



# Análise do Incremento na Resistência à Compressão de um Solo Residual de Granito a partir da Adição de Cal

Amanda da Silveira Dutra

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,  
[amanda.sduttra8@gmail.com](mailto:amanda.sduttra8@gmail.com)

Julia Bellozupko Bruschi

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,  
[juliabellozupko10@gmail.com](mailto:juliabellozupko10@gmail.com)

Larissa Aló Pinto Brito

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, [larissa.b19@ifsc.edu.br](mailto:larissa.b19@ifsc.edu.br)

Luisa Gabrielle Morás Dias

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, [luisa.d@ifsc.edu.br](mailto:luisa.d@ifsc.edu.br)

Fábio da Silva Krueger

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, [fabio.krueger@ifsc.edu.br](mailto:fabio.krueger@ifsc.edu.br)

Fernanda Simoni Schuch

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, [fernandass@ifsc.edu.br](mailto:fernandass@ifsc.edu.br)

**RESUMO:** A melhoria de solos por meio de adições é uma atividade que facilita o uso de materiais existentes próximos às obras de terra, permitindo adequá-los à diferentes aplicações, otimizando em tempo e custo, obras de terra (contenção de taludes, pavimentos rodoviários, barragens, entre outros). O presente trabalho apresenta um estudo que envolve a adição de cal num solo residual de granito em diferentes porcentagens (2% e 4%), comparando os resultados com a referência (o mesmo solo sem adição). Para isso, levou-se em consideração a umidade ótima do solo para sua moldagem, estabelecida pelos ensaios de compactação, caracterizou-se o solo por ensaios de granulometria e massa específica, obtendo-se a resistência por meio de ensaio de compressão axial. Os resultados obtidos foram satisfatórios na melhoria das características do solo, observadas incremento de resistência à compressão simples da ordem de 78% e 98% para adição de cal de 2% e 4% respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo-cal, Estabilização, Fundações.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um produto da decomposição de rochas sob ação do intemperismo em condições específicas ao longo do tempo. Esse material é usualmente utilizado como material de construção, comumente empregado em fundações, obras de terra e de pavimentação de

estradas. Entretanto, nem sempre o solo possui propriedades geotécnicas adequadas para o uso e, por isso, foram empregadas técnicas de estabilização de solos. (SILVA, 2016)

A principal utilização do solo-cal no Brasil é na área de pavimentação, para a construção de sub-bases e bases rodoviárias e, segundo Arrivabeni, Machado, Sant'Anna (2016), a cal



funciona como estabilizante e como filler nas misturas asfálticas, melhorando a adesividade do mesmo. Assim, a estabilização química de solos com cal tem sido um recurso capaz de trazer eficiência e economia, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental (NEVES, 2009).

Com o intuito de aprofundar este tema, esse artigo tem como objetivo geral analisar, observar e entender a influência da adição de cal no solo na resistência à compressão simples para a idade de 14 dias, a partir de resultados obtidos laboratorialmente. Além disso, temos como objetivos específicos: caracterizar o solo por meio da granulometria, massa específica e densidade ótima; determinar a resistência à compressão do solo sem adição de cal; determinar a resistência à compressão do solo com adição de 2% e 4% de cal; realizar análise comparativa quanto às resistências à compressão axial com a utilização de teores de cal.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em três etapas. Primeiramente, foram feitos os ensaios de caracterização do solo, sendo esses: ensaio para a determinação da massa específica com uso do picnômetro (NBR 6458:2016) e o ensaio de granulometria (NBR 7181:2016), tanto da fração fina, quanto da parte da fração grossa do solo, junto da sedimentação. Na segunda etapa, foi feito o ensaio de compactação (NBR 7182:2016) a fim de se obter os dados necessários à moldagem dos corpos de prova (umidade ótima e densidade seca máxima). A terceira e última etapa envolveu a realização da moldagem dos corpos de prova com dois teores de cal diferentes, na umidade ótima, sendo dois corpos de prova para cada teor, referentes ao peso seco de solo, (2% e 4%), restringido a esses valores pois o aumento excessivo da porcentagem de cal na mistura pode causar trincas devido ao alto enrijecimento do solo (GUÉRIOS, 2013). Para melhor comparação de dados, foram feitos dois corpos de prova para cada teor incorporado de cal, incluindo os dois de referência (0% de

adição). Todos os corpos de prova foram rompidos na idade de 14 dias. Apresenta-se nos subitens abaixo o resultado dos ensaios de caracterização realizados.

