XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/61

Análise Laboratorial de Mistura Solo-Fosfogesso para Camada de Base de Aterro Sanitário

Leonardo Cabrera Parra Ramos
Engenhario Civil, Araraquara, Brasil, ld1_h@hotmail.com

Simone Cristina de Jesus
Professora do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triangulo Mineiro, Uberaba, Brasil, simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo estudar, a partir de análise laboratorial, o comportamento físico e mecânico de mistura de solo-fosfogesso destinados a camada de base de aterros sanitários. O fosfogesso é um resíduo resultante da produção de ácido fosfórico, principal componente de fertilizantes fosfatados. É gerado em grande escala, originando sérios problemas no seu acondicionamento. O traço 1:1 foi definido de maneira a incluir a maior quantidade de fosfogesso, em massa, e que permitisse a determinação das suas características físicas e mecânicas. A caracterização dos materiais incluiu a determinação da massa específica dos grãos, dos limites de liquidez e plasticidade, da granulometria, análises químicas e ensaios de compactação, na energia Normal, e adensamento. A análise granulométrica do solo mostrou a maior concentração de areia. Já para mistura não foi possível analisar, já que após 4 minutos do início das leituras no densímetro notou-se a completa sedimentação do material. O resultado do ensaio de compactação para a mistura apresentou valores para a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) de 1,298 g/cm³ e teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 37,9 %. Esses dados foram essenciais para a moldagem de corpo de prova do ensaio de adensamento. Através do ensaio de adensamento determinou o coeficiente de adensamento (cv) com valor médio de 3,9 x 10^{-6} m^2/s. Comportamento compressível foi verificado, já que com a inserção das cargas o relógio comparador apresentava variação constante durante toda as 24 horas do carregamento. Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível determinar a permeabilidade média da mistura de 9,98 x 10^{-9}m/s. Valor este adequado segundo Boscov (2012) que cita que a permeabilidade recomendada para solos compactados de camada de base de aterros sanitários deve ser igual ou menor a 10^{-9} m/s. A partir dos resultados obtidos foi comparado a viabilidade do traço escolhido aos padrões recomendados, chegando a uma resposta positiva entre os resultados apresentados e os requisitos impostos por normativas nacionais, internacionais e bibliográficas.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito, Sustentabilidade, Mineração, Ensaios de Solo, Revestimento de Fundo.

ABSTRACT: This study aims to investigate, through laboratory analyses, the physical and mechanical behavior of a soil–phosphogypsum mixture intended for use as a base liner layer in sanitary landfills. Phosphogypsum is a by-product generated during the production of phosphoric acid, the main component of phosphate fertilizers. It is produced on a large scale, creating significant challenges regarding its storage and disposal. A 1:1 mixture ratio was selected in order to incorporate the highest possible amount of phosphogypsum by mass while still allowing the determination of its physical and mechanical properties. Material characterization included the determination of specific gravity, liquid and plastic limits, grain size distribution, chemical analyses, standard Proctor compaction tests, and consolidation tests. The grain size analysis of the soil revealed a predominance of sand particles. However, grain size analysis could not be completed for the mixture because complete sedimentation of the material was observed after only four minutes from the beginning of the hydrometer readings. The compaction test results for the mixture indicated a maximum dry density (ρd,max) of 1.298 g/cm³ and an optimum moisture content (wopt) of 37.9%. These parameters were essential for preparing the specimens used in the consolidation tests. The consolidation tests yielded an average coefficient of consolidation (cv) of 3.9×10^{-6} m²/s. Compressible behavior was observed, as the dial gauge showed continuous deformation throughout the entire 24-hour loading period. Based on the results obtained from these tests, the average permeability of the mixture was determined to be 9.98×10^{-9} m/s. This value is considered suitable according to Boscov (2012), who states that the recommended

permeability for compacted soils used as landfill base liner layers should be equal to or less than 10^{-9} m/s. The results obtained were used to evaluate the feasibility of the selected mixture ratio in comparison with recommended standards. The analysis indicated that the mixture satisfies the requirements established by national and international standards, as well as those reported in the technical literature, demonstrating its potential suitability for the proposed application.
KEYWORDS: Tailings, Sustainability, Mining, Soil Testing, Backfill.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da adoção de políticas ambientais rigorosas e capazes de alcançar em âmbito legal a preservação do meio ambiente é um aspecto progressivo, além de ser um direito garantido pela Constituição Federal de 1988 em seu Artigo 23. Portanto, sendo dever de todos os entes federativos "proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas".

