

XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas
COBRAMSEG 2016 — 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil
© ABMS, 2016

Análise Experimental de Solos Característicos do Distrito Federal Estabilizados com Cal

Darym Júnior Ferrari de Campos
Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, darymjuniorgmail.com

Jairo Furtado Nogueira
Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, jairofurtado@yahoo.com.br

Alex Torres de Souza
Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, alex_torres_ds@hotmail.com

RESUMO: A utilização do solo natural pode tornar-se problemática a partir do momento em que não se atende às exigências determinadas em projetos de execução de obras geotécnicas. No entanto, há várias técnicas que visam à modificação e ao melhoramento das propriedades do solo, resultando em um novo material capaz de atender tais exigências para diferentes tipos de fundação ou pavimentação. Uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem e que vem se consolidando no meio técnico-científico é a estabilização de solos com cal. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho estuda o comportamento de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal com adição de cal hidratada. A primeira etapa consistiu na realização dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, granulometria, compactação, expansão e Índice de Suporte de Califórnia (ISC). Na segunda etapa foram realizados os ensaios de cisalhamento direto com as misturas de solo-cal variando os teores de cal em 2%, 3% e 4%, na umidade ótima de compactação *Proctor* normal. Por fim, o solo argiloso apresentou indícios de uma melhoria em suas propriedades. Nessa avaliação as curvas de índice de suporte exibiram valores condizentes para tensões elevadas, sendo possível sua utilização em camadas de sub-base e revela-se como alternativa para utilização em obras de pavimentação. No caso do solo siltoso, não houve vantagem aparente em relação ao solo natural, mostrando que a cal para esse tipo de solo estudado pode não trazer benefícios relevantes.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solos, Solo-Cal, Ensaios Laboratoriais.

1 INTRODUÇÃO

O domínio das técnicas de estabilização dos solos pode conduzir a sensíveis reduções nos tempos de execução de obras, viabilizando a industrialização do processo construtivo e, conseqüentemente, propiciando uma economia substancial para o empreendimento (LIMA, 1981; PESSOA, 2004).

As obras geotécnicas realizadas no Brasil dependem do comportamento das propriedades do solo. Segundo Araújo (2009), quando é analisado que o solo natural não atinge as

características exigidas em projeto, a utilização da cal como forma de melhoramento pode resultar em um novo material capaz de atender tais exigências. Neste contexto, com os novos benefícios, tanto em trabalhabilidade como no comportamento hidráulico e mecânico em longo prazo, seria aplicável o seu uso em diferentes tipos de fundação ou pavimentação. Além disso, essa solução também apresenta grandes benefícios ambientais e econômicos.

Vale ressaltar que as reações solo-cal ocorrem a partir de um conjunto de mecanismos que dependem da constituição química e

mineralógica do solo, a granulometria e rugosidade das partículas e o tipo de cal empregada. Segundo Rosa *et al.*(2006) e Azevêdo (2010), para alguns tipos de solos esta estabilização pode não ser eficiente ao ponto de apresentar significativa melhora em suas propriedades geomecânicas.

Este trabalho analisa como se comportam as propriedades do solo, coletado em duas diferentes localizações em Brasília-DF e tratadas com cal hidratada. Primeiramente foram realizados ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, granulometria, compactação, Índice de Suporte de Califórnia (ISC ou CBR) e expansão. Logo após, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto com as misturas de solo-cal variando os teores de cal em 2%, 3% e 4% na amostra compactada na umidade ótima.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Amostra 1

Para a realização dos ensaios laboratoriais foram selecionadas e coletadas duas amostras de solos predominantes em Brasília-DF. A amostra denominada “Amostra 1” foi retirada de uma obra residencial situada na região de Águas Claras, com coordenadas geográficas latitude 15°50’37”Sul e longitude 48°01’21” Oeste. Esse solo foi identificado como um material predominantemente siltoso e é apresentado na Figura 1.



Figura 1. Retirada da amostra deformada de solo predominantemente siltoso.

2.2 Amostra 2

O solo utilizado na amostra denominada “Amostra 2” foi predominantemente argiloso. Procedeu-se a retirada desse material nas margens da via W5, na obra das vias internas do Parque Bulevar, com coordenadas geográficas latitude 15°45’52” Sul e longitude 47°53’54” Oeste. Ressalta-se que a opção por utilizar esse solo (Figura 2) é justificada pelo fato deste ser um material característico da região.



Figura 2. Retirada da amostra deformada de solo predominantemente argiloso

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do Solo

Realizada a coleta dos materiais de acordo com a NBR 9603/86, as amostras foram devidamente preparadas conforme recomendação da NBR 6457/86 para os ensaios de caracterização e compactação.

