

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL

**UTILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO,
FOSFOGESSO E BENTONITA EM
BARREIRAS HIDRÁULICAS: UMA ANÁLISE
HIDROMECÂNICA E AMBIENTAL**

YAGO ISAIAS DA SILVA BORGES

D0195G19
GOIÂNIA
2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

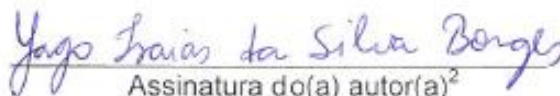
Nome completo do autor: Yago Isaias da Silva Borges

Título do trabalho: Utilização de solo laterítico, fosfogesso e bentonita em barreiras hidráulicas: uma análise hidromecânica e ambiental.

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 18 / 01 / 19

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

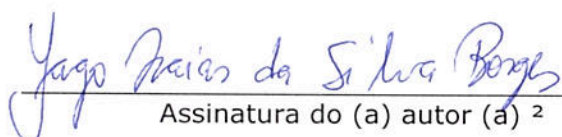
Nome completo do autor: Yago Isaias da Silva Borges

Título do trabalho: Utilização de solo laterítico, fosfogesso e bentonita em barreiras hidráulicas: uma análise hidromecânica e ambiental

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 22 / 08 / 22

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

YAGO ISAIAS DA SILVA BORGES

**UTILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO,
FOSFOGESSO E BENTONITA EM BARREIRAS
HIDRÁULICAS: UMA ANÁLISE
HIDROMECÂNICA E AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha, D.Sc.

D0195G19
GOIÂNIA
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Borges, Yago Isaias da Silva

Utilização de solo laterítico, fosfogesso e bentonita em barreiras hidráulicas: uma análise hidromecânica e ambiental [manuscrito] / Yago Isaias da Silva Borges. - 2019.
45 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2019.

Bibliografia.

Inclui abreviaturas, símbolos, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Estabilização química. 2. Aterros. 3. Condutividade hidráulica. 4. Compatibilidade. 5. Contaminação ambiental. I. Mascarenha, Márcia Maria dos Anjos, orient. II. Título.

CDU 624.13

Ata de Nº 0195 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Yago Isaias da Silva
Borges da área de concentração Geotecnia do
PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção
Civil.

Ao 01 dia do mês de fevereiro de 2019, às 14h00min, no Miniauditório do Centro de Recursos Computacionais (CERCOMP), Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "**Utilização de Solo Laterítico, Fosfogesso e Bentonita em Barreiras Hidráulicas: Uma Análise Hidromecânica e Ambiental**", apresentada pelo aluno **Yago Isaias da Silva Borges**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Geotecnia. A Banca Examinadora foi Presidida pela Prof.^a Dr.^a Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (GECON/UFG), tendo como membros o Prof. Dr. Mauricio Martines Sales (GECON/UFG) e a Prof.^a Dr.^a Maria Eugênia Gimenez Boscov (USP). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

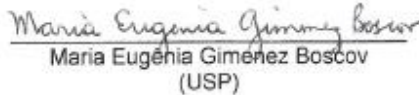
Membro	Instituição	Função	Resultado
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha	GECON/UFG	Presidente	<u>Aprovado</u>
Mauricio Martines Sales	GECON/UFG	Examinador Interno	<u>Aprova do</u>
Maria Eugênia Gimenez Boscov	(USP)	Examinadora Externa	<u>Aprovado</u>

Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

() Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.


Mauricio Martines Sales
PPG-GECON/UFG


Maria Eugênia Gimenez Boscov
(USP)


Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
PPG-GECON/UFG

Candidato: Yago Isaias da Silva Borges



DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Carlos e Idelma, e à minha avó, Geralda, que tanto lutaram pelo meu progresso.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Senhor Jesus, pois reconheço que “o homem não pode receber coisa alguma, se do céu não lhe for dada”;

Aos meus pais, Carlos e Idelma, à minha avó, Geralda e à minha irmã, Ludmilla, pelo apoio incondicional em todas as etapas de minha vida, incluindo esta;

Aos professores do PPG GECON, pela contribuição em minha formação como engenheiro geotécnico. Em especial, à prof. Dr^a. Márcia Mascarenha, pela dedicação com me orientou neste trabalho e pelo companheirismo demonstrado em todas as etapas desta pesquisa;

Aos meus colegas da turma de 2017, parceiros nos estudos, nas aflições e nas alegrias durante o mestrado;

À Capes, ao CNPq e à CMOC *International* Brasil pelo apoio financeiro, sem o qual esse trabalho seria inviável;

Ao colega de pesquisa, Bismarck, que tanto me auxiliou no laboratório durante a primeira etapa desse projeto;

À equipe técnica do laboratório de geotecnia: João Júnior, pela generosidade e prontidão em ensinar; Lucas, que me muito me ajudou nos primeiros meses; Gabriel Novato, pelas dezenas de corpos de prova compactados, pela amizade e pelo auxílio até o final desse trabalho;

Aos laboratórios parceiros na UFG: CRTI; LabMic; Labitecc, em especial aos técnicos Antônio e Victor; Laboratório de águas, em especial à Helen, sempre tão gentil; e ao laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de um solo laterítico arenoso quimicamente estabilizado como material constituinte de uma barreira hidráulica, considerando-se aspectos hidromecânicos e ambientais. Para a estabilização química, foram incorporados ao solo o fosfogesso di-hidratado e a bentonita sódica, de modo que seis amostras foram obtidas: Solo (S), solo + 10% de fosfogesso (SP), solo + 10% de fosfogesso + 3% de bentonita (SPB3), solo + 10% de fosfogesso + 6% de bentonita (SPB6), solo + 3% de bentonita (SB3) e solo + 6% de bentonita (SB6). Visto que difrações de raios-x indicaram que o fosfogesso não deveria ser submetido a temperaturas superiores a 70 °C, a umidade de todas as misturas que o continham foram determinadas nessa temperatura. Como a umidade do solo foi determinada a 110 °C, e a da bentonita, a 130 °C, foi necessário corrigir a umidade das misturas obtidas a 70 °C. Isso foi feito por meio de correlações matemáticas obtidas comparando-se amostras desses materiais em diferentes umidades e temperaturas. Para os ensaios hidromecânicos, os corpos de prova foram compactados em miniatura, de acordo com a metodologia MCT, na energia Proctor Normal. As curvas de compactação apresentaram pesos específicos aparentes secos semelhantes, mas as amostras estabilizadas apresentaram valores de umidade ótima superiores aos do solo. Os ensaios de permeabilidade foram realizados utilizando-se os mesmos cilindros da compactação, com carga hidráulica variável e gradiente de 10 m/m. Verificou-se que o fosfogesso não alterou os coeficientes de condutividade hidráulica das misturas. Por outro lado, uma redução de cerca de uma ordem de grandeza nesses coeficientes foi registrada para cada 3% de bentonita adicionado às misturas. Amostras contendo 6% desse material apresentaram coeficientes menores que 1×10^{-9} m/s, ou seja, valores adequados para uso em barreiras hidráulicas. Nos ensaios de compressão não confinados, as amostras contendo fosfogesso apresentaram menores resistências, enquanto que aquelas contendo bentonita apresentaram acréscimos de resistência, mas todas apresentaram resultados superiores ao limite mínimo de 200 kPa, sendo, portanto, consideradas aceitáveis para uso em barreira hidráulica a partir do critério de resistência. A compatibilidade com contaminantes foi verificada por meio de ensaios de percolação química, utilizando-se a mesma metodologia empregada nos ensaios de permeabilidade, porém com substituição da água por soluções de HNO₃, NaOH, NaCl e etanol. Os resultados demonstraram que a solução de NaOH reduziu os coeficientes de condutividade hidráulica das amostras. Por outro lado, o HNO₃ aumentou os coeficientes das amostras contendo bentonita, de forma que todas as amostras apresentaram valores superiores a 1×10^{-9} m/s. Não foram observadas modificações significativas para as soluções de NaCl e etanol. O risco de contaminação ambiental devido ao uso de fosfogesso foi analisado por meio de análises químicas de extratos solubilizados obtidos de amostras contendo esse subproduto, levando-se em conta os parâmetros prescritos pela resolução CONAMA 396, para águas subterrâneas. Os resultados obtidos indicaram excesso de ferro (atribuído ao solo) e de manganês (atribuído ao fosfogesso), mas foram recomendadas análises adicionais a fim de que um diagnóstico de risco preciso fosse traçado.

Palavras-chave: Estabilização química. Aterros. Condutividade hidráulica. Compatibilidade. Contaminação ambiental.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the technical viability of using a sandy lateritic soil chemically stabilized as a liner material, regarding hydromechanical and environmental features. For the chemical stabilization, dehydrated phosphogypsum and sodic bentonite were added to the soil, such six samples were obtained: Soil (S), soil + 10% phosphogypsum (SP), soil + 10% phosphogypsum + 3% bentonite (SPB3), soil + 10% phosphogypsum + 6% bentonite (SPB6), soil + 3% bentonite (SB3) and soil + 6% bentonite (SB6). Since x-ray diffractions tests showed that phosphogypsum shouldn't be subjected to temperatures above 70°C, the moisture values of all samples containing this material were determined in this temperature. However, the moisture values obtained in this temperature were corrected, since the soil moisture was determined at 110 °C and bentonite's one at 130 °C. It was done through mathematical correlations, obtained comparing samples of this materials in different temperatures. For the hydromechanical tests, specimens were compacted in miniature, in accordance to the Brazilian MCT methodology, in Proctor standard energy. The compaction curves presented similar apparent dry weight values, but the stabilized samples presented higher values of optimum water content than soil. The hydraulic conductivity tests were carried out using the same cylinders used in compaction, with variable hydraulic head and gradient of 10m/m. Phosphogypsum did not modify the coefficient of hydraulic conductivity of samples, while for the 3% of bentonite addition, these values decreased approximately one order of magnitude. Samples containing 6% of bentonite presented coefficients lower than 1×10^{-9} m/s, therefore, acceptable values for liners. In unconfined compression tests, the samples containing phosphogypsum presented lower strength, while those containing bentonite had an increasing in these values, but all them presented results higher than 200 kPa. The compatibility with contaminants was analyzed through chemical percolation tests, similar to hydraulic conductivity tests, but substituting water with solutions of HNO₃, NaOH, NaCl and ethanol. The results showed that the solution of NaOH decreased the coefficients of hydraulic conductivity of samples. On the other hand, the HNO₃ increased the coefficients of samples containing bentonite, such all samples presented values higher than 1×10^{-9} m/s. No significant changes were observed for solutions of NaCl and ethanol. The risk of environmental contamination due to the use of phosphogypsum was investigated through chemical analysis of solubilized extracts obtained from samples containing this by-product, taking into account the parameters prescribed by the Brazilian resolution CONAMA 396, for groundwaters. The results obtained indicated excess of iron (attributed to soil) and manganese (attributed to phosphogypsum), but further analysis was recommended for that a precise risk diagnosis was delineated.

