

ANÁLISE DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM UM SOLO FINO ESTABILIZADO COM CAL E CIMENTO

Amanda Dalla Rosa Johann

Professora Adjunta, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil,
amandajohann@utfpr.edu.br

Estela Bonagurio Julio

Engenheira Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, estela_bona@hotmail.com

Maria Paula Guillen Cavarsan

Engenheira Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil,
mariaacavarsan@alunos.utfpr.edu.br

RESUMO: Na engenharia os solos são considerados aglomerados de partículas provenientes da decomposição de rochas, e por serem muito variáveis, podem apresentar problemas de estabilidade. Por ser uma solução mais econômica e favorável ao meio ambiente, a estabilização de solos é o processo mais utilizado para o melhoramento de solos. A presente pesquisa tem como objetivo analisar os efeitos da energia de compactação em um solo silte argiloso, da formação Guabirotuba, estabilizado com cal e cimento. Para esta análise, foram definidos os teores de 3%, 5%, 7% e 9% para os aditivos químicos no solo. Realizou-se ensaios de compactação nas energias intermediária e modificada. Corpos de prova referentes a cada uma das misturas foram moldados e após 28 dias de cura foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. A partir dos resultados obtidos, observa-se que em geral, as misturas apresentam maior resistência à compressão simples quanto maior for a energia de compactação e o teor de aditivo químico adicionado. Além disso, partindo-se de uma resistência alvo, considerada como a resistência de projeto, é possível avaliar a relação custo/benefício para a escolha do melhor método de estabilização do solo: aumento da energia de compactação ou teor de aditivo químico.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cal, Solo-cimento, Energia de compactação, Estabilização de solos.

ABSTRACT: In engineering, soils are considered agglomerations of particles resulting from the decomposition of rocks, and because they are highly variable, they can present stability problems. Because it is a more economical and environmentally friendly solution, soil stabilization is the most widely used process for soil improvement. This research aims to analyze the effects of compaction energy on a clayey silt soil from the Guabirotuba formation, stabilized with lime and cement. For this analysis, chemical additive levels of 3%, 5%, 7%, and 9% were defined in the soil. Compaction tests were performed at intermediate and modified energy levels. Test specimens from each of the mixtures were molded and, after 28 days of curing, subjected to simple compression strength testing. Based on the results obtained, it can be observed that, in general, the higher the compaction energy and the higher the chemical additive content, the higher the compressive strength of the mixtures. Furthermore, starting from a target resistance, considered as the design resistance, it is possible to evaluate the cost/benefit ratio for choosing the best soil stabilization method: increasing compaction energy or chemical additive content.

KEYWORDS: Soil-lime, Soil-cement, Compaction energy, Soil stabilization.

1 INTRODUÇÃO

Os solos são classificados como um aglomerado de partículas provenientes da decomposição da rocha, podendo ser escavados com facilidade, e são muito utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas (ORTIGÃO, 2007). Por apresentarem grande diversidade, mesmo em regiões próximas, é extremamente importante realizar um estudo minucioso do solo antes desse ser utilizado como suporte ou



fundação para uma obra de engenharia, pois muitos solos precisam ser melhorados através de técnicas de estabilização para suportar a carga solicitada.

Os principais métodos de estabilização de solos são a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos, podendo ser utilizados separadamente ou combinados, o que é mais usual. A estabilização química pode ser realizada com diferentes tipos de aditivos, como a cal, o cimento, a emulsão betuminosa, pozolanas, produtos industriais e resíduos industriais (BRITO E PARANHOS, 2017).

Os aditivos mais utilizados atualmente são a cal e o cimento, pois permitem um aumento da resistência à compressão simples do solo, além de uma rigidez inicial maior. Além disso, para otimizar os efeitos destes aditivos, a combinação com a estabilização por compactação é muito efetiva, sendo relatada por diversos autores (LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009; CAVARSAN, 2018; SALES et al., 2017; SALDANHA et. al 2025). Contudo, observa-se uma insuficiência de pesquisas que analisem comparativamente o efeito das energias de compactação nesse tipo de solo e aditivos.

O ensaio de compactação, ou também chamado como ensaio de Proctor, determina o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima de solos quando compactados. As energias especificadas para este ensaio são a normal, a intermediária e a modificada (ABNT, 2016b). A compactação diminui os vazios do solo e visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas também, nos aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água (CAPUTO, 1988).

