso desse material. Segundo Maranha et al. (2012), as deformações por colapso podem ocorrer em qualquer tipo de estrutura geotécnica [...] e provocar alterações significativas no campo de tensões e/ou deformações”. De acordo com Araki (1997), o colapso consiste na redução brusca do volume do solo e ocorre em função da variação do estado de tensões (tensão e/ou sucção) ou em função da degradação por ataque químico ou ruptura dos vínculos que mantinham as partículas sólidas unidas. De acordo com Silva (2006), as características estruturais do solo são modificadas devido a alterações nas suas propriedades físico-químicas e estas se dão quando da interação de substâncias químicas presentes na água ou quando líquidos de características próprias entram em contato com o solo. No entanto, de acordo com o autor, há escassez de trabalhos científicos que tratam da colapsibilidade de solos por influência de outros líquidos percolantes que não a água.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. MATERIAIS

O solo (S) objeto de estudo desse trabalho é da mesma jazida onde foram coletados os solos de Rezende et al. (2016), Mascarenha et al. (2018), Silva et al. (2019) e Borges (2019). Trata-se de um solo laterítico arenoso (Tabela 1) de Aparecida de Goiânia (Goiás, Brasil), cujas amostras deformadas foram coletadas por Borges (2019), a uma profundidade de 0,4 m, e cujas camadas superficiais, ricas em matéria orgânica, foram desprezadas.

A bentonita sódica (B) utilizada foi a comercialmente disponibilizada. O fosfogesso (F) utilizado foi o do tipo diidratado, proveniente de uma indústria de fertilizantes localizada na cidade de Catalão, também localizada no estado de Goiás (Brasil).

As misturas foram preparadas nas mesmas proporções e composições estabelecidas por Borges (2019), conforme Tabela 1: Solo (S), Solo + Fosfogesso (SF) e Solo + Fosfogesso + Bentonita (SFB3 e SFB6, em que 3 e 6 indicam o teor de bentonita). A proporção de utilização de fosfogesso na composição das misturas foi fixada em 10%, devido às constatações realizadas por Matos (2011), de que essa mistura apresentou melhor estabilidade frente à ação da água, possui menor coeficiente de permeabilidade e não alterou o teor de metais na água. A Tabela 1 fornece uma síntese dos principais resultados apresentados por Borges (2019).

### 4.2. ENSAIO EDOMÉTRICO

Para a análise do potencial de colapso do solo foram executados ensaios duplos edométricos em amostras compactadas na umidade ótima e peso específico máximo apresentados na Tabela 1, com grau de compactação variando entre 94 e 95%. Os ensaios edométricos foram executados de acordo com os procedimentos que constam na D2435/D2435M – 11 (ASTM, 2011), com carga inicial de 12,5 kPa e máxima de 800 kPa, sendo que a inundação, nos ensaios na condição não saturada, foi executada sob a carga de 12,5 kPa.

**TABELA 1:** Parâmetros-base de caracterização do solo e de suas misturas.

Amostra	S	F	B	Classificação MCT	$\rho_d$	$w_L$	$w_P$	IP	pH	$\gamma_{d\text{ máx}}$	$W_{ót}$	e	$k_{20}$	RCS
S	100	-	-	LA'	2,64	37	27	10	5,9	14,7	25,3	0,79	$3,4 \cdot 10^{-8}$	304,4
SF	90	10	-	LA' - LG'	2,59	36	27	9	5,4	14,6	26,1	0,77	$3,5 \cdot 10^{-8}$	207,1
SFB3	87	10	3	LG'	2,59	40	23	17	6,5	14,7	26,3	0,77	$2,3 \cdot 10^{-9}$	271,9
SFB6	84	10	6	LG'	2,58	44	24	20	6,8	14,6	26,6	0,76	$4,7 \cdot 10^{-10}$	362,1

FONTE: Adaptado de Borges (2019).

**Nota:** S = solo (%); F = fosfogesso (%); B = bentonita (%); LA' = solo arenoso laterítico; LG' = solo argiloso laterítico;  $\rho_d$  = peso específico dos grãos ( $g/cm^3$ );  $w_L$  = limite de liquidez (%);  $w_P$  = limite de plasticidade (%); IP = índice de plasticidade (%);  $\gamma_{d\text{ máx}}$  = peso específico seco máximo ( $KN/m^3$ );  $W_{ót}$  = umidade ótima (%); e = índice de vazios;  $k_{20}$  = coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20 °C (m/s); RCS = Resistência à compressão simples (kPa).

A partir dos resultados desses ensaios, o potencial de colapso foi determinado utilizando-se duas metodologias de cálculo: a Equação 1, proposta por Vargas (1977), e a Equação 2, proposta pela ASTM D5333 (2003). Vale ressaltar que essas equações foram definidas para ensaios edométricos simples com inundação a carga constante, e, neste trabalho, realizou-se ensaios duplos edométricos.

