

Caracterização da Expansividade de um Solo Natural e Tratado com Cal do Município de Paulista-PE

Sergio Carvalho de Paiva

UNICAP e doutorando da UFPE, Recife, Brasil, spaiva@unicap.br

Joanderson James Oliveira Morais

UFPE, Recife, Brasil, joandersonjames@gmail.com

Rafael Bazilio Viana

UNICAP, Recife, Brasil, bazilioviana@gmail.com

Maria Gabriela Vilaça Padilha Pinto

UNICAP, Recife, Brasil, gabivpp@hotmail.com

Silvio Romero de Melo Ferreira

UFPE, UPE e UNICAP - Recife/PE, Brasil, sr.mf@hotmail.com

RESUMO: A variação de volume dos solos expansivos devido à variação de umidade causa danos nas edificações. Dois requisitos básicos são necessários para um solo apresenta expansividade, um intrínseco e outro extrínseco. O intrínseco está relacionado com a composição mineralógica, textura e estrutura que deve existir e entrar em funcionamento, em nível microescalar, mecanismos que produzam a instabilidade volumétrica do solo. O extrínseco está relacionado com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica que devem estar presentes e capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo. A mistura da cal com solo expansivo é uma das técnicas de estabilização. Este material tem propriedades físico-químicas capazes de conferir aos solos expansivos, quando misturado, por meio de reações, mudanças na microestrutura das partículas dos solos. Várias edificações em construção no Estado de Pernambuco encontram-se localizadas em áreas de ocorrência de solos expansivos. O efeito do tratamento da cal nas propriedades do solo expansivo de Paulista-PE foi investigado comparando-se o potencial de expansão do solo natural com o das misturas solo-cal. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica (por termogravimetria (TG) e difratometria de raio – X). Os ensaios de expansão "livre" foram realizados em células edométricas convencionais. As amostras indeformadas dos solos foram talhadas em anéis de aço inoxidável de altura 20,00 mm e diâmetro de 71,3 mm e submetidas a tensão 10 kPa antes de inundar. A tensão de expansão foi determinada por três métodos diferentes: 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, 2 - Expansão e colapso sob tensão, 3 - Volume constante. Ensaio de expansão "livre" e de tensão de expansão a volume constante foram realizados com o objetivo de analisar o efeito da interação da cal com o solo expansivo de Paulista, quando adicionado cal nas proporções de 1%, 3%, 5%, 7%. O solo natural de Paulista tem alta expansividade. A determinação da tensão de expansão é influenciada pela trajetória de tensão seguida durante o ensaio. A adição de cal ao solo causou uma agregação ou floculação das partículas originais e a redução no índice de plasticidade. O valor de 5% de cal hidratada adicionado ao solo expansivo de Paulista-PE reduziu a expansão livre e tensão de expansão a valores nulos.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Expansivo, Solo Não Saturado, Solo-Cal, Melhoramento de Solo.

1 INTRODUÇÃO

Vários solos são susceptíveis a expansão, entre eles, os oriundos de rochas ígneas, basicamente, basalto, diábases e gabros, onde os feldspatos e os piroxênios se decompõem formando montmorilonita e minerais secundários, solos oriundos de rochas sedimentares constituídos do argilomineral montmorilonita.

Um solo para ser caracterizado como expansivo depende do tipo de argila que o compõe, uma vez que nem todos os minerais argilosos experimentam modificações volumétricas, com a variação da umidade. A instabilidade pode ser, sobretudo encontrada nas argilas vermiculita e esmectitas, em especial a montmorilonita. Também, ocorre nos interestratificados de montmorilonita, com clorita, mica e vermiculita.

O fenômeno de expansão dos solos é muito complexo, envolvendo um conjunto de fatores que influenciam e interagem entre si, tais como a composição mineralógica das argilas, textura e fatores ambientais, como, clima da região, natureza do fluido, grau de saturação do solo.

