

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE EXPANSÃO DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO COM E SEM ADIÇÃO DE CAL



MIGUEL ANGEL MELLO SILVA JUNIOR

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, miguelmello@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho analisa o comportamento de um solo argiloso compactado, potencialmente expansivo, localizado nas proximidades do Complexo Industrial de Suape, Município de Ipojuca, litoral sul do Estado de Pernambuco. Tem como objetivo específico avaliar a metodologia adotada por EADS & GRIM (1966) para a definição do teor de cal ótimo a ser utilizado e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de adição de cal. Foram ensaiados corpos de prova compactados do solo sem adição de cal e para diferentes teores. A estabilização de solo expansivo utilizando a cal tem sido usada com sucesso em muitos projetos para minimizar expansão e melhorar a plasticidade e trabalhabilidade do solo. A caracterização do solo compactado com e sem adição de cal consistiu na determinação de índices físicos, obtenção de curvas granulométricas, determinação da capacidade de troca catiônica e do pH. Foram executados, ainda, ensaios de potencial de expansão, pressão de expansão e ensaios de sucção através da técnica do papel de filtro, obtendo-se as curvas características de umidade do solo. Os ensaios para a determinação do teor ótimo de cal foram realizados segundo metodologia, baseada no pH, proposta por EADS & GRIM (1966). A análise dos resultados obtidos confirma a proposta apresentada pelos autores, ou seja, ocorre uma redução da expansão quando o solo se encontra com um pH próximo a 12,4 para o teor de cal ótimo obtido através do método proposto.

Palavras-chaves: solo expansivo; estabilização com cal; potencial de expansão; pressão de expansão.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF EXPANSION OF A CLAYEY SOIL COMPACTED WITH AND WITHOUT THE ADDITION OF CAL

This paper analyzes the behavior of a compacted clay soil, potentially expansive, located near the Industrial Complex Suape Ipojuca city, south coast of Pernambuco State. Specific aims to evaluate the methodology adopted by EADS & GRIM (1966) to define the optimum lime content being used and analyze the behavior of expansion for different levels of addition of lime. We tested specimens compacted soil without lime addition to different levels. The stabilization of expansive soil using lime has been used successfully in many projects to minimize expansion and improve the plasticity and workability of soil. The characterization of the compacted soil with and without addition of lime was the physical indices, obtaining size distribution curves, determination of cation exchange capacity and pH. Were performed, also testing the potential for expansion, expansion pressure and testing of suction using the technique of filter paper, resulting in the characteristic curves of soil moisture. The tests for determining the optimum lime content were performed using methods based on pH, proposed by EADS & GRIM (1966). The results obtained confirm the proposal presented by the authors, i.e. a reduction of the expansion occurs when the soil is with a pH around 12.4 to the optimum lime content obtained through the proposed method.

Keywords: expansive soil; lime stabilization; swell potential; swelling pressure.

1 INTRODUÇÃO

Um solo potencialmente expansivo é aquele que apresenta variações de volume diante da variação da umidade ou sucção, sendo constituído na sua fração mais fina por minerais expansivos (JUSTINO DA SILVA, 2005).

O problema dos solos expansivos não era reconhecido pelos engenheiros até 1930. Os danos ocorridos nas construções da época eram atribuídos a outras causas que não à atuação desse tipo de solo. O U. S. Bureau of Reclamation reconheceu os problemas de solos expansivos em 1938, quando da construção da fundação de um sifão de aço (CHEN, 1988).

Solos expansivos são encontrados em todos os cinco continentes e são particularmente difundidos em regiões áridas e semi-áridas. Em alguns países subdesenvolvidos, os edifícios foram construídos sem qualquer conhecimento da presença de solos expansivos. Isso foi em parte devido à falta de evidências históricas. Com o rápido desenvolvimento de infra-estrutura urbana, problemas de solo expansivo se tornaram mais evidentes. Há, portanto, uma necessidade de abordar problemas associados a estes solos (NG & MENZIES, 2007).

Os solos expansivos variam de volume com a variação de umidade ou sucção, representando, conseqüentemente, um caso particular de solo não-saturado, sendo por tal motivo aplicáveis os estudos desenvolvidos por FREDLUND & RAHARDJO (1993), sendo estes referências mundiais em solos não-saturados.

Embora a solução mais recomendada no meio técnico seja a substituição do solo expansivo por outro sem essa característica, em algumas ocasiões isso pode se tornar inviável. Por exemplo, em empreendimentos que incluem grande movimentação de terra, conforme observado recentemente no complexo industrial portuário de Suape, em Pernambuco, a escassez de locais utilizáveis como bota-fora e, principalmente, a dificuldade de serem encontrados materiais em distância viável que pudessem substituir os solos expansivos tornam importante o estudo do tratamento do solo existente. A aplicação de aditivos é uma das alternativas, e a cal o mais utilizado no mundo para esse tipo de problema.

Há alguns métodos desenvolvidos para a sua dosagem, sendo que o de EADS & GRIM (1966) é um dos baseados no pH do solo, recomendado por NELSON & MILLER (1992), pela ASTM D 6276, pela TM 5-818-7 das forças armadas americanas, entre outros.

As investigações realizadas neste trabalho têm por objetivo verificar a aplicabilidade da metodologia proposta por EADS & GRIM (1966) e analisar o comportamento de expansão para diferentes teores de cal. Com isso, será possível embasar soluções de engenharia para viabilizar alternativas de construção que utilizem jazidas desse tipo de solo para fins de pavimentação e terraplenagem.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de deformação de uma argila potencialmente expansiva compactada com adição de cal através de ensaios de laboratório. Como objetivo secundário, avaliar a metodologia de EADS & GRIM (1966) e o comportamento do solo sem cal e com adição de 9% de cal durante a secagem e umedecimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra coletada para a realização desta pesquisa é proveniente de área próxima ao canteiro de obras da Refinaria Abreu e Lima, do complexo industrial portuário de Suape, no Município de Ipojuca, Pernambuco. Algumas obras da área de Suape identificaram a presença de solo expansivo na etapa de terraplenagem. Em face disso foram tomadas várias providências para sanar os problemas provenientes desse tipo de solo. Uma delas foi o aprofundamento do entendimento das propriedades relacionadas ao seu comportamento.

3.1 Aspectos geológicos da área de coleta do solo estudado

O local de coleta de amostra está situado na Província Costeira de Pernambuco, que é dividida em dois grandes elementos geológicos: o embasamento cristalino e uma seqüência da idade mesozóica, acumulada nas Bacias Pernambuco/Paraíba, ao norte, e Cabo, ao sul.

No local de coleta da amostra estavam presentes afloramentos de rochas vulcânicas escuras e de granulação fina, como o basalto, em vários estágios de intemperismo, características da Formação Ipojuca, representada pela sigla Kv e Kig. A avaliação geral da área permite-se concluir que trata-se de um solo de origem residual.