De acordo com Vargas (1977), um solo é considerado colapsível quando o potencial de colapso (PC), para uma tensão de inundação de 200 kPa, é maior que 2%. De acordo com Lutenneger e Saber (1988), o solo possui índice de colapso (I) alto quando este for maior que 8%, para uma tensão de inundação de 300 kPa, moderado quando maior que 6% e leve entre 2 e 6%.

$$PC = \frac{\Delta e}{1 + e_0} * 100\% \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

**PC:** potencial de colapso (%);

**$\Delta e$ :** Variação de índice de vazios pela saturação (adimensional);

**$e_0$ :** Índice de vazios inicial (adimensional).

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_I} * 100\% \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

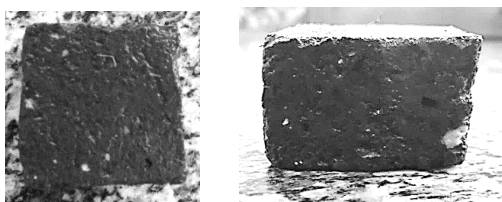
**I:** Índice de colapso (%).

**$e_I$ :** Índice de vazios antes da inundação (adimensional).

### 4.3. ENSAIOS DE DISPERSÃO

Uma das causas do colapso é a quebra dos agentes cimentantes, que se dá por acréscimo de carga no ensaio edométrico, mas pode ocorrer por reações causadas por agentes químicos, principalmente em estado líquido, que alteram as propriedades intergranulares (Silva, 2006). Assim, ensaios de dispersão foram realizados de acordo com a metodologia apresentada pela NBR 13601 (ABNT, 1996) e por Silva (2006), que consiste em verificar a desintegração estrutural de um torrão de solo, quando inundado por um líquido diferente de água.

As misturas foram compactadas na umidade ótima (Tabela 1) e torrões foram moldados no formato de blocos retangulares e pesando aproximadamente 50g, conforme apresentado na Figura 1. Esses torrões foram imersos em um volume de 400 ml, tanto em água quanto nas soluções empregadas por Borges (2019) em seus ensaios de compatibilidade (Tabela 2). Após a imersão, foi registrado o tempo necessário à estabilização da desintegração (total ou parcial) do torrão quando em contato com o líquido e seu impacto na coloração do líquido e nas condições estruturais do torrão.



**FIGURA 1:** Formato do bloco de solo compactado após o molde.

**FONTE:** Autoria Própria.

**TABELA 2:** Soluções químicas utilizadas nos ensaios de dispersão.

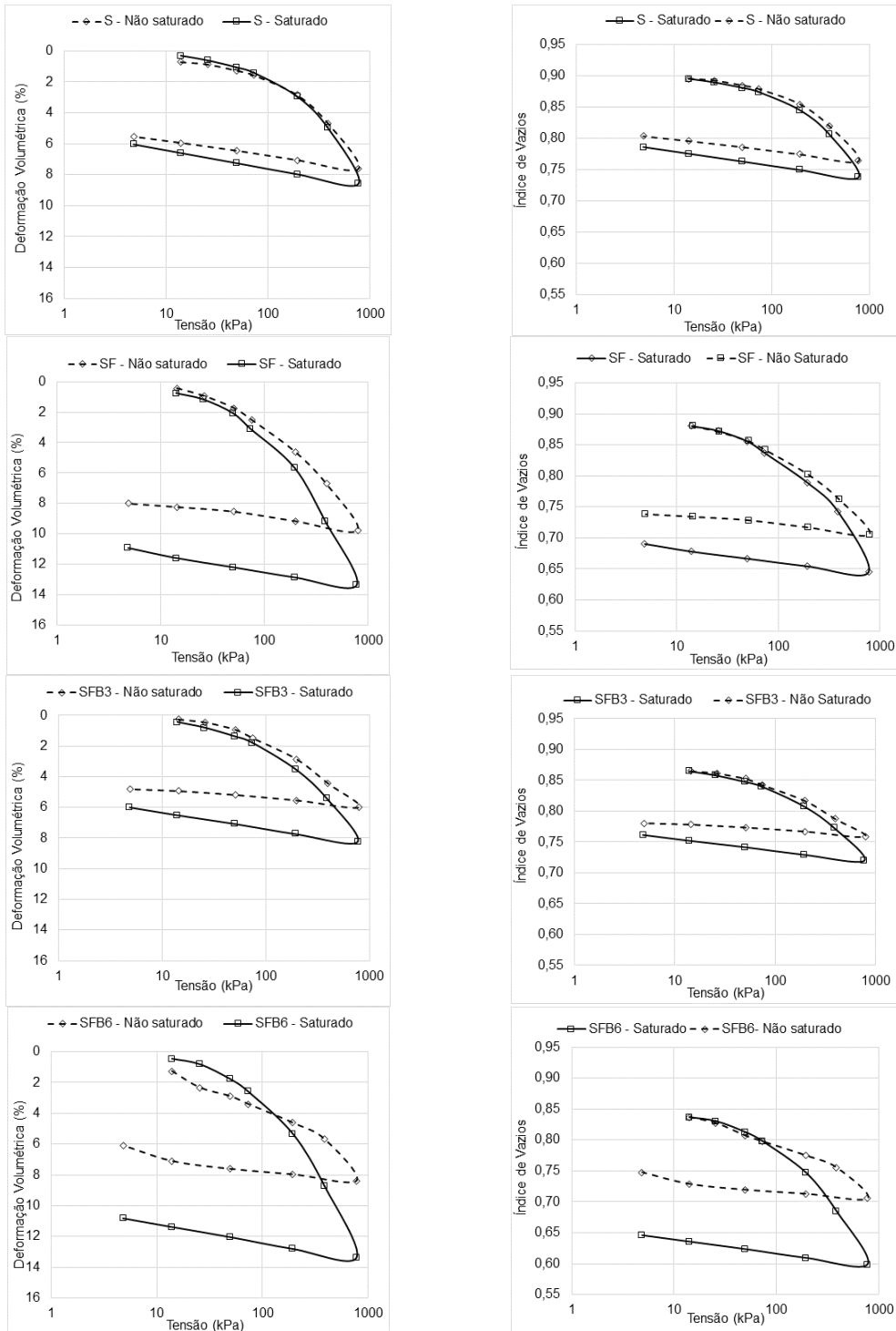
Solução	Fórmula Molecular	Característica	Concentração
Cloreto de Sódio	NaCl	Líquido miscível inorgânico salino	5 g/L
Hidróxido de Sódio	NaOH	Líquido miscível inorgânico básico	0,25 M
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Líquido miscível inorgânico neutro	1 M
Ácido Nítrico	HNO <sub>3</sub>	Líquido miscível inorgânico ácido	1M

