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/COBRAMSEG2026.6/74

Características Físicas e Mecânicas e da Permeabilidade da Mistura de Solo/Fosfogesso como Camada de Base de Aterro Sanitário

Anna Julia Furlan Soria
Discente em Engenharia Civil, Universidade Federal do Triangulo Mineiro, Uberaba, Brasil, annajusoria@gmail.com

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

RESUMO: Para a aprovação de uma camada de base de aterro sanitário, a mesma deve apresentar requisitos normativos mínimos, sendo um deles o critério de baixa permeabilidade, a qual necessita ser da ordem de 10^{-9} m/s. Esse critério pode ser obtido através da compactação do solo de base do aterro sanitário. Porém, apenas essa compactação pode não ser suficiente para que se alcance o objetivo da baixa condutividade hidráulica. Além disso, percebe-se uma crescente utilização de materiais provenientes de mineração na construção civil, sobretudo em obras rodoviárias e geotécnicas. Dessa forma, pensa-se na incorporação do fosfogesso em solo de camada de base de aterro sanitário, em substituição da bentonita, visto que o material tem uma larga produção nas indústrias de fertilizantes fosfatados. De acordo com os resultados do ensaio de permeabilidade triaxial, o coeficiente de permeabilidade da mistura de 50% de solo com 50% de fosfogesso atinge a uma ordem de 10^{-8} m/s, não estando em conformidade com o requisito mínimo, bem como os limites de consistência. Contudo, ambos se encontram muito próximos dos valores necessários, sendo facilmente atingidos com o incremento de aditivos na mistura. O ensaio de adensamento também prevê boas perspectivas ao uso do material, já que foi constada pouca expansão, apenas sugerindo atenção nos recalques e deformações da estrutura pelo alto tempo de consolidação. Para o ensaio de resistência, a mistura se mostra frágil com comportamento de areia compacta e seu uso é preocupante para obras geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: fosfogesso, condutividade hidráulica, camada de base e aterro sanitário.

ABSTRACT: For a landfill base layer to be approved, it must meet minimum regulatory requirements, one of which is the criterion of low permeability, which needs to be in the order of 10^{-9} m/s. This criterion can be achieved by compacting the landfill base soil. However, only this compaction may not be sufficient to achieve the objective of low hydraulic conductivity. Addictionally, there is a growing use of materials from mining in civil construction, especially in road and geotechnical works. Thus, the incorporation of phosphogypsum in the sanitary landfills base layer soil is considered, in substitution of bentonite, since the material has a large production in the phosphate fertilizer industries. According to the results of the triaxial permeability test, the coefficient of permeability of the mixture of 50% soil with 50% phosphogypsum reaches an order of 10^{-8} m/s, as well as the consistency limits. Though, both are very close to the required values and are easily achieved by adding additives to the mix. The oedometer test also provides good prospects for the use of the material, since little expansion was found, only suggesting that attention be paid to settlements and deformations of the structure due to the long consolidation time. The strength test showed the mixture to be fragile, with the behavior of compacted sand, and its use is worrying for geotechnical works.

KEYWORDS: phosphogypsum, hydraulic conductivity, base layer and landfill.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, aproximadamente 89,9% da população tem acesso à coleta domiciliar de resíduos, cuja disposição ocorre principalmente em aterros sanitários, onde cerca de 73,3% do descarte é realizado (SNIS, 2021). Um aterro sanitário é destinado especialmente aos resíduos sólidos urbanos (RSU) e, seguindo princípios de engenharia, minimiza os impactos ambientais se comparado a métodos como aterros controlados (que não possuem impermeabilização e tratamento de efluentes) e lixões (onde o descarte é feito a céu aberto).

Em sua fase de projeto, o local do aterro deve ser escolhido considerando a topografia, geologia, clima e hidrologia, sendo essencial caracterizar os resíduos quanto ao tipo, composição, propriedades e volume. Já na etapa construtiva, uma camada drenante e impermeabilizante na base do aterro é fundamental para evitar a percolação de substâncias tóxicas no solo e a contaminação da água subterrânea.

Especificamente, a camada de base é composta por solos finos para reduzir a carga hidráulica e coletar o percolado. A impermeabilização pode ser feita com solos argilosos compactados, geossintéticos ou geocompostos argilosos, ou uma combinação desses materiais. Como exemplo de mistura, a utilização de bentonita é viável na ausência de solos finos para compactação (BOSCOV, 2008). Por esse motivo, também é pensada a possibilidade de incorporação do fosfogesso para uma mistura que, mesmo sendo uma opção econômica, deve apresentar baixa condutividade hidráulica e ser compatível quimicamente com o percolado a longo prazo.