No Brasil, os solos expansivos foram encontrados nas regiões Sul, Centro Sul, Norte e Nordeste, Ferreira (2008). Em Pernambuco, foram identificados solos expansivos nos municípios de: Afrânio, Petrolina, Cedro, Cabrobó, Salgueiro, Floresta, Serra Talhada, Petrolândia, Inajá, Ibimirim, Carnaíba, Nova Cruz, Paulista, Olinda, Recife, Cabo. No Grande Recife é encontrado na formação Maria Farinha do Grupo Barreiras e de rochas extrusivas básicas. O Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE) indicou uma suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos alta em 12,5% da área do Estado, média em 38,7% e baixa em 45,2%, Ferreira et al (2008).

Quanto aos mecanismos de estabilização dos solos expansivos um dos tratamentos que vem sendo aplicado é a adição de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), nesse processo vários tipos de reações químicas ocorrem, contudo as mais importantes são as reações de troca catiônica, floculação e as reações pozolânicas (reações de cimentação). Ao ser adicionado o Ca(OH)_2

modifica imediatamente o pH do solo e o cálcio evita a penetração da água nos vazios dos argilosminerais neutralizando suas cargas negativas favorecendo a floculação e a troca de cátions, e com o tempo reações de cimentação finalizando com a reação com o CO_2 do ar formando os silicatos, aluminatos e aluminosilicatos de cálcio hidratado, com propriedades cimentantes, Boscov (1990).

Castro (1981) relacionou as reações da cal com o solo com a faixa de variação do pH da mistura. Na primeira faixa para pH menor que 4,0 ocorre as primeiras trocas iônicas dos íons e dos cátions mais reativos; a segunda faixa de pH entre 4,0 e 5,6 o alumínio trocável é neutralizado e parte do hidrogênio trocável é deslocado; a terceira faixa de pH entre 5,6 e 7,6 com o solo iniciando a alcalinidade, começam as reações de polimerização com o hidróxido de alumínio (Al(OH)_3); a quarta faixa com o pH variando de 7,6 e 10,0 com a alcalinidade elevada os agrupamentos silanol começam a reagir; e na última faixa com o pH maior que 10,0 começam as reações pozolânicas.

O uso da cal para estabilizar solos expansivos já foi analisado Eades e Grim (1966), Brandl (1981), Castro (1981), Nobrega (1985), Araujo (2009), Barbosa (2013), Lima (2014), Paiva et al (2016).

O presente artigo tem por objetivo caracterizar o solo expansivo de Paulista-PE e estudar o uso da cal na estabilização de solo utilizando mistura do solo, em peso, com 1%, 3%, 5%, 7%, 9% de cal.

2 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

O programa de investigação geotécnica realizado para analisar o comportamento de solo expansivo de Paulista - PE constou da coleta de amostras deformadas e indeformadas do tipo bloco e realização de ensaios de laboratório no solo, na cal e nas misturas solo-cal nas proporções em peso seco 1%, 3%, 5%, 7%. Nos ensaios de caracterização seguindo as recomendações da

A cal hidratada foi classificada segundo a ABNT (2003a). As determinações de umidade; perda ao fogo; óxido de silício; óxido férrico;

óxido de cálcio; óxido de magnésio e massa específica foram realizadas segundo a ABNT (2003b). A determinação da retenção de água foi realizada de acordo com a ABNT (1996) e a determinação da finura pela ABNT (1998).

Os ensaios de caracterização realizados seguiram as seguintes metodologias: Preparação para ensaios de caracterização, executado segundo as prescrições da ABNT (1986a) e ABNT (1986b) e ensaios de caracterização; determinação do Limite de Liquidez, ABNT (1984a), determinação do Limite de Plasticidade, ABNT (1984b); determinação da Massa Específica ABNT (1984c), análise Granulométrica, ABNT (1984d).

A caracterização química do solo foi realizada conforme a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (1997). Os resultados da análise química do solo foram calculados, de acordo com o novo sistema de classificação de solos da Embrapa (1999): a Soma das Bases (S); a Capacidade de Troca Catiônica (CTC ou T); o Grau de Saturação por Bases (V); a Saturação por Alumínio (m); a Saturação por Sódio e óxidos.