O solo foi caracterizado fisicamente quantificando-se a massa específica dos grãos de solo passantes na peneira de 4,8 mm, a distribuição granulométrica e compactação.

### 2.1 Massa específica dos grãos passantes na malha de 4,8 mm

Para determinar a massa específica dos grãos passantes na peneira de 4,8 mm utilizou-se 250 gramas de solo já preparado de acordo com a NBR 6457:2016, da qual separou-se em três amostras de 50 gramas cada para realização do ensaio com maior confiabilidade. Com o restante do material (100g) foi feito o ensaio de determinação de umidade de acordo com a NBR 6457:2016. O ensaio foi realizado à uma temperatura de 23°C, ou seja, a densidade da água era de 0,9976 g/cm<sup>3</sup>. Resultados obtidos na Tabela 1.

Tabela 1. Massa específica do solo.

Amostra	Psolo (g)	Ppic + Págu (g)	Ppic + Págu + Psolo (g)
1	49,98	638,33	665,21
2	50,10	647,60	673,49
3	50,02	631,53	658,33

Para se chegar no resultado da massa específica dos grãos foi necessário calcular a umidade do solo, cujos dados obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Umidade do solo.

Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Psolo úmido (g)	Peso Cápsula + Psolo seco (g)	Umidade (%)
19,10	51,77	49,34	8,036
18,30	58,79	55,84	7,858
19,82	50,12	47,81	8,253



A umidade média calculada foi de 8,05%. Assim, o resultado de massa específica dos grãos encontrado foi de 2,38 g/cm<sup>3</sup>.

## 2.2 Ensaio de granulometria

Ao realizar o ensaio de granulometria, foram seguidos os passos da NBR 7181:2016. Inicialmente obteve-se o teor de umidade higroscópica com o resultado de duas amostras de solo retiradas do material passante na peneira de 2,0mm. Obteve-se teor de umidade médio de 2,51%, para o qual determinou-se a massa da amostra total seca com 1.471,89g.

O ensaio de granulometria tem por finalidade a elaboração de um gráfico, em escala logarítmica, que relaciona a diâmetro dos grãos com as suas respectivas porcentagens passantes. Através dele é possível caracterizar as frações distribuídas e as predominantes, conforme apresentado na Figura 1.

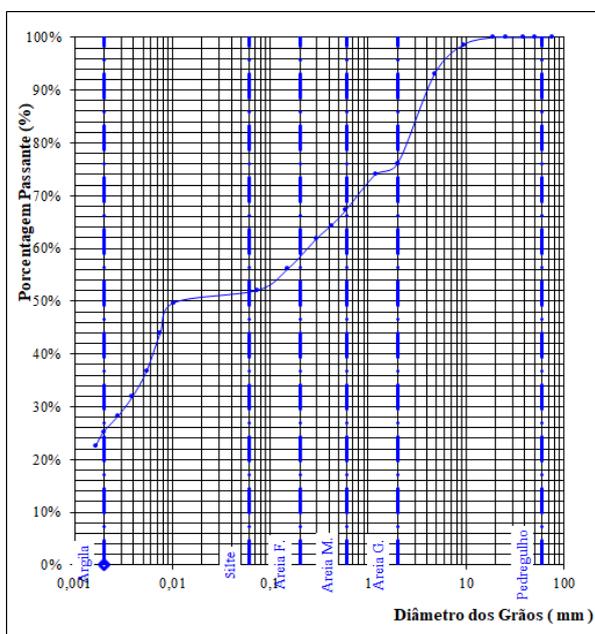


Figura 1. Gráfico da Porcentagem Passante x Diâmetro dos grãos.

Assim, a fração predominante no solo em análise é o silte, sendo que essa fração do solo possui partículas de 0,002 a 0,06 mm.

Apresentando um coeficiente de uniformidade equivalente a  $C_u=357$  e coeficiente de curvatura igual  $C_c=0,07$ . A partir disso, percebe-se que o solo em questão é de granulação aberta e mal graduado.

## 2.3 Ensaio de compactação

Este ensaio foi realizado visando a obtenção da massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima do solo, correspondente à norma NBR 7182:2016. A energia de compactação empregada foi a normal, com um cilindro pequeno, sendo 3 camadas compactadas com 26 golpes cada.

O preparo do solo seguiu as recomendações da NBR 6457:2016. Efetuou-se a separação de uma amostra de 3 kg de solo, considerando reuso de material durante o ensaio. O ensaio de compactação teve início com o solo em uma umidade abaixo da umidade ótima presumível. Após isso, foi-se acrescentado 2% de água sucessivas vezes até que o peso do solo compactado começasse a diminuir, a partir do segundo resultado. Assim, foram obtidos 8 pontos para a curva de compactação, apresentado abaixo na Figura 2.

