



Viabilidade da Utilização de Solo Melhorado com Cal para Camada de Base em Aterro Sanitário Segundo a sua Condutibilidade Hidráulica e Compressibilidade

João Victor Machado da Palma 1

Acadêmico do Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, joao.vmp14@aluno.ifsc.edu.br

Fábio Krueger da Silva 2

Professor, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

Elivete Carmen Clemente Prim 3

Professor, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, elivetecarmen.prim@ifsc.edu.br

Fernanda Simoni Schuch 4

Professor, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fernandass@ifsc.edu.br

RESUMO: A destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil deve seguir as técnicas e padrões estabelecidos nas legislações ambientais, resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normas da ABNT, em especial, estabelecem parâmetros de condutibilidade hidráulica e comportamento mecânico adequados ao local de destinação. Com o intuito de verificar o solo disponível numa área da Região da Grande Florianópolis pode ser utilizado para este fim, coletou-se o solo e fez-se a caracterização através de ensaios de laboratório. Após, realizou-se o ensaio de condutibilidade hidráulica e de compressibilidade, tanto para o solo puro quanto para o solo com adição de cal (3%), com amostras remoldadas, a fim de se averiguar possíveis melhorias obtidas com a adição. A mistura solo-cal foi ensaiada em diferentes idades (7 dias e 28 dias). Realizou-se ensaio de permeabilidade a carga variável e observou-se variação da condutibilidade hidráulica (K_p) para 7 e 28 dias de cura hermética. No ensaio de compressibilidade observou-se que o comportamento mecânico das amostras melhoradas com cal variou em relação à do solo puro. A tensão de pré-adensamento aumenta nas amostras com cal e todas as amostras forneceram valores que o qualificam para serem utilizados como camada de base em aterro sanitário.

PALAVRAS-CHAVE: Condutibilidade hidráulica do solo, Aterro Sanitário, Compressibilidade do solo.

ABSTRACT: The disposal of municipal solid waste (MSW) in Brazil must comply with the techniques and standards established by environmental legislation, resolutions of the National Environmental Council (CONAMA), and the technical standards of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). In particular, ABNT standards define the required parameters for hydraulic conductivity and mechanical behavior of soils designated for landfill construction. To assess whether the soil available in a specific area of the Greater Florianópolis Region meets these requirements, soil samples were collected and characterized through laboratory testing. Hydraulic conductivity and compressibility tests were subsequently performed on both natural soil and soil treated with 3% lime, using remolded samples, in order to evaluate the improvements resulting from stabilization. The soil-lime mixtures were tested at different curing periods (7 and 28 days). Variable head permeability tests revealed variations in hydraulic conductivity (K_p) after 7 and 28 days of hermetic curing. In addition, compressibility tests indicated that the mechanical behavior of lime-



treated samples differed from that of the natural soil. The preconsolidation pressure increased in the stabilized samples, and the results demonstrated that all samples provided values consistent with the requirements for use as a base layer in sanitary landfill construction.

KEYWORDS: soil hydraulic conductivity, sanitary landfills, soil consolidation.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de adições ao solo para melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas ocorre no Brasil e no mundo há tempos. Os materiais adicionados são diversos como fibra PET (Nichele et al. 2021), lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) (Prim, 2011), cimento portland (Pereira et al. 2020), cal hidratada (Schweiss, 2023), cal e fibra PET (Palma et al. 2024), entre outros. Os teores de adição e o tipo de adição variam de acordo com a finalidade da mesma. Para esta pesquisa, buscou-se utilizar a cal hidratada, um material disponível em todas as regiões do Brasil, e com eficácia comprovada de melhoria das propriedades de um solo, objetivando-se averiguar sua utilização em camada de base de aterro sanitário urbano.

Faz-se necessário agora conceituar alguns termos utilizados. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na ABNT NBR 8419:1992 define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando seus impactos ambientais, método este que utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permitível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores, se necessário.”