A Lei de número 12.305/2010, conhecida também como Política Nacional de Resíduos Sólidos, visa regular a gestão dos resíduos sólidos, possibilitando a diminuição no volume de produção, reuso, reciclagem e reutilização.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR, 2019), dos 5570 municípios da federação, apenas 3712 prestam informações ao SINIR e somente 2487 possuem planos de gestão de resíduos sólidos. Ademais, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), 39,8% dos municípios brasileiros não destinam adequadamente seus resíduos.

Quanto à destinação final dos resíduos, o aterro sanitário é construído sob critérios de engenharia e normas operacionais, sendo o único método de disposição permitido por lei no Brasil.

Em se tratando de aterro sanitário, a camada de impermeabilização inferior ou camada de base se configura como uma das maiores preocupações deste projeto, por ter como função reduzir o transporte de poluentes para camadas de solos inferiores, evitando, deste modo, a contaminação do subsolo e da água subterrânea.

A camada de base pode ser composta por camadas de solo compactadas, geossintéticos ou geocomposto argiloso, ou uma combinação destas (BOSCOV, 2012). A incorporação de rejeitos na camada de base é estudada por razões ambientais e econômicas, incluindo resíduos da construção e demolição e o subproduto da produção de ácido fosfórico conhecido como fosfogesso, sendo utilizações deste material analisadas por Silva (2016) e Rufato (2017).

Em vista disto, o presente artigo apresentou a análise do uso do fosfogesso incorporado a camada de base de aterro sanitário. Para tal, foram realizados ensaios e análises a partir da incorporação deste resíduo junto ao solo presente ao aterro municipal de Uberaba – Minas Gerais. O projeto visou absorver a demanda do resíduo, incorporando-o na camada e assegurando o mínimo de alterações em suas características físicas e mecânicas, viabilidade de implantação do método e redução do impacto ambiental quando comparado ao solo original.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado neste estudo foi cerca de 50kg, coletado na área do Aterro Sanitário do município de Uberaba, MG, localizado na Avenida Filomena Cartafina km 17 e encaminhado para o laboratório didático B1/B2 - Laboratório de Mecânica dos Solos, Geologia, Materiais de Construção Civil e Estrutura e Transporte do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (ICTE/UFTM). Este solo é o mesmo utilizado na área para a camada de base do aterro e foi coletado de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 2016).

O fosfogesso utilizado foi disponibilizado pela empresa Mosaic Fertilizantes localizada no município de Uberaba, MG. O resíduo foi fornecido no seu estado natural e estava acondicionado em dois sacos de 50 kg no laboratório didático B1/B2.

A mistura utilizada (50% de solo e 50% de fosfogesso, em massa) foi escolhida de acordo com a quantidade máxima de rejeito que pode ser incorporado ao solo da camada de base de aterro sanitário, sem causar prejuízos nas características físicas e mecânicas dessa estrutura. Silva (2016) e Rufato (2017) avaliaram o comportamento mecânico da mistura de solo e fosfogesso (80% solo + 20% fosfogesso, em massa) e encontrou parâmetros adequados para o uso como revestimento de fundo de aterros sanitários.

2.2 Métodos

O solo e a mistura foram submetidos a um programa de ensaios para a caracterização física e análise química e físico-química, sendo que, antecedendo aos ensaios, o solo e o fosfogesso foram dispostos em bandejas para a secagem até a umidade higroscópica e preparados conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016).

A caracterização física foi composta pelos ensaios de massa específica dos sólidos, análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade. Após a caracterização física, a mistura foi submetida ao ensaio de compactação na Energia do Proctor Normal e ensaio de Adensamento Unidimensional. Os ensaios foram realizados seguindo as normas pertinentes e apresentadas a seguir.

2.2.1 Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL)

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. O intuito foi avaliar o comportamento do solo e da mistura quanto à consistência, visto que, estes parâmetros são requisitos para a viabilidade do material como base de aterro sanitário (BOSCOV, 2012).

O limite de plasticidade é usado para avaliar a capacidade do solo de suportar cargas sem perder sua estabilidade, determinando-se a umidade máxima na qual o solo pode ser moldado sem quebrar e mantendo sua forma após a remoção da carga.