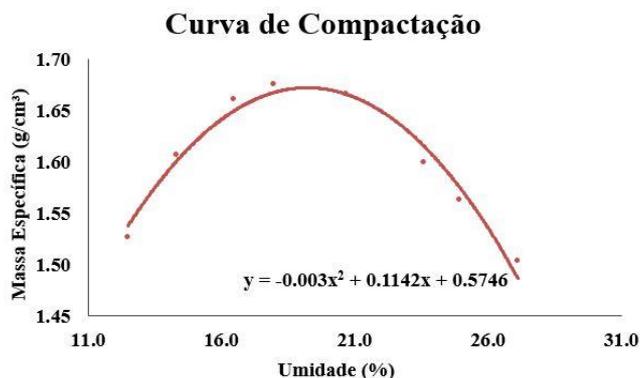


Figura 2. Curva de compactação.

A partir da curva de compactação foi encontrada a ordenada máxima que representa a massa específica aparente seca máxima de 1,67 g/cm<sup>3</sup> e uma umidade ótima equivalente a 19,2%.

## 2.4 Moldagem dos corpos de prova



Para a moldagem dos corpos de prova, foi feita a determinação da umidade do solo a ser ensaiado, por meio do método de secagem em estufa um novo teor de umidade, no que chegou-se ao valor de 9%. Sendo assim, para efeito dos cálculos de moldagem, utilizou-se a umidade de 10%.

Após a determinação da umidade do solo iniciaram-se os cálculos para moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados à compressão simples. O cilindro utilizado produziu corpos de prova com proporção de 5x10 cm entre base e altura. Assim, separou-se as frações de cada material para a execução de dois corpos de prova de referência (sem adição de cal), dois corpos de prova com 2% de adição de cal e outros dois com adição de 4% de cal. Adequou-se a umidade do solo de modo a se obter a umidade ótima de 19,2%, sendo que essas proporções tem como referência o volume do cilindro, que é de 219,88 m<sup>3</sup>, tendo em vista à densidade máxima de 1,67 g/cm<sup>3</sup>.

Dessa maneira, calculou-se a massa total seca de solo seco para ocupar o volume do cilindro na densidade seca máxima e, o valor obtido foi de 367,22 g. Logo, para cada teor de cal calculado, levou-se em consideração à massa total seca. Levando-se em consideração que a densidade máxima é obtida na umidade ótima, calculou-se a massa total de solo úmido a ser colocado no cilindro: 437,70g. As proporções encontradas para a moldagem de todos os corpos de prova estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Proporções de materiais para moldagem dos corpos de prova.

Adição de cal (%)	Solo (g)	Cal (g)	Água (g)
0	403,94	0,00	33,75
2	395,86	7,34	34,48
4	387,78	14,69	35,22

Tendo as quantidades de cada material, realizou-se a mistura dos mesmos, seguindo a ordem de adição do solo, água e posteriormente cal. A massa total foi dividida em 7 partes iguais, para realizar a moldagem em camadas.

As camadas foram compactadas por meio de

um peso cilíndrico, de modo à soltá-lo e em seguida rodá-lo sobre a camada de solo, de forma a ser completamente compactado e obtenha a espessura necessária. Esse processo é repetido até a sétima e última camada.

## 2.5 Ensaio de Compressão Axial

O ensaio realizado foi o de compressão simples com velocidade controlada, onde controla-se a carga aplicada e mede-se a deformação correspondente com auxílio de um medidor de voltas e cronômetro acoplados ao equipamento. A deformação foi medida conforme o número de divisões que a prensa apresentou, correspondente a deformação do corpo de prova. A norma de ensaio é a NBR 12770:1192.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova, após moldados, foram ensacados e armazenados em uma caixa de isopor a fim de manter temperatura constante e evitar variação de umidade, e foram então rompidos na idade de 14 dias.

A resistência a compressão é o valor da carga máximo de ruptura do material, sendo que o valor medido de resistência neste ensaio é em termos de tensão total aplicada a um solo coesivo, sem expulsão de água na fase de carregamento.

Foram rompidos, primeiramente, os corpos de prova sem adição de cal para então prosseguir com a ruptura dos corpos de prova com adição de 2% e 4% de cal. Os resultados encontrados permitem que seja elaborada a curva Tensão x Deformação do solo, sendo que essa curva é não-linear, podendo ou não apresentar pico bem definido (GUÉRIOS, 2013).