Nunes (2022) explica que a camada de base de aterros sanitários conhecida como *liner* é responsável pela impermeabilização do empreendimento, visando evitar a percolação de fluidos e a contaminação do solo subjacente. Também explica que os sistemas de impermeabilização podem variar sendo utilizadas técnicas de solo compactado, geossintéticos, solo-cimento, solo-bentonita, solo-cal entre outros. Tais sistemas devem obedecer a critérios quanto à sua permeabilidade e compressibilidade.

Portanto, sendo a permeabilidade do solo um fator decisivo para a implantação de aterros sanitários, é necessário aqui explicá-lo. A permeabilidade dos solos é estudada a partir da aplicação da Lei de Darcy. Esta Lei considera que para que haja fluxo de água entre dois pontos A e B de um meio poroso é necessário que haja uma diferença de carga total (ΔH) onde z é a carga altimétrica e $u/\gamma o$ a carga piezométrica (Massad, 2010).

$$\Delta H = z + \frac{u}{\gamma o} \quad (1)$$

A relação matemática acima descrita (fórmula 1) ocorreu com base no clássico experimento do permeâmetro (fórmula 2) em que considera Q a vazão de água que percola uma área A da seção transversal do permeâmetro, i (gradiente hidráulico) ou seja, a perda de carga total por unidade de comprimento e, o k (coeficiente de permeabilidade do solo) que mede a resistência ‘viscosa’ ao fluxo de água (Massad, 2010).

$$Q = k * i * A \quad (2)$$

A ABNT NBR 15849:2010 dá diretrizes para projeto de aterro sanitário de pequeno porte (os que recebem até 20 toneladas/dia ou menos de resíduos) tratando da permeabilidade ou condutibilidade hidráulica como um dos elementos de proteção ambiental assumindo como critérios, valores de coeficientes de permeabilidade. Tais critérios levam em conta a profundidade do lençol freático e admite que, dependendo da referida profundidade, admitem-se coeficientes mínimos da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s. Além



2025

daquela, a ABNT NBR 13896:1997 define que, o sistema de impermeabilização de base dos aterros sanitários, deve apresentar coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s. Em casos em que o subsolo apresenta permeabilidade superior, como 10^{-5} cm/s ou 10^{-4} cm/s, admite-se o uso de soluções complementares (como camadas de solo compactado ou barreiras geossintéticas), desde que previamente aprovadas pelo órgão ambiental competente (ABNT, 1997).

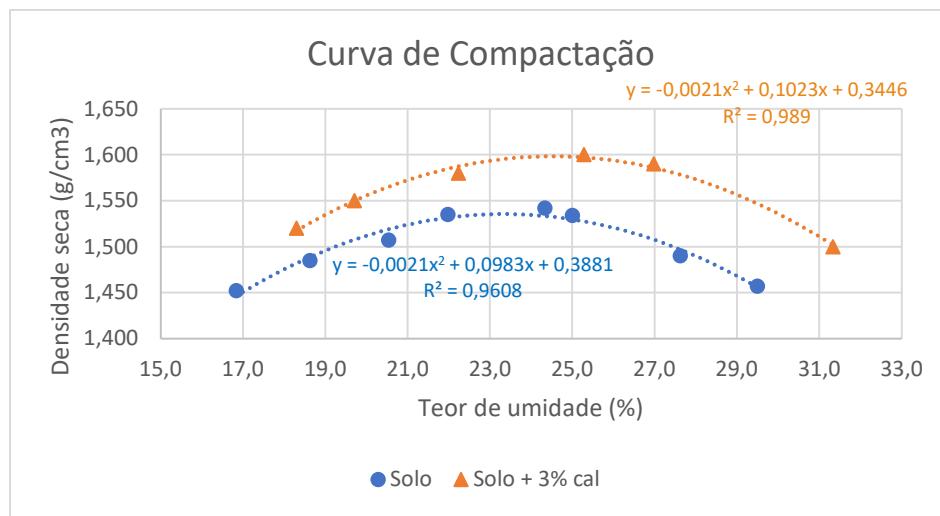
A compressibilidade do solo de fundação também é um parâmetro de projeto importante. Na engenharia geotécnica a determinação e análise de deformações devido a carregamentos verticais são de suma importância. Estas podem ser rápidas quando ocorrem em solos arenosos ou argilosos não saturados e lentas quando ocorrem em solos argilosos saturados (PINTO, 2006). Os aterros sanitários por receberem resíduos com alto índice de vazios já passam por um processo de compressão durante sua vida útil. Segundo Dal-Prá (2018) alguns autores relatam deformações da ordem de 11% a 24%. Notoriamente, um solo de fundação não pode atingir essa grandeza de recalques.

