

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO ESTABILIZADO COM CAL

**Daiane Eckardt Derlam¹, Victor A. R. Baumann², Luciano Dodl³, Rebeca Lopes⁴,
Fábio Krueger da Silva⁵, Fernanda Simoni Schuch⁶**

¹Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / daianeeckardtderlam@gmail.com

²Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / victorarbaumann@gmail.com

³Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / lucianoddodl@gmail.com

⁴Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / becaloopes@gmail.com

⁵Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / fabio.krueger@ifsc.edu.br

⁶Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico de Construção Civil / fernandass@ifsc.edu.br

Resumo: *As propriedades mecânicas dos solos podem ser modificadas com a inclusão de aditivos químicos como a cal hidratada. O presente trabalho objetiva avaliar o aumento da resistência à compressão simples de um solo residual estabilizado com o acréscimo de 7% de cal hidratada e determinar a curva de compactação da mistura solo-cal. Para tanto foram moldados 6 corpos de prova segundo a NBR 12024/2012 e rompidos segundo a NBR-12025/2012. Os corpos de prova sem adição foram rompidos em prensa manual e os corpos de prova solo-cal foram rompidos em prensa automática. A umidade ótima da mistura analisada foi de 20,5% e sua massa específica aparente seca máxima foi de 1,54 g/cm³. Já o solo utilizado, oriundo da região da Grande Florianópolis, possui umidade ótima de 18% e massa específica aparente seca máxima de 1,77 g/cm³. A adição da cal hidratada em 7% da massa proporcionou desempenho aproximadamente 10 vezes maior quanto a resistência à compressão simples do solo.*

Palavras-Chave: Solo residual, Cal hidratada, Mistura Solo-cal, Resistência à Compressão.

1 INTRODUÇÃO

A estabilização do solo baseia-se na sua mistura com um aglomerante hidráulico ou com aditivos químicos secos ou líquidos. Tal mistura tem por finalidade suportar os esforços cortantes e possam servir como camadas de um pavimento (AZEVEDO, 2010). As propriedades geotécnicas apresentadas pelo solo, sobre o qual vai ser construída uma obra, determinam o tipo de fundação a ser utilizado para sustentá-la, o que pode elevar consideravelmente o custo de uma obra. Os parâmetros geotécnicos podem ser alterados por meios mecânicos, térmicos, químicos e outros. Tais mudanças podem melhorar a resistência de um solo, e conseqüentemente diminuir os custos da obra (KEZDI 1979)

O presente trabalho objetiva avaliar o incremento na resistência à compressão simples de um solo estabilizado com o acréscimo de 7% de cal hidratada. Além do objetivo específico de determinar a curva de compactação da mistura solo-cal, condições na qual serão moldados os corpos de prova.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O solo é considerado por Terzagui e Peck (1962) como o conjunto de partículas minerais que contém ou não matéria orgânica e são separados facilmente por agitação

dentro da água. Segundo Azevedo (2010), o solo pode ser didaticamente dividido em residual ou transportado. Sendo que nos solos transportados encontram-se mais comumente os finos. Característica que torna tais solos mais susceptíveis a estabilização com cal. O solo utilizado no estudo foi caracterizado por *Perius et al* (2014) como residual de granito com grande presença de rocha intemperizada, característico dos horizontes B a C. Segundo Azevedo *et al* (2010, p. 09) solos residuais são formados pela decomposição no local, portanto suas características são semelhantes à rocha que lhe deu origem. Sendo possível encontrar blocos isolados de rochas semi-alteradas, conhecidos como matacões.

3 METODOLOGIA

A curva de compactação do solo, oriundo da região da Grande Florianópolis, a ser utilizado na mistura solo-cal, obtida em estudo anterior realizado por *Perius et al* (2016), possui umidade ótima de 18% e $\gamma_s = 1,77 \text{ g/cm}^3$. O solo a ser misturado foi seco ao ar, ou seja, apresentava a umidade higroscópica. Também foi peneirado na malha 4,8 mm além de ser destorroado com a utilização do almofariz e mão de gral. A cal a ser utilizada na mistura foi cal hidratada do tipo CH-III.