A curva de tensão e deformação para os corpos de prova sem adição de cal (Figura 3) se comportaram de maneira diferente durante o ensaio, como pode-se observar nas curvas abaixo. Porém o valor da tensão de ruptura é de 93 KPa no corpo de prova 1 com deformação de 0,0674 mn e 91 KPa no corpo de prova 2, com



deformação de 0,0658 mm, sendo a média da tensão efetiva crítica sem cal de 92 KPa.



Figura 3. Curva de tensão e deformação dos corpos de prova sem adição de cal (CP0%).

Para os corpos de prova com 2% de adição de cal, a curva de tensão e deformação (Figura 4) mostra que o valor da tensão de ruptura é de 166 KPa no corpo de prova 1 com deformação de 0,1190 mm e corpo de prova 2 é 165 KPa com deformação de 0,12 mm, sendo a média 166,5 KPa a tensão de ruptura.

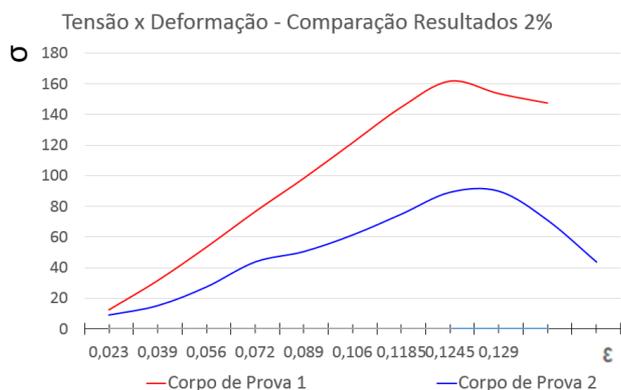


Figura 4. Curva de tensão e deformação dos corpos de prova com 2% de adição de cal (CP2%).

A curva de tensão e deformação para os corpos de prova com 4% (Figura 5) de adição de cal apresenta valor da tensão de ruptura de 169 KPa no corpo de prova 1 com deformação de 0,119 mm e corpo de prova 2 com tensão de 190 KPa e deformação de 0,1445 mm, sendo a média da tensão de ruptura de 183,5 KPa.

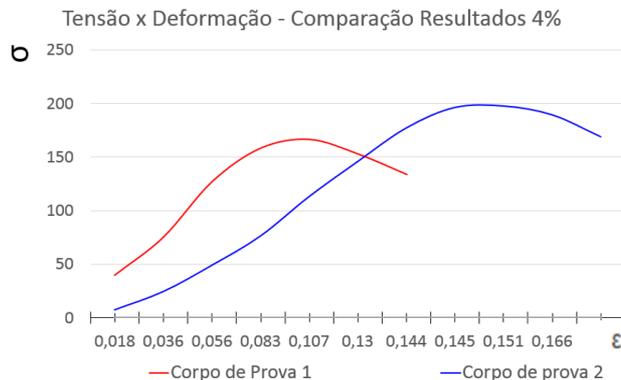


Figura 5. Curva de tensão e deformação dos corpos de prova com 4% de adição de cal (CP4%).

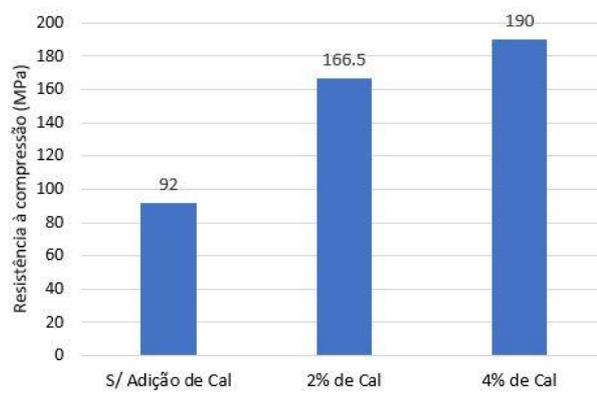


Figura 6. Comparação dos resultados de resistência à compressão média com diferentes teores de cal.

Ao comparar os resultados da resistência à compressão sem adição de cal, com 2% e com 4%, percebemos que há um aumento significativo entre o corpo de prova sem adição de cal e com 2%, de 78,92% (Figura 6). Já entre o teor de 2% de cal para o de 4%, houve um aumento de 10,88% na resistência à compressão.

O gráfico a seguir apresenta uma comparação entre os corpos de prova para as tensões cisalhantes encontradas. Aponta-se um aumento na tensão cisalhante com o aumento do teor de cal.