A composição quantitativa dos óxidos dos solos foi obtida através da técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) em amostras fundidas, com determinação de teores de dez óxidos de maior abundância: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MnO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5 . Uma porção de cada amostra foi colocada em estufa para secar a 110°C e então levada a uma mufla, a 1000°C por 2 horas, para a determinação de perda ao fogo. Foram feitas pérolas fundidas usando tetraborato de lítio como fundente. As pérolas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração, que foram construídas com materiais de referências internacionais.

A mineralogia foi determinada por Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Difratomia de raio - X.

Na preparação das misturas solo-cal, inicialmente, procurou-se definir o menor teor de cal que a estabilizasse, com o pH de 12,42, pelo critério de Eades e Grim (1966). Com o

valor do teor de cal definido (7%) foram preparadas as misturas para a realização dos ensaios de caracterização física, química, expansão livre e tensão de expansão; tomou-se o peso seco da amostra do solo e foi adicionado cal em teores de 1%, 3%, 5% e 7%, em peso.

Os ensaios de expansão "livre" foram realizados em células edométricas convencionais. Amostras indeformadas dos solos foram talhadas em anéis de aço inoxidável de altura 20,00 mm e diâmetro de 71,3 mm e submetidas a pequenas tensões que variaram de 1,0 e 10 kPa. A tensão de expansão foi determinada por três métodos diferentes: 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, 2 - Expansão e colapso sob tensão, 3 - Volume constante. Nas misturas solo-cal a tensão de expansão foi determinada pelo método a volume constante.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

Será analisado inicialmente a caracterização física, química e mineralógica do solo de expansivo de Paulista-PE, a cal e posteriormente o efeito da cal na mistura solo-cal quanto à expansividade.

3.1 Solo de Paulista

O solo expansivo de Paulista - PE é proveniente do intemperismo físico-químico sobre o calcário margoso da Formação Maria Farinha e de siltitos e argilitos da Formação Barreira, Souza (1999). É uma argila de alta compressibilidade (CH), com 18% a 43% areia, 14% a 32% de silte e 43% a 54% de argila (Figura 1), e a relação silte/argila diminui com a profundidade. Tem plasticidade alta (IP varia de 24% a 34%) e atividade normal (Ia variando de 0,56 a 0,74). O peso específico real dos grãos é de $26,14 \text{ kN/m}^3$.

A Figura 2 mostra vários critérios comumente utilizados no mundo para determinar o potencial de expansão. Foram utilizados os dados da caracterização física do solo e os resultados de sucção foram considerando a umidade do solo e a curva característica obtida por Justino da Silva (2001) no mesmo solo. O potencial de expansão da argila de Paulista é médio a alto pelos critérios

de Van der Merwe (1964) e Seed et al (1962) e alto pelos critérios de Daksanamurthy e Raman (1973) e Yilmaz (2006).

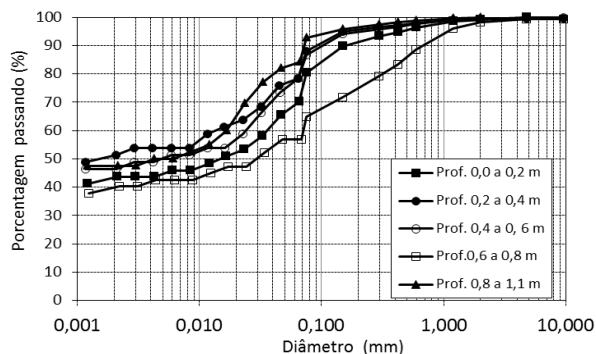
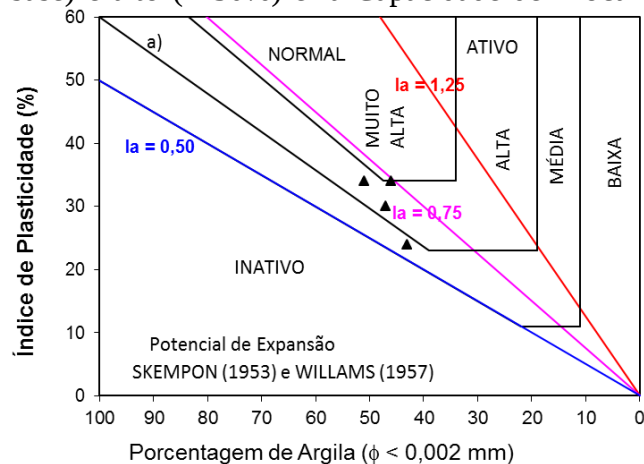