Segundo Jesus *et al*. (2016), não é possível determinar LL e LP do fosfogesso já que este em contato com a água apresenta comportamento semelhante a fluídos não newtonianos, o que não confere a trabalhabilidade necessária para a sua execução. Sendo assim, optou-se por iniciar os ensaios pela determinação da quantidade máxima de fosfogesso a ser acrescentada ao solo, de forma que fosse possível a determinação do limite de plasticidade.

Deste modo, foi possível a execução do ensaio de limite de plasticidade para uma mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso, em massa, sendo esse traço utilizado neste estudo.

2.2.2 Analise Granulométrica

A granulometria foi realizada para o solo e para a mistura conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), que determina os procedimentos para a análise granulométrica conjunta, ou seja, por sedimentação e peneiramento. Para a etapa de sedimentação foi utilizado o defloculante hexametafosfato de sódio.

2.2.3 Massa Específica dos Sólidos

A massa específica dos sólidos foi determinada para o solo e para a mistura, seguindo as recomendações do Manual da Embrapa (EMBRAPA, 2017). Esta metodologia é uma adaptação da norma DNER – ME 093/94, na qual se utiliza Etanol P.A, em substituição a água destilada, sem necessidade de fervura da amostra, tornando o ensaio mais prático e ágil.

2.2.4 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado apenas para a mistura, objeto principal do estudo, de acordo com a NBR 7182 (2016) na Energia do Proctor Normal. O intuito foi determinar os ìndices físicos, umidade ótima e a massa específica seca máxima, que correspondem ao máximo grau de compactação.

Determinados estes índices físicos, uma nova amostra da mistura foi preparada com o teor de umidade ótima e compactada na Energia Normal. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do cilindro e a amostra para o ensaio de adensamento foi confeccionada através de talhamento e cravação de anel metálico indeformável de 2 cm de altura e 8,73 cm de diâmetro.

2.2.5 Ensaio de Adensamento Unidimensional

O ensaio de adensamento foi realizado na amostra da mistura moldada com o anel metálico indeformável e seguindo as recomendações da NBR 16853 (2020). Essa amostra estava compactada no teor de umidade ótima e na Energia Normal do Proctor. O ensaio possibilitou conhecer o comportamento da mistura quando submetida a carregamentos externos e determinar no seu máximo grau de compactação o coeficiente de adensamento vertical (cv), coeficiente de permeabilidade vertical (k), índice de compressão (Cc), índice de recompressão (Cr) e variação do índice de vazios.

O ensaio foi realizado com amostra saturada e inundada e submetida aplicação das cargas (12,5; 25; 100; 200; 400 e 800kPa) por um período mínimo de 24 horas, e em sequência foi realizado o descarregamento.

2.2.6 Análise Química e Físico-química

Amostra de solo e fosfogesso foram encaminhadas para o Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), sendo determinado o pH e a concentração de alguns metais pesados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo sobre a viabilidade do uso de fosfogesso incorporado ao solo da camada de base de aterro sanitário serão apresentados e discutidos a seguir.

3.1 Caracterização Física

Os resultados encontrados na determinação do Limite de Plasticidade (LP), Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Limite de Plasticidade do Solo

Amostra	LP	LL	IP
Solo	33	41	8
Mistura	40	43,5	3,5

Tabela 2. Requisitos mínimos dos limites de consistência para a camada de base de aterros sanitários.

Fonte	LL	IP
Omafra (2003)	$30 \leq LL \leq 60$	$11 \leq IP \leq 30$
EPA (1989)	-	≥ 10
Cetesb (1993)	≥ 30	≥ 15

FONTE: Adaptado Boscov (2012).

De acordo com os valores obtidos, tanto o solo quanto a mistura podem ser considerados como materiais de plasticidade média o que leva acreditar que esses materiais também irão apresentar compressibilidade média.

Em se tratando dos requisitos mínimos desses limites para uso como camada de base, apresentados na Tabela 2, nota-se que o LL, tanto para o solo quanto para a mistura se enquadram no estabelecido. No entanto

o valor de IP foge ao necessário, o que pode dificultar a trabalhabilidade no campo. A incorporação do rejeito reduziu ainda mais o valor de IP, o que indica que mudanças muito rápidas no estado do material podem ocorrer durante a movimentação no campo. Medidas mais criteriosas devem ser empregadas durante a execução dessa camada no campo, para evitar mudanças nas propriedades.

A granulometria é de suma importância na caracterização do solo e essencial para a escolha do material para camada de base em aterro sanitário.