Segundo ALMEIDA (2003), esse termo foi introduzido por AMARAL & MENOR (1979) para designar a província magmática cretácea, constituída por rochas magmáticas, como os basaltos, andesitos, traquitos e riolitos, e o Granito do Cabo. Mais recentemente, alguns autores têm se referido a essa formação como Suíte Mágica Ipojuca.

Ocorrem intercaladas em camadas ou intrudidas na Formação Cabo ou no embasamento cristalino (ALMEIDA et al, 2003).

3.2 Aspectos mineralógicos do solo estudado

SILVA (2012) realizou com amostra coletada no mesmo local da presente pesquisa ensaio mineralógico através de difração de raios X.

Ele distinguiu a presença exclusiva de argilo-mineral do grupo das esmectitas, sendo distinguida a montmorilonita, francamente expansível se imersa em água. A Figura 1 apresenta gráfico gerado na execução do ensaio de difração de raios X.

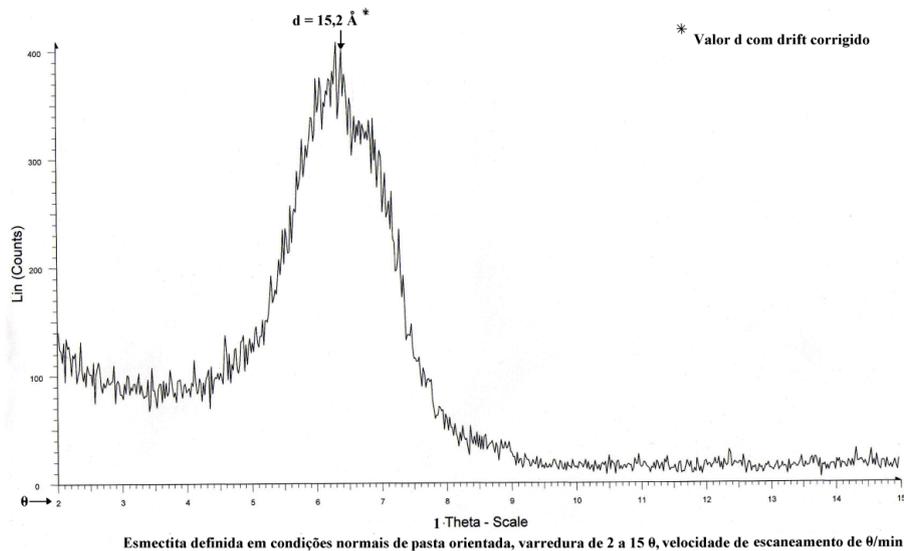


Figura 1 - Gráfico do difratograma de raio X na condição normal (SILVA, 2012).

3.3 Atividades de laboratório

Foram realizados ensaios de caracterização física e química, ensaios de compactação, determinação do teor da cal e da sucção matricial, potencial de expansão e pressão de expansão, para corpos de prova sem e com adição de cal.

3.3.1 Seleção da cal utilizada na estabilização

A cal utilizada é do tipo CH-I, definida pela NBR 7175, segundo Tabela 1:

Tabela 1 - Composição da cal segundo NBR 7175

		CH-I	CH-II	CH-III
CO ₂	Na fábrica	≤5%	≤5%	≤13%
	No depósito	≤7%	≤7%	≤15%
Óxido não-hidratado		≤10%	≤15%	≤15%
Óxidos totais na base não-voláteis		≥90%	≥88%	≥88%

Embora os tipos de cal hidratada, segundo alguns autores, não influenciavam consideravelmente nos resultados, para essa pesquisa foi selecionada essa cal devido à menor presença de CO₂, o que diminui a influência de outras espécies químicas além daquelas relacionadas ao interesse da pesquisa.

3.3.2 Dosagem da cal utilizada

Todas as dosagens realizadas com cal e solo, para todos os ensaios, foram efetuadas em peso seco, segundo equação (1) que se segue:

$$\frac{\text{Peso seco de cal}}{\text{Peso seco de solo}} = k \quad (1)$$

Sendo que k poderia assumir diferentes valores, a depender do ensaio, entre 0 e 10%.

As amostras, quando precisavam manter uma determinada umidade, eram acondicionadas com o mínimo de ar em sacos plásticos impermeáveis e devidamente fechados, impedindo também reações com componentes do ar atmosférico, o

que poderia adicionar mais uma variável ao comportamento dos ensaios.

3.3.3 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

Com um pH-metro digital procedeu-se à determinação do pH de uma amostra sem cal e amostras de solo dosadas com percentuais de 1% a 10% de cal, variando de 1% em 1%, com base na TM 5-822-14, com algumas adaptações principalmente devido aos equipamentos disponíveis.

3.3.4 Dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo

Foi realizada a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo (ensaio de dispersão SCS), com base na NBR 13602. A definição da composição granulométrica foi realizada com base na NBR 6502, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Definição do tamanho de partículas segundo NBR 6502

	Menor diâmetro (mm)	Maior diâmetro (mm)
Pedregulho	2,0	60,0
Areia grossa	0,6	2,0
Areia média	0,2	0,6
Areia fina	0,06	0,2
Silte	0,002	0,06
Argila	0	0,002

Com isso, além de serem obtidas informações a respeito da distribuição granulométrica, também foram obtidas informações relativas à dispersibilidade do material, o que poderá fornecer informações que podem ser utilizadas quando da confrontação com os ensaios químicos do complexo sortivo e da capacidade de troca catiônica.

Com base na determinação do pH, concluiu-se que o teor de 9% de cal seria o que provavelmente proporcionaria a melhor resposta em relação à redução do potencial de expansão e da pressão de expansão. Logo, foram realizados ensaios com duas amostras: uma com material sem cal e outro com material dosado com o teor de 9%

de cal, com cerca de 80 dias de cura, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, ocorreu a maioria das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com o resultado do ensaio.

3.3.5 Limites de consistência

Foram realizados ensaios de limite de liquidez e plasticidade, respectivamente, segundo a NBR 6459 (Solo - Determinação do limite de liquidez) e NBR 7180 (Solo - Determinação do limite de plasticidade). Para isso foram utilizadas amostras sem a cal e com dosagens 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante 80 dias, sem contato com o ar

atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios.

3.3.6 Ensaio de compactação

Foram realizados ensaios de compactação de acordo com a NBR 7182 (Solo - Ensaio de compactação). Para isso foram utilizadas amostras com solo sem a cal e com dosagens de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, curadas durante aproximadamente 50 dias, sem contato com o ar atmosférico. Com isso, esperou-se a ocorrência de boa parte das reações da cal com o solo que poderiam estar relacionadas com os resultados dos ensaios. Além disso, como o tempo de cura exerce influência no resultado dos ensaios, o seu aumento poderá tornar essa influência mais uniforme para as amostras.

Utilizou-se o processo de reuso do material após a secagem até próximo à umidade higroscópica. Isso foi possível devido ao fato de que a amostra, devido ao seu grande percentual de finos, não teria sua granulometria alterada em função do ensaio de compactação, fato que poderia ser verificado num ensaio em material com grãos quebradiços.

