

# **AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE UM SOLO ARGILOSO ADITIVADO COM CAL**

## **EVALUATION PHYSICAL-MECHANICAL OF CLAYEY SOIL ADDITIVATED WITH LIME**

Loiola, Clayton Daniel Brasilino; *Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, claytondaniel17@hotmail.com*

Nunes, Débora de Almeida; *Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, deboraalmeida50@hotmail.com*

Almeida, Guilherme Bravo de Oliveira; *Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras – SE, Brasil, gbravo1982@gmail.com*

Cavalcante, Erinaldo Hilário; *Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, Brasil, erinaldo@ufs.br*

### **RESUMO**

Em obras geotécnicas, o solo é fundamental no processo construtivo, pois será o responsável pela capacidade de suporte das solicitações impostas, além de determinar características essenciais do projeto. Contudo, na natureza, os solos são encontrados nas mais diversas variedades, e muitos não cumprem as especificações técnicas para a função a qual se destinam, sendo necessário escolher alguma das seguintes soluções: abandonar o local e optar por outro com solo apropriado, substituir o solo indesejado, adaptar o projeto às condições existentes ou modificar as propriedades do solo. A modificação através da estabilização química torna-se uma alternativa para melhorar o comportamento do solo. A cal tem sido um dos aditivos mais utilizados na estabilização de solos e sua aplicação promove reações, que reduzem a plasticidade e conferem resistência. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o melhoramento físico-mecânico de um solo argiloso com teores de 1% a 11% de cal. Os ensaios realizados foram análise granulométrica, massa específica real, limites de Atterberg, compactação, índice de suporte Califórnia, resistência à compressão simples, capacidade de troca de íons de cálcio e pH. Os resultados mostraram que o aditivo promoveu diminuição da fração argila e aumento da fração de silte do solo. Também ocorreu redução do limite de liquidez, aumento do limite de plasticidade e da umidade ótima e redução na massa específica aparente seca máxima em comparação ao solo natural. Verificou-se que as misturas apresentaram aumento da capacidade de suporte e da resistência à compressão na condição de submersão. Observou-se ainda que há elevação do pH e da concentração de íons de cálcio, conforme se adicionava cal. Notou-se que, entre todos os teores de cal estudados 7% seria o mais indicado, uma vez que apresentou maior resistência à compressão, atingiu pH que favorece as reações e um teor de cálcio trocável elevado, em relação aos outros teores.

### **ABSTRACT**

In geotechnical construction, the soil is fundamental in the constructive process, as it will be responsible for the capacity to support the imposed requests, in addition to determining essential characteristics of the project. However, in nature, soils are present in the most diverse varieties, and many do not meet the technical specifications for the function for which they are intended, and it is necessary choosing one of the following solutions: to abandon the site and choose for another with appropriate soil, to replace the unwanted soil, to adapt the project to existing conditions or to modify soil properties. Modification through chemical stabilization becomes an alternative to improve soil behavior. Lime has been one of the most used additives in soil stabilization and its application promotes reactions that reduce plasticity and confer strength. Thus, this research has as objective to evaluate the physical-mechanical improvement of a clayey soil with contents of 1% to 11% of lime. The tests carried out were specific gravity, particle size, Atterberg limits, Proctor compaction, California bearing ratio, unconfined strength test, exchange capacity of calcium and pH. The results showed that the additive promoted decrease of the clay fraction and increase of the fraction of silt of the soil. There was also a reduction in the liquid limit, an increase in the plastic limit and in the optimum moisture and a reduction in the dry maximum density compared to the natural soil. It was verified an increased support capacity and compressive strength in the submersion condition. It was also observed that there is an increase in the pH and concentration of calcium ions when lime was added. It was observed that, among all the lime contents studied, 7% would be the most indicated, since it presented higher resistance to compression, reached pH that favors the reactions and high exchangeable calcium content, in relation to the other contents.

### **1 - INTRODUÇÃO**

Por vezes, materiais encontrados na natureza não atendem às características necessárias para a função que se destinam, devendo-lhes escolher alternativas mais indicadas. Segundo Lambe e Whitman (1969), uma das possíveis soluções é a modificação das propriedades do solo para melhorar seu comportamento.

Assim, ao modificar artificialmente as características de um solo para adquirir um novo comportamento mais adequado à sua utilização em obra, realiza-se o processo da estabilização de solos.

Atualmente, a estabilização química tem sido utilizada com muita frequência na engenharia civil, isto se deve as vantagens de procedimentos executivos e alterações das propriedades do solo para que esse atenda os padrões exigidos. As melhorias provocadas pelo tratamento químico do solo, geralmente acontecem por meio da formação de gel químico e da ligação entre as partículas, juntamente com uma redução nas características de afinidade solo-água (Puppala, 2016).

Em solos argilosos verificam-se estruturas floculadas e dispersas que são sensíveis à presença de água, influenciando, assim, a resistência. Dessa forma, é recomendado utilizar agentes estabilizadores que provoquem a dispersão e/ou a floculação das partículas ou substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidro-repelentes seguida por ação cimentante (Marques, 2012). Little (1995) relata que para esses solos o aditivo mais indicado é a cal, já que esta produz melhorias no comportamento desses, tornando-os estruturalmente mais sólidos. O aumento da capacidade de suporte, da resistência ao cisalhamento, redução da expansividade, da plasticidade e da deformação são exemplos das melhorias alcançadas com o processo de estabilização com cal.