**FONTE:** Borges (2019).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. O POTENCIAL DE COLAPSO

Na Figura 2 constam as curvas de compressão para as condições saturada e não saturada do solo das misturas trabalhadas, não sendo observado recalques de grande magnitude e nem colapso significativo durante a inundação.



**FIGURA 2:** Curvas de compressão e de deformação volumétrica do solo e das misturas.

**FONTE:** Autoria Própria.

Por meio da Figura 2 observa-se que, sob uma carga de 200 kPa, que é o nível de tensão comumente utilizado em obras geotécnicas, a deformação na condição saturada foi de 2,95% para o solo, 3,51% para a mistura SFB3, 5,64% para a mistura SF e 5,33% para a mistura SFB6. Ou seja, as adições de fosfogesso e bentonita aumentaram a deformabilidade das misturas. No entanto, os valores de deformação apresentados pelas misturas são inferiores aos verificados por Soleimanbeigi et al. (2013) para blocos de asfalto reciclados e cinzas volantes ensaiados, que variaram entre 17,5 e 30%. Amplitudes de deformações de até 5% foram obtidas para outros materiais reciclados estudados: Soleimanbeigi e Tuncer (2015), com agregados de concreto reciclado, cinzas inferiores, escória de fundição, areia de fundição e material de pavimento reciclado; Kim et al. (2005) para cinzas volantes e suas misturas e Mascarenha et al. (2018) para mistura contendo 10% de fosfogesso e para amostra de solo tropical natural.

Como pode ser visto, as deformações na condição saturada são superiores às deformações na condição não saturada. Na condição não saturada, cresce a atração entre as partículas sólidas e as moléculas de água, devido ao fenômeno de sucção, o que confere maior resistência ao esqueleto sólido do solo, reduzindo as deformações. Quando as amostras são saturadas, essa força de atração entre as partículas diminui, e a água passa a atuar como um lubrificante, permitindo que os grãos deslizem uns sobre os outros, e se reorganizem estruturalmente. Logo, o índice de vazios diminui e as compressões aumentam.

Na Tabela 3 constam os valores do potencial de colapso (PC) e do índice de colapso (IC) calculados para uma tensão de 200 kPa, de 300 kPa e para valores médios de todas as cargas. De acordo com os critérios definidos por Vargas (1977), para uma carga de inundação de 200 kPa, e de Lutenneger e Saber (1988), para uma carga de inundação de 300 kPa, nenhuma das amostras são colapsíveis quando inundadas por água. Os valores encontrados são menores aos obtidos na literatura para solos colapsíveis. Garcia et al. (2004) realizaram ensaios oedométricos duplos e simples em um solo tropical arenoso laterítico compactado e, ao avaliarem o colapso para diferentes fluidos de inundação, obtiveram valores médios de PC entre 2,29% e 12,14%. Gonzaga et al. (2015) executaram ensaios oedométricos simples em solos laterítico argilo-siltoso e areno-argiloso naturais e obtiveram valores médios de PC 9,7% e 25,0% nas profundidades de 1 e 2 metros, respectivamente. Louro et al. (2016), por meio de ensaios com expansocolapsômetro, verificaram PCs diferentes para amostras indeformadas de solo laterítico do município de Rondonópolis, Mato Grosso, em diferentes profundidades e furos, onde seus resultados variaram, em relação à média, entre 0,65% e 11,88%, sendo o primeiro o único valor menor que 4%. Silva (2003) analisou os aspectos geotécnicos das falésias no município de Tibau do Sul, no Rio Grande do Norte, e observou que ensaios oedométricos simples aplicados em amostras indeformadas da base apresentaram PC da ordem de 4% e do topo de 1,5% quando considerado carregamento da ordem de 200 kPa.