Optou-se pelo uso do cilindro pequeno, assumindo-se ligeira imprecisão no resultado, devido ao fato de uma fração muito pequena do ficar retida na peneira de 4,76mm na análise granulométrica, representando menos de 0,5% em peso. A energia do próctor normal foi utilizada uma vez que representa a condição usual em obras de terraplenagem.

3.3.7 Potencial de expansão e pressão de expansão

Foram realizados ensaios oedométricos em amostras de solo sem a cal e dosadas com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, tendo como referência a ASMT D 4546 (Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils).

Essa norma permite que se determine a magnitude da expansão ou colapso sob pressão axial

conhecida ou a magnitude da pressão vertical necessária para manter sem alteração de volume corpos de prova limitados lateralmente e axialmente carregados.

Foram necessárias algumas adaptações tanto do equipamento quanto do **método**. O **consolidômetro mencionado na norma** foi substituído pela prensa de adensamento tipo Bishop, que aplica uma carga à célula oedométrica. Por se tratar de solos expansivos, se utilizou sempre pedras porosas e papéis filtro secos, para evitar expansão antes do início do ensaio. Além disso, devido ao objetivo único de determinação do potencial de expansão e da pressão de expansão, os ensaios cessaram quando os mesmos foram obtidos, embora a referida norma orientasse o prosseguimento dos ensaios para a determinação de parâmetros de adensamento.

Foram utilizados os mesmos equipamentos para os ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão visando com isso facilitar a comparação entre os resultados obtidos.

Inicialmente foram preparados corpos de prova através de compactação estática, utilizando os dados dos ensaios de compactação. Com isso, foi possível o controle do peso específico aparente seco e a umidade da amostra, embora, conforme já apresentado, provavelmente tenderia a apresentar valores de expansão menores do que caso fossem realizadas as moldagens de forma dinâmica, conforme ocorre em obras de terraplenagem.

3.3.8 Curva característica da umidade do solo

As curvas características da umidade do solo, tanto de secagem quanto de umedecimento foram determinadas através de sucessivas aferições de sucção matricial pelo método do papel de filtro. Para aproveitar a oportunidade de estudo tentou-se também a determinação da sucção total, mesmo utilizando um tempo de equilíbrio inferior ao recomendado por MARINHO (1995). Foram encontrados valores de sucção total menor do que os de sucção matricial, o que levou a não consideração dos resultados nesta pesquisa.

Para isso, foram preparados corpos de prova com materiais que passam na peneira de 4,76mm, sendo uma de solo sem a cal e outra de solo com acréscimo de 9% de cal, curada durante 15 dias.

A moldagem dinâmica foi escolhida por permitir que os resultados dos ensaios pudessem ser comparáveis aos dos ensaios de compactação, embora esse tipo de moldagem permita menor controle sobre a massa específica aparente seca.

Foram realizados ensaios de compactação para a determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima com a aplicação de energia do próctor normal, sendo o solo curado durante 15 dias antes dos ensaios de compactação, como medida de diminuição de influência do decorrer das reações químicas entre o solo e a cal no início das determinações de sucção.

Em seguida, foram compactados corpos de prova no cilindro de próctor com amostras de solo sem a cal e com 9% de cal, segundo os parâmetros dos ensaios de compactação. Na seqüência, foram extraídos e cravados anéis em cada um, sendo um na porção superior, outro no centro e outro na porção inferior.

Após a devida raspagem dos materiais excedentes e pesagem, os corpos de prova moldados com os anéis foram deixados expostos para secagem natural, visando a redução de volume por contração, o suficiente para que se descolassem do anel, com isso, a integridade do corpo de prova foi mantida, visto que não foi utilizada ação mecânica para a sua retirada.

A retirada do anel visava à manutenção de iguais condições de confinamento lateral do corpo de prova durante acréscimos e decréscimos de teor de umidade visto que, a depender da variação do seu volume, ora o anel proporcionaria confinamento, ora não, o que poderia influenciar nos resultados dos ensaios.

Em seguida cada corpo de prova recebeu uma camada de fita crepe na superfície lateral que ficara descoberta pela ausência do anel, visando manter a integridade da amostra e a sua liberdade de variação de volume, bem como sua identificação.

O processo de umedecimento se deu por efeito capilar e por uso do aspersor, conforme nível de dificuldade. O processo de secagem ocorreu com o auxílio da estufa, em que os corpos de prova eram deixados por alguns minutos.

O papel de filtro utilizado foi o Whatman N°42, de acordo com MARINHO (1995), com 70 mm de diâmetro e a curva de calibração de CHANDLER et al (1992).

As equações (2) e (3) foram utilizadas como curva de calibração para o papel de filtro do ensaio: Umidade do papel de filtro (w) \leq 47%: Sucção (kPa) = $10^{(4,84-0,0622w)}$ (2)

Umidade do papel de filtro (w) $>$ 47%: Sucção (kPa) = $10^{(6,05-2,48\log w)}$ (3)

O tempo de equilíbrio foi de 7 dias, conforme orientação de MARINHO (1995).

Abaixo segue o procedimento para a determinação da sucção e obtenção da curva característica da umidade do solo.

1. Os corpos de prova eram umedecidos ou ressecados até que a umidade variasse em torno de 5%, para os corpos de prova de solo sem a cal e 3% para os corpos de prova de solo com 9% de cal;
2. Pesaram-se os corpos de prova e em seguida foram adicionados os papéis de filtro, cortados em quatro, sendo um na face em contato direto com o solo (sucção matricial) e um sobre dois pedaços de tela circulares, mantendo uma distância em torno de 6 mm. Foram aplicadas várias camadas de filme de PVC, isolando o corpo de prova do contato com o ar atmosférico e apertando-se bem para manter seguro o contato com o papel de filtro;
3. Em seguida foram envolvidos individualmente em folhas de alumínio, servido de proteção contra a luminosidade e colocados em uma caixa de isopor de espessura de 30 mm;
4. Decorridos 7 dias, foram retirados os papéis de filtro rapidamente com uma pinça e pesados com precisão de 10^{-4} g;
5. Lançou-se na curva de calibração de CHANDLER et al (1992) para a determinação da sucção correspondente a uma dada umidade do papel de filtro;
6. Retornou-se à etapa 1 até que se obteve pontos suficientes para a determinação de curvas representativas das amostras;
7. Após a determinação do último ponto os corpos de prova foram mantidos na estufa por 10 dias para a determinação do peso seco.

3.3.9 Análises químicas realizadas

Foram realizados ensaios químicos de amostras de solos sem a cal e dosados com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% de cal, conforme segue lista:

- Potencial hidrogeniônico (pH) em água
- Complexo sortivo (cálcio, magnésio, potássio e sódio)
- Hidrogênio
- Alumínio
- Capacidade de troca catiônica (com pH 7,0)
- Saturação por bases, alumínio e sódio
- Fósforo assimilável

Entre a dosagem e a realização dos ensaios houve um intervalo de 80 dias, permitindo a confrontação com os outros ensaios. Utilizou-se a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para a realização dos ensaios.