Guimarães (2002) afirma que, de modo geral, as alterações promovidas pela presença da cal no solo resultam em três tipos de ação: troca iônica e floculação, ação pozolânica e carbonatação. Segundo Little (1995), o processo de estabilização deste tipo de mistura ocorre em duas fases. Na primeira, praticamente, ocorrem às reações imediatas de troca de cátions e floculação, que se processam imediatamente após a adição da cal ao solo e podem se estender de minutos a dias. A segunda é lenta e abrange as reações pozolânicas, que são responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica das misturas de solo-cal. Além destas tem-se a carbonatação, a qual consiste em uma reação prejudicial (Little, 1995; Lovato, 2004).

A troca iônica refere-se à troca de bases com os argilominerais, esta provoca a floculação, a qual promove a diminuição da dupla camada dos argilominerais resultando na floculação das partículas de argila, ou seja, na formação de partículas com dimensões maiores (Cristelo, 2001; Guimarães, 2002; Marques, 2012). Essas reações são responsáveis pelas alterações das características do solo, logo após a adição da cal, tais como: granulometria, plasticidade, trabalhabilidade, compactação, e resistência mecânica (Cristelo, 2001).

De acordo com Little (1995), as reações pozolânicas são responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica das misturas de solo-cal. A ação pozolânica, a qual ocorre em longo prazo, produz compostos hidratados estáveis e com propriedades ligantes, devido às reações da sílica, alumina e ferro do solo com a cal (Guimarães, 2002; Marques, 2012). A carbonatação trata-se da absorção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) do ar pela cal, correspondendo à reação inversa da sua produção, formando carbonatos de cálcio e/ou magnésio (Marques, 2012). Cristelo (2001) afirma que, em circunstâncias adversas, o CO<sub>2</sub> também pode reagir com os produtos de hidratação dos solos estabilizados com cal, causando uma redução da resistência e aumentos de plasticidade.

Alguns fatores podem influenciar a estabilização da mistura solo-cal, entre eles: tipo de solo, solos finos respondem melhor ao procedimento, devido a maior superfície específica que intensifica as reações entre solo e cal (Marques, 2012); tipo e quantidade de cal, o tipo da cal influencia na estabilização em função dos seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio, sendo que as reações pozolânicas só ocorrem enquanto houver o aditivo, e caso o mesmo esteja em excesso pode ocorrer a carbonatação (Cristelo, 2001); densidade, determinante na resistência da mistura, visto que a compactação da mistura influencia a velocidade com que ocorre as reações solo-cal; condições de cura, recomenda-se controlar o tempo, a temperatura e a umidade das misturas (Little, 1995); e aditivos, muitas vezes é necessário adicionar outro aditivo (cinzas volantes, cimento Portland, resinas) a mistura para que ocorra a reações aglomerantes, a fim de alcançar os requisitos necessários (Guimarães, 2002).

Ainda, é observada a influência do teor de água, quanto melhor a qualidade maior a influência na mistura; e a presença: de sulfatos, podendo causar deterioração da mistura; e matéria orgânica, a qual retarda o processo das reações químicas (Little, 1995; Cristelo, 2001, e Lovato, 2004).

Abordado o contexto da estabilização química, mostra-se que esta solução pode ser bem atrativa. E, do ponto de vista técnico, financeiro e ambiental, justifica-se a escolha do tema da pesquisa em pauta, a qual busca avaliar o melhoramento físico-mecânico de um solo argiloso ao utilizar como aditivo a cal hidratada. São observadas também as alterações na capacidade de troca de cátions ao adicionar a cal à mistura. No estudo há particularidades que apresentam uma forma não convencional de imersão dos corpos de prova, além de verificar os teores de cal segundo a determinação do pH e da concentração de cálcio para as misturas realizadas.

## **2 - MATERIAIS E MÉTODOS**

O solo utilizado neste estudo foi coletado no município de São Cristóvão, Estado de Sergipe, Região Nordeste do Brasil, nas coordenadas geográficas Latitude 10° 55' 57" S e Longitude 37°10'19,6" W. A cal utilizada na estabilização foi a CH-I nos teores de 1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 11%, todos em relação à massa de solo seco.

### **2.1 - Preparação e caracterização do solo**

As amostras de solo passaram por uma secagem prévia ao ar, destorroamento, quarteamento e preparação segundo a norma NBR 6457. Uma vez preparadas as amostras, foram realizadas as caracterizações física, mecânica e química do solo natural e das misturas solo-cal.

#### **2.1.1 - Caracterização física**

Os ensaios de densidade real (NBR 6458), análise granulométrica (NBR 7181), limite de liquidez (NBR 6459) e limite de plasticidade (NBR 7180) foram executados para o conhecimento, identificação, diferenciação e classificação dos materiais. Para avaliar os efeitos do tempo de cura das misturas, foram realizados ensaios imediatamente após a adição de cal e após 2 horas de cura. As misturas de solo-cal foram acondicionadas em sacos plásticos por um período de duas horas e, após, foram realizados os ensaios.

#### **2.1.2 - Caracterização mecânica**

A caracterização mecânica foi realizada através dos ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR) e resistência à compressão simples. Os parâmetros de compactação, massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, foram determinados seguindo a norma NBR 7182, no Proctor normal. Para o CBR foi utilizada a norma NBR 9895, prensa manual da marca Pavitest, com anel dinamométrico de capacidade 4.000 Kgf e extensômetro de resolução de 0.001 mm.