Keywords: Chemical stabilization. Landfills. Hydraulic conductivity. Compatibility tests. Environmental contamination.

LISTA DE FIGURAS

Figure 1 – Mathematical correlation for sample S.	26
Figure 2 - Mathematical correlation for sample B.	26
Figure 3 - Compaction curves of samples S, SB3 and SB6.....	30
Figure 4 - Compaction curves of samples SP, SPB3 and SPB6	30
Figure 5 - Natural soil (magnification: 50 times).	31
Figure 6 - Sample SPB6 (magnification: 50 times).....	31
Figure 7 - Values of K_r	32
Figure 8 - Sample SP treated with NaOH. Detail of a phosphogypsum plate recovered by dispersed clay particles (magnification: 1500 times).	33
Figure 9 - Sample SPB3 treated with HNO_3 . Detail of phosphogypsum plates recovered by flocculated clay particles (magnification: 1500 times).....	34
Figure 10 - Plates of phosphogypsum in sample SP (magnification: 250 times).....	36
Figure 11 - Details of phosphogypsum broken plates (magnification of 1500 times).	36

LISTA DE TABELAS

Table 1- Mixtures of Soil, phosphogypsum and bentonite.....	24
Table 2 – Geotechnical properties.	24
Table 3 - Grain size distribution.	24
Table 4 - MCT classification.....	25
Table 5 - Mineralogy of phosphogypsum samples.	26
Table 6 - Summary of Y_{dmax} , w_{op} and e	30
Table 7 - Hydraulic conductivity coefficients at 20°C.	30
Table 8 - Results of compatibility tests.....	32
Table 9 – Results of the unconfined compression tests.	35
Table 10 - Chemical analysis for inorganic parameters.....	37
Table 11 - Percentage of oxides in phosphogypsum.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B	- Bentonita
Labmic	- Laboratório multiusuário de microscopia de alta resolução
M	- Molar
MCT	- Miniatura compactado tropical
P	- Fosfogesso
pH	- Potencial hidrogeniônico
S	- Solo
SB3	- Amostra contendo 97% de solo e 3% de bentonita
SB6	- Amostra contendo 84% de solo e 6% de bentonita
SEM	- Scanning electron microscopy
SP	- Amostra contendo 90% de solo e 10% de fosfogesso
SPB3	- Amostra contendo 87% de solo, 10% de fosfogesso e 3% de bentonita
SPB6	- Amostra contendo 84% de solo, 10% de fosfogesso e 6% de bentonita
UCS	- Unconfined compression strength

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	- Centímetro
e	- Índice de vazios
Fe	- Ferro
g	- Grama
HNO ₃	- Ácido nítrico
k	- Coeficiente de condutividade hidráulica
k ₂₀	- Coeficiente de condutividade hidráulica a 20 °C
KCl	- Cloreto de potássio
kPa	- Quilo Pascal
K _r	- Condutividade hidráulica relativa
K _s	- Condutividade hidráulica com percolação de água;
K _w	- Condutividade hidráulica com percolação da solução química
m	- Metro
m/s	- Metro por segundo
Mn	- Manganês
MnO	- Óxido de manganês
Na ⁺	- Íon de sódio
NaCl	- Cloreto de Sódio
NaOH	- Hidróxido de sódio
NO ₃ ⁻	- Íon nitrato

OH^-	- Íon hidroxila
μm	- Micrômetros
γ_{dmax}	- Peso específico aparente seco máximo
γ_{p}	- Peso específico unitário
%	- Por cento
$^{\circ}\text{C}$	- Graus Celsius
$W_{\text{B}70}$	- Umidade da bentonita a 70°C
$W_{\text{B}130}$	- Umidade da bentonita a 130°C
$W_{\text{s}70}$	- Umidade do solo a 70°C
$W_{\text{s}110}$	- Umidade do solo a 110°C
W_{op}	- Umidade ótima

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa.....	16
1.2. objetivos.....	17
1.3. Estrutura da dissertação.....	18
CAPÍTULO 2 ARTIGO	19
1 Introduction.....	21
2 Materials and methods	23
2.1 Materials.....	23
2.2 Methods.....	25
2.2.1 Preliminary thermal analysis	25
2.2.2 Compaction tests.....	27
2.2.3 Hydraulic conductivity tests	27
2.2.4 Compatibility tests.....	28
2.2.5 Unconfined compression tests.....	28
2.2.6 Microstructural analysis.....	28
2.2.7 Risks of environmental contamination analysis	29
3 Results and discussion	29
3.1 Compaction tests.....	29
3.2 Hydraulic conductivity tests	30

3.3	Compatibility tests.....	32
3.4	Unconfined compression tests.....	34
3.5	Risks of environmental contamination analysis	36
4	Conclusions	38
	Acknowledgments.....	39
	References	40
	CAPÍTULO 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
3.1.	CONCLUSÕES	44
3.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS.....	47

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos é um dos grandes impasses da sociedade contemporânea, cuja tendência é se agravar ainda mais, conforme o crescimento da população mundial e da produção industrial. Cada tipo de resíduo requer um tratamento próprio e uma estrutura de acondicionamento final baseados nos riscos que podem oferecer ao meio ambiente e à saúde pública de modo geral. No caso dos resíduos sólidos urbanos, uma saída recorrente encontrada pelos governos são os aterros sanitários que, quando devidamente projetados e executados, têm demonstrado resposta satisfatória à problemática ambiental.

O desempenho adequado de aterros sanitários (ou de qualquer sistema de contenção de resíduos) requer, sobretudo, que sejam capazes de evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas nos locais onde estejam instalados. Para isso, contam com barreiras compostas por camadas de argila compactadas e planejadas para isolar os resíduos (domésticos, industriais, hospitalares e mesmo radioativos) do ambiente ao redor, especialmente do lençol freático (MORANDINI; LEITE, 2012).

Para ser efetiva, uma barreira deve ter, primordialmente, baixa permeabilidade, resistência mecânica e estabilidade físico-química, a curto e longo prazo, quando em contato com contaminantes (MORANDINI; LEITE, 2012; EBEREMU; AMADI; OSINUBI, 2013). Muitos tipos de solos, mesmo quando compactados, não atingem esses parâmetros, caso, por exemplo, de alguns dos solos lateríticos encontrados no Brasil e em outras partes do planeta.

Isso ocorre porque os solos tropicais formam-se, principalmente, em processos de laterização, o que lhes confere uma mineralogia peculiar, originando estruturas porosas e de baixos índices de atividade (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015). Embora processos de compactação possam melhorar consideravelmente as propriedades hidromecânicas destes solos, em muitas ocasiões, entretanto, os resultados ainda permanecerão abaixo daqueles considerados satisfatórios para aplicação em barreiras hidráulicas.

1.1. JUSTIFICATIVA

Em situações semelhantes a estas, uma alternativa que pode ser viável, do ponto de vista da engenharia, é a incorporação de outros tipos de solo, ou mesmo de outros materiais, ao solo

existente no local da obra, formando misturas cujas propriedades sejam mais adequadas para os fins geotécnicos desejados.

Um material comumente empregado em sistemas de barreiras hidráulicas é a bentonita, que devido à sua granulometria extremamente fina e alta superfície específica, tende a melhorar os parâmetros de permeabilidade e de reatividade do solo. No entanto, o uso deste material em sistemas de retenção de contaminantes requer atenção especial, sobretudo no que diz respeito ao potencial de expansão das misturas e às suas propriedades físico-químicas e hidráulicas em longo prazo (AMADI, 2013).

Outro material que apresenta potencial uso como estabilizante químico de solos é o fosfogesso. Trata-se de um resíduo da indústria de fertilizantes fosfatados, cuja produção ultrapassa 720 mil toneladas por mês apenas em uma unidade fabril localizada no município de Catalão – GO (REZENDE *et al.*, 2016). Assim como para os demais tipos de resíduos sólidos, também para este verificam-se dificuldades quanto à deposição final, de modo que o seu aproveitamento, quando possível, é sempre algo desejável.

Estudos realizados por Matos (2011) deram indícios de que o emprego do fosfogesso em barreiras hidráulicas é tecnicamente viável: a incorporação de 10% de fosfogesso a um solo tropical diminuiu sua permeabilidade, manteve seu pH constante e aumentou, em quase oito vezes, sua capacidade de troca catiônica. Se isto for comprovado, duas importantes questões ambientais, no que tange a deposição final de resíduos, estariam sendo atendidas: incremento das alternativas de misturas que possibilitem a utilização de solos tropicais em barreiras hidráulicas e a destinação final mais nobre e ambientalmente correta para o fosfogesso.

1.2. OBJETIVOS

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade da utilização de solos tropicais, bentonita e fosfogesso em barreiras hidráulicas. Como objetivos específicos, tem-se:

- Determinar os teores adequados de estabilizantes nas misturas de forma a atender as especificações técnicas;
- Verificar a compatibilidade com os principais tipos de reagentes químicos encontrados em sistemas de retenção de contaminantes;
- Somar esforços às pesquisas voltadas para aproveitamento de fosfogesso em obras geotécnicas desenvolvidas pela Universidade Federal de Goiás.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em três capítulos. No primeiro, apresenta-se uma introdução ao tema, bem como as justificativas e os objetivos norteadores da pesquisa. No segundo, apresenta-se o produto da pesquisa, em forma de artigo científico, contemplando os aspectos metodológicos, resultados e discussões e as conclusões obtidas. No terceiro, apresentam-se as considerações finais, incluindo sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

ARTIGO

Este capítulo apresenta o produto desta pesquisa, em formato de artigo científico submetido para avaliação, e posterior publicação, no periódico *Engineering Geology* da editora Elsevier (Qualis Capes A1).