O ensaio de análise granulométrica dos solos seguiu as orientações dos procedimentos citados da NBR 7181/84. Ambas as amostras, estudadas nessa pesquisa, foram submetidas aos procedimentos de ensaio de peneiramento e sedimentação, com e sem a adição do defloculante hexametáfosfato de sódio.

Os valores dos limites de Atterberg foram obtidos através dos ensaios de limite de liquidez (NBR 6459/84) e limite de plasticidade (NBR

7180/84). Conforme Caputo (2010), a partir da diferença entre os resultados dos dois ensaios, foram determinados os índices de plasticidade,

3.2 Caracterização da Cal

Neste trabalho, a cal hidratada exerceu função de elemento capaz de melhorar as propriedades geomecânicas do solo natural. Neste contexto, a Tabela 1 apresenta as características físico-químicas da cal hidratada.

Tabela 1. Análise Físico-Química da Cal Hidratada.

Elementos Químicos		
CaO	31,14%	
MgO	01,42%	
PPC	14,00%	
CaCO ₃	06,96%	
SiO ₂	52,69%	
Granulometria		
Peneiras	Retido	Passante
>100#	7,23%	92,77%
>200#	2,02%	90,75%

3.3 Estabilização do Solo com Cal

Durante a realização dos ensaios, acondicionou-se a cal hidratada em sacos plásticos hermeticamente fechados, buscando preservar suas características e evitar alterações de umidade e/ou contaminações.

Com a finalidade de caracterizar e identificar os efeitos da modificação do solo com o agente estabilizante, verificada pela adição dos diferentes teores em cal, foram avaliadas as características físicas e mecânicas das duas amostras citadas anteriormente.

A partir da moldagem de corpos de prova, com teores de umidade crescentes, realizou-se o ensaio de compactação de acordo com o preconizado na NBR 7182/86. Após definir a curva de compactação, foram realizados quatro pontos, na umidade ótima, sendo um deles com o solo natural e as outras acrescidas de cal hidratada na proporção de 2%, 3% e 4%. Em seguida, finalizadas as moldagens dos pontos de compactação, realizou-se o ensaio de expansão e posteriormente ISC de acordo com a NBR 9895/87.

Para o ensaio de cisalhamento direto, foram utilizadas as mesmas amostras de solo obtidas

dos ensaios de compactação descritos anteriormente.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Análise Granulométrica

Ao analisar as curvas granulométricas da Amostra 1, com a utilização do defloculante hexametáfosfato de sódio, observou-se na Figura 3 que, predominantemente, as partículas apresentaram cerca de 79,20% de argila e 13,00% de silte. Este material pode ser classificado como uma argila siltosa. Entretanto, verificou-se que o solo submetido sem o uso do defloculante apresentou 31,60% de areia fina, 26,00% de areia grossa, 25,50% de areia média, 16,40% de silte e ainda 0,30% de argila, classificando-se como uma areia siltosa.

É importante notar que essa grande diferença de classificação do solo deve-se às partículas de argila que possuem uma grande dificuldade de desagregação. Após o ensaio com defloculante, as partículas desagregaram-se diminuindo as porcentagens de areia e silte, aumentando consideravelmente a porcentagem de argila.

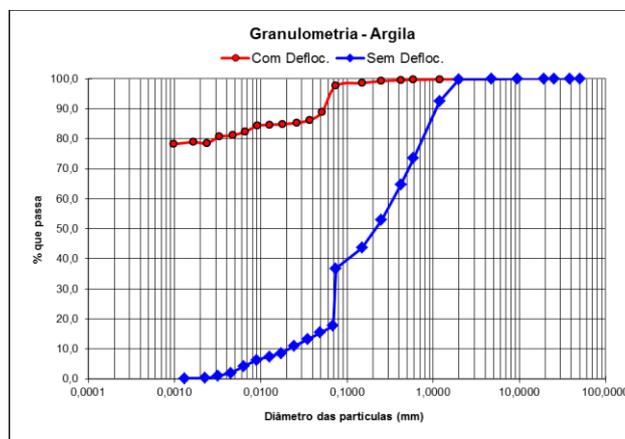


Figura 3. Curva Granulométrica com e sem Defloculante.