Dessa forma, é evidente a significativa dependência do aterro sanitário em relação ao solo usado na base, estabelecendo, assim, os requisitos mínimos para a impermeabilização dessa camada compactada. Isso inclui considerar o limite de liquidez, índice de plasticidade, fração de finos, teor de argila, areia e pedregulho, e o coeficiente de permeabilidade, além de sua correlação com a umidade e energia de compactação. Entre esses fatores, a granulometria e os limites de consistência são fundamentais para alcançar baixa permeabilidade. Portanto, mesmo que um solo não atenda a todos esses critérios, poderá ser aprovado se sua condutividade hidráulica for igual ou inferior a 10^{-9} m/s (RIBEIRO; MASCARENHA; SANTOS, 2018), dependendo do tipo de compactação e aditivos utilizados. Esse contexto, somado à possibilidade de adicionar materiais à camada de fundo, levanta a proposta de utilizar fosfogesso como parte do revestimento.

Portanto, este estudo visa avaliar uma mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso para utilização na camada de base do aterro sanitário, aproveitando a grande produção desse material na indústria de fertilizantes fosfatados. Porém, são necessários ensaios para garantir um controle geotécnico seguro, considerando a possível liberação de substâncias tóxicas no solo.

A proporção selecionada baseia-se em ensaios anteriores com 20% de fosfogesso, que demonstraram resultados satisfatórios (RAMOS, 2024). Espera-se, também, que esta pesquisa promova um aumento na aplicação de fosfogesso em obras de engenharia civil.

2 METODOLOGIA

Todas as análises físicas e mecânicas foram realizadas na mistura de 50% de fosfogesso e 50% de solo usado em camada de base do Aterro Sanitário de Uberaba/MG, localizado na Avenida Filomena Cartafina (km 17). O fosfogesso foi fornecido, em seu estado natural, pela empresa Mosaic Fertilizantes (Uberaba/MG). Esse resíduo e o solo foram acondicionados em sacos de 50 kg no Laboratório B1/B2 - 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).

2.1 Análises físicas

A caracterização granulométrica foi realizada para o solo e para a mistura por peneiramento e suas classificações foram feitas pelos métodos SUCS e AASHTO. Todos os procedimentos têm como base a norma brasileira NBR 6457 (ABNT, 2016) e foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade de São Carlos (exceto os ensaios de consistência da mistura, os quais foram feitos no Laboratório da UFTM).

Para o Ensaio do Teor de Umidade, três (3) cápsulas metálicas médias foram utilizadas para armazenar o solo anteriormente preparado. As amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,001g e

deixadas em estufa a 100ºC por 24 horas para determinação do teor de umidade, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Para a preparação da amostra da mistura, tanto o solo quanto o fosfogesso foram destorroados e passados na peneira #40 (0,425mm). Após esse processo, a mistura foi umedecida, a fim de que fosse possível realizar os ensaios com resultados satisfatórios.

Com base na NBR 7180/2016 (ABNT, 2016), o ensaio de Limite de Plasticidade foi realizado utilizando-se almofariz em porcelana e espátula para umedecimento da amostra. Em seguida, a mistura foi moldada em placa de vidro esmerilhada, até seu tamanho se igualar ao gabarito cilíndrico metálico.

Subsequentemente, segundo a NBR 6459/2017 (ABNT 2017), o ensaio de Limite de Liquidez foi realizado no aparelho de Casagrande com cinzel para solos argilosos, onde a mistura foi moldada com auxílio de espátula de lâmina flexível para posterior aplicação dos golpes.

Em ambos ensaios, cinco (5) amostras foram colocadas em cápsulas metálicas, pesadas em balança analítica com precisão de 0,001g e deixadas em estufa a 100ºC por 24 horas para determinação do teor de umidade.

Após uma secagem prévia até a umidade higroscópica de 8,17%, o ensaio de compactação foi realizado com reuso de solo e as amostras foram preparadas conforme a NBR 6457/2024 (ABNT 2024). Imediatamente após a homogeneização do solo, o mecanismo de compactação teve início na Energia Proctor Normal, aplicando a energia referente a 26 golpes em cada uma de três camadas de espessuras equivalentes da mistura, colocadas dentro do cilindro, com auxílio de um soquete pequeno ao longo de toda circunferência.