A determinação da capacidade de troca catiônica se mostrou interessante pela relação citada por diversos autores com o potencial de expansão do solo, bem como com os efeitos da cal utilizada na estabilização.

Já o pH em água poderá ser comparado às determinações de pH utilizadas inicialmente na

dosagem de cal para se verificar algum indício de reação entre o solo e a cal.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Dosagem do solo expansivo com a cal

A Figura 2 mostra que o acréscimo de cal permitiu um aumento considerável no valor de pH, obtendo-se valores crescentes até o pico de 12,42, muito próximo de 12,4 considerado como o pH que proporciona a maior redução do potencial de expansão para o teor de cal ótimo, segundo a metodologia apresentada por EADS & GRIM (1966), TM 5-818-7, TM 5-822-14 e a ASTM D 6276.

Essa elevação de pH se deve à liberação de íons hidroxila, conforme estudos de ROGERS & GLENDINNING (2000) apud LOVATO (2004).

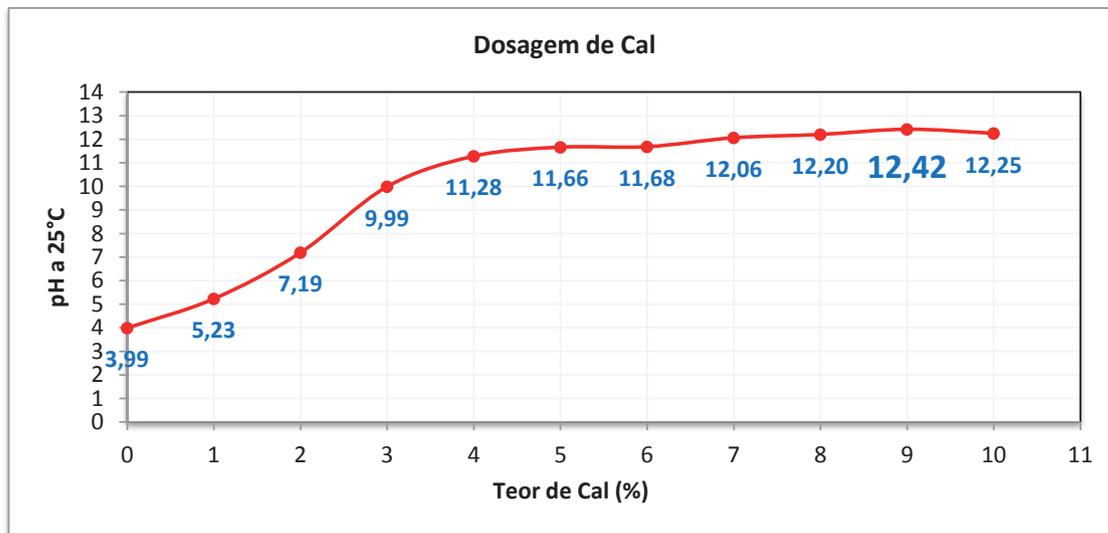


Figura 2 – pH do solo resultante das dosagens com a cal

4.2 Caracterização do solo sem a cal e com 9% de cal

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas do solo sem a cal e do solo dosado com 9% de cal, com e sem defloculante. A composição granulométrica, os valores

de limites de consistência e a porcentagem de dispersão para o solo sem e com 9% de teor de cal estão apresentados na Tabela 3. Utilizando-se os dados referentes à composição granulométrica e limites de consistência, segundo o Sistema de Classificação Unificada de Solos, o solo sem a cal é classificada como MH.

Tabela 3 – Composição granulométrica, limites de consistência e percentagem de dispersão

	Solo sem cal	Solo com adição de 9% de cal
Argila (%)	52	41
Silte (%)	36	14
Areia fina (%)	7	38
Areia média (%)	3	3
Areia grossa (%)	1	2
Pedregulho (%)	1	2
Partículas < 0,002 mm (%)	52	41
Limite de Liquidez (%)	67,3	NL
Limite de Plasticidade (%)	51,9	NP
Índice de Plasticidade (%)	15,4	NP
Percentagem de Dispersão (%)	6,25	0

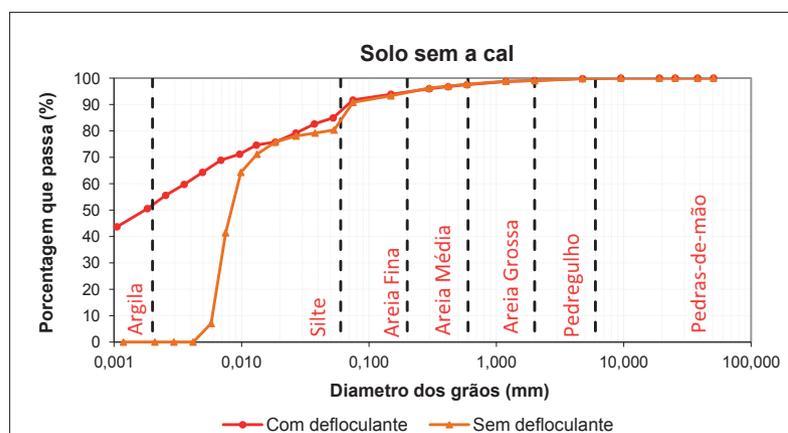


Figura 3 – Curvas granulométricas do solo sem a cal, com e sem defloculante

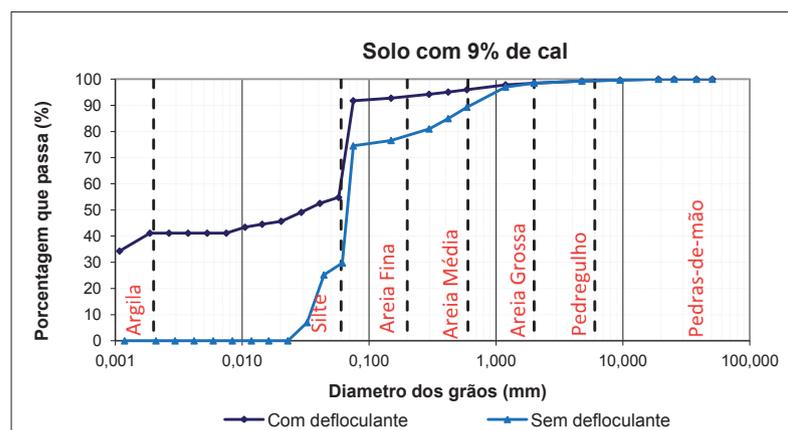


Figura 4 – Curvas granulométricas do solo com 9% de cal, com e sem defloculante

O solo sem a cal, segundo os critérios do Sistema de Classificação Unificado de Solos (ASTM, 1983 apud OLIVEIRA & BRITO, 1998), é classificado como MH.

Conforme definição da maioria das classificações de solos expansivos (CHEN, 1998) o solo

analisado possui uma característica comum a todos os solos expansivos, pois, apresenta um elevado percentual de partículas menores do que 0,002 mm (52%), conforme pode ser visto na Figura 3.