A determinação da resistência a compressão simples (RCS) seguiu a norma NBR 12770, moldando-se 6 corpos de prova (CPs), seguindo a relação altura-diâmetro igual a 2, para cada teor de cal, com cura de 7 dias em câmara úmida (temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa  $\geq 95\%$ ). Após esse período, 3 CPs foram submersos em água, durante 1 hora e 30 minutos em média. Para isso os CPs foram colocados em recipientes sobre pedra porosa, em seguida foi adicionada a água até 1/8 de sua altura, o CP ficou nesta condição por 15 minutos. Após este tempo o mesmo foi invertido e aguardou-se mais 15 minutos. Decorrido este tempo, acrescentou-se água até 1/6 e 1/3 de sua altura, com intervalo de 30 minutos entre cada acréscimo. Por fim, o ensaio foi executado com deformação controlada a uma velocidade de 1 mm/min em todos os 6 corpos de prova. A prensa utilizada foi uma prensa manual simples para amostras de 80 mm a 200 mm de altura, com anel dinamométrico de capacidade de 300 Kgf, acoplado a extensômetro com resolução 0.001 mm, da marca Solotest.

#### **2.1.3 - Caracterização química**

A caracterização química foi feita através de ensaios de capacidade de troca de cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e pH, tomados como procedimentos o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997). Para determinação da capacidade de troca de cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  foi adotado o método do KCl N mol  $\text{L}^{-1}$ . Para realização do ensaio foi necessário preparar as amostras com antecedência de 24 horas, essas foram homogeneizadas e diluídas numa amostra de KCL, passando o dia sendo agitadas e a noite em repouso. No dia seguinte, realizou-se a filtração e extração, após estes procedimentos, iniciou-se a titulação de uma solução de EDTA 0.0125 mol  $\text{L}^{-1}$  na amostra, até viragem da cor rósea para roxa. O volume de EDTA gasto corresponde ao cálcio trocável existente ( $\text{Ca}^{2+}$  (cmolc/kg) = mL EDTA).

No ensaio de pH realizado utilizou-se como meio de suspensão solo-líquido água destilada. As leituras foram efetuadas no medidor de pH, para tanto foi necessário 1 g de amostra diluída em 100 g de água, para cada mistura.

## **3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **3.1 - Caracterização do solo natural**

Os resultados dos ensaios de caracterização física, mecânica e química estão apresentados no Quadro 1 e a curva de distribuição granulométrica na Figura 1. O ensaio por peneiramento e sedimentação mostrou as seguintes percentagens: 1,19% de pedregulho, 46,10% de areia, 19,79% de silte e 32,94% de argila, caracterizando um solo argiloso CL, segundo a Unified Soil Classification System e A-6 (5), segundo a Transportation Research Board. Segundo DNIT (2006), os solos com esta classificação são argilosos, plásticos, apresentando, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. O grupo

possui também misturas e solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200.

No ensaio de CBR foi verificado que o solo natural apresentou baixa capacidade de suporte. Já o ensaio de RCS apresentou elevados valores, porém esses foram obtidos com corpos de prova sem submersão, uma vez que quando os CPs eram submersos ocorria completa desintegração.

Quadro 1 – Resultados da caracterização física, mecânica e química do solo natural

Ensaio	Valores
Limite de liquidez (%)	35
Limite de plasticidade (%)	19
Índice de plasticidade (%)	16
Densidade real dos grãos	2,667
Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,858
Umidade ótima (%)	13,7
Resistência à compressão simples (kPa)	672,4
Índice de suporte Califórnia (%)	10
Expansão (%)	0,35
pH	6,36
Concentração de íons de Cálcio (cmolc/kg)	2,3