Ao analisar de maneira análoga ao método citado anteriormente, verificou-se na Figura 4 que a Amostra 2 apresentou a mesma classificação com e sem a utilização do defloculante, sendo assim um predominantemente solo siltoso. Este material com defloculante

consiste em uma composição de 74,80% de silte, 0,91% de areia grossa, 0,96% de areia média e 8,04% de areia fina. Sem o uso de defloculante, consiste de 68,7% de silte, 3,88% de areia grossa, 4,10% de areia média e 9,20% de areia fina.

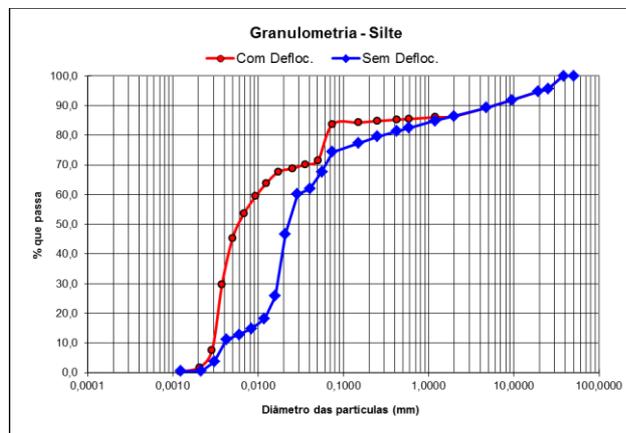


Figura 4. Curva Granulométrica com e sem Defloculante.

4.2 Limites Físicos de Atterberg

Na Tabela 2, apresentaram-se os resultados dos ensaios de limites de liquidez (W_L) e de plasticidade (W_P) das duas amostras, bem como os valores do índice de plasticidade (I_P). Com a análise dos resultados, verificou-se que ambos os solos classificaram-se como altamente plásticos.

Tabela 2. Limites Físicos de Atterberg.

Solo	Limite de Liquidez (W_L)	Limite de Plasticidade (W_P)	Índice de Plasticidade (I_P)
Amostra 1	56,2%	38,2%	18,0%
Amostra 2	47,9%	32,5%	15,4%

Após os prévios resultados de classificação dos solos, foram realizados os demais ensaios citados na metodologia a fim de se obter informações para a sua estabilização com o uso da Cal hidratada.

4.3 Ensaios de Compactação

A partir da análise das curvas de compactação, verificou-se que o solo da amostra de argila possuiu um teor de umidade ótima com cerca de

34,0% e uma massa específica aparente máxima seca de 13,25 kN/m³. A amostra de silte possuiu um teor de umidade ótima com cerca de 20% e uma massa específica aparente máxima seca de 14,65 kN/m³.

Definida a curva de compactação, foram realizados quatro pontos na umidade ótima. Primeiramente utilizou-se o solo natural e, logo após, as outras amostras foram acrescidas de cal hidratada na proporção de 2%, 3% e 4%.

4.4 Expansão

Após a imersão em água, durante 96h, dos corpos de prova e a realização das respectivas leituras realizadas no extensômetro, analisaram-se as expansões para todas os pontos da curva de compactação. Para a Amostra 1, não ocorreu expansão (0,00%) e, para a Amostra 2, a expansão resultou em 0,07%.

4.5 Índice de Suporte Califórnia

A relação entre a pressão e a penetração dos corpos de prova, compactados e saturados da amostra de argila, são expostos na Figura 5. Além disso, verifica-se na Tabela 3 um aumento de resistência a compressão do solo quando este é acrescido de cal.

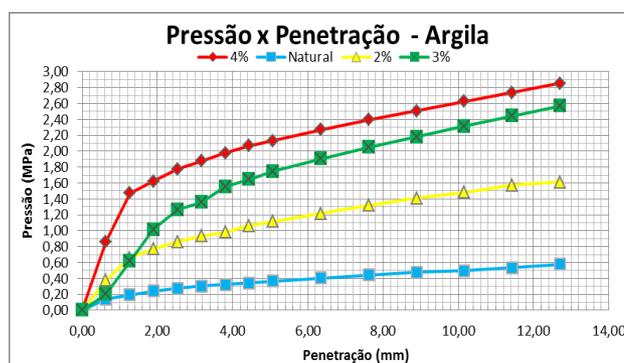


Figura 5. Curvas do Índice de Suporte Califórnia – Amostra 1.

Tabela 3. Índice de Suporte Califórnia – Amostra 1.

Solo	Penetração	Pressão (MPa)		ISC (%)
		Corrigida	Padrão	
Natural	2,54	0,27	6,90	4
	5,08	0,37	10,35	3
2%	2,54	0,86	6,90	13
	5,08	1,12	10,35	11
3%	2,54	1,27	6,90	19
	5,08	1,75	10,35	17
4%	2,54	1,78	6,90	26
	5,08	2,13	10,35	21

No que diz respeito a relação entre a pressão e a penetração dos corpos de prova compactados e saturados da amostra de silte, estes são apresentados na Figura 6. A Tabela 4 expõe as leituras realizadas no decorrer do ensaio.