Com a finalização da compactação, o conjunto foi pesado e levado ao extrator de amostras para a retirada do corpo de prova e seguinte constatação de seu teor de umidade (com pesagens da cápsula, da cápsula com solo na umidade do ensaio e da cápsula com solo após 24h de secagem na estufa com temperatura entre 105°C e 110°C).

Por fim, a amostra foi destorroada na bandeja metálica para um novo ciclo do ensaio de compactação com reuso de solo, sendo todo o procedimento acima repetido até a observação da redução de massa com o aumento dos incrementos de água em pelo menos duas pesagens de corpos de prova distintos.

Como resultado, a curva de compactação foi construída por um total de 8 corpos de prova, sendo 5 no ramo seco, 1 próximo à umidade ótima e 2 no ramo úmido, frutos de incrementos de 50ml, 50ml, 50ml, 80ml, 100ml, 100ml, 100ml e 150ml de água.

2.2 Análise da permeabilidade

Uma nova compactação foi realizada para a mistura, de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016) na Energia do Proctor Normal, nos parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima, que correspondem ao máximo grau de compactação. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do cilindro no extrator e moldado, com um anel de 5cm de diâmetro e estilete, para a confecção da amostra para o ensaio de permeabilidade, nas dimensões de, aproximadamente, 5cm de diâmetro e 11cm de altura.

Após essa primeira etapa, o ensaio para a determinação da permeabilidade foi realizado de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2021), na câmara triaxial. Esta foi montada colocando-se a sua base, pedra porosa e papel filtro abaixo do corpo de prova. Sobre ele, colocou-se, também, papel filtro, pedra porosa e o cabeçote superior. Assim, revestiu-se o corpo de prova com membrana de silicone e a montagem da câmara foi finalizada com a parede de acrílico e a tampa superior.

Dessa forma, o interior da câmara foi preenchido com água a fim de saturar completamente o corpo de prova, aplicando-se uma pressão confinante externa σ_3 (para provocar pequenas variações de tensão na amostra) e uma contra pressão interna u (para eliminar o ar dos vazios ainda presentes), mantendo uma diferença de, sempre, 10 kPa ($\sigma_3 > u$). Por fim, elevam-se os níveis de pressão até a ordem de 400 kPa.

Dessa maneira, podem-se retornar os níveis de pressão (σ_3 e u) para os estipulados para as leituras de permeabilidade. Assim, abre-se a válvula de saída do cabeçote superior para que ocorra fluxo na amostra. A análise da permeabilidade foi realizada observando-se as leituras da variação do menisco de água na bureta graduada, determinando-se o volume de água percolada pelo corpo de prova em certo tempo.

O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Equação 1:

$$k = \frac{a*L}{t*A} * log\left(\frac{Hi}{Hf}\right) \quad (1)$$

2.3 Análises mecânicas

O ensaio de adensamento foi executado seguindo as diretrizes da ABNT NBR 16853/2020, cuja amostra para execução do ensaio foi do tipo deformada e compactada em laboratório. Também, foram utilizados os dados de umidade ótima e densidade aparente seca máxima.

Com isso, o equipamento foi configurado para transmissão de carga e medição da deformação e acoplado ao equipamento de cisalhamento direto, sendo permitida a atuação apenas da força axial no sentido vertical. Como aparato para medição de deformação foi acoplado um deflectômetro com precisão de 0,01mm. O entendimento da amplitude de carga transmitida pelo braço de alavanca ao corpo de prova foi feito através do momento fletor no eixo da rótula.

Assim, foi realizado o primeiro carregamento com a carga de assentamento de 5kPa por 10 minutos para ajuste inicial das partículas, com sequência de carregamento dobrando-se as cargas, sendo utilizadas as tensões de 10kPa (estágio 1), 20kPa (estágio 2), 40kPa (estágio 3), 80kPa (estágio 4), 160kPa (estágio 5), 320kPa (estágio 6) e 640kPa (estágio 7). Em todos os estágios, a leitura do deflectômetro foi realizada nos tempos de 0s, 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 24h e leituras adicionais para os estágios com durações maiores que 24h.

