

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO FOSFOGESSO HEMIDRATADO PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

Study of the phosphogypsum hemidrate for application in a landfill cover system

Matheus Eliatan da Silva Ribeiro¹, Márcia Maria dos Anjos Mascarenha², Thiago Lopes dos Santos³

Recebido em 09 de fevereiro de 2018; aceito em 24 de maio de 2018; disponível on-line em 26 de julho de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Aterro Sanitário;
Fosfogesso;
Condutividade Hidráulica;
Variações Sazonais;
Formulação empírica;

KEYWORDS:

Sanitary Landfill;
Phosphogypsum;
Hydraulic Conductivity;
Seasonal Variations;
Empirical formulation;

RESUMO: O fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto formado a partir da produção industrial de fertilizantes, no entanto esse material é considerado um passivo ambiental. Este estudo visa aplicar o fosfogesso, em sua forma hemidratada, em camadas finais de cobertura de aterros sanitários, em misturas com solo e aditivos bentoníticos. Para tal análise, as amostras foram submetidas a estudos de caracterização física e ensaios de permeabilidade para duas energias de compactação. Logo após foi executado uma simulação de variações sazonais por umedecimento e ressecamento para verificar possíveis interferências no comportamento hidromecânico. Também foi realizada uma estimativa matemática empírica para determinação da permeabilidade. Nesse estudo, a amostra com 6% de aditivo bentonítico compactada na energia Proctor Normal apresentou uma permeabilidade similar à amostra com 0% de aditivo bentonítico compactada na energia Proctor Intermediária e ambas dentro da faixa aceitável para aplicação em camadas de cobertura e barreira hidráulica. O solo também apresentou baixa permeabilidade em Proctor Intermediária, mas sofreu maiores alterações hidromecânicas durante os ciclos sazonais. A formulação empírica se mostrou aplicável a amostras lateríticas independentemente de sua variação na composição, mas quando a energia de compactação foi modificada a mesma equação não se aplicou, sendo necessário realizar outra adaptação matemática.

ABSTRACT: The phosphogypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) is a by-product from the industrial production of fertilizers, however this material is considered an environmental passive. This study aims to apply the hemidrate phosphogypsum to final layers of landfill cover, in soil mixtures and bentonite additives. For this analysis, were carried out, in these materials, studies of physical characterization and permeability tests for two compaction energies. Afterwards a simulation of seasonal variations was performed through wetting and drying cycles to verify possible interferences in the hydro mechanical behavior of the materials. An empirical mathematical estimate was made to determine the permeability. In this study, the sample with 6% of bentonite additive in the Reduced Proctor Energy presented a permeability similar to the sample with 0% of bentonite additive compacted in the Standard Proctor Energy and both within the acceptable range for application in cover layers and hydraulic barrier. The soil also presented low permeability in the Standard Proctor, but underwent major hydromechanical changes during the seasonal cycles. The empirical formulation was applicable to lateritic samples regardless of their variation in composition, but when the compaction energy was modified the same equation was not applied and it is necessary to make another mathematical adaptation.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: matheuseliatan@hotmail.com (M. E. S. Ribeiro)

Engenharia ambiental, graduando, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

² e-mail: marciamascarenha@gmail.com (M. M. A. Mascarenha)

Engenheira civil, doutora, Professora associada, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

³ e-mail: thiagolopes.engcivil@gmail.com (T. L. Santos)

Engenheiro civil, mestre, gerente técnico da LTEC e Professor adjunto da Universidade Paulista.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Catalão, em Goiás, se destaca na exploração das rochas fosfatadas para a produção do ácido fosfórico, que é utilizado na fabricação de fertilizantes. O ácido fosfórico é obtido a partir da reação de rochas fosfáticas com ácido sulfúrico. O fosfogesso é um subproduto sólido resultante desse processo. Diante do problema ambiental gerado pela produção excessiva desse passivo ambiental, surge o interesse em sua reutilização.

Diversos trabalhos foram executados no intuito de verificar a viabilidade do uso do fosfogesso em pavimentação (Mesquita, 2007; Rufo, 2009; Metogo, 2010; Kumar, Dutta e Mohanty, 2014; Alves, 2015; Rezende et al, 2016). Kumar, Dutta e Mohanty (2014) não especificam o tipo de fosfogesso utilizado, Alves (2015) e Rezende *et al.* (2016) estudaram o fosfogesso hemidratado (HH), com meia molécula de água, enquanto os demais estudaram o fosfogesso diidratado (DH), com duas moléculas de água. O uso do fosfogesso HH melhora o comportamento mecânico do material e aumenta o teor de fosfogesso de 20% para 50%, além de dispensar o uso de estabilizante (Alves, 2015). De acordo com Ahmed, Ugai e Kamei (2011), a melhora do comportamento mecânico ocorre porque o fosfogesso HH absorve água do solo, reduzindo os vazios. De acordo com Alves (2015), essa melhora no comportamento mecânico também é devido à forma de seus cristais, que permite uma melhor interação entre as partículas de solo e fosfogesso.

Por outro lado, de acordo com Izzo, Mahler e Rose (2013), é recomendada a utilização de solo local para a construção do sistema final de cobertura de sistemas de disposição de resíduos, porém o comportamento mecânico desse pode inviabilizar a sua utilização, surgindo assim a necessidade de alternativas de substituição desse material.

O sistema de cobertura final é composto por uma camada de cobertura, camada de

drenagem e barreira hidráulica. Segundo Koerner e Daniel (1997), a camada de cobertura armazena água (retenção para evaporação), e é um anteparo físico para a camada drenante. A permeabilidade do solo que será utilizado nesta camada deve ser menor que 10^{-7} m.s⁻¹. A barreira hidráulica tem como função impedir a percolação de líquido e gases que entra em contato com esta camada e deve ter uma condutividade hidráulica igual ou inferior a 10^{-9} m.s⁻¹, podendo ocorrer a estabilização do solo com bentonita para a obtenção desse valor de permeabilidade. Os valores de permeabilidade são obtidos por meio de ensaios laboratoriais, mas a escolha dos solos nos quais serão executados esses ensaios pode ser otimizada por meio do uso de fórmulas empíricas, tais como as propostas por Kozeny-Carman e apresentadas por Morandini e Leite (2015).