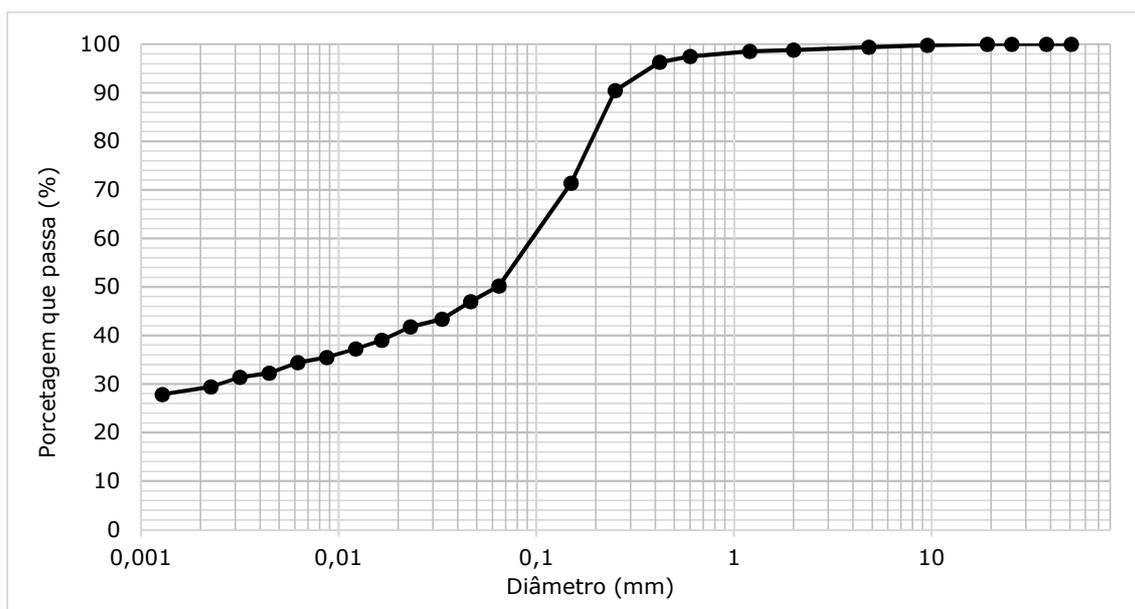


Figura 1 – Curva de distribuição granulométrica do solo natural

### 3.2 - Caracterização física das misturas solo-cal

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de distribuição granulométricas das misturas solo-cal, imediatamente após a mistura, com teores de 1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 11%. Como mostrado por Guimarães (2002) e verificado no estudo de Portelinha (2008), houve expressiva redução da fração argilosa e aumento na fração de silte. Este comportamento se deve à ação de trocas catiónicas, que promovem a floculação ou agregação da cal às partículas de argila, transformando estas em silte. Percebe-se que as frações de pedregulho e areia não sofreram influência da cal. Nota-se ainda que, os teores de 1% e 3% praticamente não alteraram a granulometria do solo natural. A partir de 5% do aditivo, há uma redução da fração de argila até o acréscimo de 9% de cal. Já para o teor de 11%, a redução desta fração não foi tão eficiente. Isto pode ter ocorrido devido ao excesso de cal na mistura a qual proporciona uma grande floculação, que decanta no fundo da proveta dificultando a leitura pelo densímetro.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de distribuição granulométricas das misturas solo-cal, 2 horas após a mistura, com teores de 1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 11%. Pode-se observar que para os teores de 1%, 3% e 5% a cura teve pouca influência, resultando em curvas de distribuição granulométricas muito

semelhantes com as dos ensaios realizados imediatamente após as misturas. Já para os demais teores houve uma menor redução nas frações de argila das misturas. Isto é, houve uma maior redução da fração argilosa para os ensaios sem cura. Uma possível causa é o efeito de carbonatação, atribuída à presença de cal sem reagir na mistura e incorporação de ar durante a homogeneização do material.

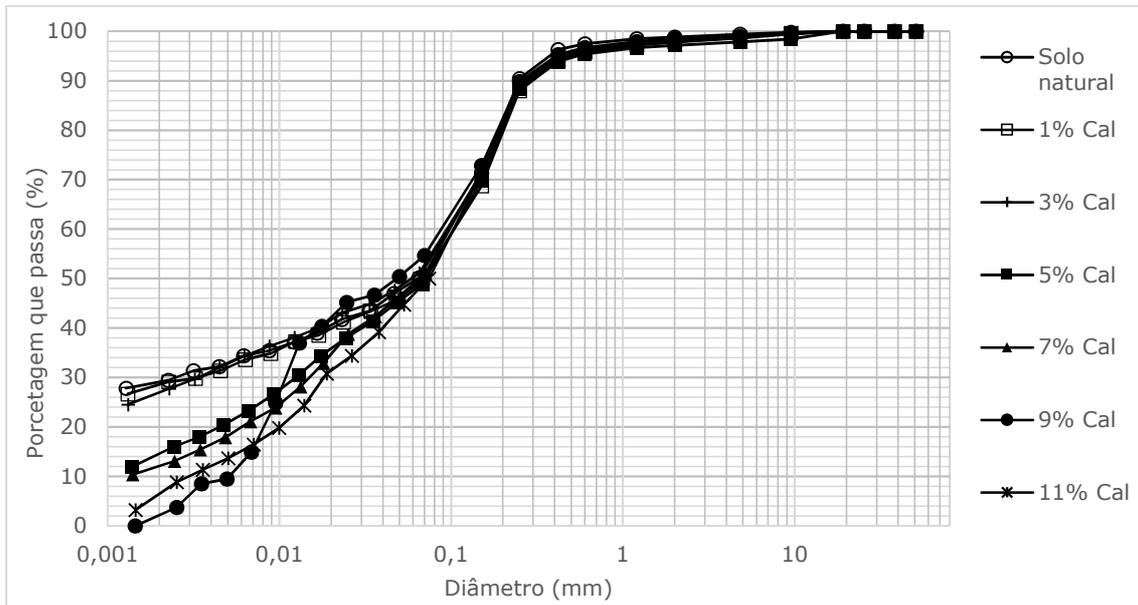


Figura 2 - Curvas de distribuição granulométricas imediatamente após a mistura solo-cal