Os gráficos de Taylor e Casagrande foram utilizados na análise do desenvolvimento do adensamento primário e secundário em cada estágio de carregamento, cuja troca para o próximo estágio sendo função do início do adensamento secundário. Essa análise ocorreu para todo o ensaio, com exceção do primeiro, que durou o tempo de 24h.

Ademais, a relação entre o logaritmo da tensão vertical no eixo das abscissas e o índice de vazios, no eixo das ordenadas, também foi avaliada com o gráfico que compreendeu todas as tensões utilizadas no ensaio, inclusos os descarregamentos efetuados, os quais ocorreram em 3 momentos: entre o estágio 4 e 5, entre o estágio 6 e 7 e o último ao final de todo o procedimento. Também, os incrementos de carga foram retirados no sentido inverso ao carregamento, com um intervalo de 30 minutos entre as movimentações para possibilitar a estabilização do solo e a leitura inicial e final do deflectômetro. Os dados iniciais do corpo de prova podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características iniciais do corpo de prova do ensaio de adensamento

Dados do anel		Dados iniciais do corpo de prova	
Altura [cm]	3,35	Massa específica [g/cm³]	1,755
Diâmetro [cm]	7,53	Massa específica dos grãos [g/cm³]	2,283
Área [cm²]	44,57	Massa específica seca [g/cm³]	1,287
Volume [cm³]	149,32	Teor de umidade [%]	36,300
Massa [g]	498,33	Índice de vazios	0,770
Massa anel + solo [g]	761,33	Grau de saturação inicial [%]	100,000
Massa de solo [g]	263,00	Grau de compactação [%]	99,180

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado seguindo a ASTM 3080, sendo feita uma envoltória de 4 pontos, iniciando com a aferição das dimensões dos três anéis de cisalhamento que foram utilizados no ensaio. Todos os anéis identificados por 1, 2 e 3 possuem diâmetro de 6,3 cm, altura de 2,85 cm, área interna de 31,172 cm² e volume de 88,84 cm³, diferenciando-se apenas na tara (914,05 g 908,55 g e 913,54 g, respectivamente).

A massa da mistura foi calculada (159,02 g) e compactada no anel de cisalhamento, totalizando 4 corpos de prova para as tensões de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa e, em seguida, foram aferidas as massas de cada conjunto anel + mistura, cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados da massa do anel + mistura para o ensaio de cisalhamento direto

Anel	Tensão aplicada [kPa]	Massa (anel + mistura) [g]
1	50	1073,90
2	100	1067,87
3	150	1073,16
3	200	1066,47

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

Em seguida, os corpos de prova foram então submersos por 24h para saturar a amostra. Após esse período, foi aplicada a carga sobre o corpo de prova para a sua consolidação e, após 24h com a aplicação de carga, foram instalados os extensômetros do tipo LVDT para registrar os deslocamentos horizontais e verticais. Para isso, os dados foram registrados através de um aquisitor, conectado a um computador onde são registradas as leituras dos extensômetros e da célula de carga presente no sistema. Após a realização dos ensaios, as umidades dos corpos de prova foram aferidas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do Limite de Plasticidade (LP), Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) da mistura de solo e fosfogesso encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de consistência da mistura

Amostra	LL	LP	IP
Solo	41	33	8
Mistura	41,50	32,77	8,73

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

Percebe-se que a mistura não atinge os requisitos mínimos para a construção de uma camada de base de aterro sanitário, já que o IP se encontra fora do intervalo para ambas as fontes (mesmo que muito próximo do necessário – 11 < IP), mas o LL se mostra adequado para a utilização dessa mistura (30 < LL < 60) (BOSCOV, 2008).

Para Boscov (2008), a permeabilidade pode ser diminuída de duas maneiras: aumentando energia de compactação, já que o peso específico seco máximo aumenta e teor de umidade ótimo diminui, ou aumentando o teor de umidade de compactação, visto que a estrutura do solo não atingiu seu máximo grau de dispersão na umidade ótima, ou seja, quando se aumenta a umidade de compactação, também há o aumento da dispersão das partículas (FONTOURA FILHO, 2019). Dessa forma, para solos de baixa plasticidade, quando a incorporação do gesso ocorre em maiores teores, o LL pode aumentar em virtude da absorção da água, fato que foi observado na mistura estudada com leve aumento no LL, IP e redução do LP.