Por fim, dada a necessidade de estudos com finalidade preventiva para *liners* de aterros sanitários e sua importância para a sociedade, objetiva-se ao final desta pesquisa compreender a melhoria das características de permeabilidade e adensamento numa mistura solo-cal, verificando-se sua aptidão para ser utilizado como camada de base em aterros sanitários de pequeno porte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Coletou-se solo em campo, a 1,5 metro de profundidade, armazenando-o em tonéis para proceder com o processo experimental da pesquisa. O solo foi previamente caracterizado conforme descreveu Schuch et al. (2024). Trata-se de um solo que possui 53% de argila, 18% de silte, 27% de areia e 2% de pedregulho. É, portanto, classificado como argila segundo o diagrama trilinear. Possui massa específica dos grãos igual a $2,61 \text{ g/cm}^3$, Limite de Liquidez igual a 52%, Limite de Plasticidade igual a 38%, Índice de Plasticidade (IP) igual a 14, então, quanto à sua plasticidade, podemos dizer que se trata de um solo medianamente a altamente plástico, um solo plástico com matriz argilosa. No ensaio de compactação no solo natural, utilizando-se energia normal e cilindro de Proctor pequeno, obteve-se uma umidade ótima (h_{ot}) igual a 24,4% e uma peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{smáx}$) igual a $1,590 \text{ g/cm}^3$. Já o solo melhorado com 3% de cal forneceu como resultado uma h_{ot} de 23,5% e $\gamma_{smáx}$ de $1,535 \text{ g/cm}^3$ (Figura 1).

Figura 1. Curvas de compactação



Fonte: Schuch et al (2024)

Posteriormente, moldou-se no cilindro pequeno de Proctor, na umidade ótima e na densidade seca máxima, novos corpos de prova (CPs) de solo natural e melhorado com cal, para serem utilizados no ensaio de condutibilidade hidráulica, bem como no de compressibilidade. Para o ensaio de compressibilidade,



também foi preciso cravar o anel no cilindro para a moldagem do corpo de prova. (Figura 2)

Figura 2. Cravando o anel metálico do ensaio de compressibilidade no cilindro de solo



Fonte: dos autores

2.1 Determinação da Condutibilidade Hidráulica (K_p)

Para serem submetidos ao ensaio de condutibilidade hidráulica em laboratório os CPs de solo melhorado com 3% de adição de cal (em relação à massa seca) foram mantidos em cura hermética (ensacado e armazenado em tonel com tampa) por 7 e 28 dias. O de solo puro foi moldado e imediatamente ensaiado.

O ensaio de condutibilidade hidráulica dos solos foi realizado à carga variável pois a água percola pela amostra mais lentamente. Portanto, utilizou-se como referência a ABNT NBR 14545:2021 que trata do método de ensaio necessário. A figura abaixo (Figura 3) mostra o CP posicionado no permeâmetro com bentonita fazendo a vedação entre a lateral do CP e o recipiente do permeâmetro.

Figura 3: Posicionamento do corpo de prova no permeâmetro



Fonte: dos autores.

2.2 Determinação da compressibilidade das amostras

O procedimento de moldagem dos CPs submetidos ao ensaio de compressibilidade foi o mesmo realizado para a condutibilidade hidráulica, tendo sido, posteriormente, extraídas amostras no interior dos cilindros para serem submetidas aos carregamentos.