USE OF LATERITIC SOIL, PHOSPHOGYPSUM AND BENTONITE AS LINER MATERIALS: A HYDROMECHANICAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS

Abstract: The objective of this paper is to evaluate the technical viability of using 10% of dehydrated phosphogypsum and sodic bentonite (3% or 6%) as stabilizers of a sandy lateritic soil for applications as liner. For that, the following tests were carried out: compaction, hydraulic conductivity (in rigid wall permeameters, with a hydraulic gradient of 10 m/m), unconfined compression strength, and compatibility (similar to the hydraulic conductivity tests, substituting water with solutions of HNO₃, NaOH, NaCl and ethanol). To analyse the risks of environmental contamination, chemical analyses of the water obtained from samples containing phosphogypsum were carried out. X-ray diffraction and fluorescence indicated that phosphogypsum should not be subjected to temperatures above 70°C. Thus, a preliminary thermal study was performed for fitting the values of the moisture in samples containing this by-product. The compaction curves obtained presented similar dry weight values, while those containing the stabilizers presented higher optimum water content values. It was observed that phosphogypsum did not modify the hydraulic conductivity of the samples, but decreased their compression strengths. On the other hand, for 3% bentonite added, the hydraulic conductivity of mixtures decreased one order of magnitude, while an increasing in compression strength was observed. All samples reached compression strength values above 200 kPa, but only those containing 6% bentonite reached a hydraulic conductivity coefficient lower than 1×10^{-9} m/s. The effect of NaOH in the samples was to decrease their hydraulic conductivity in more than three-fold, while the HNO₃ increased the hydraulic conductivity of samples containing bentonite to values higher than 1×10^{-9} m/s. No significant changes were observed for samples treated with NaCl or ethanol. Finally, chemical analysis indicated that phosphogypsum could contaminate the groundwater with manganese, but a conclusive risk diagnosis requires further analysis.

Keywords: Chemical stabilization. Landfills. Hydraulic conductivity. Compatibility tests. Environmental contamination.

1 INTRODUCTION

The main purpose of a liner is protecting the surrounding environment by isolating the wastes from soil and groundwater and minimizing the migration of contaminants (MORANDINI; LEITE, 2012; BOUAZZA; VAN IMPE, 1998).

Although environmental legislation varies around the world, there is an agreement that efficient liner systems must present low hydraulic conductivity coefficient (k) values. In most cases, values of $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s are required (DANIEL, BENSON, 1990; BENSON *et al.*, 1994; MORANDINI; LEITE, 2015; EBEREMU, 2013; OSINUBI, *et al.*, 2015; QIANG *et al.*, 2014).

Mechanical strength is another important criterion for a liner (BOUAZZA; VAN IMPE, 1998; EBEREMU *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2018), that should be analysed regarding the stresses that could be found during the lifetime of the landfill. Even that minimum mechanical strength requirements are particularities of each landfill, a minimum value of 200 kPa for unconfined compression strength (UCS) has been adopted for several authors in literature (DANIEL; WU, 1993; OSINUBI; NWAIWU, 2006; EBEREMU *et al.*, 2013; EBEREMU, 2013). According to Benson and Wu (1993, p. 228) “this strength is the lowest value for very stiff soils” after studies published in 1970s.

Besides these hydromechanical parameters, the interaction between the liner materials and the contaminants, which is called compatibility, is also a significant issue to be considered in liner projects (SHACKELFORD *et al.*, 1994; FARNEZI; LEITE, 2007; MALUSIS; MACKEEHAN, 2013). In according to Farnezi and Leite (2007) and Eberemu *et al.* (2013) a good compatibility means that the liner will be able to keep its geotechnical properties after a prolonged time in contact with the contaminants.

Many kinds of soils, including some lateritic soils, even compacted, do not achieve the minimum hydraulic requirement to be used as a liner material (MASCARENHA *et al.*, 2018; FARNEZI; LEITE, 2007; MORANDINI; LEITE, 2015; MATOS, 2011). As result of intensive climate action, lateritic soils mainly consist of stable minerals and clay minerals, such as quartz and kaolinite. In addition, the presence of iron and aluminium oxides and hydroxides, which cover the surface of the clay minerals and act as cementing agents, contributes to the formation of porous and permeable structures (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* 2015; OSINUBI *et al.*, 2015).

In this context, chemical stabilization can be an alternative for improving the geotechnical properties of these soils. In this technique, other materials, like bentonite, for example, is added to the soil. The bentonite, a natural clay formed by the weathering of volcanic ash, and which consists, basically, of montmorillonite, is a material that has been used successfully for this purpose (MORANDINI, 2014; AMADI; EBEREMU, 2012; AMADI; OSINUBI, 2017; DE LA MORENA *et al.*, 2018).

In addition to decreasing the hydraulic conductivity, due to its high cation exchange capacity and large specific surface, bentonite can still improve the sorption capacity of soils (SHACKELFORD *et al.*, 2000; AMADI, 2013). However, problems relative to the usage of bentonite have been reported in the literature, especially excessive swelling (AMADI, 2013; GHADR; ASSADI-LANGROUDI, 2018) and increasing of incompatibility (MORANDINI, LEITE, 2012; GLEASON *et al.*, 1997).

Not only conventional materials, such as bentonite, have been employed as chemical stabilizers for lateritic soils for liners, but also alternative materials, including wastes and by-products. Rice rusk ash (EBEREMU *et al.*, 2013), sugar cane bagasse ash (EBEREMU, 2013) and cement kiln dust (OSINUBI *et al.*, 2015) are examples of wastes that have been used together with lateritic soils as liner materials and that have obtained positive results.

These reports encourage the study of other alternative materials, such as phosphogypsum, a by-product generated in phosphoric acid production, in fertilizer industry (REZENDE *et al.*, 2016; RASHAD, 2017). In most of these industries, for every ton of phosphoric acid obtained, approximately 3 tons of phosphogypsum are generated (ÇORUH; ERGUN, 2010). It is estimated that approximately 160 million of tons of this material is generated per year in the world, and that only 15% of this amount is reused, while the others 85% are disposed in stockpiles and water bodies (RASHAD, 2017).

The industrial process usually employed in Brazil, and in other parts of the world, generates a kind of phosphogypsum composed, basically, of calcium sulphate dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (SILVA *et al.*, 2019). Phosphogypsum is similar to natural gypsum, except for the possible presence of impurities including fluorides, phosphates, organic matter and heavy metals (MASCARENHA *et al.*, 2018; RASHAD, 2017).

In some cases, phosphogypsum may still contain natural radionuclides of uranium and thorium (NISTI *et al.*, 2015). However, several reports have been shown that the levels of radioactivity of the phosphogypsum produced in many localities of Brazil do not offer risk of environmental contamination (MESQUITA, 2007; METOGO, 2010; CAMPOS *et al.*, 2017).

The use of phosphogypsum as a liner material has been only slightly explored in the literature, but some information can be found: Çoruh and Ergun (2010) showed that this material might have the potential for use as a heavy metal adsorbent. Mascarenha *et al.* (2018) showed that mixtures of a tropical lateritic soil treated with 10% of phosphogypsum presented a higher cationic exchange capacity, while Matos (2011) showed that the same mixtures presented acceptable hydromechanical properties, including values of k in the order of 10^{-9} m/s.

In addition to offer more one option for chemical stabilization of soils, the use of phosphogypsum in liners might contribute to solve other environmental issue: the final disposition of this by-product.

Therefore, the objective of this paper is to evaluate the technical viability of using phosphogypsum and bentonite as stabilizers of a lateritic soil for application as liner materials, regarding the hydromechanical and environmental aspects.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

Three materials were used in this study: a tropical soil (S), sodic bentonite (B) and dehydrated phosphogypsum (P).

The tropical soil was from Aparecida de Goiania, Goias, in Midwest region of Brazil. It was collected at a depth of 0.4 m, from the same deposit that was previously analysed by Rezende *et al.* (2016) and Mascarenha *et al.* (2018).

The phosphogypsum was from an industry located in the state of Goias (Midwest region of Brazil) and was used in a proportion of 10%. Matos (2011) showed that mixtures of lateritic soil containing more than 10% phosphogypsum presented higher values of k , so this limit was respected in this paper. The sodic bentonite was used in proportions of 3% and 6%.

These three materials were combined in the proportions presented in Table 1 (in dry weight), producing the mixtures studied in this paper.

Table 1- Mixtures of Soil, phosphogypsum and bentonite.

Mixture	Soil (%)	Phosphogypsum (%)	Bentonite (%)
SP	90	10	-
SPB3	87	10	3
SPB6	84	10	6
SB3	97	-	3
SB6	94	-	6

The summary of the geotechnical properties of all samples is presented in Table 2. The grain size distribution data are presented in Table 3.

Table 2 – Geotechnical properties.

Property	Sample							
	S	P	B	SP	SB3	SB6	SPB3	SPB6
Specific gravity of grains ¹ (g/cm ³)	2.64	2.36	2.71	2.59	2.63	2.62	2.59	2.58
Liquid limit ² (%)	37	-	470	36	47	54	40	44
Plasticity limit ² (%)	27	-	48	27	30	27	23	24
Plastic Index (%)	10	NP	422	9	17	27	17	20
pH (water)	5.9	5.2	9.9	5.4	7.3	7.4	6.5	6.8

Notes: NP: Non-plastic. These results were obtained following the methodology prescribed by ¹ASTM (2014a); ²ASTM (2017), ABNT (2016a); ³ASTM (2017), ABNT (2016b).

Table 3 - Grain size distribution.

Particle size	Sample							
	S	P	B	SP	SB3	SB6	SPB3	SPB6
Without dispersant								
Gravel (%)	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Sand (%)	62.0	40.2	0.0	56.4	57.9	55.7	56.1	54.5
Silt (%)	29.0	59.8	89.0	43.5	32.2	29.9	43.8	45.4
Clay (%)	8.9	0	11.0	0.0	9.8	14.3	0.0	0.0
With dispersant								
Gravel (%)	0.1	0.0	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Sand (%)	56.6	26.6	-	51.6	50.6	52.2	52.5	42.0
Silt (%)	29.2	65.4	-	33.9	31.9	29.9	37.8	44.8
Clay (%)	14.0	8.0	-	14.4	17.4	17.8	9.6	13.1

Note: particle's size after ABNT (1995), which are similar to particle's size after ASTM (2014b).

The miniature compacted tropical (MCT) classification data are shown in Table 4. The MCT classification is a Brazilian methodology developed for classifying lateritic or non-lateritic tropical soils (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). The procedures include measuring the diametric shrinkage of a 20 mm soil chip and the penetration of a standard penetrometer.