Posteriormente, a mistura e o solo fino foram classificados pelos métodos SUCS e AASHTO como ambos pertencentes ao grupo dos siltes de baixa plasticidade ML e A-5, pelas respectivas classificações. Esse fato se mostra satisfatório para a utilização da mistura, já que esse solo fino já é utilizado em camadas de base de aterros sanitários e, mesmo após a substituição de 50% do solo para adição de 50% de fosfogesso, a granulometria das partículas e sua interação com a água não sofreram alterações significativas a ponto de modificar a categoria do solo.

Porém, no ensaio de compactação realizado no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da Universidade Federal de São Carlos (LabGeo/UFSCar), houve constatação de exsudação da água do corpo de prova, o que culmina em duas possibilidades: o teor de umidade está acima do ótimo, ou é característica inerente da mistura proveniente da inserção do fosfogesso. Em ambos os casos, para materiais que apresentam esse tipo de comportamento, mesmo depois de compactados podem se soltar da camada compactada com certa facilidade.

Nesse ensaio, a umidade ótima tem valor de 24,7% e um $\rho_{dmáx}$ de 1,441 g/cm^3. Esses dois valores indicam uma estrutura dispersa e, consequentemente, uma incapacidade de melhorar a permeabilidade com o aumento da umidade na compactação. Por essa razão, apenas o aumento da energia de compactação pode ser capaz de

diminuí-la, já que causa aumento da massa de sólidos em relação à massa de água pela diminuição do índice de vazios.

Além disso, outros 3 corpos de prova foram submetidos à compactação com diferentes umidades e, em todos os casos, houve expulsão de água. Esse fato também torna a segunda possibilidade verdadeira e, então, para melhor compreensão dos mecanismos de saída de água dos poros da mistura compactada, foram realizados estudos pelo ensaio de adensamento.

Segundo Boscov (2008), a permeabilidade diminui muito pouco com o aumento da tensão confinante e do gradiente hidráulico quando a tensão de pré-adensamento aplicada no ensaio triaxial é menor que a tensão aplicada na compactação. Os resultados de permeabilidade presentes na Tabela 4 confirmam essa hipótese. Ainda, percebe-se que os resultados não satisfazem o requisito mínimo de 10^{-9} m/s. Destaca-se que a amostra desse presente sofreu compactação em 3 camadas, com ranhuras entre elas para promover a aderência. Ou seja, mesmo diminuindo os vazios entre as partículas, a água pode ter sido exposta a caminhos preferenciais. Além disso, deve-se atentar ao fato de que há obtenção de permeabilidades uma a três vezes maiores em campo que as obtidas em laboratórios, que são ambientes controlados.

Tabela 4 - Resultados do ensaio triaxial para a permeabilidade

Gradiente Hidráulico	Tensão Confinante [kPa]	Permeabilidade Média [m/s]
20	30	$4{,}21 \times 10^{-8}$
30	40	$7{,}31 \times 10^{-8}$
40	50	$1{,}06 \times 10^{-7}$
40	100	$8{,}19 \times 10^{-8}$
40	150	$8{,}20 \times 10^{-8}$

Fonte: Elaborada pela Autora, 2024.