As cargas aplicadas correspondem às seguintes tensões em kg/cm^2 para o solo puro: 0,10 ; 0,30 ; 0,69; 1,52 ; 3,15 ; 6,53 ; 12,17 ; 23,26. Para o solo com cal aplicou-se um estágio a mais de carregamento que correspondeu a 45,55 kg/cm^2 . Realizou-se 4 estágios de descarregamento em todas as amostras. Após a elaboração da curva, pelo método de Pacheco & Silva, obteve-se a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}), Coeficiente de Recompressibilidade (Cr), Coeficiente de Compressibilidade (Cc) e Coeficiente de Descarregamento (Cd).



3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade do solo analisado encontram-se na Tabela 1:

Tabela 1. Resultados de K_p (cm/s)

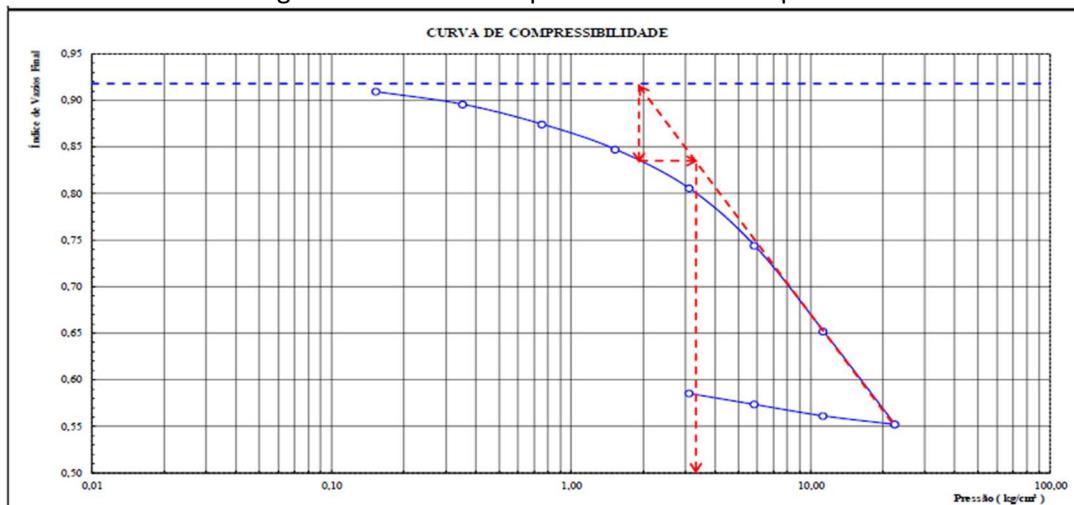
Medições	Solo puro	Solo melhorado com cal – 7 dias	Solo melhorado com cal – 28 dias
K_p (cm/s)	$3,15 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Schuch et al., 2024.

Nota-se que em relação ao solo natural, no ensaio conduzido aos 7 dias, houve queda no valor no índice de permeabilidade indicando provavelmente a flocação que ocorre nas primeiras idades de misturas de solo + cal. A formação de flocos acaba por aumentar a permeabilidade. Contudo, após um tempo maior para as reações químicas se desenvolverem (28 dias) percebe-se que houve ganho de aproximadamente 36% na estanqueidade de percolação de água na mistura. Os resultados mostraram que o solo misturado com cal atende aos requisitos impostos por normas e legislações para ser utilizado em aterros sanitários de pequeno porte. ABNT NBR 13896:1997 define que o coeficiente de permeabilidade deve igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s, portanto, tanto o solo puro quanto o melhorado atendem a este requisito, sem a necessidade de uma impermeabilização complementar.