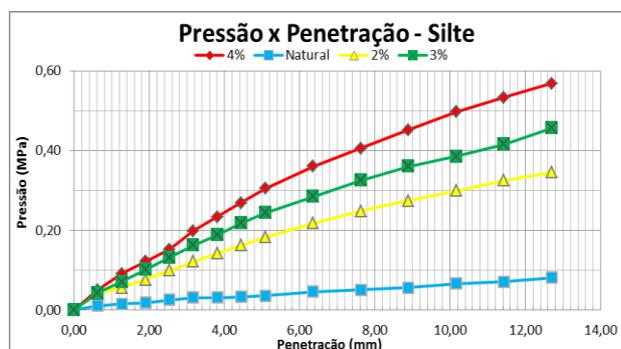


Figura 6. Curvas do Índice de Suporte Califórnia – Amostra 2.

Tabela 4. Índice de Suporte Califórnia – Amostra 2.

Solo	Penetração	Pressão (MPa)		ISC (%)
		Corrigida	Padrão	
Natural	2,54	0,025	6,90	1
	5,08	0,036	10,35	1
2%	2,54	0,099	6,90	1,5
	5,08	0,183	10,35	2
3%	2,54	0,132	6,90	2
	5,08	0,244	10,35	2,5
4%	2,54	0,152	6,90	2,5
	5,08	0,304	10,35	3

De forma análoga ao apresentado para amostra de argila, a amostra de silte apresentou um aumento nos valores de ISC quando este é acrescido de cal. Para esse aumento de 2% do Solo natural ao acrescido de 4% de cal, conclui-se que, pela representividade dos ensaios, aparentemente existem indícios de um melhoramento da Amostra 2.

4.6 Ensaio de Cisalhamento Direto

Após a compactação dos corpos de provas das amostras em estado natural e da mistura dos diferentes teores de cal, colocaram-se os mesmos imersos em água até estabilizar o processo de saturação. Com o material saturado, moldaram-se duas amostras dentro de cada caixa de cisalhamento, com dimensões de 5,08cm x 5,08cm, para dar início ao ensaio. A Figura 7 apresenta as tensões cisalhantes para a amostra de argila, enquanto a Tabela 5 expõe os resultados obtidos.

O critério de ruptura adotado corresponde ao estado de tensões atingido no deslocamento de 7 mm. Adotou-se ainda como velocidade cisalhante, para que o ensaio seja considerado drenado, um valor de 0,029 mm/min. As tensões normais de consolidação, do solo natural compactado na energia *Proctor* normal, foram de 50 KPa, 100 KPa e 200 KPa.

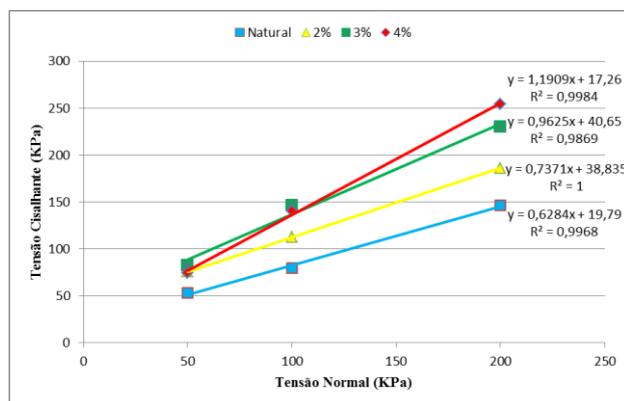


Figura 7. Envoltórias de Ruptura para a Amostra 1.

Tabela 5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto da Amostra 1.

Amostra 1	Natural	2%	3%	4%
Ângulo de Atrito	32	36	44	50
Coesão	20	39	41	17

Tensão (KPa)	Tensão Cisalhante			
	Natural	2%	3%	4%
50	53,26	75,71	82,38	74,09
100	79,55	112,52	146,49	140,43
200	146,49	186,27	229,85	254,09

Da análise do solo siltoso, não foi possível realizar o procedimento de saturação e posteriormente a moldagem, pois o solo não

mantinha sua estrutura indeformada quando retirado do corpo de prova da compactação, conforme apresentado na Figura 8. Provavelmente, deu-se ao fato que, mesmo quando úmido, o silte por si só não exibe muita pegajosidade ou plasticidade (maleabilidade). Devido à sua baixa pegajosidade e plasticidade, solos com grandes quantidades de silte e areia fina podem ser altamente suscetíveis à erosão eólica e hídrica (BRADY, 2013). Portanto, adotou-se o procedimento de moldagem e posteriormente saturou o material na máquina de cisalhamento.