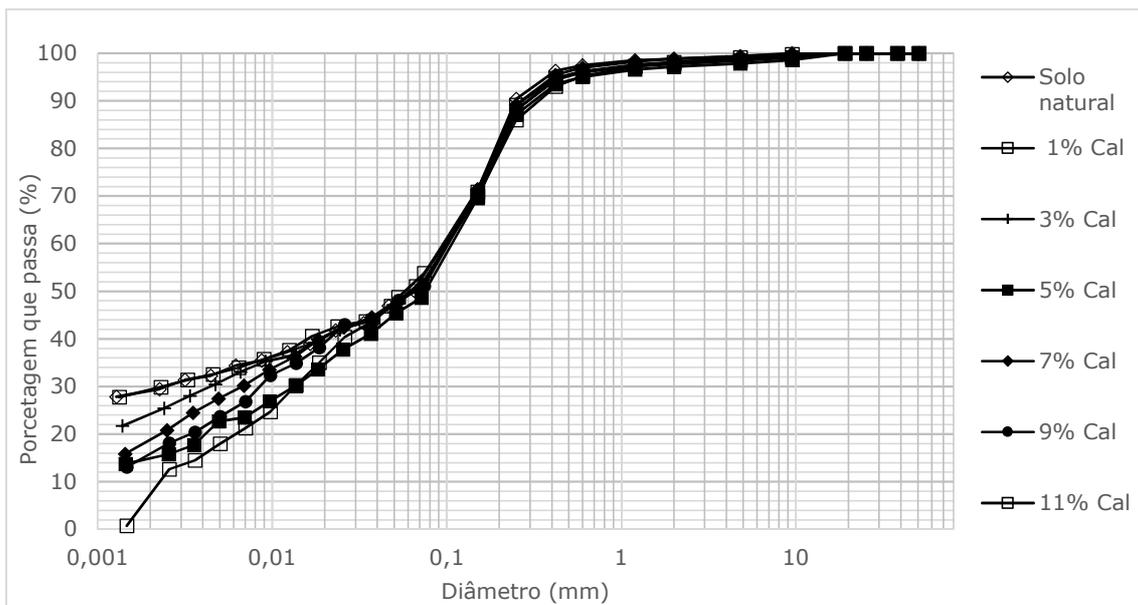


Figura 3 - Curvas de distribuição granulométricas 2 horas após a mistura solo-cal

Os resultados dos limites de Atterberg imediatamente após a mistura solo-cal estão reunidos graficamente na Figura 4. Verificou-se uma redução na plasticidade das misturas para todos os teores pesquisados. Nota-se ainda que, baixos teores do aditivo provocaram redução de cerca de 50% desta, concordando com Portelinha (2008) os quais mostraram que baixos teores de cal proporcionaram redução desta característica. Observa-se ainda que, até 7% do aditivo, a plasticidade torna-se constante podendo reduzir conforme se aumenta o teor de cal. Porém, a partir deste teor, a plasticidade volta a crescer, não justificando assim o acréscimo do aditivo. Isto pode ter ocorrido devido ao efeito da carbonatação, resultante do excesso de cal nas misturas.

Os resultados dos limites de Atterberg 2 horas após a mistura solo-cal estão reunidos graficamente na Figura 5. Observa-se uma redução da plasticidade conforme se aumenta o teor do aditivo, até o teor de 3%. A partir deste nota-se que houve um aumento do índice de plasticidade, resultado semelhante ao encontrado por Portelinha (2008). Isto pode ser atribuído pelo fato de as reações de troca catiônica, principais responsáveis pela redução da plasticidade, acontecerem imediatamente após a mistura.

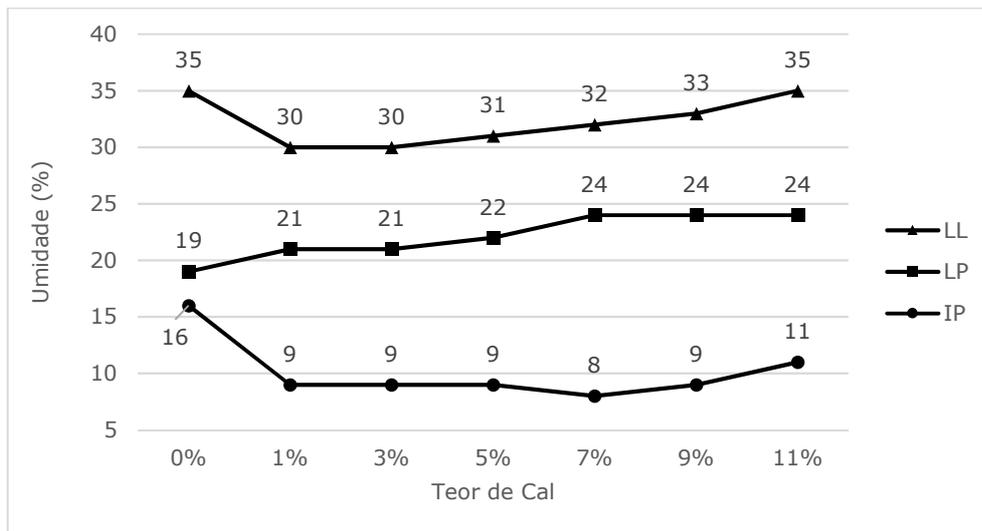


Figura 4 - Limites de Atterberg imediatamente após a mistura

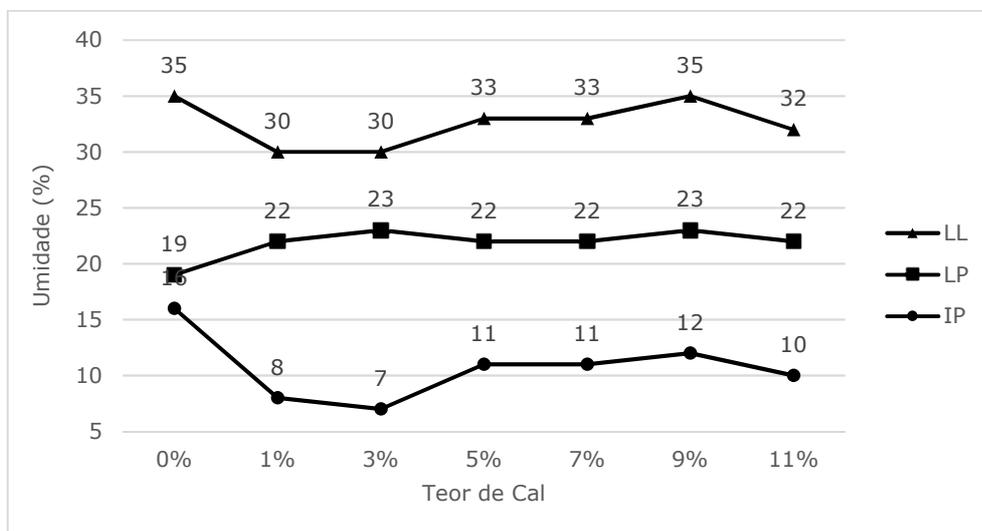


Figura 5 - Limites de Atterberg 2 horas após a mistura

### 3.3 - Caracterização mecânica das misturas solo-cal

A Figura 6 mostra as curvas de compactação das misturas solo-cal. Observa-se uma redução na massa específica aparente seca máxima e consequente aumento na umidade ótima, o que está de acordo com os estudos de Little (1995) e mais recentemente Souza (2014). Esta alteração nos parâmetros de compactação ocorre pelo fato de o solo se tornar mais floculado quando se adiciona a cal (Lovato, 2004).