Table 4 - MCT classification.

Item	Sample							
	S	P	B	SP	SB3	SB6	SPB3	SPB6
Shrinkage (mm)	0.7	-	-	1.3	1.3	1.8	1.6	1.8
Penetration	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MCT classification	LA'	-	-	LA' - LG'	LA' - LG'	LG'	LG'	LG'

Notes: LA': sandy lateritic soil; LG': clayey lateritic soil; LA'-LG': sand-clayey lateritic soil.

For compatibility tests, four solutions were used: sodium chloride (NaCl, concentration 5 g/l), nitric acid (HNO₃, molar concentration, pH=1), sodium hydroxide (NaOH, 10 g/l, pH=13) and ethanol (molar concentration). These solutions were previously used by Morandini and Leite (2012), representing, respectively aspects of saline, acidic, alkaline and organic solutions that might be found in municipal landfills.

2.2 METHODS

2.2.1 Preliminary thermal analysis

A preliminary thermal analysis was performed for the determination of the ideal temperature for measuring the moisture of phosphogypsum. This step was needed because raising the temperature can make dehydrated phosphogypsum lose the water of its microstructure, transforming it into hemi-hydrated phosphogypsum, a material with different properties (REZENDE *et al*, 2016).

For that, samples of phosphogypsum were oven dried until mass constancy at two different temperatures (70°C and 90°C), and X-ray diffraction tests were carried out. From these tests, it was possible to verify the percentage of minerals present for each temperature, as shown in Table 5.

As shown in Table 5, the sample oven dried at 70°C is composed, basically, of gypsite (dehydrated phosphogypsum) and quartz, while the sample dried at 90°C contains more than 74% basanite (hemi-hydrated phosphogypsum) and only 8.54% gypsite. Hence, 70°C was the temperature indicated for the moisture determination of samples containing phosphogypsum.

However, for bentonite required temperature to achieve mass constancy is 130°C (RIBEIRO *et al.*, 2018), and for soil, it is 110 °C (ABNT, 2016e). Thus, since each material has an ideal temperature for moisture determination, the moisture of mixtures was obtained by mathematical correlations. For that, these materials (S, B and P) were moisturized with

different water contents and taken to ovens at temperatures of 70 °C, 110 °C and 130 °C. The moisture values obtained were compared and linear equations were determined for the correlations, as presented in Figure 1 (for sample S) and Figure 2 (for sample B).

Table 5 - Mineralogy of phosphogypsum samples.

Mineral	Percentage (%)	
	70°C	90°C
Basanite	<CL	74,08
Anidrite	<CL	14,79
Gypsite	93,37	8,54
Ettringite	<CL	<CL
Quartz	2,27	2,42
Gibbsite	<CL	<CL
Hematite	<CL	<CL
Portlandite	<CL	<CL

Note: <CL: value below the countable limit.

Figure 1 – Mathematical correlation for sample S.

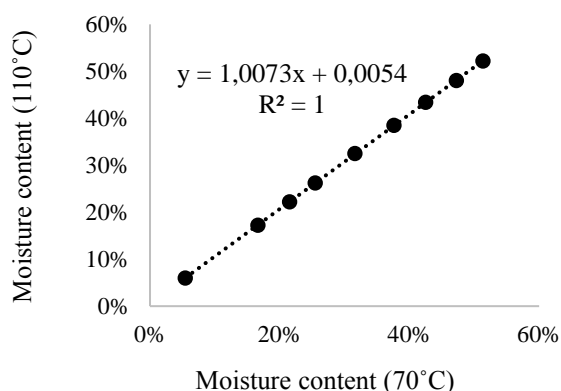
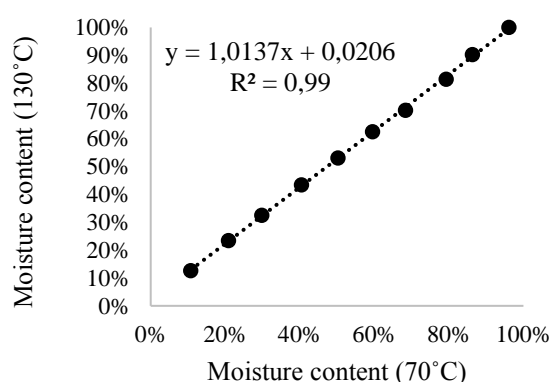


Figure 2 - Mathematical correlation for sample B.



Therefore, in accordance with Figure 1, Equation 1 was used for correcting the soil moisture in mixtures containing phosphogypsum:

$$w_{S110} = 1,0073w_{S70} + 0,0054 \quad (1)$$

where w_{S110} is the soil moisture content at 110°C and w_{S70} is the soil moisture content at 70°C.

For correcting the bentonite moisture content, the Equation 2 was applied, after Figure 3.

$$w_{B130} = 1,0137w_{B70} + 0,0206 \quad (2)$$

where w_{B130} is the bentonite moisture content at 130°C and w_{B70} is the bentonite moisture content at 70°C.

From Equations 1 and 2, and regarding the proportions of bentonite and phosphogypsum in each mixture, the moisture of samples oven dried at 70°C were corrected. To simplify calculations, it was considered that water was distributed proportionally among the masses of soil, phosphogypsum and bentonite.

2.2.2 Compaction tests

For determining the optimum water content (w_{op}) and the maximum dry unit weight (Y_{dmax}), compaction curves were obtained in according to the Brazilian MCT methodology (DNER, 1994; VILLIBOR; NOGAMI, 2009). For that, specimens were compacted in a miniature apparatus, under standard Proctor energy. In this methodology, the soil is distributed in two layers into a cylindrical mold with 130 mm high and 50 mm diameter. For each layer, five blows are applied using a rammer of 2,270g. The specimen is suitable when its final high (after compaction) is 50 ± 1 mm.

Specimens with these dimensions ($\approx 50 \times 50$ mm) saturate, in hydraulic conductivity tests, faster than larger specimens, obtained by conventional compaction tests. This is the main reason because the MCT methodology was chosen.

2.2.3 Hydraulic conductivity tests

Hydraulic conductivity tests were performed in rigid wall permeameters. The specimens were compacted according to item 2.2.2, respecting a maximum variation of 1% for w_{op} and compaction degree ranging from 98% up to 102% (relative to Y_{dmax}).

The tests were carried out using the same cylinders that were used in compaction process by applying a hydraulic gradient of 10 m/m (≈ 0.5 m of water column). The saturation process was performed by backpressure, using the same hydraulic gradient of 10 m/m. The values of k were calculated in according to ASTM D5856 – 15 (ASTM, 2015).

A minimum value $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s was adopted as acceptance criterion, according to the literature review (DANIEL, BENSON, 1990; BENSON *et al.*, 1994; MORANDINI; LEITE, 2015; EBEREMU, 2013; OSINUBI, *et al.*, 2015; QIANG *et al.*, 2014).

2.2.4 Compatibility tests

Compatibility tests were performed substituting the water used in hydraulic conductivity tests by the solutions described in item 2.1. These tests were performed on soil (sample S) and samples containing phosphogypsum (SP, SPB3 and SPB6).

The solutions were used in compaction, saturation and percolation steps. For avoiding corrosion, metallic permeameters were changed to acrylic ones.

For assessing compatibility, the method proposed by Shackelford (1994) was used, as described in Equation (3):

$$k_r = \frac{k_s}{k_w} \quad (3)$$

where k_r is the relative hydraulic conductivity coefficient, k_s is the hydraulic conductivity coefficient using the solution and k_w is the hydraulic conductivity coefficient using water.

2.2.5 Unconfined compression tests

For these tests, specimens with 5 cm diameter and 10 cm height were compacted at w_{op} and at Y_{dmax} , using the standard Proctor energy (see 2.2.2). The compaction conditions were the same as those described for the hydraulic conductivity tests. Specimens were wrapped in plastic film and kept in a closed box for 28 days. The failure process followed the prescriptions of ABNT (1992) and ASTM (2016).

A minimum value of 200 kPa for UCS was adopted as acceptance criterion, in according to literature review (DANIEL; WU, 1993; OSINUBI; NWAIWU, 2006; EBEREMU *et al.*, 2013; EBEREMU, 2013).

2.2.6 Microstructural analysis

Scanning electron microscopy (SEM) was performed for analysing possible changes in the microstructure of the specimens that were used in the hydraulic conductivity, compatibility and unconfined compression tests.

For the microstructural analysis, the samples were air dried and covered with a thin layer of gold (via sputtering). Images were obtained using a high vacuum technique, in a scanning

electron microscope, model Jeol 6610, in the Multiuser laboratory of high-resolution microscopy (LabMic) of the Federal University of Goiás.

2.2.7 Risks of environmental contamination analysis

Due to the possible presence of impurities in the phosphogypsum, such as heavy metals, as previously reported (RASHAD, 2017; MASCARENHA *et al.*, 2018), laboratory tests were performed for analysing the risks of environmental contamination.

For these tests, a solubilized extract was obtained from sample SP following the Brazilian standard NBR 10006 (ABNT, 2004): a solution of 250 g (dry weight) of SP and 1000 ml of distilled water was prepared and kept at rest for 7 days. Five minutes of mixing was applied before and after the rest period. In sequence, the solution was filtered using a membrane with 0.45 μm pore size.

The solubilized extract was used for chemical analysis for the determination of the inorganic groundwater contamination parameters according to the Brazilian environmental resolution CONAMA 396 (CONAMA, 2008). For determining the background values and for isolating the influence of the phosphogypsum, the same procedures were performed for sample S and for the distilled water (a blank test).

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 COMPACTION TESTS

Compaction curves of samples S, SB3 and SB6 are shown in Figure 3. The curves of samples SP, SPB3 and SPB6 are shown in Figure 4. A summary of the Y_{dmax} , w_{op} and void ratio (e) values under the optimum compaction conditions is presented in Table 6.

As shown in the compaction curves (Figures 3 and 4) and in Table 6, the w_{op} values of the mixtures were greater than that of the soil. This happened because the addition of phosphogypsum and bentonite increased the percentage of fines (see Table 3), yielding a larger specific surface and requiring more water to the hydration process (EBEREMU *et al.*, 2013; EBEREMU, 2013; OSINUBI *et al.*, 2015).

However, the percentages of stabilizers used were not sufficient for modify the values of γ_{dmax} of the mixtures, that were similar to the value registered for soil.