Por outro lado, o sistema de cobertura final é a última etapa do processo construtivo/operacional de um aterro sanitário, portanto sofrerá todas as interferências das variações sazonais (precipitações e evapotranspiração), podendo ocorrer fissurações, induzindo à expansão e colapso do solo.

Este estudo objetiva estudar o comportamento hidráulico de misturas de fosfogesso hemidratado com solo e bentonita quando aplicados em sistema de disposição final de rejeitos, verificando, inclusive, a interferência de variações sazonais nos coeficientes de permeabilidades das amostras. Além disso será avaliada a eficiência de equações matemáticas empíricas para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

2. METODOLOGIA

Este item aborda as origens, coleta e preparação dos materiais estudados (solo tropical, fosfogesso tratado termicamente na forma hemidratada, bentonita e suas misturas). São apresentados também os ensaios executados (caracterização física e química, permeabilidade

hidráulica e resistência a umedecimento e ressecamento) e os procedimentos adotados.

2.1 MATERIAIS

O solo foi retirado de uma jazida no bairro Vila Brasília em Aparecida de Goiânia – Goiás. Esse mesmo solo foi material de estudo de Metogo (2010), Matos (2011), Alves (2015), Rezende et al (2016) e Santos, Mascarenha e Ribeiro (2016). A composição mineralógica desse solo consiste de quartzo, caulinita, gibsitita e hematita (Rezende et al, 2016) e sua estrutura é constituída de micro e macroporos (Alves 2015), comportamento típico de solo laterítico. O procedimento de retirada de amostra deformada foi de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 2016a) descartando-se a camada superficial rica em matéria orgânica.

O fosfogesso é gerado em Catalão – GO na forma diidratada (DH) com depósito a céu aberto e sujeito a todos os tipos de variações climáticas e intempéries. Para procedimento de ensaios, empregou-se o tratamento térmico no material a fim de transformá-lo em fosfogesso HH.

Para definir a temperatura adequada para o tratamento térmico, Alves (2015) realizou ensaios de DRX com variação de temperatura em uma amostra de fosfogesso DH seco a 65°C. Nesse ensaio, a temperatura variou de 30°C (próximo à temperatura ambiente) até 130°C, com incrementos de 20°C/min. Nas temperaturas de 50°C e 100°C utilizou-se um intervalo de cinco minutos para estabilização da temperatura e entre 105°C e 130°C, o ensaio de DRx foi executado a cada 5°C e foram mantidos 20 minutos para estabilização da temperatura. A autora observou que, entre 110°C e 130°C, há formação do cristal de sulfato de cálcio hemidratado (bassanita), adotando-se, portanto, a temperatura de 130°C para o tratamento térmico do fosfogesso.

A bentonita é um mineral composto em parte por montmorilonita e foi adicionada às misturas devido a sua elevada expansão e baixa condutividade hidráulica, dando-lhe características selantes. Neste trabalho, foi utilizada a argila

sódica Bentongel da fabricante Bentonisa do estado da Paraíba.

Todos os materiais foram levados ao Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás em condições adequadas, onde foram identificados e armazenados até a execução dos ensaios para preservar contra interferências do meio úmido.

2.2 PROGRAMA DE ENSAIOS

Os ensaios dessa pesquisa foram precedidos pela preparação e caracterização física e química das amostras. Posteriormente as amostras foram submetidas a determinação do coeficiente de permeabilidade, a verificação do comportamento mecânico e hidráulico pós ciclos de ressecamento e umedecimento. Também foi verificada a melhor aproximação empírica para estimativa do coeficiente de permeabilidade.

2.2.1 Preparação das amostras

O solo, após ter sido levado ao laboratório, foi distribuído em recipientes abertos e exposto ao ambiente até que se equilibrasse com a atmosfera e atingisse a umidade higroscópica. O tempo para esse equilíbrio variou de 24 a 48 horas, com alguns revolvimentos do material durante esse período. Finalizado esse processo, todo o solo foi passado na peneira de 4,8 mm após o destorroamento. O procedimento adotado foi o apresentado pela NBR 6457 (ABNT, 2016b). Posteriormente, todo o solo peneirado foi separado em pequenas frações em sacos plásticos para futuros ensaios e sua umidade higroscópica foi determinada, levando-o à estufa a 100°C até constância de massa.

Nenhuma norma aborda o preparo prévio do fosfogesso para ensaios de compactação e caracterização, sendo assim adotou-se a metodologia de Alves (2015). O fosfogesso do tipo DH, por conter duas moléculas de água em sua estrutura, apresentava-se muito úmido e com vários grãos aglutinados, sendo, portanto, destorroado e peneirado em 4,8 mm. Posteriormente foi submetido ao tratamento

térmico, que consistiu em levá-lo à estufa a 130°C até sua constância de massa. Deixado a estufa, o fosfogesso, já na forma HH, ficou em repouso por alguns minutos até que o resfriamento fosse tal que permitisse a sua trabalhabilidade. O mesmo foi passado na peneira de número 10 (2 mm) a fim de fragmentar possíveis agregações, e então armazenados em sacos plásticos. A umidade higroscópica do material também foi extraída, retornando o material à estufa em 130°C até constância de massa por um período de 48 horas.

A bentonita foi adquirida comercialmente e sua umidade higroscópica foi retirada também em estufa a 130°C, porém o tempo até a constância de massa foi de 72 horas, devido à sua superfície específica e distância interplanar basal. Assim como os demais materiais desse estudo, a bentonita foi estocada em sacos plásticos devidamente identificados e datados.

O teor de fosfogesso aplicado às misturas foi fixado em 50%, pois Alves (2015) observou que essa é a máxima porcentagem para que a mistura obtivesse trabalhabilidade, com índice de plasticidade maior que 7%. Na outra metade das misturas foram adicionados solo e bentonita. Segundo Rowe (2000), para que alguns solos atinjam uma condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m.s^{-1} a adição de bentonita deve ser entre 4% e 10%. Lukiantchuki (2007) e Huse (2007) também trabalharam nesses teores de bentonita para atender a permeabilidade exigida pelas legislações para aplicação em barreiras impermeabilizantes.