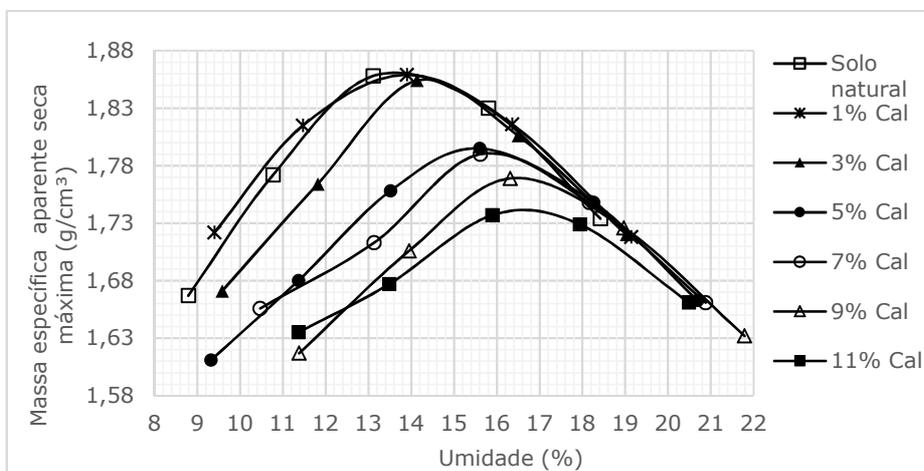


Figura 6 - Curvas de compactação das misturas solo-cal

Com os parâmetros determinados nos ensaios de compactação, foram realizados os ensaios de índice de suporte Califórnia. O Quadro 2 apresenta os valores do CBR, expansão e grau de compactação (GC) obtidos para as misturas solo-cal compactadas na energia de Proctor normal.

Quadro 2 – Valores de CBR, expansão e GC

Teor de cal	CBR (%)	Expansão (%)	GC (%)
0%	10	0,35	99
1%	28	0,12	98
3%	46	0,08	98
5%	31	0,13	101
7%	29	0,10	100
9%	22	0,10	100
11%	32	0,09	102

Os resultados demonstram de forma bem clara o aumento da capacidade de suporte com adição da cal. Porém, a partir do teor de 5% há um decréscimo, tendendo a aumentar quando o teor de cal foi de 11%. Autores como Araújo (2009) e Guimarães (2002) comentam este acréscimo quando comparado com o solo natural.

Núñez (1991), citado por Araújo (2009), afirma que a baixa capacidade de troca catiônica faz com que pequenos teores satisfaçam apenas a afinidade da cal pelo solo, enquanto que a cal em excesso é consumida em reações pozolânicas, que não ocorrem de imediato e não se iniciam durante o período de 96 horas de imersão, a que são submetidos os corpos de prova durante o ensaio de CBR.

No que diz respeito à expansão, apesar de a expansão do solo natural não ser elevada, houve uma redução conforme o acréscimo de cal, o que está de acordo com os trabalhos de Bordignon (2015) e Souza (2014).

Os resultados do ensaio de resistência a compressão simples estão reunidos no Quadro 3 para os corpos de prova da mistura solo-cal com e sem submersão após 7 dias de cura. A Figura 7 demonstra de forma mais compreensível o comportamento dos valores médios de RCS para as duas situações estudadas.

Quadro 3 – Valores da resistência à compressão simples

Amostra	Unidade	Teor de cal						
		0%	1%	3%	5%	7%	9%	11%
Sem imersão								
CP01	kPa	640,1	586,1	839,7	806,9	548,9	687,5	534,6
CP02	kPa	687,8	632,6	670,5	801,0	617,7	838,2	1089,0
CP03	kPa	689,4	539,4	799,5	721,0	727,7	736,3	666,9
CP04	kPa	-	-	-	-	-	820,2	-
Média	kPa	672,4	586,0	769,9	776,3	631,4	770,6	763,5
Com imersão a 1/3 da altura do CP								
CP01	kPa	*	*	26,4	69,6	270,8	122,1	80,6
CP02	kPa	*	*	44,6	125,6	155,6	40,1	93,7
CP03	kPa	*	*	64,5	69,1	128,6	77,9	*
Média	kPa	-	-	45,2	88,1	185,0	80,0	87,2

Ao analisar os dados é possível notar, como relatado por Cruz et al. (2013), que os valores obtidos nos ensaios de RCS para os corpos de prova sem submersão apresentam maior resistência que os imergidos em água a 1/3 da altura. Além disso, os dados apresentados não mostram uma tendência, para os CPs sem submersão.

A menor resistência obtida sem submersão foi para o teor de 7% de cal e isto pode ter ocorrido por problemas na homogeneização ou carbonatação da mistura. Destaca-se que, os principais incrementos de resistência ocorrem para maiores períodos de cura devido à ação cimentante da cal, conforme comenta Neves e Fonseca (2012).

Em relação aos CPs submersos, nota-se uma grande melhoria na resistência quando adicionado os teores de cal, uma vez que os mesmos praticamente não sofreram desintegração (com exceção do teor de 1%), determinando o teor ótimo de 7% para esta condição.