Figura 1. Curvas granulométricas

O pH é ácido (< 7), o valor V (saturação de base) é alto ($> 50\%$) e a Capacidade de Troca



de Cátions é Alta (> 27 cmol/ kg). Indicando a presença de minerais argílicos expansivos. A condutividade elétrica do extrato de saturação é alta. O óxido de silício prevaleceu sobre o óxido de alumínio e sobre o óxido de ferro, Tabela 3.

Na análise da TG/DTG do solo (Figura 3-a) entre 100°C até 250°C há um pico endotérmico intenso de perda de água; a 400°C , inicia-se a reação de desidroxilação do hidróxido de esmectita que é completada a 700°C . A Figura 3-b apresenta os difratogramas de raios-X para o solo, indica que há uma interestratificação irregular envolvendo minerais do tipo 2:1, Mica e expansivos (esmectitas e vermiculitas) além da presença da Caulinita. Os resultados encontram-se em acordo com a proposta de Chleborad et al (1996) apresentados na Figura 2-b.

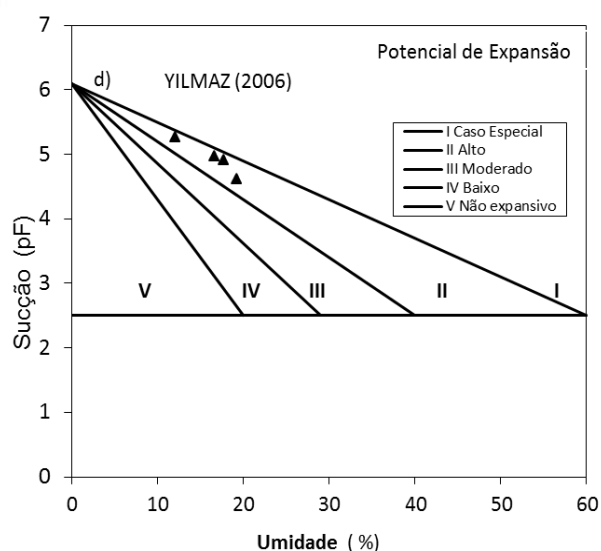
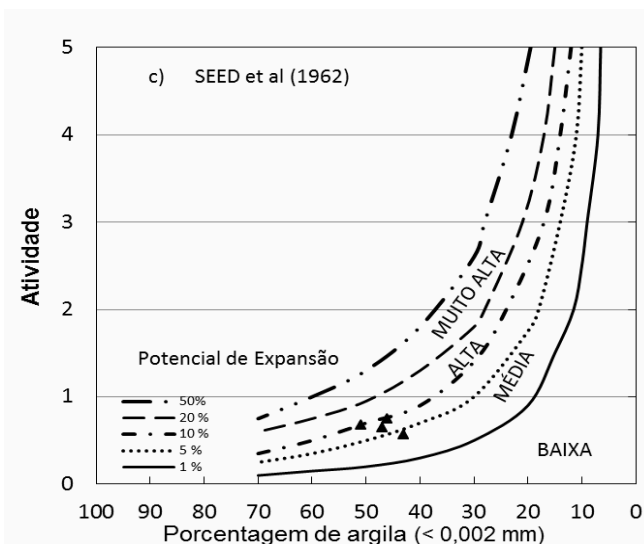
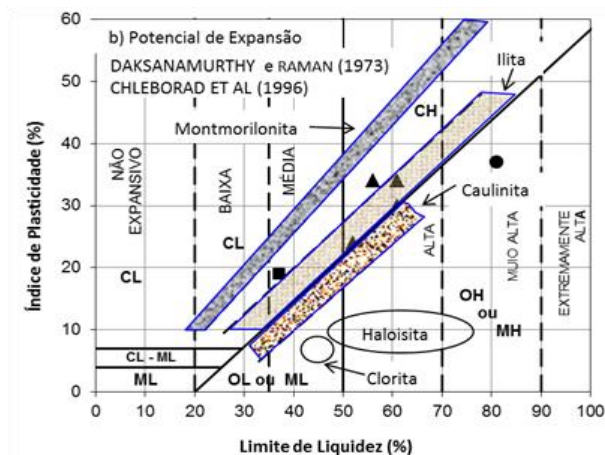