**TABELA 3:** Potencial de colapso (PC) e índice de colapso (IC) das misturas.

Amostra	PC <sub>200</sub>	PC <sub>300</sub>	PC <sub>N</sub>	IC <sub>200</sub>	IC <sub>300</sub>	IC <sub>M</sub>
S	0,51	0,61	0,70	0,52	0,63	0,74
SF	0,68	0,86	1,58	2,70	3,47	1,71
SFB3	0,47	0,63	0,91	0,48	0,65	0,95
SFB6	1,53	2,70	3,03	1,58	2,81	3,21

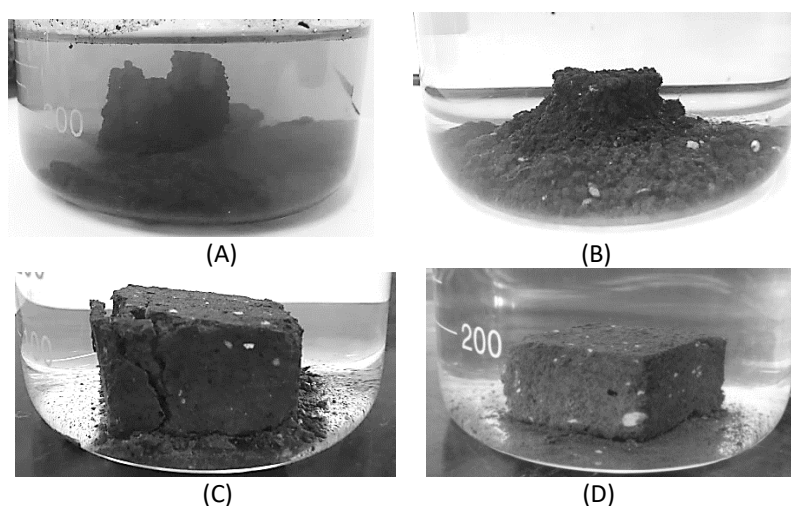
FONTE: Autoria Própria.

**Nota:** PC = potencial de colapso (%), I = Índice de colapso; PC<sub>N</sub> = PC para carga N; I<sub>N</sub> = I para carga N; M = média.

## 5.2. A INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO POTENCIAL DE COLAPSO DO SOLO

Na Figura 3 consta o efeito dispersivo da água nas diversas misturas. Observa-se que a mistura SF apresentou maior desagregação, sendo que o fosfogesso reagiu com as substâncias em suspensão, provenientes da desagregação, fazendo com que houvesse a decantação desse material, o que propiciou a manutenção do meio mais transparente do que quando da amostra contendo apenas solo. O resultado corrobora com o resultado do potencial de colapso (Tabela 3), no qual a adição de fosfogesso ao solo aumentou o referido potencial. Chang et al. (1989) verificou que a incorporação de apenas fosfogesso como estabilizante, não apresenta melhora comportamental quanto ao colapso em solos tropicais.

As amostras contendo bentonita foram as que menos sofreram interferência da inundação com água, sendo que SFB3 apresentou fissuras em uma de suas extremidades, enquanto SFB6 praticamente não sofreu com alteração estrutural. Supõe-se que a bentonita, ao entrar em contato com a água expande, penetrando nos vazios do solo e dificultando a entrada da água. Vale ressaltar que esses resultados estão em desacordo com o potencial de colapso (Tabela 1), uma vez que as misturas com solo, fosfogesso e bentonita possuem potenciais de colapso superiores aos valores do solo. No entanto, no ensaio edométrico, o colapso acontece devido ao contato com a água e as tensões aplicadas, enquanto no ensaio de desagregação é analisado apenas a influência do contato com a água.