A adição de cal permitiu um aumento no percentual de partículas de textura mais grossa,

conforme se observa na Figura 4, correspondente à curva granulométrica referente ao solo com 9% de cal. Ainda na Figura 4 observa-se que ocorreu considerável desencontro nas curvas das amostras com e sem defloculante no intervalo referente à fração areia. Tal fato pode ser explicado por

fenômenos de floculação e/ou aglomeração também nessa fração em decorrência à adição de cal.

Na Tabela 4 se observa o efeito da adição de diferentes percentuais de cal ao solo na plasticidade, sendo evidentes as alterações nas características plásticas do solo.

Tabela 4 - Limites de consistência e plasticidade

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
9% cal	NL	NP	NP
7% cal	58,3	44,4	13,9
5% cal	58,5	45,9	12,6
3% cal	77,8	50,2	27,6
1% cal	78,4	55,4	23,0
0% cal	90,9	59,7	31,2

Através do confronto entre as composições granulométricas e os limites de consistência do solo sem a cal e com 9% de cal, conforme Tabela 3 e Figura 5, conclui-se que a cal proporcionou uma alteração considerável na textura do solo e no seu comportamento plástico. Tal fato se deve,

principalmente, à capacidade da cal em flocular e aglomerar as partículas devido ao aumento da concentração eletrolítica e redução da espessura da camada dupla difusa, visto que a cal possibilita um equilíbrio da deficiência de carga elétrica da partícula de argila.

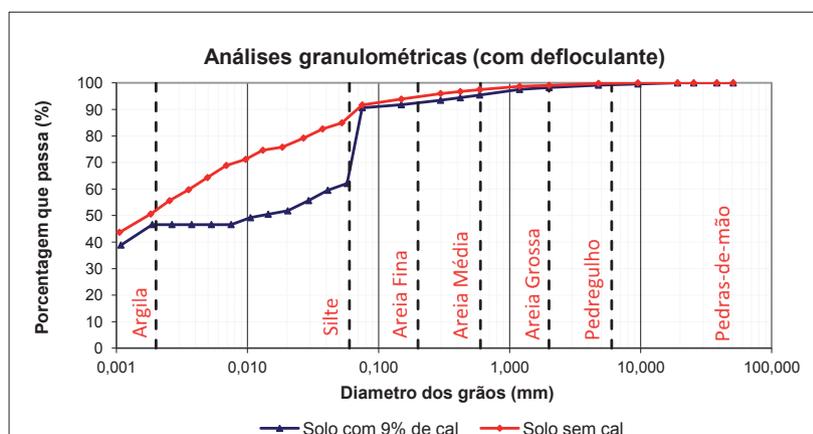


Figura 5 – Curvas granulométricas do solo natural sem a cal versus solo com 9% de cal

A cal reduz a deficiência por carga elétrica positiva das partículas do solo. Consequentemente diminui a afinidade do mineral expansivo por água e íons, levando à redução da expansão e alteração da plasticidade do solo.

Todos os autores pesquisados apontam para uma diminuição do índice de plasticidade do solo com o acréscimo de teores crescentes de cal, bem como do limite de liquidez. Conforme se observa

na Figura 6, houve redução do limite de liquidez e, na maioria das dosagens, do índice de plasticidade. Foi observado, também, redução no limite de plasticidade, em contraposição à elevação do limite de plasticidade apresentada por GOOSEN et al (2006), CASTRO (1981), CASTRO & SERAFIM LUIS (1974) e HILT & DAVIDSON (1960) apud PORTELINHA (2008).

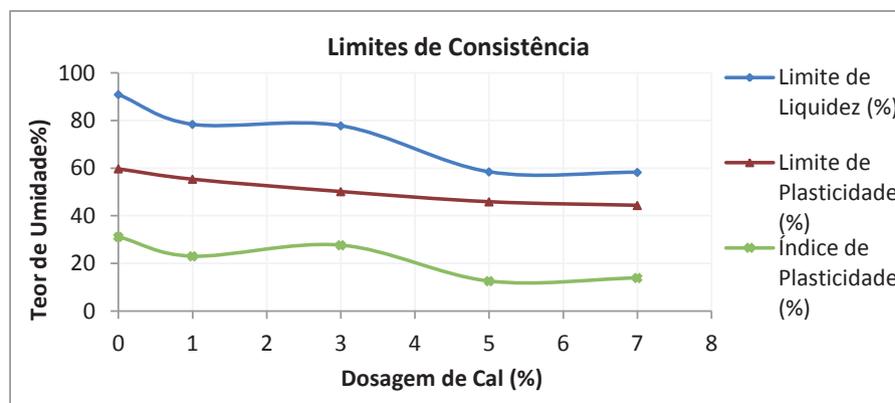


Figura 6 - Limite de plasticidade e de liquidez

4.3 Resultados dos ensaios de compactação

As curvas dos ensaios de compactação do solo sem cal e de todas as dosagens estão apresentados na Figura 7.

O intervalo de tempo entre a dosagem e ensaio de compactação foi de 80 dias. Conforme OSINUBI (1998) apud LOVATO (2004), quando decorrido um tempo considerável entre a mistura e o ensaio, através da reação de hidratação, às partículas se unem e torna-se necessário a ruptura das ligações formadas, para uma compactação satisfatória, o que pode ter ocorrido nos ensaios ilustrados na Figura 6. Com isto, para uma mesma energia de compactação, ocorreu uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com o acréscimo de cal pela dificuldade em quebrar as

agregações. Além disso, a floculação aumenta a quantidade e o tamanho dos vazios no solo, o que implica na necessidade de mais água para a sua ocupação, contribuindo também para a diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Na Figura 8 verifica-se uma diminuição da massa específica aparente seca máxima com teores crescentes de cal, a partir da dosagem de 1%. Na Figura 9, observa-se um comportamento geral de elevação da umidade ótima com os teores crescentes de cal, embora existam pequenas variações para menos, conseqüentes da imprecisão pertinente à própria metodologia do ensaio. A partir do teor de cal de 5%, tanto a diminuição da massa específica aparente seca quanto a elevação do teor de umidade ótimo apresentam uma variação mais acentuada.