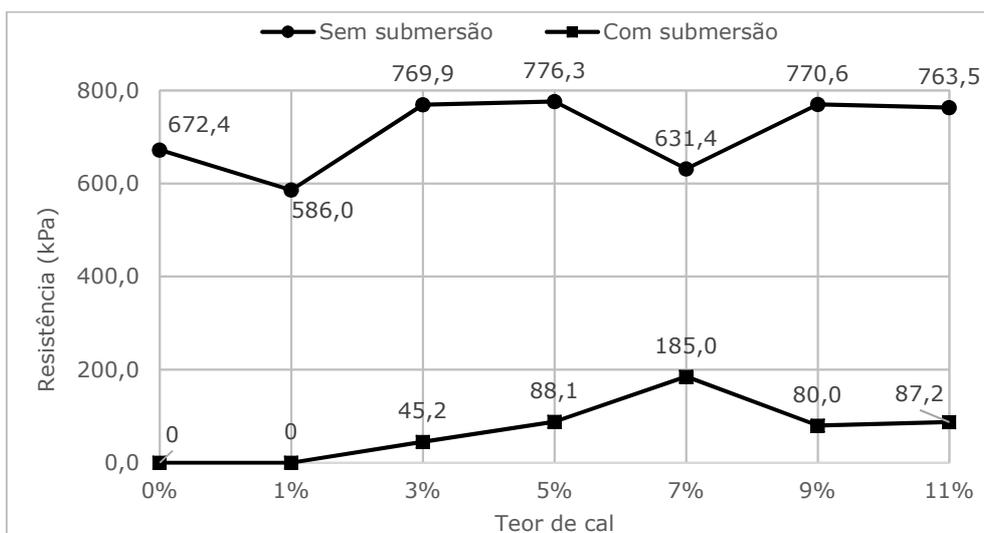


Figura 7 - Variação da RCS em relação à % cal

### 3.4 - Caracterização química das misturas solo-cal

Para Portelinha (2008) é importante conhecer as propriedades químicas dos solos, já que estas auxiliam na compreensão das propriedades dos solos estabilizados. De acordo com Santos (1989), aumentando a carga positiva dos íons no meio, a exemplo da cal ( $\text{Ca}^{2+}$ ), o potencial eletrocinético da partícula argilosa e a repulsão entre as partículas diminuem e há formação de aglomerados de partículas. Ocorre, então, a floculação.

No Figura 8 são apresentados os valores de base trocáveis de  $\text{Ca}^{2+}$  para as misturas solo-cal. Percebe-se um crescimento na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  à medida que se aumenta o teor de cal adicionada ao solo. Isto comprova a teoria de que as reações de floculação iniciam-se imediatamente após a mistura e tem grande contribuição na estabilização da plasticidade do solo. Observa-se ainda que, a partir de 7% do aditivo, não há um aumento proporcional.

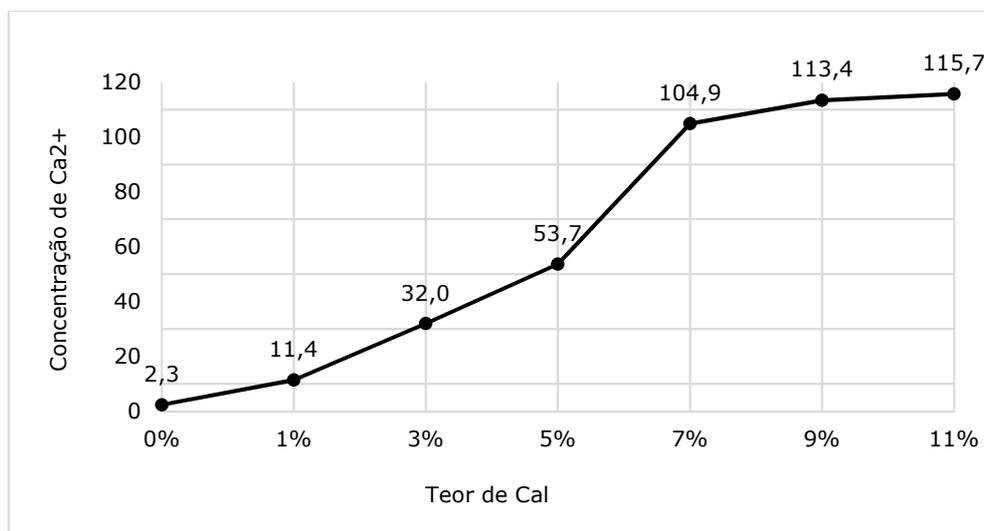


Figura 8 - Resultados da análise de troca de íons de cálcio

Os valores obtidos de pH estão apresentados na Figura 9. Conforme comentado por Guimarães (2002), a cal faz elevar o pH da mistura. Verificou-se que, para 5% do aditivo, o pH atingiu valores pouco maiores que 12. Hilt e Davidson (1960) citados por Portelinha (2008), afirmam que isto proporciona aumento da capacidade de troca catiônica.