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da adição de cal e de cimento em um solo da formação Guabirotuba, através de ensaios de resistência à compressão simples em amostras moldadas na energia de compactação intermediária e modificada. Os resultados obtidos também foram comparados com os resultados de Sales et al. (2017), que estudou os mesmos materiais desta pesquisa com amostras moldadas na compactação de energia normal.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa pertence à Formação Guabirotuba e foi caracterizado por Sales et al. (2017), que através de ensaios de caracterização por peneiramento e sedimentação, determinou a sua curva granulométrica. A partir da curva granulométrica verifica-se que o solo é formado por 76% de materiais finos e 24% de materiais granulares, sendo eles: 15% de argila, 61% de silte, 10% de areia fina, 9% de areia média, 4% de areia grossa e 1% de pedregulho (ABNT, 2016a). O solo em estudo é classificado pelo método SUCS como um silte de baixa compressibilidade (ML) e pelo sistema TRB como solo argiloso (A-7-5). O resultado obtido para o índice de plasticidade foi de 14% e a massa específica real dos grãos foi de 2,75 g/cm³ (Sales et al., 2017).

2.1.3 Cal

Para esta pesquisa, foi utilizada a cal hidratada, tipo CH-III. O resultado obtido para a massa específica real dos grãos na pesquisa de Sales et al. (2017) foi de 2,42 g/cm³ para a cal.

2.1.4 Cimento

O cimento a ser utilizado para o estudo será o Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI. O resultado obtido para a massa específica real dos grãos na pesquisa de Sales et al. (2017) foi de 3,14 g/cm³ para o cimento.

2.1.4 Água

Nos ensaios de caracterização foi utilizado água destilada, como solicitado pelas normas, com intuito de evitar reações químicas indesejadas, como reações dos sais e/ou impurezas da água com a cal e o cimento.



A mesma foi empregada também nos ensaios de compactação e na moldagem dos corpos de prova, garantindo a precisão e a reprodutibilidade dos resultados, pois impurezas poderiam influenciar o processo de cura e, consequentemente, a resistência à compressão simples das misturas.

2.1.5 Moldagem dos corpos-de-prova

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados para corpos de prova de solo natural, solo-cimento e solo-cal, sendo estes últimos com teor de aditivo de 3%, 5%, 7% e 9%. Para a moldagem dos corpos de prova, foi considerado o teor de umidade e o peso específico seco aparente máximo obtidos nos ensaios de compactação com energia intermediária e modificada (ABNT, 2016b), conforme tabelas 1 a 3. Os resultados obtidos por Sales et al. (2017), para as energias normal também foram adicionados às tabelas 1 a 3, para fins de comparação.

Tabela 1. Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo natural.

Tabela 1. Legenda em Times New Roman, tamanho 11.

Energia de Compactação	Peso específico aparente seco máximo γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade ótimo (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,51	27,0
Intermediária	1,62	20,5
Modificada	1,70	15,0

Tabela 2. Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cal.

Energia de Compactação	Peso específico aparente seco máximo γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade ótimo (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,44	29,8
Intermediária	1,60	19,0
Modificada	1,70	18,0

Tabela 3. Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação da mistura solo-cimento.

Energia de Compactação	Peso específico aparente seco máximo γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade ótimo (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,48	27,1
Intermediária	1,62	19,0
Modificada	1,70	20,0

Tendo como base os parâmetros obtidos no ensaio de Proctor na energia de compactação intermediária e modificada, moldaram-se corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Após a pesagem dos materiais, o solo seco e os aditivos foram misturados até o conjunto adquirir consistência uniforme. Em seguida a água foi adicionada, continuando o processo de mistura até que fosse obtida a homogeneidade. Após o processo de mistura, a composição foi armazenada em recipiente fechado para evitar perda de umidade para o ambiente antes da moldagem. Três amostras de cada mistura foram retiradas para verificação da umidade.

O processo de moldagem foi realizado em prensa hidráulica manual, de forma estática, em três camadas de igual massa, com escarificação manual entre camadas. Foram moldados 5 corpos de prova para cada traço. Após o processo de moldagem, os corpos de prova foram imediatamente extraídos do molde, e seus respectivos pesos, diâmetros e alturas medidos novamente para a verificação dos parâmetros desejados para esta pesquisa. Os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos individuais e dispostos em câmara úmida durante o período de 28 dias de cura.

2.1.6 Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

A realização dos ensaios de resistência à compressão simples seguiu os procedimentos gerais descritos pela ABNT (2012), onde os corpos de prova foram submetidos a rompimento em prensa hidráulica universal, da marca EMIC, modelo DL30, com capacidade máxima de 30 toneladas.