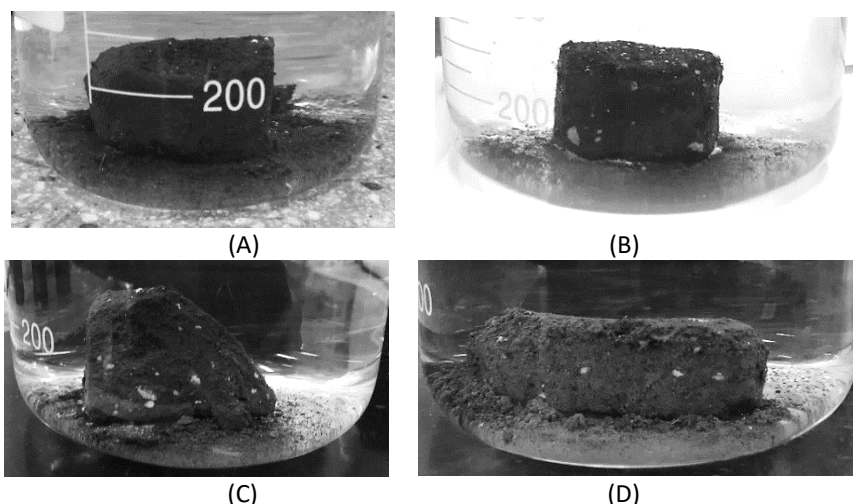


**FIGURA 3:** Efeito da água na dispersão, em 24 horas de ensaio, para os torrões de solo (A), solo+fosfogesso (B), solo+ fosfogesso+bentonita 3% (C) e solo+ fosfogesso+bentonita 6% (D).

**FONTE:** Autoria Própria.

Nas Figuras 4 a 7 constam os resultados dos ensaios de dispersão das misturas inundadas por NaCl, NaOH, álcool e HNO<sub>3</sub>, respectivamente. Por meio da Figura 4 observa-se que houve desestruturação das misturas quando em contato com o NaCl. Nos ensaios de compatibilidade direta realizados por Borges (2019), a solução contendo NaCl apresentou valores de condutividade hidráulica similar à da água, o que confirma que a barreira hidráulica, ao entrar em contato com esse sal, apresentará comportamento similar ao obtido em contato com a água. Recomenda-se, contudo, que a concentração da solução salina seja analisada criteriosamente em possíveis testes de compatibilidade, uma vez que maiores concentrações podem afetar o comportamento hidromecânico da barreira de forma mais significativa (SHACKELFORD et al., 2000).



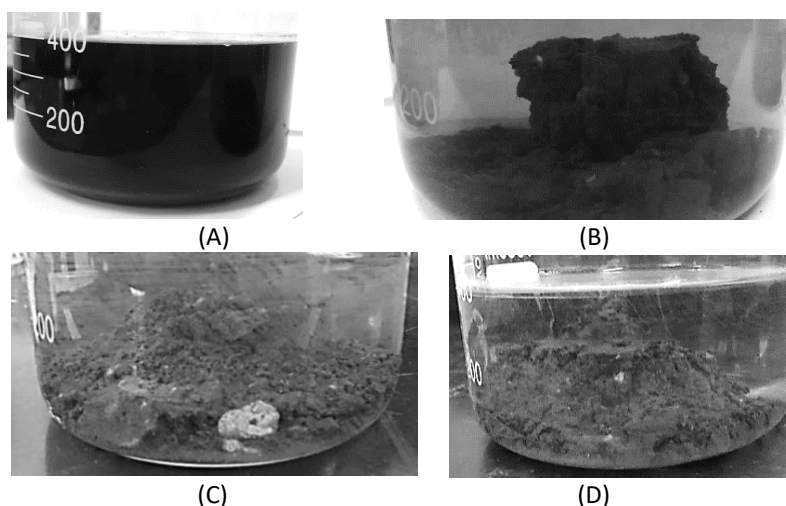


**FIGURA 4:** Efeito da NaCl na dispersão, em 24 horas de ensaio, para os torrões de solo (A), solo+fosfogesso (B), solo+ fosfogesso+bentonita 3% (C) e solo+ fosfogesso+bentonita 6% (D).

**FONTE:** Autoria Própria.

A solução de NaOH, ao entrar em contato com as misturas, provoca uma maior desestruturação do que a água. Portanto, espera-se que o solo e as misturas, quando em contato com essa solução, apresentem maiores valores de colapso do que o apresentado na Tabela 3. Observa-se, ao fim de 24 horas de ensaio, a amostra de solo totalmente desestruturada e a coloração opaca da solução (Figura 5a), sendo que este se encontrava com coloração turva (em tom avermelhado) e com boa parte do material desagregado com apenas 10 minutos de ensaio. Esta coloração pode estar relacionada ao processo de oxidação dos elementos metálicos presentes no solo, onde, no caso das misturas, isso é menos intenso justamente porque as adições estão recobrando os grãos de solo e evitando um contato direto com a solução, que é uma base forte.