Figure 3 - Compaction curves of samples S, SB3 and SB6.

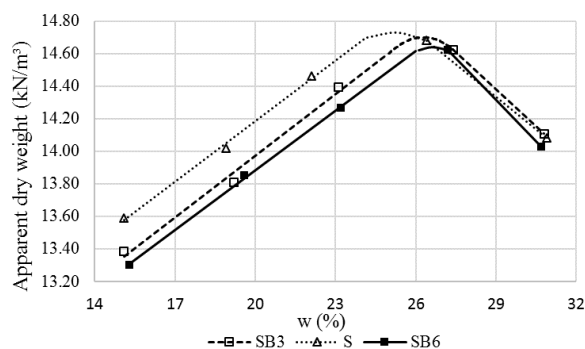


Figure 4 - Compaction curves of samples SP, SPB3 and SPB6.

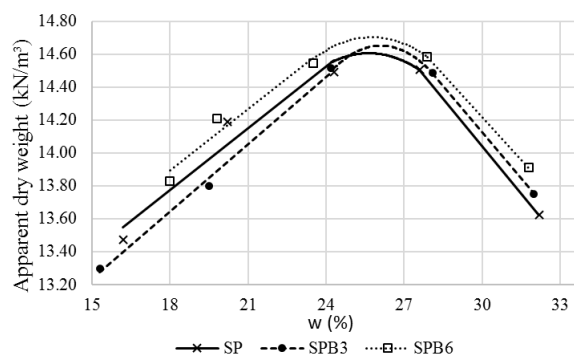


Table 6 - Summary of γ_{dmax} , w_{op} and e .

Sample	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{op} (%)	e
S	14.7	25.3	0.79
SP	14.6	26.1	0.77
SB3	14.7	26.3	0.79
SB6	14.6	26.6	0.79
SPB3	14.6	26.3	0.77
SPB6	14.7	26.1	0.76

3.2 HYDRAULIC CONDUCTIVITY TESTS

The hydraulic conductivity coefficients that were registered in the permeability tests, at a temperature of 20°C (k_{20}), are presented in Table 7.

Table 7 - Hydraulic conductivity coefficients at 20°C.

Sample	k_{20} (m/s)
S	3.4×10^{-8}
SP	3.5×10^{-8}
SB3	1.3×10^{-9}
SB6	4.5×10^{-10}
SPB3	2.3×10^{-9}
SPB6	4.7×10^{-10}

As shown in Table 7, samples S and SP presented similar k_{20} values and the same behaviour was observed comparing SPB3 with SB3 and SPB6 with SB6, which means that the addition

of phosphogypsum did not affect the hydraulic conductivity of the soil or the mixtures. Analogous results were reported by Matos (2011) that analysed soil-phosphogypsum mixtures, in the same proportions as those used in this paper.

On the other hand, as shown in Table 7, for the 3% of bentonite addition, the k value decreased approximately one order of magnitude. Similar results have been reported in the literature (MORANDINI; LEITE, 2012; 2015; AMADI; EBEREMU, 2012; AMADI; OSINUBI, 2017; KERAMATIKERMAN *et al.*, 2017).

According to Shackelford *et al.* (2000) bentonite decreases the hydraulic conductivity of soils because of the presence of montmorillonite. During the process of hydration, montmorillonite can adsorb many water molecules and hydrated cations. These water molecules and cations are kept essentially immobile, occupying a large fraction of the pores and forming irregular pathways for water that is free for flowing.

Thus, even though the void ratios are quite similar for all the samples (see Table 6), in those containing bentonite, the pores are, indeed, partially filled by a gel formed around the soil particles during the hydration process (AMADI, 2013).

Another factor that contributes to decreasing the k values of the samples containing bentonite is the swelling potential of montmorillonite (5-10 times its dry volume) (SHACKELFORD *et al.*, 2000). Since the specimens tested in this paper were confined during the process of saturation, volumetric variations were restricted, compressing the pores even more.

Figures 5 and 6 show the images (SEM) of samples S and SPB6, respectively. It is possible to see the more porous aspect of the natural soil (sample S) than that of the sample containing bentonite.

Figure 5 - Natural soil (magnification: 50 times).

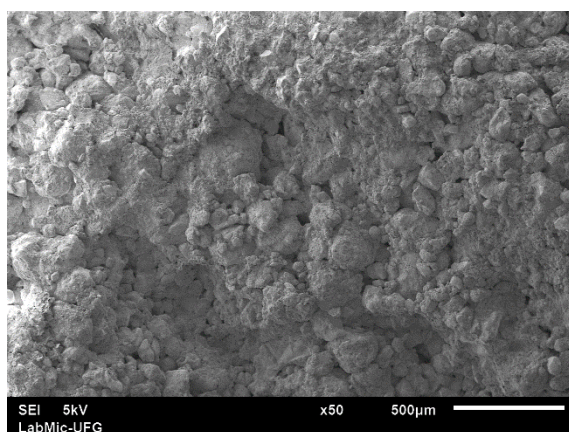
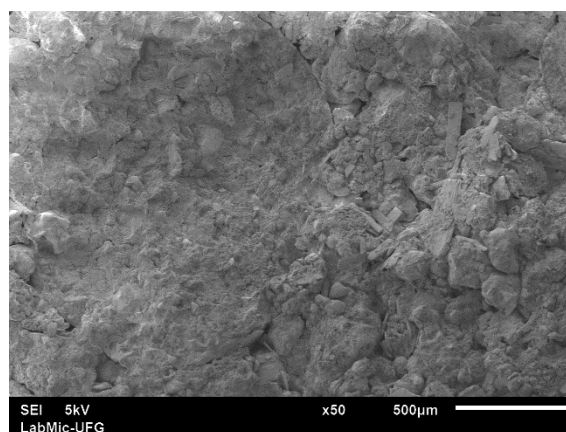


Figure 6 - Sample SPB6 (magnification: 50 times).



3.3 COMPATIBILITY TESTS

The values of k_{20} for the solutions described in item 3.1 are presented in Table 8. The values of k_r (see Equation 3) are presented in Figure 7.

Table 8 - Results of compatibility tests.

Sample	k_{20} (m/s)			
	HNO ₃	NaOH	NaCl	Ethanol
S	3.3×10^{-8}	8.1×10^{-10}	1.1×10^{-8}	3.0×10^{-8}
SP	2.0×10^{-8}	1.4×10^{-9}	1.2×10^{-8}	1.5×10^{-8}
SPB3	7.9×10^{-9}	4.5×10^{-10}	7.0×10^{-9}	4.4×10^{-9}
SPB6	1.6×10^{-9}	1.2×10^{-10}	7.4×10^{-10}	6.9×10^{-10}

Figure 7 - Values of k_r .

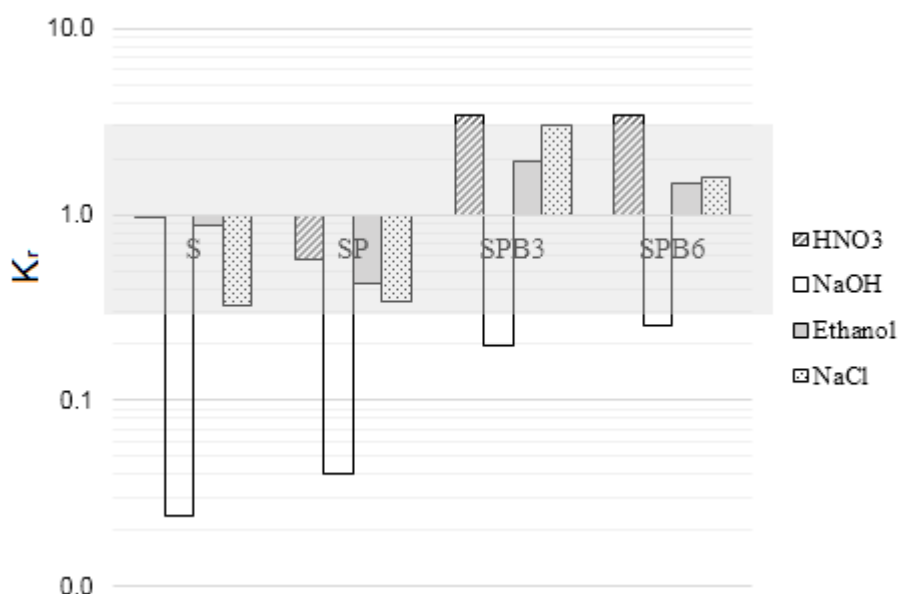
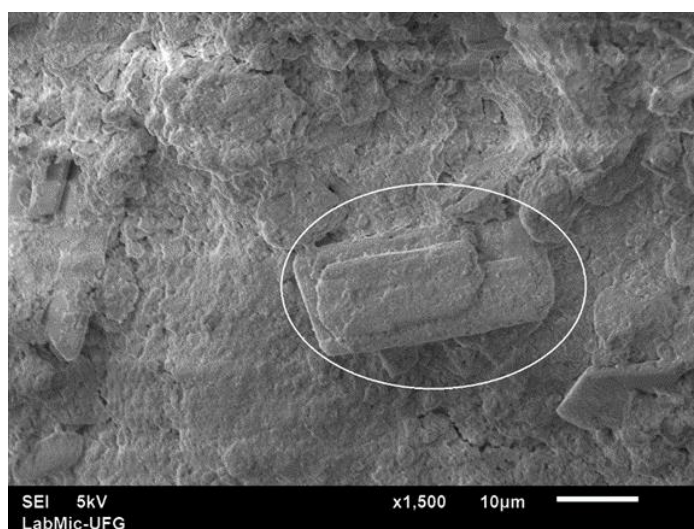


Figure 7 depicts the data using a logarithmic scale. Values lower than one indicate a decreasing hydraulic conductivity, while values greater than one indicate an increasing hydraulic conductivity. According to Lambe and Whitman (1969) the permeability ratio of a clayey soil, compacted to the same void ratio and the same degree of saturation can, easily, range three-fold, due to the experimental variations. Taking this into account, a zone where k_r ranges three-fold is depicted in Figure 7 (the shaded zone). This means that the results within this zone do not vary significantly and, therefore, can be considered to be similar.

As shown in Table 8 and Figure 7, all the samples treated with NaOH presented a decrease of the hydraulic conductivity.