Seguindo esse raciocínio, os ensaios dessa pesquisa foram realizados em mistura com 3%, 6% e 9% de bentonita. A Tabela 1 apresenta os

teores (relativos à massa seca) aplicados em cada uma dessas misturas e suas identificações que serão também utilizadas nesse artigo.

2.2.2 Caracterização física

Para a caracterização física do solo foram executados ensaios de caracterização convencionais (massa específica dos grãos, limites de consistências, análise granulométrica) e ensaios típicos para solos tropicais (ensaio de azul de metileno e ensaio de pastilha).

O ensaio Adsorção de Azul de Metileno, ou “método da mancha”, possibilita a determinação da superfície específica (SE), capacidade de troca catiônica (CTC) e do coeficiente de atividade (CA) das amostras. A metodologia empregada foi a mesma adotada por Fabbri (1994), considerando-se as modificações propostas por Romão (1995).

Nesse ensaio, 1 grama do material passante na peneira 0,074mm é inserido em um béquer com 100 ml de água destilada com, inicialmente, 1 ml de solução de azul de metileno. Perturba-se o meio através de um agitador magnético por 1 minuto e com o auxílio de um bastão de vidro pinga-se uma gota da solução (água + amostra + corante) em um papel filtro. O processo é repetido, sempre acrescentando 1 ml de solução de azul, até que se identifique um coroamento bem definido da mancha, momento este chamado de ponto de viragem, ou seja, o ponto onde há excesso de corante. A superfície específica (SE), a capacidade de troca catiônica (CTC) e o coeficiente de atividade (CA) foram determinados pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

TABELA 1: Teores dos materiais em cada amostra de estudo.

Amostras	Fosfogesso H-H (%)	Solo (%)	Bentonita (%)
S	0	100	0
M00	50	50	0
M03	50	47	3
M06	50	44	6
M09	50	41	9

FONTE: Autoria Própria.

$$SE = \frac{SE_{AM} \cdot V}{M} \quad \text{Eq. [1]}$$

$$CTC = \frac{V \cdot C \cdot 100}{M} \quad \text{Eq. [2]}$$

$$CA = \frac{100 \cdot V}{P_a} \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

SE_{AM} = superfície específica do corante Azul de Metileno (para 1g igual a 2,44 m².g⁻¹);

V = volume total utilizado da solução de Azul de Metileno (mL);

C = concentração da solução de Azul de Metileno - encontrado nos resultados de Romão (1995) igual a 2,68.10⁻³ meq.mL⁻¹;

M = massa de amostra seca ensaiada (1 g);

P_a = porcentagem da fração argila na amostra.

O ensaio de pastilha teve como diretriz o empreendimento do Rodoanel Mário Covas (DERSA, 2006), o qual se baseia na verificação da contração diametral do material moldado em anéis PVC com aproximadamente 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura (Figura1). Também foi moldado um cilindro de 3 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento para analisar o ângulo de quebra, podendo identificar o material em plástico ou não plástico.

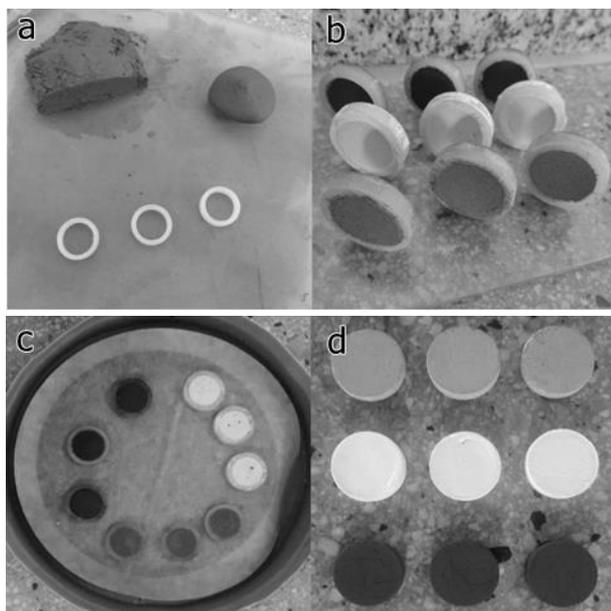


FIGURA 1: Ensaio de pastilha: [a] preparação; [b] material moldado em repouso para secagem; [c] anéis sobre pedra porosa para reabsorção; [d] verificação de trincas e contração diametral. **FONTE:** Autoria Própria.

A determinação do limite de liquidez e de plasticidade foram executados de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016c) e a NBR 7180 (ABNT, 2016d), respectivamente. A análise granulométrica seguiu o procedimento da NBR 7181 (ABNT, 2016e). A massa específica das amostras com adição de bentonita foi determinada através do aparelho penta-picnômetro, onde é possível obter a massa específica das amostras secas, dispensando o uso de água.

2.2.3 Determinação do ponto ótimo

Para definir as condições de compactação dos corpos de prova (umidade ótima - w_{ot} , e peso específico seco máximo - $\gamma_{d_{máx}}$) foram executados ensaios de compactação pela metodologia MCT (miniatura, compacta, tropical) ditada pela ME-228 (DNER, 1994). Todas as amostras foram compactadas na energia Proctor Normal e as amostras S, M00 e M03 também foram compactadas na Energia Intermediária.

É importante citar aqui que para o ensaio de compactação, onde se faz necessário o tempo de cura úmida nos materiais, não se seguiu o que exige a ME-254 (DNER, 1997), por se identificar reações de endurecimento e cristalização dos grãos quando aplicado o fosfogesso. Nesse sentido, os tempos de homogeneização aplicados foram de 24 horas para o solo (S) e de 2 horas para as demais misturas, conforme recomendado por Alves (2015).

Hamada, Calças e Giacheti (2004) verificaram uma redução significativa da permeabilidade de um solo arenoso fino somente quando os corpos de prova atingiram grau de compactação superior à 95%. Dessa forma, neste trabalho, os corpos de prova utilizados nos ensaios hidráulicos tiveram grau de compactação superior à esse valor.