A resistência à compressão simples de cada corpo de prova foi obtida através da divisão da força aplicada pelo equipamento pela área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico. Para cada mistura foram rompidos cinco corpos de prova, e obtida a resistência à compressão simples através da média aritmética entre os resultados obtidos. Os ensaios foram realizados com deformação controlada.

3 RESULTADOS

A partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, foram obtidas as tensões médias entre os corpos de prova para cada mistura estudada. A tabela 4 e a Figura 1 apresentam os resultados encontrados nesta pesquisa e na de Sales et al. (2017), para fins de comparação, para todos as porcentagens de cal e de cimento utilizadas.

A partir da Figura 1, observa-se que, independentemente da energia de compactação utilizada, a resistência à compressão simples aumenta com o aumento da porcentagem dos agentes cimentantes (% de aditivo, cal ou cimento). Este fato é observado em outras pesquisas, como Lopes Junior (2007) e Dalla Rosa (2009), que também utilizaram uma porcentagem crescente de cal na estabilização do solo utilizado em suas pesquisas.

Na Figura 1 observa-se também, que para os corpos de prova na energia de compactação modificada, a resistência à compressão simples é maior para o solo natural e para a mistura solo-cal com todos os teores de adição, tanto em relação aos resultados para a energia intermediária como para os resultados de Sales et al. (2017), que estudou a energia normal. Contudo, para as misturas solo-cimento somente os valores de resistência à compressão simples para os teores 3% e 5%, moldados com a energia modificada, foram maiores do que a resistência à compressão simples dos mesmos moldados tanto na energia normal como na intermediária.

Os corpos de prova moldados na energia modificada, para as misturas solo-cimento 7% e 9%, ficaram abaixo da resistência à compressão simples das amostras moldadas na energia intermediária. Est fato não condiz com a literatura, visto que ao ser compactado com uma energia maior a quantidade de vazios no solo diminui, o que consequentemente o torna mais resistente devido ao maior contato entre os grãos. Estes resultados dificultam uma análise concreta sobre o efeito da adição dos teores 7% e 9% de cimento quando utilizada a energia modificada no solo estudado, porém não comprometem as análises para os outros teores de cimento e para os teores de cal estudados.

Tabela 4. Resultados médios de Resistência à Compressão Simples (MPa)

Energia de Compactação	Solo Natural	Solo-cal				Solo-cimento			
		Solo cal 3%	Solo cal 5%	Solo cal 7%	Solo cal 9%	Solo cimento 3%	Solo cimento 5%	Solo cimento 7%	Solo cimento 9%
Normal (Sales et al., 2017)	0,33	0,47	0,69	0,83	0,97	0,88	1,53	2,17	2,39
Intermediária	0,59	0,9	0,97	1,09	1,11	1,38	2,14	2,71	2,82
Modificada	0,63	0,93	1,21	1,56	1,77	1,57	2,29	2,42	2,69