Although the unit weight and the viscosity of the solution of NaOH might affect the hydraulic conductivity (SHACKELFORD *et al.*, 2000; MORANDINI; LEITE, 2015; REN *et al.*, 2016), the most important cause for this behaviour is, probably, the electrostatic force between the particles of the samples. In the case of the clay particles, the negative charges are distributed on the surface, while the positive charges are distributed on the edges (LAMBE; WHITMAN, 1969). In solution, the NaOH is dissociated into ions of Na^+ and OH^- . Since the OH^- ions neutralize the positive charges on the edges, the linkage between the particles is face to face, yielding disperse structures in parallel arrays (LAMBE; WHITMAN, 1969) (see Figure 8). This arrangement of particles hampers the flow of water, reducing the k value.

Figure 8 - Sample SP treated with NaOH. Detail of a phosphogypsum plate recovered by dispersed clay particles (magnification: 1500 times).

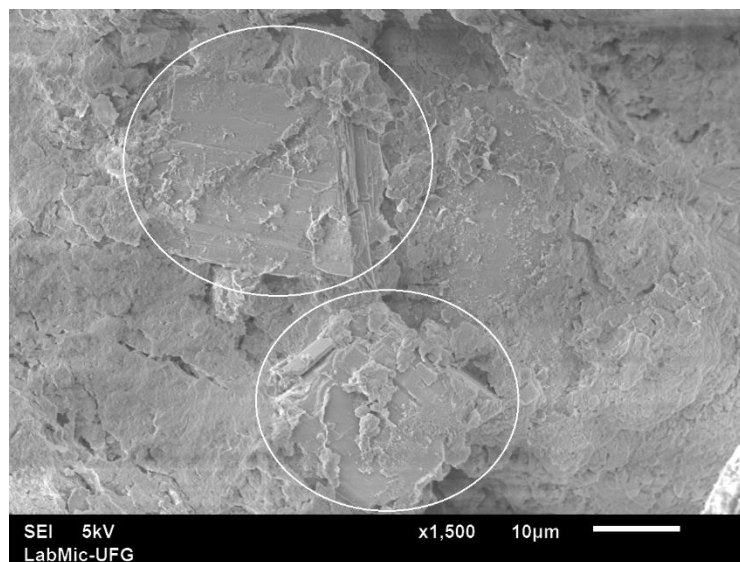


The samples containing bentonite treated with HNO_3 , differently of those treated with NaOH, presented increasing in hydraulic conductivity. In this case, the acid is ionized yielding H^+ and NO_3^- ions. These H^+ ions neutralize the negative charges on the surface of the clay minerals, leaving the edges free to make linkages of the edge-to-face type (LAMBE; WHITMAN, 1969). In this type of arrangement, the particles form flocculated structures (see Figure 9), creating pathways where the water can flow more easily.

The concentration of the solution also contributed to increasing the k_r . The HNO_3 solution used in this paper is four times more concentrated than the NaOH solution, and eight times more than the NaCl solution (see item 3.1). According to the models used for calculating the thickness of the double layer in clay minerals, such as Gouy-Chapman (MORANDINI, 2014) or Stern-Gouy (SHACKELFORD *et al.*, 2000; MORANDINI, 2014), an increasing concentration of the electrolytic solution results in a decreasing thickness of the double layer. Since the

double layer has an important role in the permeability of bentonite (SHACKELFORD *et al.*, 2000; AMADI, 2013; MORANDINI, 2014; MORANDINI; LEITE, 2012; 2015) the results presented are in accordance with the models mentioned.

Figure 9 - Sample SPB3 treated with HNO_3 . Detail of phosphogypsum plates recovered by flocculated clay particles (magnification: 1500 times).



According to Shackelford *et al.* (2000), solutions containing organic compounds such as ethanol have lower dielectric constants than water, which could decrease the thickness of the double layer, and thus, increase the hydraulic conductivity. However, these authors mention several examples in which considerable increases in the hydraulic conductivity were only observed for concentrations greater than 50%. For lower concentrations, such as that used in this paper (1 M, or 58 ml of ethanol per litre) no significant increases in the hydraulic conductivity have been reported. Therefore, the results present in Figure 7 are consistent with the literature.

The valence of the cations available for exchange can also affect the thickness of the double layer: the greater the valence, the lower the thickness (SHACKELFORD *et al.*, 2000; MORANDINI, 2014). Regarding the solutions of NaCl, the available cation for exchange, Na^+ , besides being monovalent, is the same as the one that is present in sodic bentonite. Hence, only a little variation was observed in samples treated with this solution, as shown in Figure 7.

3.4 UNCONFINED COMPRESSION TESTS

The results of the unconfined compression tests are presented in Table 9.

Table 9 – Results of the unconfined compression tests.

Sample	UCS (kPa)	Strain (%)
S	304.4	2.8
SP	207.1	2.8
SB3	390.1	2.9
SB6	422.6	3.0
SPB3	271.9	2.9
SPB6	362.1	2.9

As shown in Table 9, samples containing bentonite presented greater values of unconfined compression strength (UCS) than samples that do not contain bentonite. Furthermore, the UCS values were greater for samples containing 6% of bentonite than those containing 3% bentonite. Therefore, it is possible to conclude that this addition improved the UCS values of the mixtures. Similar behaviour was reported by Malizia and Shakoor (2018) which observed that the higher the plasticity of a clay soil the higher its UCS values.

Bentonite is quite a fine material (see Table 3) that, due its large specific surface and large net negative charge, has a great potential to adsorb water molecules and hydrate ions from the soil (SHACKELFORD *et al.*, 2000). This process promotes an attraction between particles, increasing the contact area and raising the strength (LAMBE; WHITMAN 1969; AHMED, 2015).

On the other hand, the addition of phosphogypsum promoted a decreasing in the UCS. Dehydrated phosphogypsum is composed, mainly, of gypsum (see Table 5), a mineral that can have a tabular structure, with particles in the format of large and thin plates (MASCARENHA *et al.*, 2018). Images obtained by SEM (Figure 10) showed that this was the case of the phosphogypsum used in this paper. This format contributes to the breaking process of phosphogypsum particles (see Figure 11) and, therefore, to the decreasing of the unconfined compression strength. Similar results were verified by Rezende *et al.* (2016).

Furthermore, the irregular surface formed contributes to decreasing the contact area between the plates and between the plates and the soil grains. Thus, the lower the contact area, the greater the stress transmitted from particle to particle.

In addition, the presence of water in the mixtures affects the strength of the gypsum plates. According to Andonov and Stefanov (1997), humidity can reduce the internal friction angle of this mineral, turning it from a *quazi*-elastic into a *quazi*-plastic material. Therefore, these facts could explain the loss of strength verified by the samples containing phosphogypsum.

Figure 10 - Plates of phosphogypsum in sample SP (magnification: 250 times).

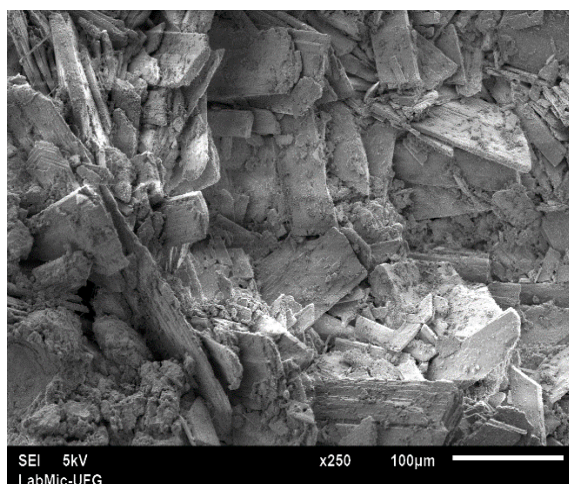
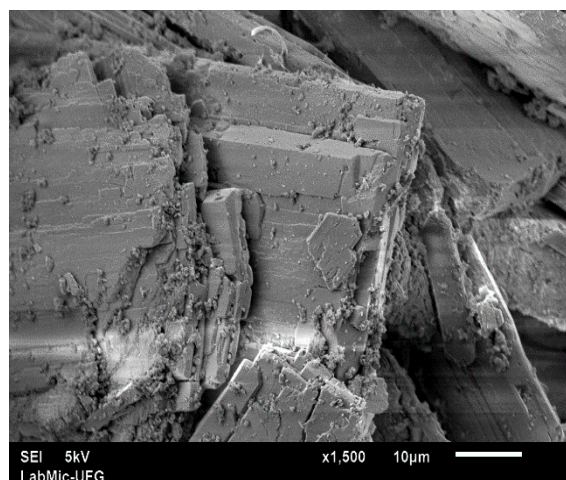


Figure 11 - Details of phosphogypsum broken plates (magnification of 1500 times).



3.5 RISKS OF ENVIRONMENTAL CONTAMINATION ANALYSIS

The results of the chemical analysis of the inorganic groundwater contamination parameters are shown in Table 10.

According to Table 10, the amounts of iron (Fe) and manganese (Mn) present in sample SP exceed the acceptable limit prescribed by the Brazilian resolution CONAMA 396 (CONAMA, 2008) and by the United States Environmental Protection Agency (EPA, 2009).

In tropical soils, Fe is present in the form of oxides and hydroxides, especially in the superficial layers (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015; OSINUBI *et al.*, 2015). Mascarenha *et al.* (2018) analysed water percolated through mixtures soil-phosphogypsum and observed that the amount of Fe was within the acceptable limits required by Conama 396 (CONAMA, 2008). This situation is more realistic than the solubilization process employed in this paper.

However, the amount of manganese oxides (MnO) in phosphogypsum, determined by X-ray fluorescence tests, as shown in Table 11, is so little that it could not be detected. In addition, both the phosphogypsum used in this paper and in Mascarenha *et al.* (2018) are from the same industry, so, the excess Mn could be a peculiarity of this local plant. Hence, before stating that phosphogypsum represent a risk of environmental contamination, it is indicated that a greater number of samples of this material should be analysed, so that a statistical approach can be used.

Table 10 - Chemical analysis for inorganic parameters.