2.2.4 Determinação do coeficiente hidráulico

O ensaio de permeabilidade Mini MCT foi executado de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000) em amostras compactadas nas condições ótimas das energias Proctor Normal e

Intermediária. A determinação do coeficiente de permeabilidade é importante para prever a quantidade de água percolada, que resultará na produção de percolado. O critério definido pela Cetesb (1993) é de que a barreira hidráulica apresente coeficientes iguais ou inferiores a 10^{-9} m.s⁻¹.

2.2.5 Simulação de sazonalidade

Para a simulação das variações sazonais, um ciclo de ressecamento e umedecimento foi aplicado às amostras que atenderam ao critério de permeabilidade. Foi adotada a metodologia aplicada por Costa (2015), com apenas 3 ciclos na seguinte ordem: ressecamento – umedecimento – ressecamento (R-U-R). Os corpos de prova utilizados foram compactados no ponto ótimo da curva de compactação e envoltos em parafina com apenas as faces superiores e inferiores livres para que as interferências pudessem ser no sentido vertical da amostra. A etapa de ressecamento consiste na inserção do CP em estufa a 35°C até constância de massa e a etapa de umedecimento consiste na imersão do CP em água até constância de massa. Nos intervalos desses ciclos, análises visuais e medições de altura, diâmetro e massa foram feitas.

Após esses ciclos, foram executados ensaios de permeabilidade de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000). Nesse caso, utilizou-se um permeâmetro bipartido, que se ajusta à dimensão do corpo de prova, visto que os ciclos de umedecimento e secagem resultam em variações diamétricas dos corpos de prova (Figura 2).



FIGURA 2: Equipamento desenvolvido para a permeabilidade pós dilatação diametral.

FONTE: Autoria Própria.

Para verificar a eficiência do equipamento, ensaios de permeabilidade foram executados com o permeômetro convencional e o bipartido em uma amostra de solo compactada na energia Proctor Intermediária e os resultados encontrados foram similares. Assim, caso ocorresse variações de permeabilidade entre a amostra intacta e a submetida a ciclos sazonais, podia-se descartar a influência do equipamento.

2.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA EMPÍRICA

Segundo Morandini e Leite (2015), é possível determinar a permeabilidade de solos lateríticos, transicionais e não lateríticos por meio de formulações matemáticas, utilizando-se alguns parâmetros do material, tais como: porosidade, índice de vazios, superfície específica, entre outros. O uso dessas formulações, caso adequadas, podem agilizar a escolha dos melhores teores de solos e estabilizante químico em misturas utilizadas como barreira hidráulica.

Neste trabalho aplicou-se, para todas as amostras compactadas na energia Proctor Normal, as seguintes correlações apresentadas por Morandini e Leite (2015): Kozeny-Carman (Equação 4), em que o parâmetro de superfície específica é adquirido pelo ensaio do método Azul de Metileno; Kozeny-Carman (Equação 5), onde a superfície específica é definida matematicamente por meio do limite de liquidez e a equação de Morandini-Leite (Equação 6) para solos lateríticos compactados em energia Proctor Normal. As devidas equações são apresentadas a seguir.

$$K_{(KC1)} = 0,2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{1}{S_0^2} \quad \text{Eq. [4]}$$

$$K_{(KC2)} = 0,2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot \left(\frac{1,3513}{\omega_L} - 0,0089 \right)^2 \quad \text{Eq. [5]}$$

$$K_{(ML)} = 0,2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot a \cdot \left(\frac{\omega_L + \omega_p}{2} \right)^b \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

γ : Peso específico da água;

μ : Coeficiente de viscosidade dinâmica da água;

e : Índice de vazios;

S_0 : Superfície específica;

ω_L : Limite de liquidez;

ω_p : Limite de plasticidade

K : Permeabilidade

Na Equação 6, os termos a e b são, respectivamente, iguais a $8,32 \cdot 10^{-4}$ e $-4,48$, para solos lateríticos (Morandini e Leite, 2015). Esses valores dependem, inicialmente, de um ensaio laboratorial de permeabilidade (k_{lab}). O termo b é encontrado por meio de uma linearização gráfica e o termo a através da Equação 7.

$$\log \left(k_{lab} \cdot \frac{1}{0,2} \cdot \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{1+a}{e^3} \right) = \log(a) + b \cdot \log \left(\frac{w_L + w_P}{2} \right) \text{ Eq. [7]}$$

Em que:

k_{lab} : Permeabilidade de laboratório

Definida qual a equação de base que melhor se ajustou aos dados experimentais das amostras compactadas na energia Proctor Normal, obteve-se uma nova equação matemática. Verificou-se se essa nova equação também se ajustava às amostras compactadas na energia Proctor Intermediária, afim de observar se as formulações empíricas conseguem abranger variações quanto à energia de compactação das amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa etapa, os resultados dos ensaios de caracterização, hidráulicos e sazonais, serão apresentados seguido das análises e discussões a fim de concluir com os objetivos propostos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MISTURAS

Na Tabela 2 consta a caracterização física dos materiais. Observa-se que a adição de fosfogesso e bentonita diminui o teor de areia, aumenta o teor de silte e incrementa o índice de atividade do solo. Em relação ao teor de argila, ocorre um incremento quando do acréscimo de 3 % de bentonita, conforme esperado, mas que reduz nos teores de 6% e 9%. Uma possível explicação é a ineficiência do defloculante em desfazer as agregações geradas quando da mistura de fosfogesso com bentonita, que se manifesta a partir de um determinado teor (6%). No entanto, seriam necessários ensaios de microscopia eletrônica de varredura para confirmar essa afirmação.

Na Figura 3 consta a variação dos limites de consistência devido a adição de bentonita. Observa-se que os valores dos limites de liquidez e de plasticidade aumentam com o incremento do teor de bentonita. No entanto, o incremento de w_p , quando da adição de 6% de bentonita, foi menor do que o esperado, resultando em um baixo valor de regressão linear (R^2). Morandini e Leite (2015) também apresentaram os ajustes para os limites de consistência de suas amostras, obtendo valores de R^2 para w_L e w_p de 0,99 e 0,84, respectivamente.