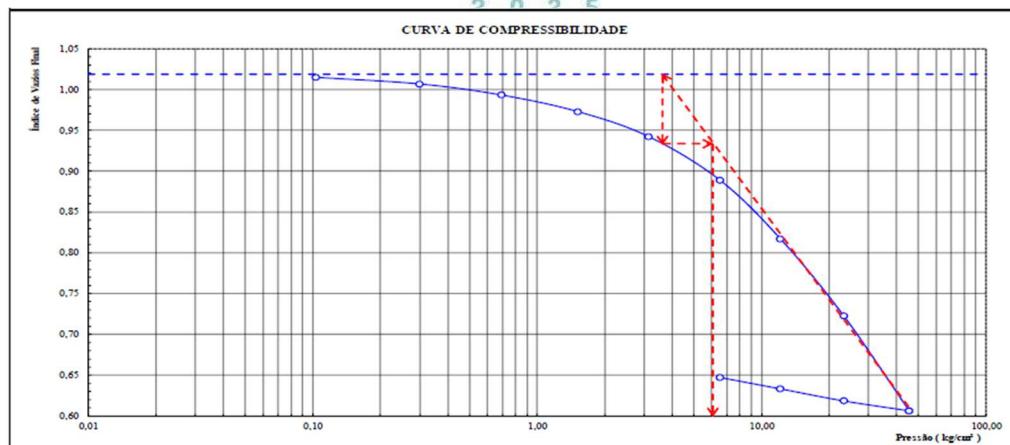
As figuras 3, 4, e 5, dispostas a seguir, mostram o resultado gráfico do ensaio de compressibilidade realizado nas amostras remoldadas de solo.

Figura 3. Curva de compressibilidade do solo puro



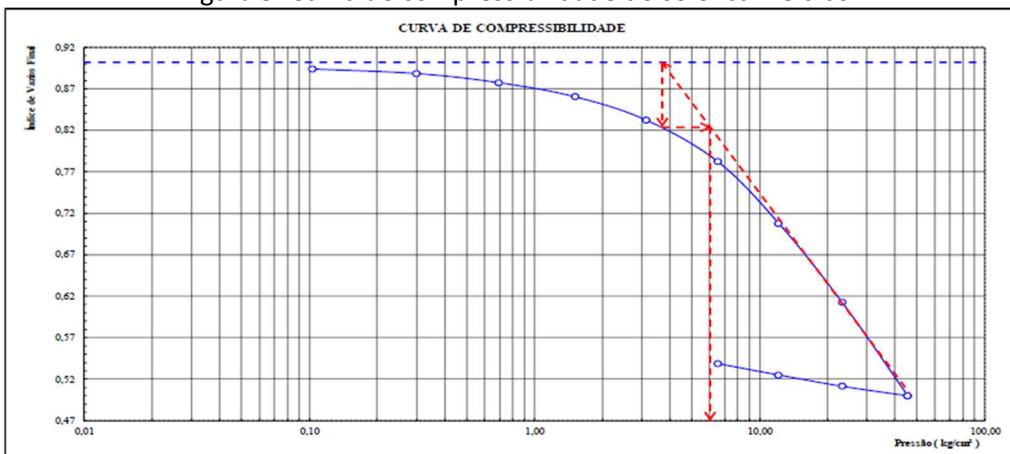
Fonte: dos autores

Figura 4. Curva de compressibilidade do solo+cal 7 dias



Fonte: dos autores

Figura 5. Curva de compressibilidade do solo+cal 28 dias



Fonte: dos autores

Os resultados numéricos do ensaio de compressibilidade do solo constam na Tabela 2:

Tabela 2. Resultados curva de compressibilidade

Amostra	σ'_{vm} (kPa)	Cr	Cc	Cd
Solo puro	320	0,05	0,33	0,04
Solo + cal 7 dias	589	0,03	0,36	0,05
Solo + cal 28 dias	589	0,03	0,36	0,05