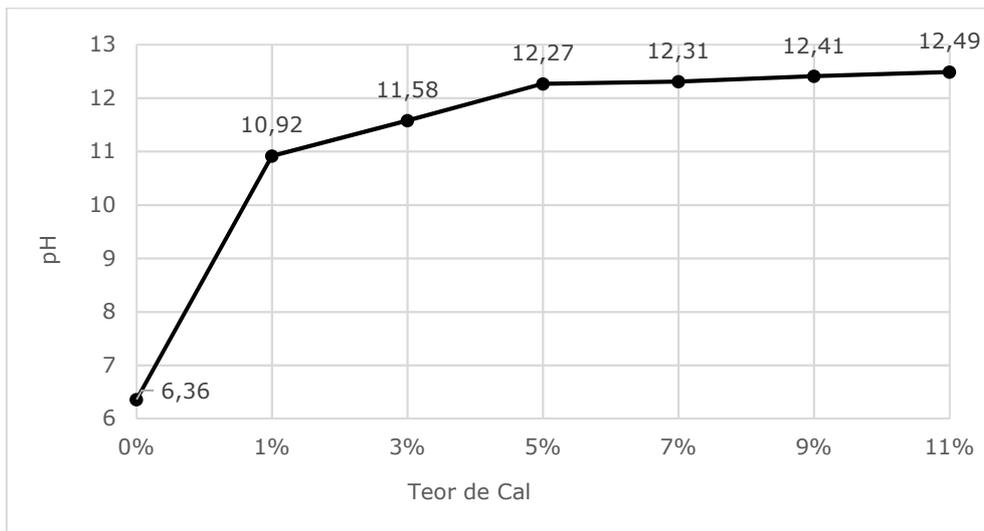


Figura 9 - Variação do pH com o acréscimo de cal

#### 4 - CONCLUSÃO

O estudo realizado buscou avaliar o melhoramento físico-mecânico de um solo argiloso e as alterações na capacidade de troca de cálcio ao utilizar como aditivo a cal hidratada. Os resultados obtidos permitiram concluir os seguintes pontos em relação às características analisadas:

- ✓ redução da fração argilosa e aumento da fração de silte, variando com o teor de cal. Para os teores de 1% e 3% praticamente não alteraram a granulometria do solo natural. A partir da adição de 5% de cal notou-se maior eficiência das reações, alcançando melhores resultados com o teor de 9% sem cura. Notou-se uma menor redução das frações citadas para uma cura de 2 horas, provavelmente devido ao efeito da carbonatação;
- ✓ redução na plasticidade das misturas para todos os teores pesquisados. Observou-se que para baixos teores de aditivo o efeito da redução é mais expressivo. Os melhores resultados de redução da plasticidade ocorreram imediatamente após a mistura, fato que demonstra a melhor eficiência da reação de troca catiônica nesta situação;
- ✓ redução na massa específica aparente seca máxima e consequente aumento na umidade ótima das misturas em relação ao solo natural;
- ✓ aumento da capacidade de suporte com adição da cal, porém a partir do teor de 5% há um decréscimo, tendendo a aumentar quando o teor de cal foi de 11%;
- ✓ maiores valores de resistência para os corpos de prova sem submersão, contudo, os dados não demonstraram uma tendência. Para os CPs submersos em água a 1/3 da altura observou-se uma melhoria na resistência quando adicionado os teores de cal, uma vez que os mesmos praticamente não sofreram desintegração, com exceção do teor de 1%;
- ✓ crescimento na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e elevação do pH à medida que aumentou-se o teor de cal adicionado ao solo.

Por fim conclui-se que, entre todos os teores de cal estudados, os teores de 3%, 5% e 7% se mostraram os mais eficientes para a estabilização do solo, visto que apresentaram uma melhoria significativa nas características do solo puro (granulometria, plasticidade, capacidade de suporte, resistência à compressão, concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e pH) em comparação aos demais teores. E entre esses teores, 7% seria o mais indicado, uma vez que apresentou maior resistência à compressão, quando o corpo de prova foi submerso, atingiu pH que favorecem as reações e um teor de cálcio trocável elevado, em relação aos outros dois teores.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, por todo apoio dado durante a 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. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2016. 8p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 1984. 6 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. 2016. 5 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. 2016. 3 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. 2016. 12 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. 2016. 9 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (CBR) - Método de ensaio. 2016. 14 p. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. 1992. 4 p. Rio de Janeiro.
- Bordignon, V. R. (2015) - Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- Cristelo, N. M. C. (2001) - Estabilização de solos residuais graníticos através da adição da cal. 2001. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Cruz, N., Neves, E. C. e Santos, J. (2013) - Melhoramento com cal de um solo do miocénico para utilização em camadas de leito de pavimento. Artigo. Universidade de Aveiro, Gaia, Portugal.
- DNIT (2006) - Manual de pavimentação, 3rd ed., Rio de Janeiro.
- EMBRAPA (1997) - Manual de métodos de análise de solo. 2nd ed. Rio de Janeiro. EMBRAPA-CNPQ.
- Guimarães, J. E. (2002) - A cal - Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil. 2. Edição. Editora Pini. São Paulo.
- Lambe, T. W. e Whitman, R. V. (1969) - Soil Mechanics. New York. John Wiley & Sons.
- Little, D. N. (1995) - Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Published by Kendall/Hunt Publishing Company.
- Lovato, S. L. (2004) - Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Marques, G. L. de O. (2012) - Pavimentação. Universidade Federal de Juiz de Fora. Versão 06.2.. 204 p.
- Neves, E. C. Fonseca, A. V. (2012) - Evolução no tempo do comportamento mecânico de solos melhorados com cal aérea. Revista Geotecnia nº 122. p. 31-47.
- Puppala, A. J. (2016) - Advances in ground modification with chemical additives: from theory to practice. Transportation Geotechnics. pp. 123-138.
- Portelinha, F. H. M. (2008) - Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.
- Santos, P. S. (1989) - Ciência e tecnologia de argilas. 2nd ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda.
- Souza, A. N. S. (2014) - Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas. Brasília.