TABELA 2: Resultados dos ensaios de caracterização física.

Amostras	Massa Específica (g.cm ⁻³)	Granulometria (%)			Limite de Consistência (%)			IA
		Areia	Silte	Argila	w _L	w _P	IP	
S	2,65 ¹	50,9	38,3	10,8	38 ¹	27 ¹	11 ¹	1,02
M00	2,69 ¹	45,5	49,1	5,4	38 ²	30 ²	8 ²	1,48
M03	2,72	32,4	49,3	18,3	44	29	15	0,82
M06	2,71	32,6	58,6	8,8	52	31	21	2,39
M09	2,67	30,6	63,1	6,3	66	45	21	3,33

¹ (ALVES, 2015) e ² (SANTOS, MASCARENHA e RIBEIRO, 2016)

FONTE: Autoria Própria.

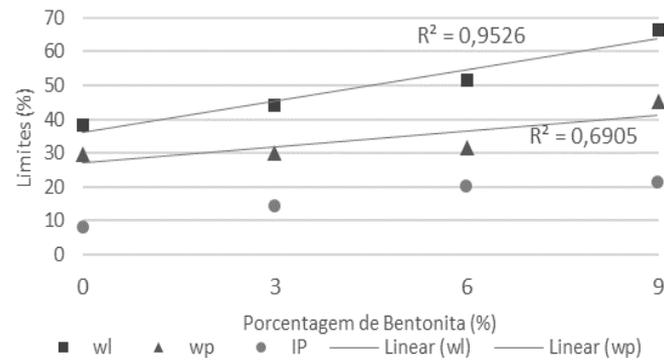


FIGURA 3: Limite de liquidez e de plasticidade com diferentes teores de bentonita.
FONTE: Autoria Própria.

Pelo ensaio do Método da Pastilha, todas as amostras foram identificadas como plásticas (com ângulo de quebra entre 30° e 90°), com exceção do HH que resultou em não plástico por não ter sido possível moldá-lo por rolagem. Na Figura 4 constam os resultados da classificação de cada material pelo método da pastilha.

Pela carta de classificação nota-se que a adição de bentonita mudou a classificação das misturas de lateríticas para não lateríticas, devido sua elevada superfície específica. O solo, o fosfesso HH e as misturas M03, M06 e M09

foram classificados como laterítico areno-argiloso (LA'-LG'), não laterítico silto-arenoso (NS'/NA'), areia laterítica (LA-LA'), laterítico arenoso (LA'), não laterítico silto-arenoso (NS'/NA') e não laterítico silto-argiloso (NS'-NG'), respectivamente.

Por meio do ensaio de adsorção de Azul de Metileno foi possível perceber que a adição da bentonita ao solo provocou um aumento na superfície específica (SE) e conseqüentemente na capacidade de troca catiônica (CTC), conforme verificado na Figura 5.

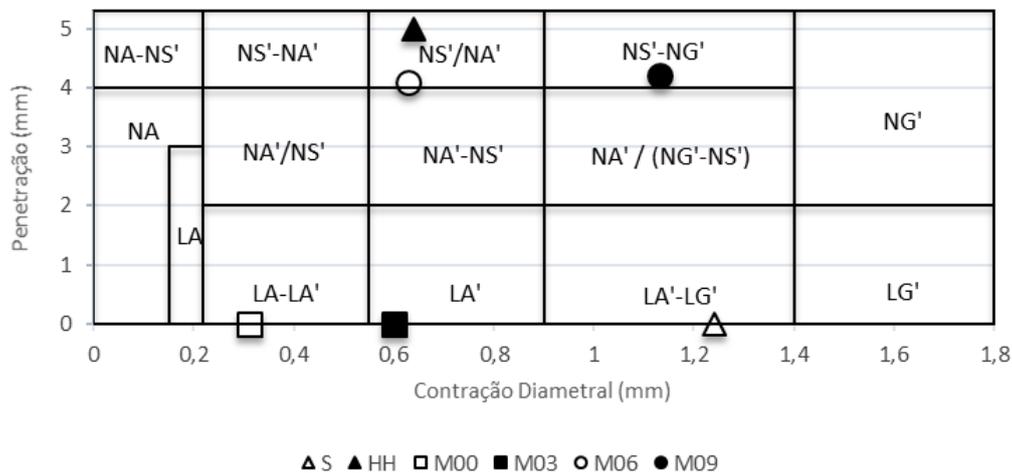


FIGURA 4: Classificação das amostras pelo método da pastilha.
FONTE: Autoria Própria.

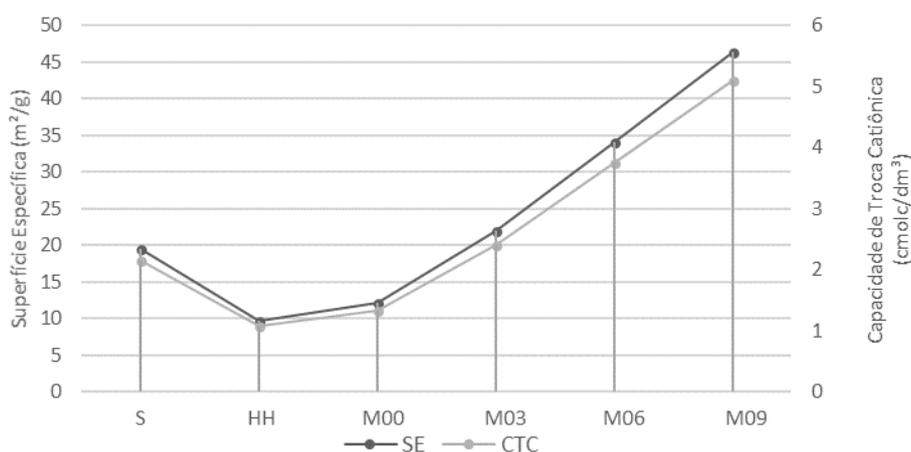


FIGURA 5: Resultado de SE e CTC através do ensaio de Azul de Metileno.

FONTE: Autoria Própria.