Parameter	Maximum acceptable values (mg/l) – per category of use of water ¹				Results (mg/l)		
	Human consumption	Animal feeds	Irrigation	Recreation	Water (blank test)	S	SP
Antimony	0.005	-	-	-	<0.005	0.005	<0.005
Arsenic	0.010	0.200	-	0.050	<0.005	0.010	0.010
Barium	0.700	-	-	1.000	<0.003	0.096	0.116
Beryllium	0.004	0.100	0.100	-	<0.0004	<0.0004	<0.0004
Boron	0.500	5.000	0.500	1.000	0.0640	0.0700	0.0850
Cadmium	0.005	0.050	0.010	0.005	<0.001	<0.001	<0.001
Lead	0.010	0.100	5.000	0.050	<0.005	0.0100	0.0100
Cyanide	0.070	-	-	0.100	<0.001	<0.001	<0.001
Cobalt	-	1.000	0.050	-	<0.003	<0.003	<0.003
Copper	2.000	0.500	0.200	1.000	0.0920	0.0940	0.1120
Chromium (III)	0.050	1.000	0.100	0.050	<0.100	<0.100	<0.100
Chromium (IV)	0.050	1.000	0.100	0.050	<0.100	<0.100	<0.100
Lithium	-	-	2.500	-	0.0100	0.0100	0.0110
Manganese	0.100	0.050	0.200	0.100	0.0110	0.0230	1.1140
Mercury	0.001	0.010	0.002	0.001	<0.0002	<0.0002	<0.0002
Molybdenum	0.070	0.150	0.010	-	<0.0070	<0.0070	<0.0070
Nickel	0.020	1.000	0.200	0.100	<0.0070	<0.0070	<0.0070
Silver	0.100	-	-	0.050	<0.0050	<0.0050	0.0070
Selenium	0.010	0.050	0.020	0.010	<0.0100	<0.0100	<0.0100
Sodium	200	-	-	300.0	1.920	3.080	5.970
Uranium	0.015	0.200	0.0104	-	<0.0100	<0.0100	<0.0100
Vanadium	0.050	0.100	0.100	-	<0.0300	<0.0300	<0.0300
Zinc	5.000	24.000	2.000	-	<0.0200	0.0400	0.0900
Aluminium	0.200	5.000	5.000	0.200	<0.0200	<0.0200	<0.0200
Chlorides	250.0	-	100-700	400.0	10.800	30.100	32.500
Iron	0.300	-	5.000	0.300	<0.0100	4.920	1.380
Fluorides	1.500	-	1.000	1.000	<0.100	<0.100	<0.100
Total dissolved solids	1000.0	-	-	-	3.000	31.000	954.000

Notes: 1After CONAMA (2008).

Table 11 - Percentage of oxides in phosphogypsum.

Oxide	Percentage
SiO ₂	1.77
TiO ₂	0.19
Al ₂ O ₃	0.31
Fe ₂ O ₃	0.53
MnO	<CL
MgO	<CL
CaO	33.63
Na ₂ O	<CL
K ₂ O	<CL
P ₂ O ₅	0.85
SO ₃	42.7
Loss on ignition	20.85

Note:<CL: value below the countable limit.

4 CONCLUSIONS

The results of hydromechanical tests showed that:

- The compaction curves of mixtures containing phosphogypsum and/or bentonite presented greater values of w_{op} , but the values of their maximum dry weight were similar.
- The addition of phosphogypsum did not modify the hydraulic conductivity coefficients of the samples. Because this material is a by-product, the fact that it does not increase the hydraulic conductivity is a positive point, opening new applications for its use and helping solve the problem of its final disposition.
- Bentonite was demonstrated to be an efficient stabilizer for decreasing the hydraulic conductivity: 3% of this material yielded values of k in the order of 10^{-9} m/s, while for the 6% addition the values were in the order of 10^{-10} m/s. Thus, samples SB6 and SPB6 reached values of k lower than 1×10^{-9} m/s, meeting this criterion required for a liner material.
- Bentonite was still demonstrated to be an efficient stabilizer for improving the compression strength of samples, while the phosphogypsum presented an opposite behaviour, decreasing the strength. However, all the samples reached the minimum criteria of 200 kPa reported in literature.

The compatibility tests data demonstrated that:

- All the samples treated with NaOH presented k values lower than those treated with water;
- Samples containing bentonite presented higher values of k when treated with HNO_3 and this can be attributed to the formation of flocculated structures and to the decreasing of the double layer in the clay minerals. In this condition, none of the samples reached k values lower than $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, meaning that compatibility should be analysed more frequently in liner designs.
- For solutions of ethanol or NaCl, the k values were similar to those of water.

Since the samples containing phosphogypsum presented amounts of manganese above the limits prescribed in environmental legislation, it is recommended that chemical analysis be carried out before using this material for liner purposes.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are thankful for the funds provided by Brazilian Research Agencies (CNPq, process 408756/2016-0 and CAPES, Finance code 001) and CMOIC International Brazil to support this study, and the partnering laboratories in Federal University of Goiás (CRTI, LabMic, Labitecc and Laboratory of waters), and in University of Brasília (geotechnical laboratory).

REFERENCES

- ABNT (2016a). NBR 6459: Soil – Determination of liquid limit. Rio de Janeiro, 5 p (in portuguese).
- ABNT (2016b). NBR 7180: Soil – Plastic limit determination. Rio de Janeiro, 3 p. (in portuguese).
- ABNT (1992). NBR12770: Cohesive soil – Determination of unconfined compression strength. Rio de Janeiro, 4 p. (In portuguese).
- ABNT (2000). NBR 14545: Soil – Determination of hydraulic conductivity coefficient of clayey soils at variable head. Rio de Janeiro, 24 p. (In Portuguese).
- ABNT (2004) – NBR 10006 – Procedure for obtention of solubilized extraction of solid wastes. Rio de Janeiro, 7 p. (In portuguese)
- ABNT (1995) – NBR 6502 – Rocks and soils. Terminology. Rio de Janeiro, 18 p. (In portuguese).
- AHMED, A. (2015) Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled basanite. *Applied Clay Sciences*, 104, p. 27-25.
- AMADI, A. A. (2013) Swelling characteristics of compacted lateritic soil-bentonite mixtures subjected to municipal waste leachate contamination. *Environmental Earth Sciences*, vol. 70, p. 2437-2442.
- 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*, vol. 67, p. 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.
- ANDONOV, E.; STEFANOV, P. (1997). Earthfalls in Koshava gypsite deposit. In: MARINOS, P. G.; KOUKIS, G.C.; TSIAMBAOS, G.C; STOURNARAS, G.C (1997) *Engineering geology and the environment*, vol. 1. A. A. Balkema publishers, Brookfield, 4076 p.
- ASTM (2014a) – D5550 – 14: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- ASTM (2014b) – D635 – 14: Standard terminology relating to soil, rock, and contained fluids, ASTM International, West Conshohocken, PA, 46 p.
- ASTM (2015) – D5856 – 15: Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 9 p.
- ASTM (2016) – D2166 – 16: Standard test method for unconfined compressive strength for cohesive soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 7 p.
- ASTM (2017) – D4318 – 17e1: Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 20 p.
- BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X. (1994) Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol.120, n. 2, p. 366 – 387.
- BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W. F. (1998) Liner design for waste disposal sites. *Environmental Geology*, vol. 35, n. 1, p. 41-54.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C. F. L.; GUIMARÃES, R. C.; VALENCIA, Y. G. (2015) Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, vol. 5, p. 3-19.
- CAMPOS, M. P.; COSTA, L. J. P.; NISTI, M. B. (2017). Phosphogypsum recycling in the building material industry: assessment of the radon exhalation. *Journal of environmental radioactivity*, 172, p. 232-236.
- CONAMA (2008). Resolution 397 of April 3rd, 2008. Brasília, 11p. (In Portuguese).
- ÇORUH, S.; ERGUN, O. N. (2010) Use of fly ash, phosphogypsum and red mud as liner material for hazardous zinc leach residue waste. *Journal of hazardous materials*, vol. 173, p. 468-473.
- CLARKE, C.; UPSON, S. (2017) A global portrait of the manganese industry – a socioeconomic perspective. *Neurotoxicology*, vol. 58, p. 173-179.
- DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. (1990) Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 116, n. 12, p. 1811-1830.
- DANIEL, D. E.; W. Y. (1993) Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 119, n. 2, p. 223 – 237.
- DE LA MORENA, G.; ASENSIO, L.; NAVARRO, V. (2018) Intra-aggregate water content and void ratio model for MX-80 bentonites. *Engineering Geology*, 246, p. 131 – 138.
- DERSA: Diretrizes para identificação expedita de solos lateríticos – “Método da pastilha”. São Paulo, 2006, 24p. (In Portuguese).
- DNER (1994). ME-228: Soils, compaction in miniature apparatus. Rio de Janeiro, 14p. (In Portuguese).
- EBEREMU, A. O. (2013) Evaluation of bagasse ash treated lateritic soil as potential barrier material in waste containment application. *Acta Geotechnica*, vol. 8, p. 407-421.
- EBEREMU, A. O.; AMADI, A. A.; OSINUBI, K. J. (2013) The use of compacted tropical treated with rice husk as a suitable hydraulic barrier material in waste containment applications. *Waste Biomass Valor*, Vol. 4, p. 309- 323.
- EPA (2009): National primary drinking water regulation. United States Environmental Protection agency, 7p.
- FARNEZI, M. K.; LEITE, A. L. (2007) Lateritic soil and bentonite mixtures assessment for liner usage purpose. *Soil and rocks*, vol. 30, n. 2, p. 103 – 112.
- GHADR, S.; ASSADI-LANGROUDI, A. (2018) Structure-based hydro-mechanical properties of sand-bentonite composites. *Engineering Geology*, 235, p. 53 – 63.
- GLEASON, M. H.; DANIEL, D. E.; EYKHOLT, G. R. (1997) Calcium and sodic bentonite for hydraulic containments applications. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 123, n. 5, p. 438-445.
- KERAMATIKERMAN, M.; CHEGENIZADEH, A.; NIKRAZ, H. (2017). An investigation into effect of sawdust treatment on permeability and compressibility of soil-bentonite slurry cut-off wall. *Journal of cleaner production*, vol. 162, p. 1-6.
- LAMBE, J. W.; WHITMAN, R. V. (1969) *Soil mechanics*. John Willey & sons. New York, 553 p.
- MALIZIA, J. P.; SHAKOOR, A. (2018) Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils. *Engineering Geology*, 244, p. 125 – 131.