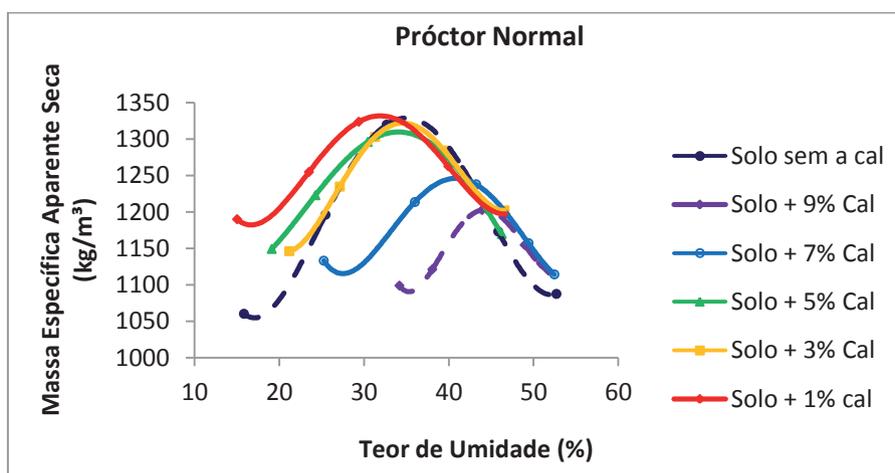


Figura 7 - Ensaio de compactação do solo sem e com adição de cal

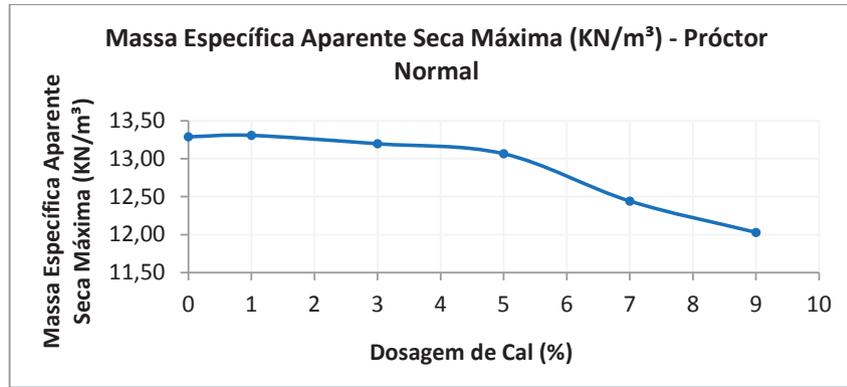


Figura 8 - Variação da massa específica aparente seca máxima com a adição de cal

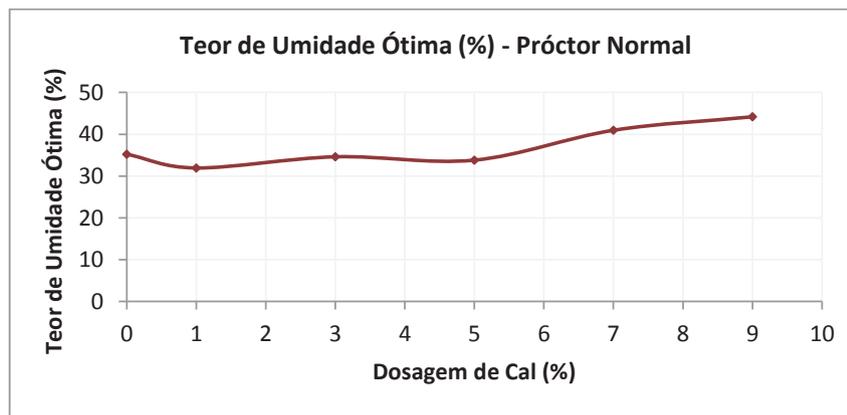


Figura 9 - Variação do teor de umidade ótima em relação ao teor de cal

4.4 Potencial de expansão e pressão de expansão

As figuras 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios de potencial de expansão e de pressão de expansão.

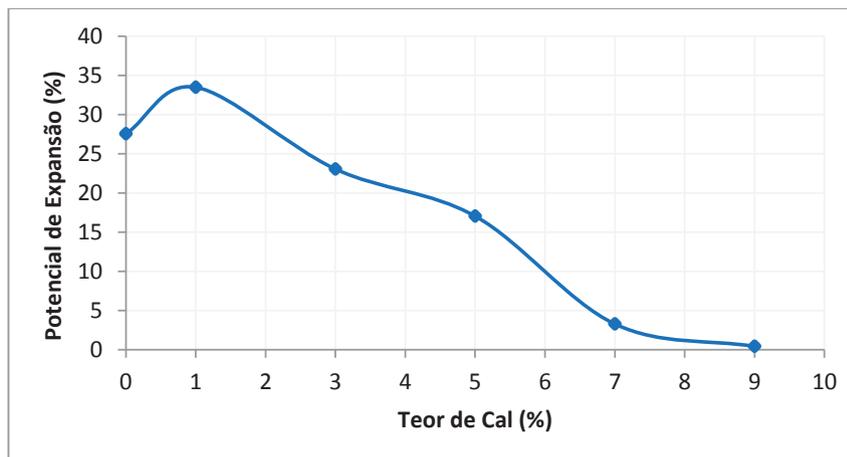


Figura 10 - Potencial de expansão relacionada à dosagem de cal

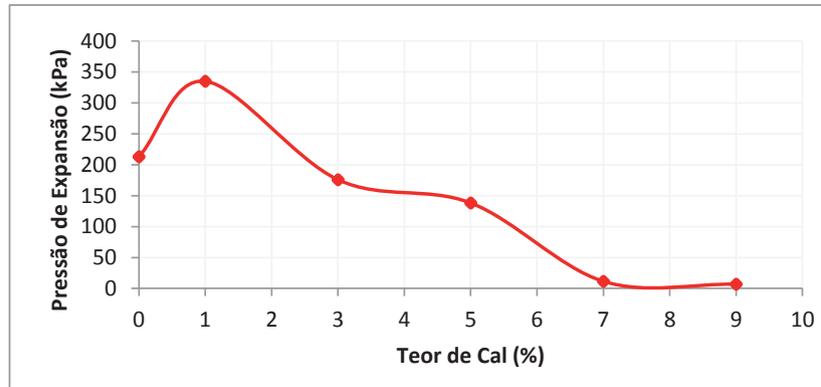


Figura 11 – Pressão de expansão para diferentes teores de cal

Para o solo sem a cal determinou-se um potencial de expansão de 27,5% e uma pressão de expansão de 213 kPa. Observou-se em relação ao solo sem a cal, a partir de 3%, uma diminuição do potencial de expansão e da pressão de expansão. Para o teor de 1% houve acréscimo tanto no potencial de expansão quanto da pressão de expansão resultando, respectivamente, 33,5% e 335 kPa. Enquanto, para o teor de 9% de cal, praticamente eliminou a expansão e reduziu a pressão de expansão para 7 kPa.

Segundo NELSON & MILLER (1992), a cal permite boa reatividade quando o pH do solo é maior do que 7, o que explica porque o solo estudado aumentou o potencial de expansão e a pressão de expansão, para o teor de 1%, visto que, conforme se observa na Figura 2, o pH é de 5,23, portanto inferior ao pH que permite boa reatividade.

Pode-se explicar a redução no potencial de expansão e na pressão de expansão para teor de cal igual ou superior a 3%, até 9%, pelos seguintes fatores:

- a) A redução na massa específica aparente seca contribui para que as partículas tenham menores forças de repulsão. Logo, a pressão de expansão resultante, considerando corpos de prova moldados com teores de umidades ótimas e as mesmas energias de compactação, sofrerá redução.
- b) A diminuição da sucção matricial contribui para que o solo tenha menos afinidade por água, o que diminui a quantidade de água disponível para equilibrar a excesso de carga elétrica negativa da superfície do mineral expansivo.