Os resultados da granulometria e da massa específica dos sólidos, encontram-se na Tabela 3.

O solo é composto por argila, silte e areia, sendo a maior concentração de areia.

Tabela 3. Granulometria e massa específica dos sólidos obtidos do Solo e da mistura Solo/Fosfogesso de acordo com ABNT.

Amostra	Argila (%) $\Phi \leq 0{,}002$ mm	Silte (%) $0{,}002\text{mm} \leq \Phi \leq 0{,}06$ mm	Areia (%) $0{,}06\text{ mm} \leq \Phi \leq 2$ mm	Finos (%) $\Phi \leq 0{,}075$ mm	ρ_s (g/cm³)
Solo	22	33	45	70	3,076
Mistura	-	-	29	74	2,283

A análise granulométrica da mistura não foi possível analisar por essa metodologia. Durante o processo de sedimentação, após 4 minutos do início das leituras no densímetro notou-se a completa sedimentação do material. Este fenômeno pode ser observado na Figura 1. Ao analisar as leituras no densímetro, durante o ensaio, inicialmente ocorreu a redução na densidade da solução, o que já era esperado. No entanto, após quinze minutos, a leitura no densímetro voltou a aumentar, indicando aumento da concentração da solução. Sendo assim, acredita-se que ocorreu trocas iônicas entre a solução e a mistura que provocou primeiramente a sedimentação dos sólidos e em sequência a liberação de algum íon aumentando a concentração iônica da solução.

O fosfogesso é subproduto do sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e o hexametafosfato de sódio constitui-se de $(NaPO_3)_6$. Analisando de uma forma genérica, devido à grande concentração de sódio (Na^+) na solução, este pode ter ocupado o lugar do Ca^{2+}, deixando de agir como defloculante, assim as partículas em suspensão ficam sujeitas a floculação e aglomeração, acelerando o processo de sedimentação.

A análise granulométrica do fosfogesso da mesma região, apresentado por Silva (2016), indicou a predominância de silte. Resultados semelhantes foram apresentados também por Oliveira (2005) e Eleutério (2016).

Analisando a granulometria do solo em estudo com a granulometria do fosfogesso apresentado por Silva (2016), espera-se que a mistura apresenta granulometria predominantemente de partículas finas ($\Phi \geq 0{,}075$ mm). Para maiores afirmações são necessárias análise granulométrica do fosfogesso atual e a mudança do agente defloculante, juntamente com a determinação da Argila Dispersa em Água (ADA).

Em se tratando do uso da mistura para revestimento de fundo de aterros sanitários, Boscov (2012) apresenta os requisitos mínimos quanto a granulometria na Tabela 4.



(a) (b)

Figura 1. Ensaio de Sedimentação: (a) Solo (b) mistura Solo/Fosfogesso.

Tabela 4. Requisitos mínimos da granulometria para a camada de base de aterros sanitários.

Fonte	Finos (%)	Argila (%)	Areia (%)

	$\Phi \leq 0{,}075$ mm	$\Phi \leq 0{,}002$ mm	$\leq 0{,}075\ \Phi \leq 4{,}8$ mm
Omafra (2003)	≥ 50	≥ 20	≤ 45
EPA (1989)	≥ 20	-	-
Cetesb (1993)	≥ 30	-	-

Fonte: Adaptado Boscov (2012).

Analisando a granulometria em relação à fração de areia, tanto a mistura quanto o solo, atenderam os requisitos mínimos de Omafra (2003) *apoud* Boscov (2012). Notando, também, que a mistura diminuiu a concentração de areia o que favorece ainda mais esta exigência. Contudo a porcentagem de fino e argila que o solo apresentou foi de 70% e 22%, respectivamente, se enquadrando também nos requisitos. No entanto, nenhuma afirmação pode ser feita em relação as porcentagens de finos e argila para a mistura, visto que, o ensaio de sedimentação apresentou comportamento fora do padrão.

A massa específica dos sólidos permitiu verificar o efeito do fosfogesso no comportamento do solo quanto a quantidade de partícula, em massa, por volume. Notou uma redução na densidade superior a 25%, como consta na Tabela 3. Devido a coloração do solo ser avermelhada, é considerável a presença de óxido ou hidróxido de Ferro na composição. Sendo assim a presença desse mineral faz com que a massa seca desse solo seja maior, para o mesmo volume, em comparação a mistura que tem apenas 50% do solo.