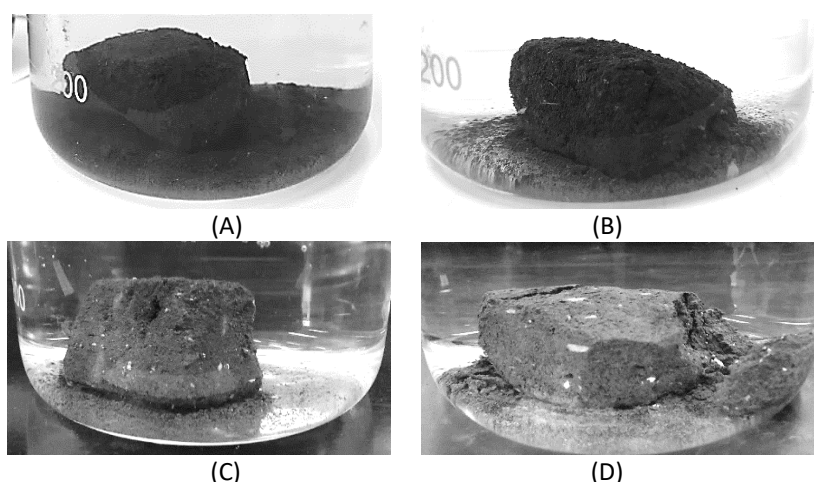
Ainda com relação à solução de NaOH, observa-se turbidez do líquido nas misturas SF, SFB3 e SFB6 (Figuras 5b, 5c e 5d), mas suas partículas não se dispersaram totalmente. Borges (2019) verificou que todas as amostras ensaiadas com esse fluido apresentaram coeficiente de permeabilidade inferior às tratadas com água, devido à viscosidade desta solução e por causa da formação de estruturas dispersas.



**FIGURA 5:** Efeito da NaOH na dispersão, em 24 horas de ensaio, para os torrões de solo (A), solo+fosfogesso (B), solo+ fosfogesso+bentonita 3% (C) e solo+ fosfogesso+bentonita 6% (D).

**FONTE:** Autoria Própria.

O álcool produziu efeito similar ao apresentado pelo NaCl nos torrões, como pode ser observado na Figura 6. Borges (2019) verificou, por meio de ensaios de compatibilidade direta, que a permeabilidade, em relação à água, do solo e dessas misturas é semelhante à permeabilidade em relação ao álcool. A exceção se deu na amostra contendo SBF6, sendo que uma das extremidades se despreendeu do restante do corpo de prova e seu extremo oposto apresentou fissuras. Essa alteração estrutural ocorreu após os instantes iniciais à imersão, e a configuração se manteve até o encerramento do período de observação, o que deve estar relacionado a uma fragilidade localizada da amostra.



**FIGURA 6:** Efeito da álcool na dispersão, em 24 horas de ensaio, para os torrões de solo (A), solo+fosfogesso (B), solo+ fosfogesso+bentonita 3% (C) e solo+ fosfogesso+bentonita 6% (D).

**FONTE:** Autoria Própria.

Comparando-se os comportamentos de colapso devido a inundação por água e álcool, tem-se que a dispersão das partículas em água é muito superior à do álcool. Resultado semelhante foi encontrado nos estudos de Albiero et al. (1986, apud Silva, 2006), que analisaram o colapso de um solo poroso da região central do estado de São Paulo e o valor encontrado para a inundação por álcool (3.6%) foi bem inferior ao valor encontrado para a água (12.4%).

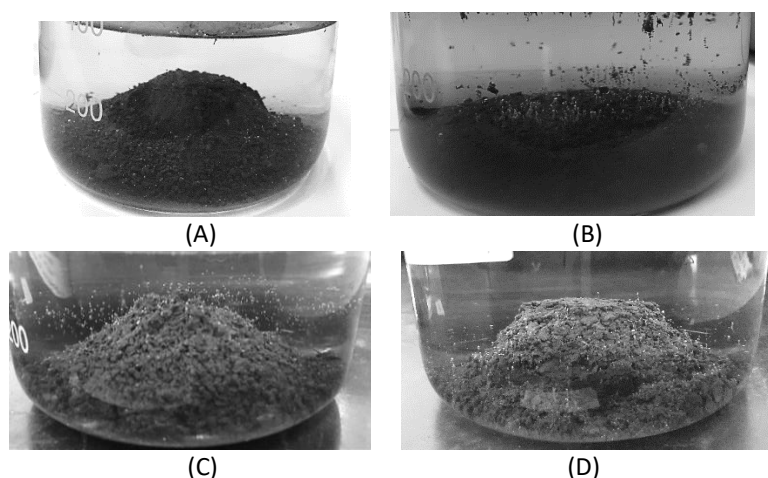
Novamente, ressalta-se o cuidado com a concentração da solução em análises para projetos de barreiras hidráulicas, haja vista a existência de dados na literatura que indicam que soluções orgânicas com concentrações superiores a 50% podem ser nocivas às camadas impermeabilizantes, em especial para aquelas que contêm materiais expansivos, como a bentonita (Shackelford et al., 2000).