Figura 2. Critérios comumente utilizados no mundo para determinar o potencial de expansão: a) SKEMPTON (1953) e VAN DER MERVE (1967) b) DAKSANAMURTHY e RAMAN (1973) e CHLEBORAD et al (1996), c) SEED et al (1962) d) YILMAZ (2006)

Tabela 2 Caracterização Química

Solo	pH H ₂ O	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC	V	m	100Na ⁺ /T
		μS	----- cmol _c /kg-----								----- % -----		
0,10 m	4,91	145	1,34	27,73	2,10	3,40	7,40	8,90	34,57	50,87	67,98	7,61	2,63
0,20 m	4,94	101	0,22	30,17	2,40	26,00	12,00	9,80	58,79	80,59	72,95	12,20	0,27
0,40 m	4,77	131	4,22	19,23	1,00	23,80	12,50	9,30	48,25	70,05	68,88	12,76	6,02
0,60 m	5,18	102	0,82	4,66	1,30	17,90	9,80	14,50	24,68	48,98	50,38	28,42	1,67

Legenda: $S = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; $CTC = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Al^{3+} + H^+$; $V = 100 \frac{S}{T}$; $m = \frac{100Al^{3+}}{S + Al^{3+}}$

Tabela 3. Valores das porcentagens de óxidos e perda ao fogo no solo e na cal

Material	Óxidos (%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Total
Solo	65,54	15,27	5,05	0,68	0,00	0,14	0,00	1,77	0,87	0,02	11,88	97,48
Cal	0,00	1,50	0,00	1,93	0,00	66,42	0,00	0,12	0,06	0,01	27,44	101,22