O coeficiente de atividade mostrou considerável elevação para as amostras M06 e M09, classificando-as como muito ativas ($CA > 80$) enquanto as demais são apenas ativas ($11 < CA < 80$), conforme verificado por meio da Tabela 3. Pelo grau de atividade das amostras é possível definir também o tipo de argilomineral, sendo as muito ativas do grupo das montmorilonita e vermiculitas e as ativas do grupo das caulinitas e/ou ilitas.

3.2 DETERMINAÇÃO DO PONTO ÓTIMO

A Tabela 4 apresenta os valores de umidade ótima e peso específico seco máximo além dos valores referentes ao grau de compactação, que foram superiores a 97%. Observa-se que a adição de bentonita aumenta a umidade ótima (devido ao acréscimo de superfície específica e distância interplanar basal) e diminui o peso específico seco máximo.

TABELA 3: Coeficiente de atividade das amostras.

	S	M00	M03	M06	M09
CA	41,77	53,66	44,27	149,26	291,05

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 4: Resultados do ensaio de compactação.

	S		M00		M03	M06	M09
	PN	PI	PN	PI	PN	PN	PN
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g.cm ⁻³)	14,8	15,5	13,6	14,8	13,8	13,0	12,2
W_{otm} (%)	25,30	22,00	30,35	28,00	32,00	38,70	44,40
GC (%)	99,66	99,26	97,94	99,89	97,48	97,74	100,00

FONTE: Autoria Própria.

3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE HIDRÁULICO

Na Tabela 5 constam os valores dos coeficientes de permeabilidade das amostras compactadas na energia Proctor Normal e Proctor Intermediária. As amostras M03, M06 e M09, compactadas na energia Proctor Normal, e a amostra S e M00, compactada na energia Proctor Intermediária, apresentaram valores de permeabilidade satisfatórios (10^{-9}m.s^{-1}) para uso em barreira hidráulica de cobertura final de aterros sanitários.

Como o intuito é o uso do maior teor possível de fosfogesso, visando dar um destino adequado a esse subproduto, optou-se por executar os ensaios de sazonalidade apenas na amostra M00 e no solo, ambos compactados na energia Proctor Intermediária.

3.4 SIMULAÇÃO DE SAZONALIDADE

O processo de ressecamento e umedecimento pode ser um agente agressivo à estrutura do material, provocando alterações em suas estruturas como fissurações e expansões,

refletindo em variações volumétricas e de massa dos materiais. De acordo com Eberemu, Amadi e Osinubi (2013) e Osinubi, Moses e Liman (2015), a variação volumétrica deve ser limitada a 4%. Vale ressaltar que os autores determinaram a variação volumétrica após secagem ao ar das amostras por 40 dias, afim de verificar o comportamento em campo. As variações do volume e de massa do Solo e da Mistura M00 são apresentadas na Figura 6.

O solo apresentou variação volumétrica de 6,34% e a amostra com fosfogesso apresentou variação volumétrica de 0,69%, bem abaixo do limite estabelecido por Eberemu, Amadi e Osinubi (2013) e Osinubi, Moses e Liman (2015), mesmo após secagem em estufa. Isso pode ser devido ao processo de reidratação do fosfogesso tratado termicamente, formando cristais intertravados em formato de placas e agulhas. Alves (2015) verificou que a amostra composta por solo + fosfogesso hemidratado não apresentava desagregação estrutural e nem alterações no comportamento hidráulico.

TABELA 5: Coeficiente de permeabilidade (m.s^{-1}).

	S	M00	M03	M06	M09
Proctor Normal	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$2,06 \cdot 10^{-8}$	$4,21 \cdot 10^{-9}$	$1,56 \cdot 10^{-9}$	$5,67 \cdot 10^{-9}$
Proctor Intermediária	$2,28 \cdot 10^{-10}$	$2,29 \cdot 10^{-9}$	-	-	-

FONTE: Autoria Própria.

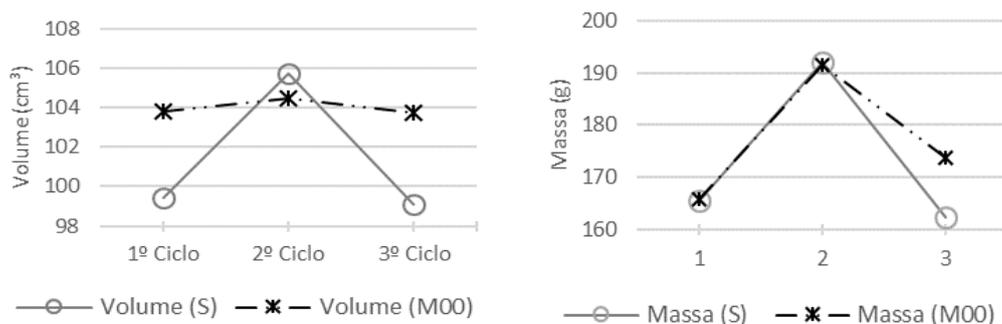


FIGURA 6: Variações volumétricas e de massa durante ciclos sazonais.

FONTE: Autoria Própria.

O solo teve redução na gramatura após o 3º ciclo em relação a sua massa original no 1º ciclo. Isso se justifica pela baixa temperatura aplicada na etapa de ressecamento, não sendo suficiente para retirar toda a água contida no corpo de prova no 1º ciclo. Com sua expansão durante o umedecimento, possivelmente pequenas fissurações internas foram criadas favorecendo a liberação de maior quantidade de água na etapa de ressecamento seguinte.

Em relação à amostra M00, a massa final foi superior à original, evidenciando que a reidratação do fosfogesso, verificada por Alves (2015), pode ter impedido a liberação de água na etapa de ressecamento seguinte.

No ensaio de permeabilidade, após os ciclos de ressecamento e umedecimento, os corpos de prova apresentaram aumento do coeficiente de condutividade hidráulica. Os valores novos desses coeficientes foram de $1,66 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para o solo e $5,75 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para a amostra M00, ficando ambos os valores na mesma ordem de grandeza recomendada para barreiras hidráulicas. A variação de uma ordem de grandeza na permeabilidade após ciclos de ressecamento e umedecimento, obtido para o solo dessa pesquisa, também foi verificado por Costa (2015) quando analisou o solo + 40% de resíduo de construção civil (RCC) e solo + 0,4% de material fibrosos (PET). Por outro lado, a amostra M00 manteve a mesma ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, justificada pela sua menor alteração estrutural durante os ciclos.