O procedimento de compactação da mistura solo-cal adotado foi sem reuso de material, para isso foram separados sete porções de 2 kg de solo (Figura 1). A cada porção de solo foi acrescido 7% da massa de cal hidratada. Devido à presença da cal optou-se por manter a umidade por 24 horas, de maneira que a hidratação do aglomerante fosse iniciada antes da compactação.

Para isso, calculou-se a quantidade de água a ser acrescentada a cada porção da mistura solo-cal, a fim de manter por 24 horas diferentes umidades, as quais serão utilizadas para a compactação. Então, o solo, a cal e a água foram homogeneizadas e armazenadas em sacos plásticos.

A compactação e a moldagem de corpos de prova foram realizadas no cilindro de Proctor, com 1000 cm^3 de volume e optou-se por realizá-las com energia normal, ou seja, em três camadas com 26 golpes cada.

Depois de anotado os valores do peso do solo compactado nos cilindros, coletou-se amostras de cada ensaio em cápsulas para a determinação da umidade. A partir desses dados, foi possível construir a curva de compactação da mistura. Apesar da pesquisa se tratar da mistura solo-cal, a moldagem dos corpos de prova foi baseada na NBR 12024/2012-Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.

Novamente, devido à presença da cal optou-se por manter a umidade por 24 horas, antes da moldagem. Foram moldados 3 corpos de prova de solo, na umidade ótima (18%), conforme obtido por estudo anterior de Perius *et al* (2014); e 3 corpos de prova da mistura solo-cal, também por 24 horas na sua umidade ótima (20,5%), obtida por meio do Ensaio de compactação Proctor e da curva de compactação elaborada pelos autores. Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados na câmara úmida até o rompimento à compressão simples ser realizado.

Figura 1: Preparação do solo-cal para a compactação.



Fonte: os autores.

Os corpos de prova foram nomeados em ordem crescente. Os três primeiros (CP1, CP2, CP3) referem-se à mistura solo-cal, enquanto o restante (CP4, CP5, CP6), aos corpos de prova sem mistura (somente solo natural).

Os corpos de prova solo-cal foram previamente capeados com enxofre e rompidos na prensa eletromecânica EMIC, baseado na NBR-12025/2012: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Já os corpos de prova somente solo foram ensaiados à compressão simples na Prensa CBR usual com anel dinamométrico adequado.

A proposta inicial era realizar o rompimento dos corpos de prova somente na prensa manual, mas o anel disponível para o ensaio não suportou a força necessária para romper os corpos de prova com cal hidratada. A seguir, podem-se observar os corpos de provas nas respectivas prensas.

Figura 2: Ensaio à compressão simples (a) CP solo-cal (b) CP solo.



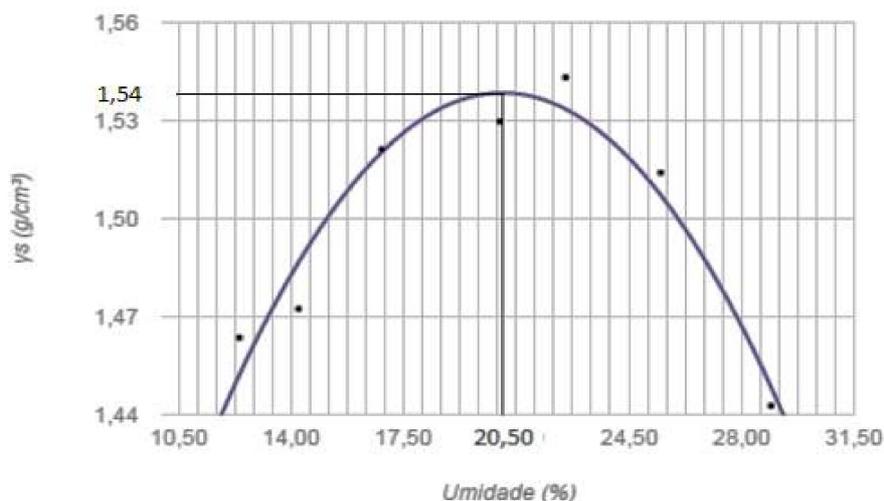
Fonte: os autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte do estudo consistiu em determinar a umidade ótima da mistura solo-cal analisada. A umidade ótima é aquela em que o solo atinge a maior massa específica aparente seca máxima. O solo quando em sua umidade ótima permite um grau de compactação máxima (AZEVEDO, 2010).