- MALUSIS, M. A.; MACKEEHAN, M. D. (2013). Chemical compatibility of model soil-bentonite backfill containing multiswellable bentonite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, n. 2, p. 189 – 198.
- 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*, vol. 4, p. 157-170.
- MATOS, T. H. C. (2011) Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso. 119 p. Master's degree dissertation. University of Brasília. (In portuguese).
- MESQUITA, G. M. (2007). Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação. 2007. Master's dissertation. Federal University of Goiás, Goiania, Brazil. (In portuguese).
- METOGO, D. A. N. (2010) Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico executado com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal. Master's dissertation, Federal University of Goiás, Goiania, Brazil (In Portuguese).
- MORANDINI, T. L. C. (2014) Solo tropical e bentonita: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal. 276 p. PhD thesis. Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. (In Portuguese).
- 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*, Vol. 35, n. 3, p. 267-278.
- MORANDINI, T. L.C.; LEITE, A. L. (2015) Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology*, vol. 196, p. 251-267.
- 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*, Vol. 144, p. 120-126.
- OSINUBI, K. J.; MOSES, G.; LIMAN, A. S. (2015) The influence of compactive effort on compacted lateritic soil treated with cement kiln dust as hydraulic barrier material. *Journal of Geotechnical Geological Engineering*, vol. 33, p. 523-535.
- OSINUBI, K. J.; Nwaiwu, C. H. M. O. (2006) Design of compacted lateritic soil liners and covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, n. 2, p. 203 - 2013.
- QIANG, X.; HAI-JUN, L.; ZHEN-ZE, L.; LEI, L. (2014) Cracking, water permeability and deformation of compacted clay liners improved by straw fiber. *Engineering Geology*, vol. 178, p. 82-90.
- RASHAD, A. M. (2017) Phosphogypsum as a construction material. *Journal of cleaner production*, vol. 166, p. 732-743.
- REN, X.; ZHAO, Y.; DENG, Q.; KANG, J.; LI, D.; WANG, D. (2016) A relation of hydraulic conductivity – void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. *Engineering Geology*, 2013, p. 89-97.
- 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*, vol. 29, n.1, p. 04016188-1 – 04016188-16.
- RIBEIRO, M. E. S.; MASCARENHA, M. M. A.; SANTOS, T. L. (2018) Estudo de viabilidade técnica do fosfogesso hemidratado para aplicação em sistemas de cobertura de aterros sanitários. *Revista eletrônica de engenharia civil*, 14 (2), p. 263 – 277 (In Portuguese).

SHACKELFORD, C. D. (1994) Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM STP1142. Philadelphia, p. 111-166.

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, p. 133-161.

SILVA, M. V.; REZENDE, L. R.; MASCARENHA, M. M. A.; OLIVEIRA, R. B. (2019) Phosphogypsum, tropical soil and cement for asphalt pavements under wet and dry environmental conditions. Resources, conservation and recycling, vol. 144, p. 123 – 136.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. (2009) Pavimentos econômicos: tecnologia e uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte e Ciência, 291 p. (In Portuguese).

XU, Y.; WU, S.; WILLIAMS, D. J.; SERATI, M. (2018) Determination of peak and ultimate shear strength parameters of compacted clay. Engineering Geology, 243, p. 160 – 167.

ZHANG, Z.; LU, Y.; HAIPU, L. TU, Y.; LIU, B.; YANG, Z. (2018) Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. Science of the total environment, vol. 645, p. 235-243.

CAPÍTULO 3

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

3.1. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados na análise térmica preliminar demonstraram que o fosfogesso di-hidratado não deve ser submetido a temperaturas superiores a 70 °C, sendo que a 90 °C mais de 70% das moléculas foram desidratadas, transformando-se em fosfogesso hemi-hidratado.

Desse modo, a umidade das misturas contendo esse subproduto foi determinada em estufas a 70 °C e, posteriormente, corrigida por meio de formulações matemáticas que levaram em conta o percentual dos materiais constituintes das mesmas.

As curvas de compactação das misturas apresentaram pesos específicos aparentes secos e índices de vazios semelhantes aos do solo, porém, maiores valores de umidade ótima. Embora o percentual dos estabilizantes não tenha sido grande o suficiente para alterar os índices físicos, o incremento de partículas finas ao solo exigiu mais água nos processos de hidratação, aumentando os valores de umidade ótima.

Conforme demonstrado pelos resultados dos ensaios de permeabilidade, a adição de fosfogesso não alterou os coeficientes de condutividade hidráulica das misturas. Por outro lado, uma redução desses coeficientes foi observada com a adição de bentonita: para cada 3% desse material, verificou-se uma redução de uma ordem de magnitude. As amostras contendo 6% de bentonita apresentaram coeficientes inferiores a 1×10^{-9} m/s, sendo, portanto, consideradas adequadas para uso em barreiras hidráulicas, segundo esse critério.

Verificou-se que as amostras contendo fosfogesso apresentaram menores valores de resistência à compressão simples do que aquelas que não o continham, enquanto aquelas contendo bentonita apresentaram maiores valores de resistência. Entretanto, todas as amostras analisadas apresentaram resultados superiores ao valor mínimo de 200 kPa, adotado como critério nesse trabalho, para uso em barreiras hidráulicas.

Assim, conclui-se que a amostra contendo 6% de bentonita (SB6) e a amostra contendo 10% de fosfogesso e 6% de bentonita (SPB6) foram consideradas aceitáveis para uso em barreiras hidráulicas, segundo os critérios hidromecânicos.

Nos ensaios de compatibilidade, verificou-se que a solução de NaOH diminuiu a condutividade hidráulica das misturas. Isso foi atribuído a dois fatores principais: a viscosidade da solução e à formação de estruturas dispersas nas misturas. Por outro lado, a solução de HNO₃ aumentou a condutividade hidráulicas das misturas contendo bentonita, de tal modo que, mesmo aquelas contendo 6% desse material, apresentaram coeficientes superiores a 1×10^{-9} m/s. Isso foi explicado por alterações provocadas na dupla camada dos argilominerais devido à concentração da solução e pela formação de estruturas floculadas. As soluções de NaCl e etanol não produziram alterações significativas nas misturas.

As análises químicas realizadas a partir de extratos solubilizados de amostras contendo fosfogesso indicaram que os níveis de cloretos, fluoretos e metais (exceto ferro e manganês) estavam dentro dos padrões de aceitação prescritos pela resolução CONAMA 396, inclusive para consumo humano. O excesso de ferro foi atribuído ao próprio solo e o de manganês ao fosfogesso. Contudo, cogitou-se que o processo de solubilização tenha contribuído para que os valores encontrados estivessem acima do estabelecido, uma vez que essa seria uma situação extrema e pouco representativa da realidade de um sistema de retenção de contaminantes.

3.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que as amostras contendo 3% de bentonita apresentaram coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-9} m /s, quando compactadas na energia Proctor normal, sugere-se que futuros trabalhos investiguem as mesmas amostras na energia Proctor Intermediária. Ainda considerando-se o uso de maiores energias, recomenda-se que maiores teores de fosfogesso sejam testados nas misturas.

Devido às dificuldades verificadas para realização dos ensaios de condutividade hidráulica nos permeâmetros de parede rígida, especialmente na fase de saturação das amostras, recomenda-se que esses ensaios sejam realizados, quando possível, em permeâmetros de parede flexível (tri-axial). Nessa condição, sugere-se que testes sejam realizados com diferentes tensões confinantes.

Para o caso de os ensaios seguirem a metodologia utilizada nessa pesquisa, sugere-se que outros mecanismos de vedação (que não silicone) sejam utilizados nos permeâmetros, a fim de que maiores gradientes possam ser aplicados aos corpos de prova, agilizando os períodos de saturação.

Para uma melhor compreensão de como os estabilizantes químicos (especialmente a bentonita) afetam a condutividade hidráulica das amostras, recomenda-se a realização de ensaios que permitam a verificação da distribuição de poros nos corpos de prova, tais como porosimetria e tomografias computadorizadas.

Para os ensaios de compatibilidade, sugere-se que futuros trabalhos envidem esforços para adaptar permeâmetros tri-axiais, a fim de que substâncias que não água possam ser empregadas com mais frequência e segurança.

Concomitante aos métodos diretos para verificação de compatibilidade (percolação química) recomenda-se o emprego de métodos indiretos, que são, geralmente, de mais simples execução. Desse modo, os resultados dos métodos indiretos poderiam ser utilizados para validação de formulações de predição de condutividade hidráulica com contaminantes, ou mesmo para elaboração de novos métodos de predição.

Recomenda-se que os ensaios de compatibilidade sejam realizados com soluções semelhantes às que estarão em contato com a barreira hidráulica nos aterros. Em sistemas que utilizem bentonita, recomenda-se que sejam realizados testes com soluções cujas propriedades afetem os mecanismos de expansão da dupla camada dos argilominerais, tais como cátions bi e trivalentes e eletrólitos concentrados.

Outra questão a ser melhor compreendida é a cinética das reações entre a barreira e o contaminante, ou seja, como o tempo de exposição ao contaminante afeta as propriedades hidráulicas e físico-químicas da camada selante.

Quanto aos ensaios para verificação do risco de contaminação ambiental referentes ao uso de fosfogesso, sugere-se que sejam realizadas análises químicas da água percolada através de corpos de prova (em vez de extratos solubilizados) e que os dados obtidos sejam sujeitos a um tratamento estatístico a fim de que um diagnóstico de risco possa ser traçado.

REFERÊNCIAS

- AMADI, A. A. Swelling characteristics of compacted lateritic soil-bentonite mixtures subjected to municipal waste leachate contamination. **Environmental Earth Sciences**, vol. 70, p. 2437-2442, 2013.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C. F. L.; GUIMARÃES, R. C.; VALENCIA, Y. G. Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. **Transportation Geotechnics**, vol. 5, p. 3-19, 2015.
- EBEREMU, A. O.; AMADI, A. A.; OSINUBI, K. J. The use of compacted tropical treated with rice husk as a suitable hydraulic barrier material in waste containment applications. **Waste Biomass Valorization**, Vol. 4, p. 309- 323, 2013.
- MATOS, T. H. C. **Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. 2011. 119 f. Dissertação (mestrado em Geotecnia). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- MORANDINI, T. L. C.; LEITE, A. L. Characterization, hydraulic conductivity and compatibility of mixtures of tropical soil and bentonite mixtures for barrier usage purpose. **Soils and Rocks**, Vol. 35, n. 3, p. 267-278, 2012.
- MORANDINI, T. L.C.; LEITE, A. L. Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. **Engineering Geology**, vol. 196, p. 251-267, 2015.
- 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. Laboratory study of phosphogypsum, stabilizers, and tropical soil mixtures. **Journal of materials in civil engineering**, vol. 29, n.1, p. 04016188-1 – 04016188-16, 2016.