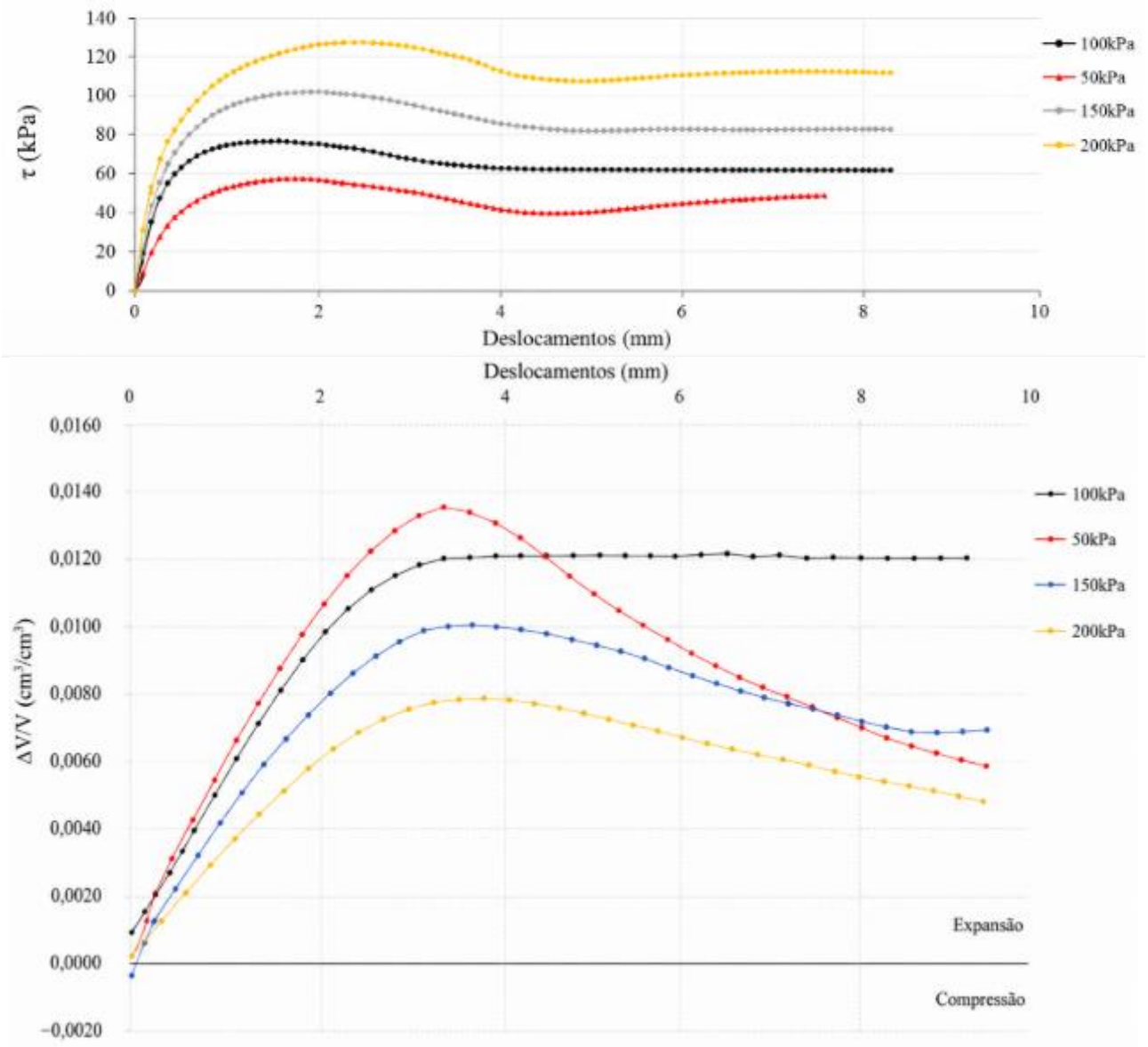
Em sequência, o coeficiente de adensamento somente pôde ser calculado para o Estágio 3, pelo Método de Casagrande (cv = 0,01436), já que nos outros estágios não houve adensamento secundário de forma pronunciada em 20 dias, fato ainda confirmado com o gráfico de índice de vazios pelo logaritmo da tensão, onde não houve estabilização da reta virgem mesmo com uma tensão de 640 kPa. Relacionando esse contexto com o aterro sanitário, o adensamento secundário somente ocorreria após o fim da vida útil do aterro. Também, a não linearidade do índice de vazios a partir da carga de 320 kPa pode indicar quebra dos grãos de fosfogesso que estavam floculados pela ação da água a partir dessa tensão.

A tensão de pré-adensamento foi calculada pelos métodos de Pacheco e Silva (50 kPa) e Casagrande (57,8 kPa), com pequena diferença proveniente da destreza do pesquisador, além dos índices de consolidação do ensaio cc (0,72563), cr (0,02) e cs (0,000217). Esses valores revelam uma expansão muito baixa mesmo com a realização de dois descarregamentos, o que indica menor probabilidade de fissuração da camada com possíveis diminuições de carga e, se for feita a compactação na umidade ótima, as características não-newtonianas do fosfogesso puro não devem implicar em prejuízos, já que o primeiro ensaio não foi observado exsudação, além de que em aterros sanitários a camada impermeabilizante não entra em contato com fluidos quando utilizada a geomembrana.

Finalmente, com os resultados do ensaio de cisalhamento apresentado na Figura 1, observam-se resistências de pico máximas moderadas, semelhante a solos pré-adensados. Porém, pela influência do fosfogesso, o qual se assemelha com um material normalmente adensado, não é possível afirmar se os picos são resultados da mistura realmente ser pré-adensada ou se é decorrência da quebra dos grãos devido à geometria em bastão das partículas de fosfogesso. De qualquer forma, esse comportamento frágil caracterizado por pico de tensão se torna um ponto preocupante para utilização da mistura em obras de caráter geotécnico.