A mistura em questão apresentou a curva de compactação a seguir. Sendo o valor de umidade ótima de 20,50% e $\gamma_s = 1,54 \text{ g/cm}^3$.

Gráfico 1 - Curva de compactação solo-cal.



Fonte: os autores.

Os corpos de prova (CP) foram identificados quanto às suas características de tamanho e massa. As quais são apresentadas na Tabela 1.

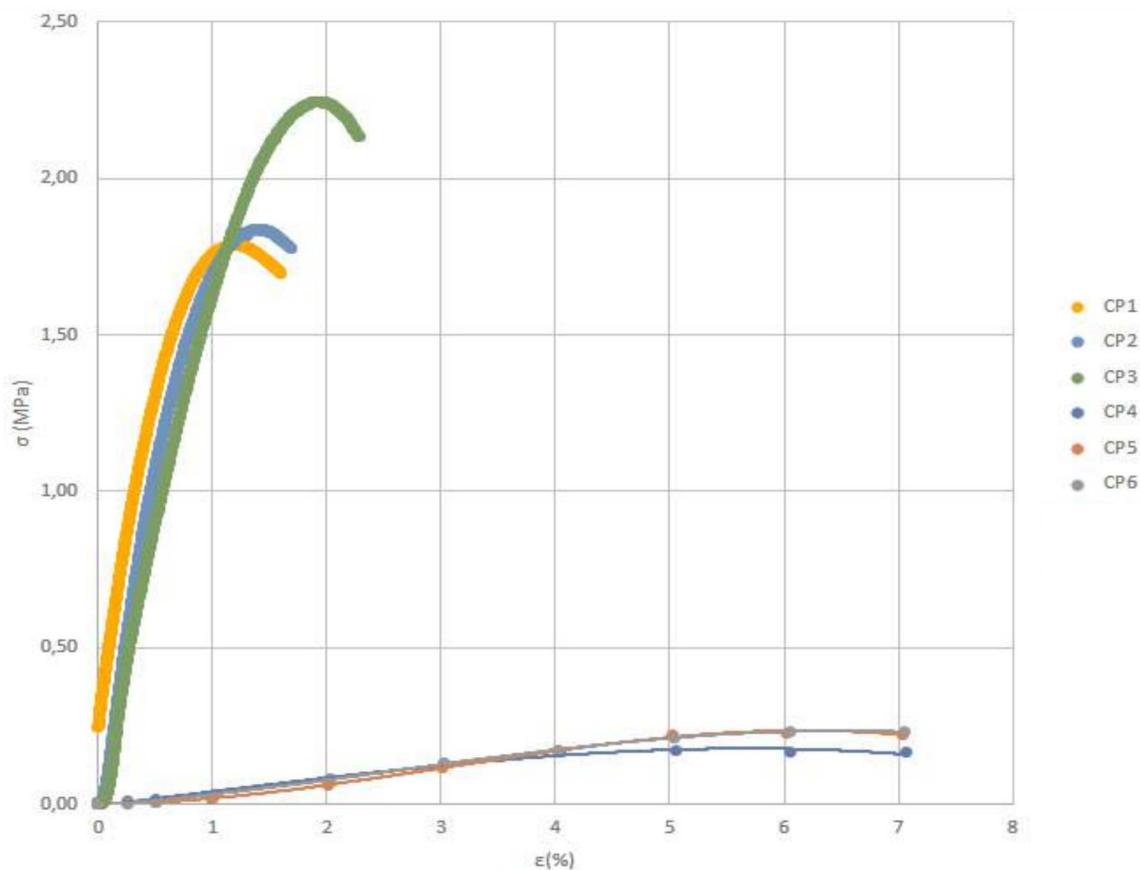
Tabela 1 – Dados iniciais de caracterização dos corpos de prova utilizados.