- c. A cal fornece cátions para equilibrar a superfície do argilomineral e, conseqüentemente, diminuir a espessura da camada dupla difusa, diminuindo a presença de água.
- d. A elevação do teor de umidade ótima contribui para que o solo já inicie o fenômeno de expansão a partir de um teor de umidade mais elevado, bem como com menor sucção. Logo, ele iniciará de uma condição mais expandida do que o solo sem a cal, diminuindo o potencial de expansão. Todavia, tal fato não está relacionado à diminuição da pressão de expansão, conforme apresentado por CHEN (1988).

4.5 Curva característica da umidade do solo

Os corpos de prova utilizados na determinação da curva característica foram moldados de amostras compactadas dinamicamente, tendo o ensaio de compactação sido realizado com acréscimo sucessivo de água, semelhante à curva de umedecimento na determinação da sucção. Verificou-se que o teor de umidade ótima de 44% corresponde a uma sucção matricial, na curva característica de umedecimento, de aproximadamente 10 kPa, conforme se pode observar na Figura 12.

Observa-se, na Figura 12 que a variação da sucção com a umidade do solo sem cal e com 9% de cal até 1500 kPa foi muito reduzida porque o tempo de cura do solo com 9% de cal utilizado na determinação do ponto inicial da curva característica foi de apenas 21 dias, deste modo, o solo ainda estava submetido à variação de volume. Abaixo de 1500 kPa, já com o tempo de cura de aproximadamente 40 dias a diferença de sucção entre o solo sem e com adição de cal aumentou pois o efeito da

sucção devido à ação eletrostática e à capilaridade é reduzido devido à presença da cal.

Na Figura 13 o valor da sucção do solo com 9% de cal, até aproximadamente 4000 kPa, é inferior ao do solo sem cal, isso ocorre porque a presença da cal induz a um aumento na granulometria e a uma redução no efeito de adsorção entre as partículas. Como consequência, tem-se uma redução de volume por contração no solo sem cal superior a do solo com cal. Somente a partir de 30% de umidade e 4000 kPa é que o solo passa a ter o mesmo comportamento de variação de volume por contração.

Em relação à expansão do solo, para um dado teor de umidade, uma sucção menor implica numa menor afinidade por água. Logo, estará menos sujeito a variações de umidade e, conseqüentemente, a variações de volume. Além disso, a menor sucção é resultante também da contribuição da cal na diminuição da deficiência por carga elétrica da superfície do argilomineral. Com isso, menos moléculas de água serão necessárias para alcançar o equilíbrio, o que diminui a afinidade por água do solo e a espessura da camada dupla difusa.

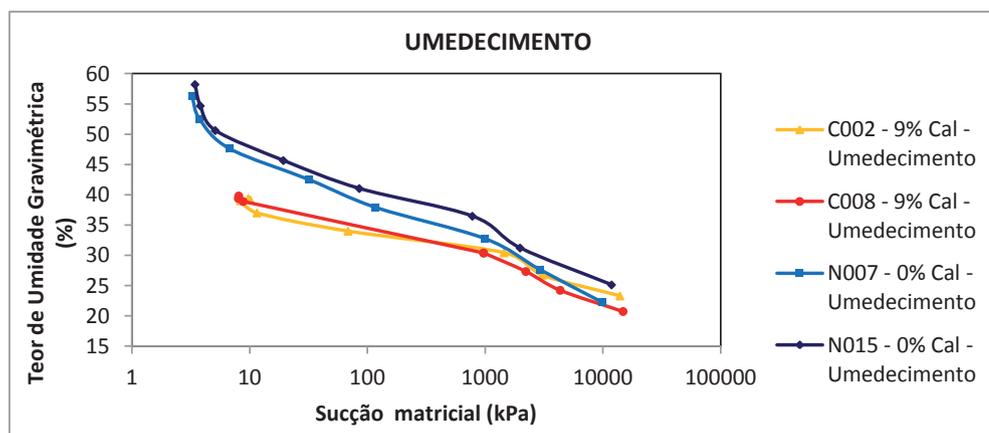


Figura 12 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal -trajetória de umedecimento

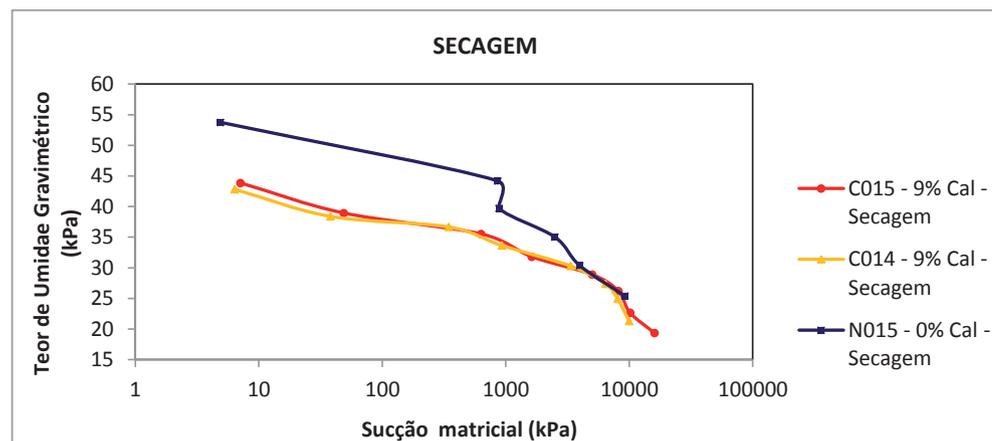


Figura 13 - Curva característica de umidade do solo com e sem adição de cal - trajetória de secagem

4.6 Ensaios químicos

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização química do solo argiloso estudado, com e sem adição de cal.

Tabela 5 – Ensaio químicos

Teor de cal	(%)	0	1	3	5	7	9
pH em água		3,9	4,7	8,2	10,5	11,2	11,3
Complexo sortivo	(cmol(+)/kg)						
Cálcio		1,11	24,28	52,61	51,6	41,48	40,78
Magnésio		79,83	26,91	1,01	1,01	1,01	0,71
Potássio		0,31	0,26	0,25	0,20	0,20	0,20
Sódio		1,13	1,20	1,85	2,31	2,47	2,39
Soma de bases(SB)		82,38	52,66	55,72	55,13	45,17	44,08
Hidrogênio		7,25	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Alumínio		30,26	11,17	0,00	0,00	0,00	0,00
CTC a pH 7,0		119,89	65,09	55,72	55,13	45,17	44,08
Saturação por bases (V)	(%)	69,00	81,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Saturação por Alumínio	(%)	26,86	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Saturação por Sódio	(%)	0,94	1,84	3,32	4,19	5,47	5,42
Fósforo assimilável (Mehlich)	mg/kg	131	81	164	131	3	1

A redução do pH para cada teor de cal pode ser explicado pelo processo de reação da cal com o solo, o que requer um tempo para que isto ocorra.

Os resultados do pH apresentados na Figura 14 indicam esta redução, chegando a ser da ordem de 10%.