O ácido nítrico foi o líquido que mais desestruturou as misturas (Figura 7). A amostra de solo permaneceu com uma pequena parte estruturada ao centro do torrão e as misturas se desintegraram totalmente: A mistura SF, aos 40 minutos de ensaio, já estava disforme, com mais da metade já desestruturada; as misturas SFB3 e SFB6, com cerca de 2 a 3h, possuía praticamente 50% de desagregação. As misturas de Borges (2019) contendo bentonita apresentaram maiores valores de condutividade hidráulica quando tratadas com HNO<sub>3</sub> e isso pode ser atribuído à formação de estruturas floculadas e à diminuição da dupla camada elétrica nos minerais argilosos (ocasionada pela redução da constante dielétrica do líquido).

Observa-se que os líquidos que causaram maiores deformações foram as soluções alcalina e ácida (fortes), corroborando com os resultados de Ferreira (1994; apud Silva, 2006), que observou menores valores de potencial de colapso com permeantes com pH em torno de 7,0 e potenciais maiores, para valores ácidos e básicos. Cabe ressaltar que o pH do chorume é tipicamente entre 5,0 e 6,0 (podendo variar de 4,5 a 9,0), sendo mais ácido no início da degradação e mais básico na fase metanogênica.

No caso da solução básica, segundo Garcia et al. (2004), o potencial colapsível pode ser atribuído a composição química dos fluidos que são à base de sódio, pois sabe-se que este cátion age como dispersante

em solos com estrutura agregada, facilitando a quebra de agregados de partículas de granulometria mais fina. Para Silva (2006), uma explicação provável para a dispersão das argilas é que o excesso de cátions do líquido neutraliza a eletronegatividade predominante na superfície das partículas de argila.



**FIGURA 7:** Efeito do  $\text{HNO}_3$  água na dispersão, em 24 horas de ensaio, para os torrões de solo (A), solo+fósforo (B), solo+ fósforo+bentonita 3% (C) e solo+ fósforo+bentonita 6% (D).

**FONTE:** Autoria Própria.

## 6. CONCLUSÕES

O solo e as misturas possuem deformabilidades inferiores ou similares a outros tipos de resíduos utilizados em obras geotécnicas. Além disso, esses materiais foram classificados como não colapsíveis, de acordo com os critérios definidos por Vargas (1977) e Lutenneger e Saber (1988), quando inundadas por água, sem considerar a influência do fluido percolante.

Os resultados apresentados pela mistura contendo apenas solo e fósforo corroboram com a constatação apresentada por Chang et al. (1989) de que a adição do fósforo como estabilizante, não contribui para a redução da deformabilidade de solos tropicais quando inundado por água.

As soluções de álcool e NaCl não apresentaram alterações estruturais significativas nas amostras testadas. Os meios líquidos compostos por NaOH e  $\text{HNO}_3$  foram mais agressivos às estruturas do solo e das misturas. Assim, quando da presença desses líquidos em barreiras hidráulicas, devem ser verificadas outras possibilidades de agentes estabilizantes, pois nenhuma das misturas propostas agregou resistência satisfatória à manutenção de sua condição estrutural antes da inundação.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq (processo nº 160413/2018-4) e pela bolsa de iniciação científica da primeira autora e à CMOB Brasil pelo suporte financeiro à referida pesquisa, a Capes (código de financiamento 001) e aos Laboratórios de Geotecnia (LabGeo) e de Análise de Águas (LANA) da UFG por todo o apoio técnico nas realizações dos ensaios.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADI, A. A.; EBEREMU, A. O. (2012) *Delineation of compaction criteria for acceptable hydraulic conductivity of lateritic soil-bentonite mixtures designed as landfill liners. Environmental Earth Sciences*, 67, 999-1006.

AMADI, A. A.; OSINUBI, K. J. (2017) *Transport parameters of lead (Pb) ions migrating through saturated lateritic soil-bentonite column. International Journal of Geotechnical Engineering*, DOI: 10.1080/19386362.2016.1277620.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2011) *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. **D2435/D2435M – 11**, 15 pp.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2003), *Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*, **D5333 – 03**, 4 pp.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1996) Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*Crumb test*) - Método de ensaio. **NBR 13601**, 2pp.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004) Resíduos sólidos – Classificação. **NBR 10004**, 71pp.

ARAKI, M.S. (1997). **Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM – 040A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.

BORGES, Y. I. S. (2019). **Utilização de solo laterítico, fosfogesso e bentonita em barreiras hidráulicas: uma análise hidromecânica e ambiental**, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 45 pp.

CAMPOS, M.P., COSTA, L.J.P., NISTI, M.B., MAZZILLI, B.P. (2017). *Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate*. **Journal of Environmental Radioactivity**, 172, 232–236.

CHANG, W.F., CHIN, D.A., HO, R. (1989). **Phosphogypsum for Secondary Road Construction**. Miami, Florida.

CHEN, X.; GAO, J.; ZHAO, Y. (2019). *Investigation on the hydration of hemihydrate phosphogypsum after post treatment*. **Construction and Building Materials**, 229, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2008). **Resolução nº 396**, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília: Distrito Federal, 11pp.