Como esperado, verificou-se um aumento na tensão de pré adensamento virtual decorrente da cimentação entre as partículas de solo provocada pela adição de cal. Na análise dos coeficientes de compressibilidade, nota-se que houve poucas variações em relação ao solo natural. Provavelmente por todos os corpos de prova terem sido moldados na mesma energia de compactação. Conclui-se, portanto, que tais coeficientes foram pouco afetados pela adição de cal. Os dados obtidos no ensaio de adensamento mostram que o solo analisado vai sofrer uma variação volumétrica quando submetido ao peso de camadas de resíduos sólidos urbanos da ordem de 33% para o solo puro e 36% para o solo com adição de cal, considerando-se que o carregamento seja superior a 320kPa e 589 kPa, respectivamente.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que o solo argiloso analisado, especialmente após a adição de 3% de cal, apresenta comportamento técnico compatível com os critérios exigidos pelas normas ABNT NBR 13896:1997 e ABNT NBR 15849:2010 para utilização como camada de base em aterros sanitários de pequeno porte. A condutibilidade hidráulica verificada ficou na ordem de 10^{-7} cm/s, valor inferior ao limite máximo estabelecido, o que demonstra sua capacidade de limitar a percolação de lixiviados.

Em termos mecânicos, observou-se um ganho significativo na tensão de pré-adensamento com a adição de cal, embora os coeficientes de compressibilidade tenham se mantido próximos aos do solo natural, indicando maior resistência, mas sem aumento relevante na deformabilidade.

Dessa forma, conclui-se que a estabilização com cal pode ser considerada uma alternativa viável, especialmente em regiões onde o uso de geossintéticos é economicamente inviável ou tecnicamente desaconselhado.

Recomenda-se, contudo, que estudos complementares em campo sejam realizados, principalmente visando avaliar a condutibilidade hidráulica de camadas profundas não compactadas e o comportamento a longo prazo da camada de base, considerando os efeitos de recalques induzidos pela decomposição dos resíduos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo apoio concedido na forma de bolsas de pesquisa para o discente envolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. _____.8419:1992: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos - Procedimentos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

_____. 16853: Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, 2020.

_____.13986:1997: Aterros de Resíduos Não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____.15849:2010: Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros Sanitários de Pequeno Porte – Diretrizes para Localização, Projeto, Implantação, Operação e Encerramento. Rio de Janeiro, 2010.

DAI-PRÀ, L. B.; Desenvolvimento e aplicação de um modelo de predição de recalques no aterro sanitário da CRVR – Unidade São Leopoldo/RS. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018. 216p.

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnica. 2a. Ed. São Paulo. Oficina de Textos. 2010.

NUNES, Thayná da Silva. Compressibilidade de solos utilizados como liners em aterros sanitários. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2022.

NICHELE, C. D. ; PEREIRA, Letícia Alves ; SILVA, F. K. ; SCHUCH, Fernanda. Avaliando a adição de polietileno tereftalato e cimento portland para melhoria das propriedades de um solo. In: e-GEOSUL - 1º Simpósio Virtual de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 2021. Anais do e-GEOSUL 2021, 2021.

PALMA, J. V. M. ; SILVA, A. K. S. ; SILVA, F. K. ; SCHUCH, Fernanda . Alterações Provocadas pela Adição de Cal e Fibra PET num Solo Argiloso Quanto a: Resistência a Compressão, Tração e Compressibilidade. In: COBRAMEG 2024, 2024, Balneário Camboriú/SC. Anais do COBRAMSEG2024, 2024.



PEREIRA et al.; Variações na Curva de Compactação de um Solo Melhorado com Cimento. In: In: 9º SictSUL, 2020, Evento online. Anais do 9º SIctSUL, 2020.

PINTO, C. S.; Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. São Paulo/SP. Oficina de Textos. 2006.

PRIM, E. C. C.; Utilização de lodos de estação de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 2011. 285p.

SCHUCH, Fernanda; SILVA, F. K. ; PALMA, J. V. M. . Condutibilidade Hidráulica de um Solo Argiloso Melhorado com Cal para fins de Utilização como Camada de Aterro Sanitário. In: COBICET 2024, 2024, online. Anais do V COBICET, 2024.

SCHWEISS, E. V.; Estudo do comportamento mecânico de misturas solo-RCD estabilizadas com cal para aplicação em obras geotécnicas. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Civil. 2022. 82p.