A elevação do coeficiente de permeabilidade em ambas as amostras é devido a possíveis fissurações internas na estrutura do corpo de prova, visto que superficialmente não se identificou nenhuma fissuração (Figura 7), apenas a parafina envolta à amostra de solo se soltou devido à contração do material, mas isso não é um fator de interferência na permeabilidade, pois a parafina é raspada antes do material ser submetido ao ensaio.



FIGURA 7: Amostras S e M00 após finalização dos ciclos sazonais.

FONTE: Autoria Própria.

3.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA EMPÍRICA

Na Tabela 6 constam os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos em laboratório e por meio de equações matemáticas (equações 4, 5 e 6) em amostras compactadas na energia Proctor Normal. Os dados de entrada também são apresentados, sendo, índice de vazios (e), superfície específica (S_0) e limites de liquidez (w_L) e plasticidade (w_p).

O índice de vazios foi determinado a partir da massa específica apresentada na Tabela 2 e do valor de peso específico seco máximo da curva de compactação. Já a superfície específica são resultados do ensaio de Azul de Metileno (Figura 5). Os valores adotados de peso específico (γ) e de viscosidade cinemática (μ) da água para temperatura de $29,3^\circ\text{C}$ foram de $9,959 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ e $8,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Verifica-se que, para todas as amostras, a melhor aproximação foi a equação adaptada por Morandini e Leite (2015). No entanto, essa ainda não é uma estimativa matemática ideal, dessa forma, buscou-se encontrar novos valores de a e b que se adaptassem às misturas estudadas nesse trabalho. Na Figura 8 tem-se o gráfico de linearização para as três amostras lateríticas (S, M00 e M03) e a equação da linha de tendência formada entre elas. O termo b corresponde ao coeficiente angular da reta, neste caso igual a $-18,11$, e o termo a pôde ser encontrado pela média entre os resultados dos três pontos pela Equação 6, resultando em $9,26 \cdot 10^{+17}$.

TABELA 6: Dados das amostras e suas respectivas permeabilidades.

Amostras	e	S ₀ (AM) (cm ² .g ⁻¹)	ω _L (%)	ω _P (%)	K _{LAB} (m.s ⁻¹)	K _{ML} (m.s ⁻¹)	K _{KC} [1] (m.s ⁻¹)	K _{KC} [2] (m.s ⁻¹)
S	0,778	195200	38	27	2,10.10 ⁻⁸	8,87.10 ⁻⁹	1,66.10 ⁻⁹	4,50.10 ⁻¹⁰
M00	0,924	122000	38	30	2,06.10 ⁻⁸	1,12.10 ⁻⁸	6,58.10 ⁻⁹	6,96.10 ⁻¹⁰
M03	0,927	219600	44	29	4,21.10 ⁻⁹	8,23.10 ⁻⁹	2,05.10 ⁻⁹	4,70.10 ⁻¹⁰

FONTE: Autoria Própria.

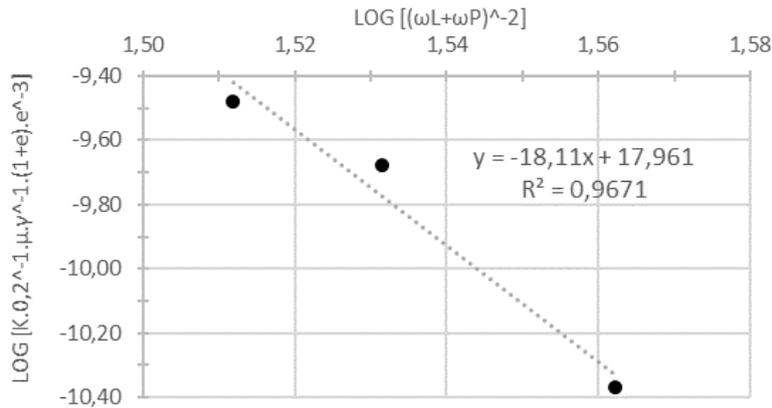


FIGURA 8: Linearização para determinação do parâmetro b.

FONTE: Autoria Própria

Logo, a equação final, neste trabalho identificada por (K_{ME}), resultou em:

$$k_{(ME)} = 0,2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} 9,26 \times 10^{17} \left(\frac{\omega_L + \omega_P}{2} \right)^{-18,11} \text{ Eq. [8]}$$

A partir da Equação 8, determinou-se os novos valores de permeabilidade. Os parâmetros utilizados constam na Tabela 6 e, para os corpos de prova compactados na Energia Proctor

Intermediária, adotou-se os índices de vazios de 0,689 e 0,782 para as amostras S e M00, respectivamente. Na Figura 9 são apresentadas as correlações entre os dados de laboratório para as duas energias distintas de compactação. Observa-se que, ao modificar a energia de compactação, e conseqüentemente os índices de vazios, o ajuste matemático não se adequa aos dados experimentais, necessitando de um novo ajuste.

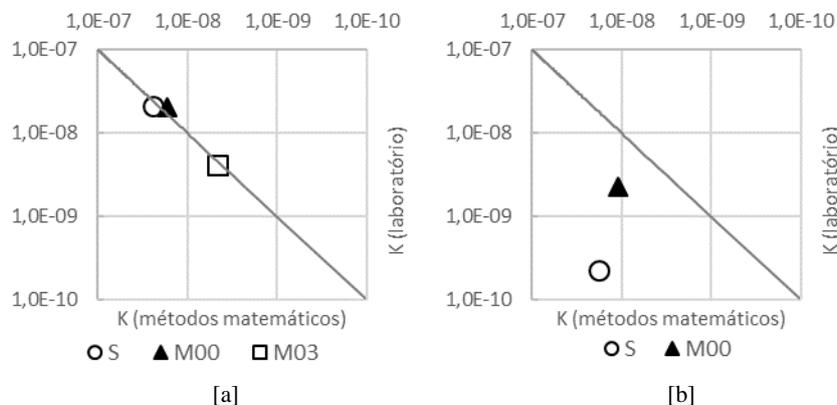


FIGURA 9: Correlação entre a Eq. 8 e dados de laboratório para a energia [a] Proctor Normal e [b] Proctor Intermediária.