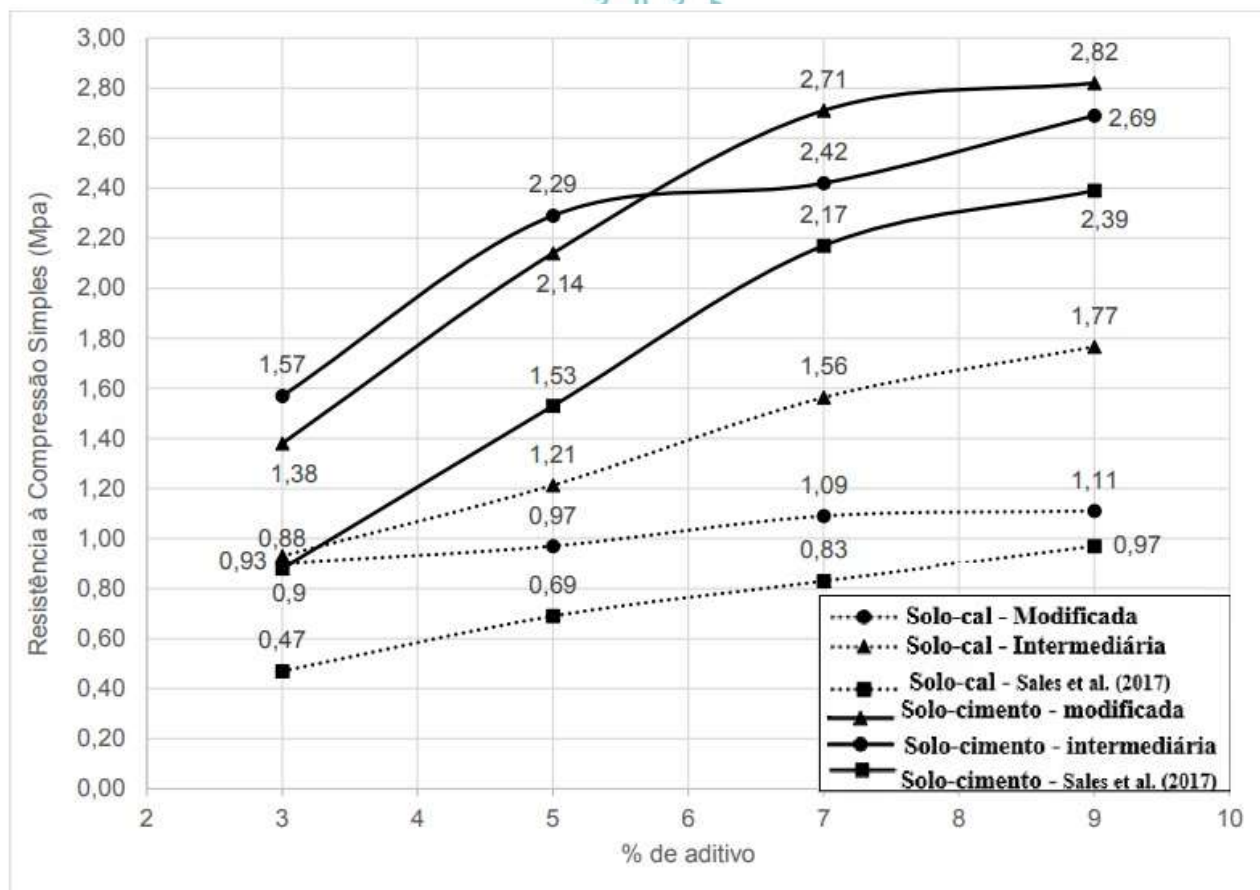


Figura 1. Comparação de resultados para todas as energias de compactação e para todos os teores de cal e de cimento utilizados.

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas através da realização desta pesquisa foram:

- A cal e o cimento apresentaram efeitos semelhantes em relação ao comportamento mecânico do solo estudado, os dois agentes cimentantes proporcionaram ganhos crescentes nos valores de resistência à compressão simples do solo estudado. O uso da cal e do cimento proporcionaram ao solo natural um aumento de até 436% e de 754%, respectivamente.
- Em relação à energia de compactação, de modo geral, a resistência à compressão simples aumentou com o aumento da energia de compactação, exceto nos teores de 7% e 9% de cimento e energia modificada, que apresentaram comportamento inesperado, mas sem comprometer as demais análises. Este resultado pode ser explicado pelo menor teor de umidade ótima na energia modificada, insuficiente para a hidratação desses teores mais elevados.
- A partir dos resultados obtidos é possível, partindo-se de uma resistência alvo (resistência de projeto), avaliar a relação custo/benefício para a escolha do melhor método de estabilização do solo: tipo de agente cimentante, teor de agente cimentante e energia de compactação. Essa avaliação de relação custo/benefício subsidia a escolha de soluções mais eficientes e economicamente viáveis em obras de infraestrutura, como pavimentação, estabilização de taludes, fundações superficiais e diques de contenção. Recomenda-se a ampliação dos estudos para avaliação da durabilidade e do desempenho mecânico dessas misturas em condições de campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao suporte da UTFPR, aos colaboradores do Laboratório de Materiais e do Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo: Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo: Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 12025. *Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Brito, L. C.; Paranhos, H. S. (2017). Estabilização de Solos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, vol. 1, 6ª edi, p. 425-438.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos*, vol. 1, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Cavarsan, M. P. (2018). *Análise dos efeitos da adição de cal e de cimento para estabilização de solos*. Trabalho de conclusão de curso, Curso Superior de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná / UTFPR, Curitiba.
- Dalla Rosa, A. (2009). *Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS, Porto Alegre.
- Lopes Junior, L. S. (2007). *Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS, Porto Alegre.
- Ortigão, J. A. R. (2007). *Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3ª ed.. Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Saldanha, R. B.; Loreto, A., Jaskulski F.; Consoli N. C.; Rocha, C. G. (2025). A decision-making flowchart for tailings Stabilization: Assessing environmental and economic impacts. *Journal of Cleaner Production*, vol. 519, 36 (8).
- Sales, A. W.; Ribeiro, D. D.; Nery, K. D. (2017). *Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação*. Trabalho de conclusão de curso, Curso Superior de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná / UTFPR, Curitiba.