Figura 8. Amostra 2 retirada do corpo de prova após saturação.

Após este procedimento, o ensaio foi normalmente realizado para a amostra de silte, respeitando os mesmos procedimentos realizados para a amostra de argila. A Figura 9 apresentou as envoltórias de resistência do solo na condição saturada, e os valores de parâmetros de resistência obtidos pelo critério de ruptura utilizado foram detalhados na Tabela 6.

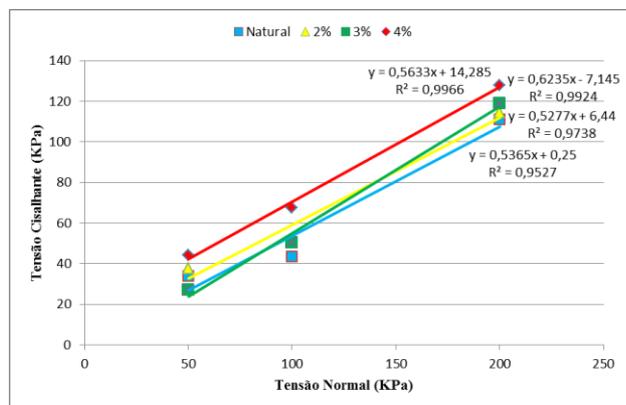


Figura 9. Envoltórias de Ruptura para a Amostra 2.

Tabela 6. Resultados do ensaio de cisalhamento direto da Amostra 2.

Amostra2	Natural	2%	3%	4%
Ângulo de Atrito	28	28	32	29
Coesão	0	6	7	14

Tensão (KPa)	Tensão Cisalhante			
	Natural	2%	3%	4%
50	33,98	37,82	27,17	44,36
100	43,55	51,71	50,49	67,75
200	111,01	114,47	119,12	127,9

5 CONCLUSÕES

A partir dos objetivos traçados inicialmente, procurou-se verificar os parâmetros de estabilização do solo quando submetido a uma mistura de cal. Com base nos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais pode-se concluir que:

(a) Após analisar o comportamento da mistura solo-cal, o solo argiloso apresentou indícios de uma melhoria em suas propriedades geomecânicas. Em outro contexto, o solo siltoso não apresentou significativas alterações, mostrando que a cal para esse tipo de solo pode não trazer relevantes benefícios. Ressalta-se ainda que essa conclusão refere-se apenas aos resultados obtidos de acordo com a forma como os ensaios foram realizados nesse trabalho.

(b) Os valores das misturas de solo-cal, ensaiadas com o solo argiloso, apresentaram uma evolução onde as curvas de índice de suporte exibiram valores condizentes a tensões elevadas. Neste contexto, pode ser possível a utilização deste material em camadas de sub-base, constituindo-se em alternativa para obras de pavimentação.

(c) Do ponto de vista ambiental, uma das grandes vantagens na melhoria do solo com a cal é o aproveitamento do material local, diminuindo a necessidade de zonas de empréstimo e, conseqüentemente, evita-se a degradação de outras áreas e o descarte impróprio do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília, por ter possibilitado a execução da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Araújo, A. F. (2009) *Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará*. Universidade Federal do Ceará, Ceará, 175 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7181/84: solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7182/86: solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7180/84: solo - Determinação do limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro. 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6457/86: Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação*. Rio de Janeiro. 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6459/84: solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9895/87: Índice Suporte California - CBR*. Rio de Janeiro. 1987.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9603/86: Execução de sondagem a Trado*. Rio de Janeiro. 1986.
- Azevêdo, A. L. C. D. (2010) *Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um Estudo a Respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo Após a Adição de Cal*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 114 p.
- Brady, Nyle C.; Weil, Ray R. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. 3. Ed, Porto Alegre: Bookman, 2013
- Caputo, H. P. (1976) *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*, 3ª ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A, Vol. I, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 242 p.
- Lima, D.C. (1981) *Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 171 p.
- Pessoa, F.H.C. (2004) *Análises dos solos de Uruacu para fins de uso rodoviário*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 151 p.
- Rosa, J. B.; Ferreira, C. J. e Guimarães, R. C. (2006) *Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação*. Universidade do Estado de Goiás, Goiás, 6 p.