O solo apresentou valor de massa específica dos sólidos comumente encontrada na literatura para solos com presença do óxido hidróxido de Ferro.

3.2 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica contou com a realização dos ensaios de Compactação e Adensamento Unidimensional.

O resultado do ensaio de compactação para a mistura foi plotado em gráfico de teor de umidade (%) versus massa específica seca (g/cm³) para obtenção das curvas de compactação de acordo com a Energia Normal. O valor obtido para a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) foi de 1,298 g/cm³ e teor de umidade ótimo (w_{ot}) de 37,9 %, como apresentado na Tabela 5.

Observa-se que a o teor de umidade ótimo está abaixo do valor do limite de plasticidade, o que pode favorecer a trabalhabilidade no campo para esse material, já que o índice de plasticidade foi bem estreito. Assim, mudanças repentinas e preocupantes, no comportamento da mistura, podem ser evitadas, tais como, mudança do estado plástico para líquido.

Tabela 5. Teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima.

COMPACTAÇÃO		
$W_{ót}$	37,9	%
$\rho_{dmáx}$	1.298	g/cm³

Esses dados foram essenciais para a moldagem de corpo de prova do ensaio de adensamento.

Durante a execução do ensaio de compactação, percebeu-se que a mistura em seu estado solto apresentava grande volume, porém, quando submetido a compactação era bruscamente reduzida, mostrando grande capacidade de compressão, consequentemente, redução do índice de vazios.

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado na mistura para avaliar a capacidade de compressibilidade quando sujeito a cargas externas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros determinados através do ensaio de adensamento para a mistura solo/fosfogesso

Parâmetro	Valor
Índice de vazios inicial - ei	0,76
Índice de vazios final - ef	0,46
Índice de compressão - cc	0,144

Índice de recompressão - cr	0,027
Coeficiente de compressibilidade - av (kPa^{-1})	$4,5 \times 10^{-4}$
Coeficiente de adensamento - cv (m^2/s)	$3,9 \times 10^{-6}$
Coeficiente de permeabilidade vertical - k (m/s)	$9,98 \times 10^{-9}$

O coeficiente de adensamento (cv), para cada etapa de carregamento, foi semelhante, com valor médio de $3,9 \times 10^{-6}$ m^2/s. Este resultado foi diferente do obtido por Silva (2016) para uma mistura compactada de 80% solo e 20% fosfogesso, que foi de $4,88 \times 10^{-8}$ m^2/s. Esse aumento no cv pode ser pelo uso de um solo com porcentagem de areia de 45%, valor maior que o usado por Silva (2016), que foi de 15%.

O valor do coeficiente de compressibilidade (av) foi de $4,5 \times 10^{-4}$ kPa^{-1} na mesma ordem de grandeza apresentado por Silva (2016). Analisando os resultados, percebe-se que o comportamento da mistura se assemelha a de solos muito compressíveis, o que pode ser um problema, devido a solicitações e recalques diferenciais, podendo criar fissuras e caminhos preferenciais para o percolado.

Esse comportamento compressível foi verificado, já que com a inserção das cargas o relógio comparador apresentava variação constante durante toda as 24 horas do carregamento. O que pode ter favorecido esse desempenho, e o fato da mistura ter sido saturada e inundada durante todo o ensaio. É de conhecimento que o comportamento da mistura se altera com pequena variação do teor de umidade (IP = 3,5). Sendo assim, recomenda-se a realização do ensaio sem saturação e inundação da amostra.

Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível determinar a permeabilidade do solo, para cada etapa. O valor médio obtido para o coeficiente de permeabilidade foi de $9,98 \times 10^{-9}$m/s. Valor este adequado segundo Boscov (2012) que cita que a permeabilidade recomendada para solos compactados de camada de base de aterros sanitários deve ser igual ou menor a 10^{-9} m/s.

3.3 Caracterização Química e Físico-Quimica

Os resultados da análise química do fosfogesso e do solo encontram-se na Tabela 8.

Sendo ambos materiais com pH ácido, acredita-se que o pH se manterá ácido para a mistura, o que não favorece os processos de retardamento de elementos tóxicos pelos vazios do solo. No entanto é necessário conhecer o Ponto de Carga Zero (PCZ) da mistura, para saber exatamente se as cargas disponibilizadas para troca são negativas ou positivas.