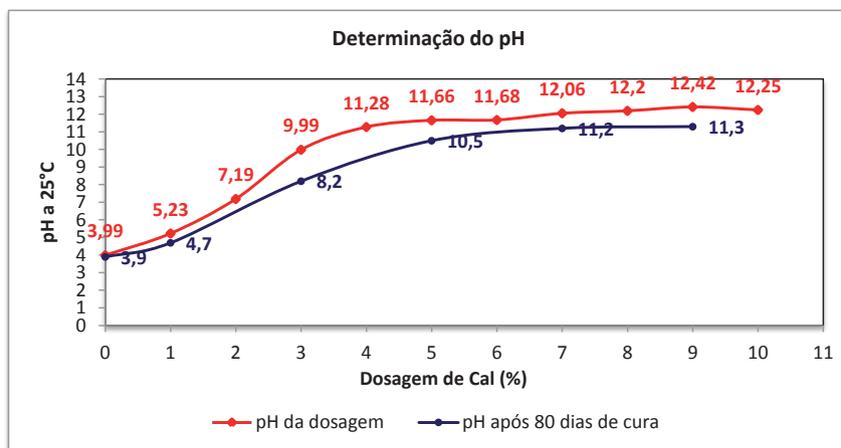


Figura 14 – pH após dosagem e pH após 80 dias de cura

A capacidade de troca catiônica está relacionada à estabilidade do argilomineral. Conforme pode ser observado na Figura 15, ela decresce com o aumento do teor de cal até 9%, resultando na menor capacidade de troca catiônica, coincidindo com o percentual que resultou em menores valores de potencial de expansão e de pressão de expansão.

Por ter maior afinidade com o argilomineral, os íons Ca^{2+} substituem outros íons, como o Na^{+} e o K^{+} , de acordo com a carga elétrica negativa da superfície do argilomineral. O aumento da densidade dos íons diminui a capacidade de troca catiônica, reduzindo o potencial de mudança de volume.

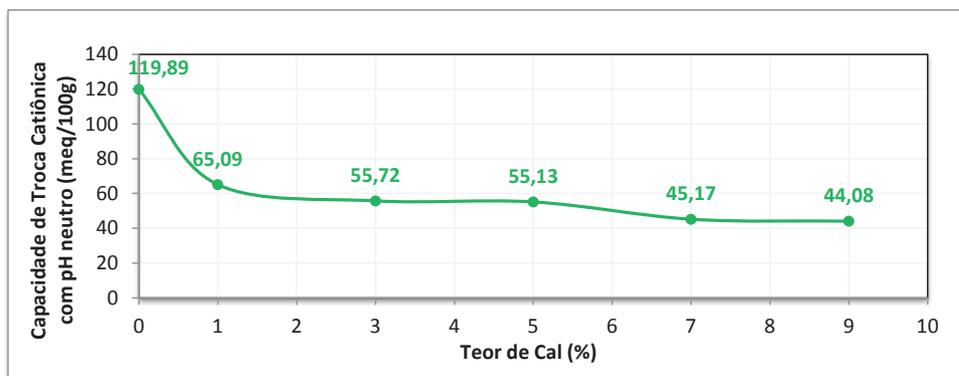


Figura 15 – Capacidade de troca catiônica

5 CONCLUSÕES

A adição de cal reduz a deficiência de carga elétrica do argilomineral, portanto, induz a uma diminuição da afinidade do solo por água, contribuindo, dessa maneira, para a redução do potencial de expansão e da pressão de expansão.

Devido a fenômenos de floculação uma parcela do material se tornou de textura mais grossa, o que diminui também a sucção, bem como a área específica disponível para umedecimento.

A redução da sucção matricial conseqüente do aumento do teor de umidade implica numa menor força de aproximação entre as partículas e no aumento de volume do solo, reduzindo, conseqüentemente, a massa específica aparente seca. Tal fato influi diretamente na diminuição do potencial de expansão e na pressão de expansão, pois, o teor de umidade inicial aumenta.

O aumento do teor de umidade ótima devido à adição de cal provocou um acréscimo no teor de umidade inicial diminuindo a variação de volume. Embora tenha ocorrido diminuição da pressão de expansão, ela não pode ser explicada pelo mesmo motivo, visto que a massa específica aparente seca é quem influi mais diretamente no comportamento.

A diminuição da capacidade de troca catiônica torna o material ensaiado menos sujeito a variações de volume, visto que o íon de cálcio é menos substituível do que íon de sódio ou potássio.

Ocorreu uma diminuição do índice de plasticidade e do limite de liquidez, indicando uma relação com o potencial de expansão do solo, conforme constatado, também, por CHEN (1988).

Os resultados do potencial de expansão e pressão de expansão para o teor de 1% de cal contrariaram a expectativa pois aumentaram em relação ao solo sem a cal, podendo tal fato ser explicado porque o solo só apresenta boa reatividade quando o pH é maior do que 7 (NELSON & MILLER, 1992).

Embora o teor de 9% de cal tenha praticamente eliminado o potencial de expansão e a pressão de expansão, não necessariamente ele deverá ser utilizado em obras de terraplenagem e pavimentação. A depender da tolerância prevista em projetos teores menores de cal também poderão ser utilizados.

Pode ter ocorrido diminuição da precisão dos resultados devido à não padronização dos tempos de cura, o que dificultou a confrontação de resultados.

Houve confirmação da metodologia de EADS & GRIM (1966) para a determinação do teor ótimo de cal.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. B., 2003. Mapeamento Geológico da Região do Engenho Sibiró - Porto de Galinhas (Litoral Sul, PE): Contribuição à Estratigrafia e à Tectônica da Sub-bacia de Pernambuco. Relatório de CHEN, F. H., 1988. Foundation on Expansive Soils, New York: Elsevier, 463 p.

DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-818-7: Foundations in Expansive Soils. Washington, 1983.

- DEPARTMENTS OF THE ARMY USA. TM 5-822-14/AFMAN: Soil stabilization for pavements. Washington, 1994.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, New York: John Wiley & Sons, 517 p.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Estudo de impacto ambiental da Refinaria do Nordeste - Abreu e Lima. Pernambuco, 2006.
- GOOSEN, F. A. Mattheus; AL-RAWAS, A. A., 2006. Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, London: Taylor & Francis Group, 544 p.
- GUSMÃO, Alexandre Duarte (Org.). Geotecnia no Nordeste. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005.
- LOVATO, R. S., 2004. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144 p.
- MARINHO, F. A. M., 1995. A técnica do papel de filtro para medição de sucção. Encontro sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul, 18 a 20 de outubro de 1995.
- NELSON, J. D. & MILLER, D. J. Expansive soils, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- NG, Charles W. W.; MENZIES, Bruce., 2007. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering, New York: Taylor & Francis Group, 687 p.
- OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos (Edit.). Geologia de Engenharia. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- PORTELINHA, F. H. M., 2008. Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 161 p.
- SILVA, O. S., 2012. Estudo de propriedades geotécnicas de um solo argiloso, potencialmente expansivo, compactado com e sem adição de cal. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Viçosa, 167 p.
- SOTO, M. A. A., 2004. Comparação entre os métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doutorado) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 233 p.