FONTE: Autoria Própria.

4. CONCLUSÕES

O aumento da energia de compactação na preparação das amostras foi um ponto crucial dessa pesquisa, tendo em vista que essa elevação na energia tende a aumentar o peso específico seco e reduzir o ponto de umidade ótima. Essa mudança reflete no índice de vazios do corpo de prova, interferindo positivamente no coeficiente de permeabilidade para o fim desejável desse estudo.

Com base nos resultados encontrados, foi possível concluir que:

- Para uso como barreira hidráulica, o coeficiente de permeabilidade deve ser igual ou inferior a 10^{-9} m.s⁻¹. Tendo isso em vista, tanto o solo isoladamente, como ele em adição a 50% com fosfogesso, apresentaram condições favoráveis quando compactados em energia Proctor Intermediária para aplicação no sistema de cobertura. No entanto, a mistura solo + fosfogesso foi definida como prioritária nessa aplicação por dar finalidade ao fosfogesso, até então considerado um passivo ambiental, e conjuntamente reduzir a extração de solo natural para essa finalidade. A escolha dessa amostra também se mostra econômica e ambientalmente viável por não ser necessário a adição de composto bentonítico para redução do coeficiente de permeabilidade.

- Quanto aos ciclos simulados de variações sazonais por ressecamento e umedecimento, a amostra M00 apresentou menor variação volumétrica e de massa durante os ciclos. Essa baixa variação é devido à estrutura do fosfogesso HH, que produz placas que reforçam a estrutura física do material, viabilizando sua aplicação em camadas que exijam baixa variação de permeabilidade quando submetidas a variações de temperatura e umidade.

- Os resultados analisados nas medições citadas acima refletiram nos coeficientes de permeabilidade encontrados para esses mesmos corpos de prova após os ciclos de

ressecamento e umedecimento. O solo apresentou maior variação nos valores de permeabilidade em relação à amostra M00. Como verificado, as interferências físicas sofridas pelas amostras durante os ciclos sazonais interferem diretamente na variação do coeficiente de permeabilidade. Essa interferência física pode ser menos intensa caso essa amostra seja aplicada como barreira hidráulica do sistema de cobertura, por estar protegida pela camada drenante e camada de cobertura. Portanto, os resultados podem ser mais favoráveis do que os já encontrados nesse estudo.

- Os termos a e b da equação empírica formulada por Morandini e Leite (2015) para solos lateríticos foram modificados para que os valores de permeabilidade se ajustassem melhor aos dados laboratoriais das misturas utilizadas nesse trabalho. Além disso, ao se verificar se a mesma equação era aplicável aos dados experimentais de amostras compactadas na energia Proctor Intermediária, verificou-se que a equação não se aplica a energias diferentes, sendo no caso necessário uma nova formulação para novas energias de compactação, o que limita bastante o uso de equações empíricas para previsão de permeabilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Cmoc Brazil e ao CNPq (processo nº 408756/2016-0) pelo financiamento da referida pesquisa e ao Laboratório de Geotecnia - UFG por todo o apoio técnico nas realizações dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 14545: **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 9604: **Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. NBR 6457: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. NBR 7180: **Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016d.

_____. NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016e.

AHMED, A.; UGAI, K.; KAMEI, T. **Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilizer agent in embankment construction**. Soils Found, Vol.. 51, n. 6, 2011, 975–990p.

ALVES, K. C. S. K. **Estudo do fosfogesso tratado termicamente e das misturas com solo tropical**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia,GO, 2015,122p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos sólidos industriais**. 1993, 2ª ed. 234p

COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, DF, , 2015,163p.

DERSA: DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S/A, **Diretrizes para identificação expedita do solo laterítico - Método da Pastilha**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME-228: **Solos - compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. ME-254: **Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão**. Rio de Janeiro, 1997.

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 and Biomass Valorization, Vol. 4, 2013, 309- 323p.

FABBRI, G.T.P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo,SP, 1994, 101.

HAMADA, J; CALÇAS, D. A. N. Q. P.; GIACHETI, H. L. **Influência da compactação de um solo arenoso na infiltração e retenção de carga orgânica do chorume**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 9, n. 3, 2004, 180-186p.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007, 126p.

IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, J. L. **Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 18, n. 4, 2013, 303-312p.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps**. Publicado por *American Society of Civil Engineers* e co-publicado por *Thomas Telford Publications*. 1997, 256p.

KUMAR, S.; DUTTA, R. K; MOHANTY, B. **Engineering properties of bentonite stabilized with lime and phosphogypsum**. Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 22, n. 4, 2014, 35-44p. DOI: 10.2478/sjce-2014-0021.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007, 124p.

MATOS, T. H. C. **Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011,118p.

MESQUITA, G. M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2007,144p.

METOGO, D.A.N. **Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico executado com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás,

MORANDINI, T. L. C.; LEITE, A. L. **Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes.** *Engineering Geology*; Vol. 196, 2015, 251-267p.

OSINUBI, K. J.; MOSES, G.; LIMAN, A. S. **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, 2015, 523-535p.

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. **Laboratoy study of phosphogypsum, stabilizers and tropical soil mixtures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001711.

ROMÃO, P. A. **Mapeamento geotécnico da região de águas claras (DF): Utilização de recursos de geoprocessamento e de novos métodos de ensaio para caracterização de solos tropicais.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 1995,169p.

ROWE, R.K. Barrier Systems. **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook.** Ontario, Kluwer academic publishers, 2000, chapter 25, 739-788p.

RUFO, R. C. **Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2009,155p.

SANTOS, T. L.; MASCARENHA, M. M. A.; RIBEIRO, M. E. S. **Estudo da deformabilidade do fosfogesso hemi-hidratado.** In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2016,8p.