Tabela 8. Resultados análise química do solo e fosfogesso separadamente.

	pH	Teor P / %	Teor Ca / %	Teor S / %	Teor Zn / %	Teor Cd / %	Teor Cr / %	Teor Ni / %	Teor Pb / %	Teor Al / %
Amostra F	2,62	0,3818	20,8859	11,9441	0,0234	nd	nd	nd	0,0009	0,0273
Amostra S	5,87	0,0000	0,0281	0,0104	0,0006	nd	nd	nd	0,0001	0,4862

De acordo com Mesquita (2007), até 50% de fosfogesso misturado ao solo, tem-se a constância do pH em torno do pH do solo. Apenas para maiores teores de fosfogesso, observa-se redução no valor do pH.

Não foram encontradas concentrações significativas de metais em nenhuma das amostras. O que favorece o uso da mistura como revestimento de fundo, por não haver possibilidade de contaminação do subsolo e lençol freático, atentando aos padrões da Resolução COPAM 08/2022.

Já a presença do cálcio, junto com outras bases trocáveis, favorece troca catiônica com metais pesados que possam estar presentes no lixiviado, gerado na área do aterro sanitário, e se por alguma falha no sistema de drenagem, estes migrarem para a camada de base, retendo-os.

Em geral, as reações químicas causam um retardamento no transporte de contaminantes em solos (COELHO et al., 2003).

4 CONCLUSÕES

Conclui-se, através dos ensaios realizados e comparações com outros trabalhos, que a mistura solo-fosfogesso se enquadrou a alguns requisitos mínimos, com ressalvas a alguns quesitos como IP, a troca iônica incidida no ensaio de sedimentação, e a compressibilidade alta, parâmetros estes descritos por Boscov (2012), importantes requisitos para garantir um projeto de alta qualidade de construção.

Tido como parâmetro mais importante, o coeficiente de permeabilidade da mistura não se enquadrou aos requisitos de padrões nacionais e internacionais, porém já chegou muito próximo ao exigido, podendo ser estudado um aditivo junto à mistura, favorecendo a melhora do parâmetro. O coeficiente de permeabilidade vertical na grandeza menor ou igual a 10^{-9} garante uma percolação sob gradiente hidráulico unitário mínimo, onde esse percolado com o passar dos anos perderia sua capacidade poluente ao meio.

Este estudo conclui então de forma negativa a utilização do traço escolhido para camadas de base de aterros sanitários, porém não excluí a possibilidade, uma vez que não foi possível a análise de alguns parâmetros, devido ao fenômeno ocorrido na sedimentação, e a possível incorporação de aditivos a mistura para a melhora do coeficiente de permeabilidade vertical, IP e compressibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021). Panorama 2021. 1 ed. p. 22.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16.853. Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. Solo — Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9604. Abertura de peço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro.

Boscov, M. E. G. (2012) Geotecnia Ambiental, 1ª reimpressão, São Paulo, Oficina de Textos.

Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (2022). Deliberação Normativa n° 8. Minas Gerais.

Coelho, H. M. G.; Simões, G. F.; Lange, L. C. & Ferreira, C. F. A. (2003). Estudo preliminar da contaminação por metais pesados na área do *aterro* de *disposição* de *resíduos sólidos urbanos* do *Município* de *Cata Altas – MG*. In: *V Congresso Brasileiro* de *Geotecnia Ambiental - REGEO'2003. Porto Alegre, RS*

Departamento Nacional De Estradas E Rodagem (1994). DNER-ME 093: Solos - Determinação da densidade real. Brasília.

Eleutério et al (2016). Adição de Cal ao Fosfogesso e Análise do Comportamento Mecânico em Função do Tempo de Cura e Energias de Compactação para Utilização na Pavimentação. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Manual de métodos de análise de solo. Brasília.

Jesus, S.C; Andrade, L.C.R; Nascente, R; Eleutério, G.R (2016). Adição de cal ao fosfogesso e análise do comportamento mecânico em função do tempo de cura e energias de compactação para utilização na

pavimentação. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- COBRAMSEG, 2016 -19-22 Outubro, Belo Horizonte, MG.

Mesquita, G. M. (2007). Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Goiânia.

Oliveira, S. M. F (2005). Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária. Universidade de São Paulo, São Carlos.

Silva, J. E (2016). Estudo da viabilidade mecânica da aplicação do fosfogesso em camada de base de aterro sanitário. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.

Sistema Nacional de Informações Sobre Resíduos Sólidos (2019). Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 5 ago. 2022.