Ademais, percebe-se uma resistência residual após a de pico que, juntamente com a detecção de uma expansão do corpo de prova, resulta em comportamento de areias compactas. Isso acontece porque quando o fosfogesso entra em contato com água, flocula-se gerando grãos de maiores dimensões, os quais são mobilizados, fazendo com que a mistura tenha comportamento semelhante a areia até a quebra desses grãos. Nessa exata fase, ocorre uma expansão no material e um pico de tensão. Após a quebra dos grãos de fosfogesso floculados, o solo passa a ter o comportamento de uma argila normalmente adensada, com resistência residual e uma redução na expansão, visualizada para deslocamentos a partir de 4mm e justificada pelo reajuste das partículas de fosfogesso, cujos formatos são lamelares.

Figura 1 - Cisalhamento direto para Tensão x Deslocamento e Deformação x Deslocamento



Fonte: da Autora, 2024.

No geral, a envoltória de tensões mostra que a mistura tem resultado coesivo análogo com areia compacta devido à boa coesão pela cimentação das partículas e comportamento semelhante a silte com a baixa plasticidade. Destaca-se que o fosfogesso diminui a coesão das partículas, pois a floculação prejudica a interação das partículas de menor diâmetro e aumenta a quantidade de água intersticial (MATOS, 2011), além de que as partículas de solo não se misturam com as do fosfogesso pois, como esse elemento se assemelha a silte, não há interação devido à inexistência cargas.

Nesse contexto, essa floculação sucede por ser um fluido não newtoniano, ou seja, o mesmo não retém a água, a qual fica sempre intersticial. Por essa razão, qualquer impacto provocado nele, a água sai pelos poros (bem como é observado em areias), se tornando um parâmetro desfavorável para utilização dessa mistura em camada de base de aterros sanitários.

4 CONCLUSÃO

Os resultados físicos e da permeabilidade mostraram que a mistura de 50% de solo e 50% de fosfogesso, apesar de muito próximos dos requisitos mínimos e do fosfogesso não alterar significativamente a granulometria, a mistura não satisfaz as condições de um solo destinado à camada de base de aterros sanitários.

Também, o adensamento sugere uma atenção ao tempo de consolidação em razão dos recalques que a estrutura da base do aterro irá realizar, já que o tempo para atingir o adensamento secundário aumenta com a quebra das partículas de fosfogesso ainda no adensamento primário. Ainda, o ensaio sugere baixa expansão, fato fundamental para que não se prejudique a permeabilidade da camada. Já para a resistência da mistura, a quebra das partículas de fosfogesso e seu comportamento a areias compactas inviabiliza a utilização nos aterros, já que sugere um desempenho frágil após a aplicação de cargas.

Sugere-se, então, futuros estudos que reduzam uma pequena quantidade de fosfogesso na mistura, já que para 50%, o coeficiente de permeabilidade chegou à ordem de 10^{-8} m/s, valor com pouca diferença do necessário de 10^{-9} m/s. Além disso, o uso de aditivos também pode melhorar a permeabilidade para essa mesma mistura. A energia de compactação também pode ser aumentada caso o estudo do comportamento do fosfogesso não resulte em prejuízos à estrutura do aterro sanitário, além de nova análise que se mostre positiva para os parâmetros de resistência.

AGRADECIMENTOS

A autora expressa sincera gratidão à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) por proporcionar o ambiente e os recursos necessários para a realização deste trabalho, especialmente ao Professor Fernando Henrique Martins Portelinha, que, com generosidade e disposição, esteve sempre pronto a auxiliar nos experimentos necessários, contribuindo de forma decisiva para o sucesso desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solos – 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, 7 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9604. *Solos – Condições exigíveis para abertura de poço de inspeção, de trincheira e para retirada de amostras - Suporte Sondagens e Ensaios Geotécnicos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14545. *Solos – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variavel*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16853. *Solo - Ensaio de adensamento unidimensional*. Rio de Janeiro.

ASTM International (1994). D. 3-9. ASTM 3080. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. Annual book of ASTM standards, v. 4, p. 290-295.

Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. São Paulo, Oficina de Textos, 2008.