Figura 7. Comparação dos resultados de resistência ao cisalhamento com teores de cal.

A resistência à compressão simples apresentada pelos corpos de prova com adição de cal foi maior àquela apresentada pelo corpo de prova referência, o aumento foi de 78,92% com adição de 2% de cal e de 98,38% com adição de 4% de cal. Pelo valor de resistência à compressão em kg/cm<sup>2</sup>, o corpo de prova sem adição de cal obteve 0,4624 kg/cm<sup>2</sup>, sendo classificado como argila de consistência mole, O corpo de prova com 2% de cal obteve 0,8275 kg/cm<sup>2</sup> e 4% de cal obteve 0,9175 kg/cm<sup>2</sup>, ambos sendo classificados como argilas de consistência médias.

Tabela 4. Dados de resistência à compressão simples de argila (MARAGON, 2015)

Consistência	Resistência à compressão (kg/cm <sup>2</sup> )
Muito mole	0-0,25
Mole	0,25-0,50
Média	0,50-1,00
Rija	1,00-2,00
Muito rija	2,00-4,00
Dura	>4,00

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho contribui com resultados importantes para o âmbito da mecânica dos solos, demonstrando que há uma melhora nas propriedades dos solos com a adição de cal em certas proporções, comprovado pelos resultados obtidos no ensaio de compressão simples.

Após aferir os resultados, constatou-se que

houve uma melhora significativa nas características do solo estudado com a adição de 2% de cal e ainda maior com a adição de 4% de cal. Porém, o incremento de 4% em relação a 2% foi pequeno e economicamente inviável. Essa melhoria foi observada no acréscimo de resistência à compressão axial e cisalhamento.

Para futuras pesquisas sugere-se se que implementem a pesquisa com o estudo da porcentagem de cal ótima para solos distintos, permitindo assim que haja uma base de dados estabelecida para a aplicação de cal ideal em solos com características diferentes e assim verificar se ocorre também um aumento da resistência à compressão e cisalhamento, além da melhoria de propriedades como massa específica aparente seca máxima e umidade ótima.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSC, Instituto Federal de Santa Catarina, e também ao DACC, Departamento Acadêmico de Construção Civil, por cederem a infraestrutura para a realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR7181: Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: Anais, 2016. 16 p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR7182: Solo - Ensaio de Compactação*. Rio De Janeiro: Anais, 2016. 13 p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR12770: Solo Coesivo - Determinação da Resistência à Compressão não confinada*. Rio de Janeiro: Anais, 1992. 4 p.
- Azevêdo, André Luis C. De. (2008). *Estabilização de Solos com Adição de Cal*. Um Estudo a Respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 178 p. Tese (Doutorado) - Curso de engenharia geotécnica, UFOP, Ouro Preto, 2010.
- Guérios, Eduan Maganhotto. (2013). *Estudo Do Melhoramento De Solo Com Adição De Cal Hidratada Para Uso Em Pavimento Urbano*. 80 p. TCC (Graduação) - Curso de engenharia de produção civil,



- Departamento de construção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- Marangon, Marcio. (2009). *Parâmetros Dos Solos Para Cálculo De Fundações*. Disponível em: <[Http://Www.Ufjf.Br/Nugeo/Files/2009/11/Gf03-par%C3%A2metros-dos-solos-para-c%C3%A1lculo-de-funda%C3%A7%C3%B5es.Pdf](http://www.Ufjf.Br/Nugeo/Files/2009/11/Gf03-par%C3%A2metros-dos-solos-para-c%C3%A1lculo-de-funda%C3%A7%C3%B5es.Pdf)>. Acesso em: 26 Nov. 2018.
- Neves, Eduardo Nuno Sousa De Azevedo Castro. *Estudo laboratorial de solos tratados com cal modelos de comportamento*. (2007). 176 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal, 2009.
- Sartori, Guilherme. (2015). *Estudo De Estabilização De Solos Para Fins De Pavimentação Na Região De Campo Mourão*. 54 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico De Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015. Cap. 6. Disponível em: <[Http://Repositorio.Roca.Utfpr.Edu.Br/Jspui/Bitstream/1/6672/1/Cm\\_coeci\\_2015\\_2\\_13.Pdf](http://Repositorio.Roca.Utfpr.Edu.Br/Jspui/Bitstream/1/6672/1/Cm_coeci_2015_2_13.Pdf)>. Acesso em: 26 de Nov. 2018.
- Silva, Matheus Francisco Da. (2014). *Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico*. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- Souza, Alan Nunes De Siqueira De. (2014). *Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento Rodoviário*. 71 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2014.