CP	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Massa (g)
1-Solo-Cal	100,2	7885,4	134,0	1056,6	1843,0
2-Solo-Cal	100,3	7901,2	134,0	1058,8	1846,0
3-Solo-Cal	100,3	7901,2	135,0	1066,7	1885,0
4-Solo	98,0	7543,0	125,8	948,9	1839,9
5-Solo	97,5	7466,2	126,5	944,5	1914,1
6-Solo	97,2	7420,3	126,0	935,0	1862,3

Fonte: os autores.

Os corpos de prova solo-cal foram previamente capeados com enxofre e rompidos na prensa eletromecânica EMIC. O ensaio de compressão na prensa automática forneceu dados de deformação por tensão e com isso foi possível gerar um gráfico com todas as curvas de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados neste estudo.

Os corpos de prova constituídos apenas por solo foram ensaiados à compressão simples utilizando a Prensa CBR usual. A partir do controle da velocidade e registros da deformação do anel, obteve-se a curva tensão (σ) por deformação (ϵ) do solo.

Gráfico 2 - Curva de resistência à compressão CP 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Fonte: os autores.

O ponto mais elevado de cada linha de tendência, representa a ruptura, pois a partir desse ponto as tensões suportadas diminuem, obteve-se assim o valor de resistência à compressão dos corpos de prova. Com esses valores foi possível elaborar a tabela 2 que contém os valores de resistência à compressões encontradas para todos os corpos de prova, a fim de verificar a interferência da adição da cal na resistência à compressão simples do solo analisado.

Tabela 2 – Resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova utilizados.

CP	Resistência Compressão (MPa)
1-Solo-Cal	1,790
2-Solo-Cal	1,840
3-Solo-Cal	2,250
4-Solo	0,175
5-Solo	0,226
6-Solo	0,234

Fonte: os autores.

A resistência à compressão média foi de 1,960 MPa para os corpos de prova de Solo-Cal e 0,212 MPa para os corpos de prova confeccionados apenas com solo natural. O acréscimo de 7% de cal no solo acarretou na contribuição de uma parcela considerável de aumento da resistência do material.

Outras propriedades mecânicas, como expansão na imersão em água, deformabilidade, erodibilidade, e etc., não foram analisadas, porém, certamente o incremento de cal também afetou nesses parâmetros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores encontrados de massa específica aparente seca (γ_s) da mistura solo-cal foram menores comparados a somente solo, o que representa uma quantidade de vazios maiores na mistura. Porém, os valores de sua resistência a compressão simples foram superiores no solo-cal, apesar do menor γ_s . Acredita-se que a propriedade cimentícia do aglomerante tenha sido fator predominante ao acréscimo de sua resistência.

O solo com a inclusão de cal hidratada, apresentou um acréscimo na resistência a compressão simples, na ordem de 9,24 vezes. Isso acarreta melhoria nas propriedades do solo, o que pode possibilitar a serventia como camada de pavimentação ou ainda a redução considerável nos custos de fundação para uma obra. Há duas variáveis a serem consideradas quanto à ordem desse melhor desempenho, referem-se aos procedimentos adotados, como a utilização de prensas diferentes para o rompimento dos corpos de prova e o capeamento somente dos corpos de prova com adição de cal.

Para ensaios futuros, deve-se manter o mesmo procedimento de rompimento para os todos corpos de prova. Além disso, almeja-se a realização do ensaio de resistência à compressão simples para diferentes proporções de cal hidratada, a fim de determinar a porcentagem de cal hidratada que atinja a resistência máxima dessa mistura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 1992. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: Abnt, 2012. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: Abnt, 1986. 10 p.

AZEVÊDO, André Luis C. de. **Estabilização de solos com adição de cal**: Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

KEZDI, A. **Stabilized earth roads**: developments in geotechnical engineering. Amsterdam: Elsevier. 1979.

PERIUS, Gustavo Rodolfo *et al.* **Análise de desempenho de tijolos de solo-cimento com incorporação de agregados reciclados**. In: SEMINÁRIO DE ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO DO IFSC, 2015, Florianópolis. Criciúma: IFSC, 2014. p. 1 - 4.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Tradução de Antônio José da Costa Nunes e Maria de Lourdes Campos Campello. Rio de Janeiro, 1962. Ao Livro Técnico S. A., 659p.