DE LA MORENA, G.; ASENSIO, L.; NAVARRO, V. (2018) *Intra-aggregate water content and void ratio model for MX-80 bentonites*. **Engineering Geology**, 246, 131 – 138.

GARCIA, J. R.; RODRIGUES, E R. A.; LOLLO, J. A. (2004). A Influência de Diferentes Fluidos de Inundação no Colapso Estrutural de um Solo Arenoso Laterítico. **Revista Engenharia Civil – UM**, 21, 49-58.

GONZAGA, A. C.; ALMEIDA, F. A. S.; ALELVAN, G. M.; REBELO, K. M. W. (2015). Caracterização geotécnica do solo da cidade de Uberlândia (MG) / Brasil para utilização em aterros sanitários. **Geotecnia**, 133, 73-90.

KIM, B.; PREZZI, M.; SALGADO, R. (2005). *Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 10.1061 / (ASCE)GT.1943-5606.0001285.

LOURO, C. F.; SOARES, F. T.; RIBEIRO, K. F. A.; RIBEIRO JUNIOR, I. (2016) Utilização de Expansocolapsômetro na Determinação do Colapso no solo de Rondonópolis – MT, **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)**. ABMS, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

LUTENEGGER, A.; SABER, R. (1988) *Determination of Collapse Potential of Soils*. **Geotechnical Testing Journal**, 11(3), 1-6

MARANHA, J. R.; VIEIRA, A.; MOURINHA, A. (2012) Algoritmo para modelação do colapso em solos não saturados. **Geotecnia**, 126: 3-24.

MASCARENHA, M. M. A.; CORDÃO NETO, M. P.; MATOS, T. H. C.; CHAGAS, J. V. R.; REZENDE, L. R. (2018) *Effects of the addition of phosphogypsum on the characterization and mechanical behavior of lateritic clay*. **Soil and Rocks**, 4, 157-170.

MATOS, T. H. C. (2011). **Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 119 pp.

MESQUITA, G.M. (2007). **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 144 pp.

MORANDINI, T. L. C.; LEITE, A. L. (2012) *Characterization, hydraulic conductivity and compatibility of mixtures of tropical soil and bentonite mixtures for barrier usage purpose*. **Soils and Rocks**, 35 (3), 267-278.

- MORANDINI, T. L. C.; LEITE, A. L. (2015). Misturas de solo laterítico e bentonita como barreiras alternativas para aterros sanitários no Brasil. **Geotecnia**, 134, 43-59.
- NISTI, M. B.; SAUEIA, C. R.; MALHEIRO, R. H.; GROppo, G. H.; MAZILLI, B. P. (2015) *Lixiviation of natural radionuclides and heavy metals in tropical soils amended with phosphogypsum*. **Journal of environmental radioactivity**, 144, 120-126.
- PORTELINHA, F. H. M.; LIMA, D. C.; FONTES, M. P. F. (2012). Influência dos mecanismos de reação nas propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais melhorados com cimento e cal. **Geotecnia**, 124, 5-30.
- REZENDE, L. R.; CURADO, T.S; SILVA, M.V.; MASCARENHA, M.M.A.; METOGO, D.A.N; CORDÃO NETO, M.P; BERNUCCI, L.L.B (2016) *Laboratory study of phosphogypsum, stabilizers and tropical soil mixtures*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001711.
- RIBEIRO, M. E. S.; MASCARENHA, M. M. A.; SANTOS, T. L. (2018) Estudo de viabilidade técnica do fosfogesso hemiidratado para aplicação em sistema de cobertura de aterros sanitários. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 14(2), 263 – 277.
- SHACKELFORD, C. D.; BENSON, C. H.; KATSUMI, T.; EDIL, T. B.; LIN, L. (2000). *Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids*. **Geotextiles and geomembranes**. 18, 133-161.
- SILVA, J. D. (2006). **Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes**, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 39 pp.
- SILVA, M. V.; CURADO, T. S.; REZENDE, L. R.; MASCARENHA, M. M. A.; OLIVEIRA, R. B. (2019) *Phosphogypsum, tropical soil and cement mixtures for asphalt pavements under wet and dry environmental conditions*. **Resources, Conservation & Recycling**, 144, 123-136.
- SILVA, W. S. (2003). **Estudo da dinâmica superficial e geotécnico das falésias do município de Tibau do Sul – Litoral oriental do RN**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 150p.
- SOLEIMANBEIGI, A.; TUNCER, B.E.; BERSON, C. (2013). *Evaluation of fly ash stabilization of recycled asphalt shingles for use in structural fills*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Eng., 25(1), 94-104
- SOLEIMANBEIGI, A.; TUNCER, B.E. (2015). **Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill**. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285.
- VARGAS, M. (1978). **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo/SP. Makron Books do Brasil Editora Ltda., São Paulo, 509p.