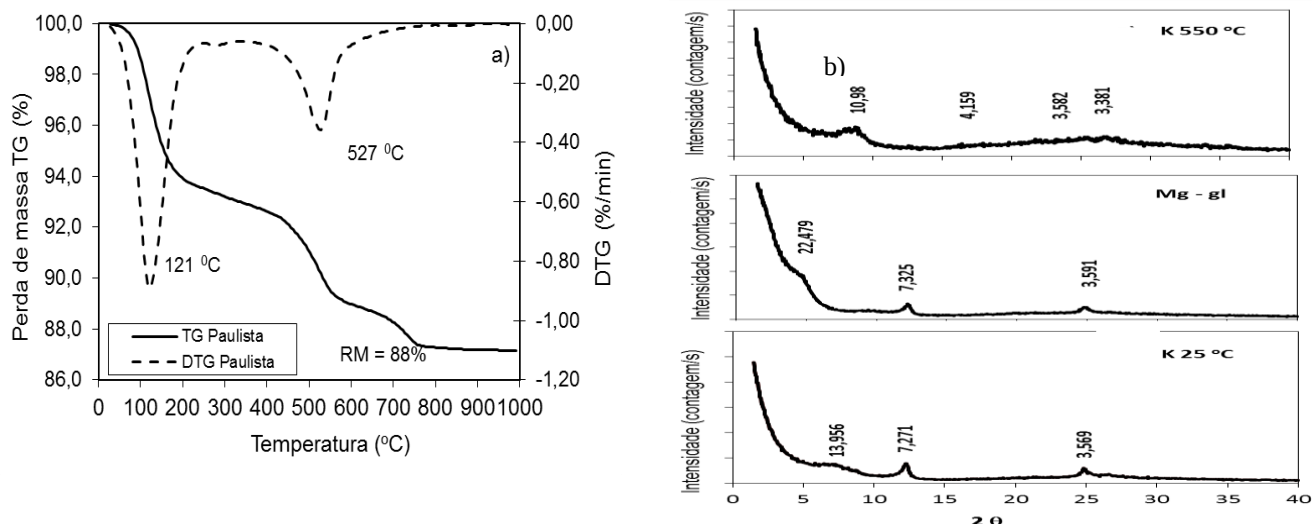


Figura 3. Curvas: a) TG e DTG, b) Difração de raio-X

A expansão "livre" ($E_l = 100\Delta h/h_0$) obtida a partir de ensaios edômetros convencionais com sobrecarga de tensão 10 kPa é de 10,70%, Figura 3. Pelo critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) o grau de expansividade médio é alto.

A Tabela 4 mostra os valores da tensão de expansão do solo determinados por diferentes trajetórias de tensões, que correspondem a diferentes métodos, são apresentados Figura 3. O valor médio obtido pelos três métodos foi 252 kPa. A diferença fundamental entre os métodos é a ordem seguida entre a aplicação de tensão e a inundação. No Método-1, a amostra

é inundada primeiro e carregada depois; no Método-2, a amostra é carregada primeiro e inundada depois; no Método-3, a inundação e carregamento ocorrem simultaneamente. As diferentes trajetórias de tensões aplicadas ao solo utilizadas nos métodos levam a valores distintos da tensão de expansão. Comportamento similar foi obtido na argila de Petrolândia-PE por Ferreira e Ferreira (2009) e por Delgado (1986) na argila compactada Arahá-A coletada da Barreira La Paz de Arahá (Servilla), Tabela 4.

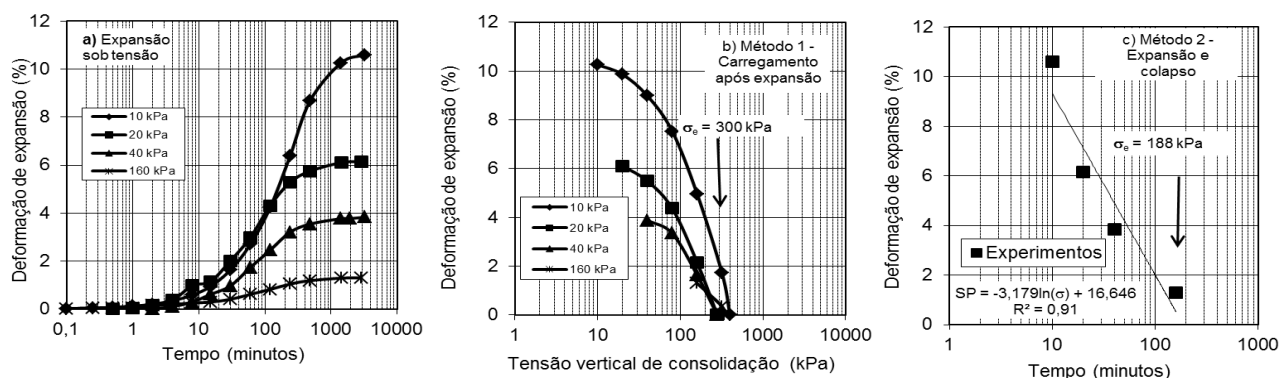


Figura 3. Métodos de tensão de expansão aplicados ao solo de Paulista: a - Expansão sob tensão, b) Método 1 - Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, c) Método 2 - Expansão e colapso

Tabela 4. Tensão de Expansão

Método de Tensão de Expansão	Tensão de Expansão (kPa)		
	Paulista	Petrolândia Ferreira e Ferreira (2009)	Servilla Delgado (1986)
1 Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação	300	333	260
2 Expansão e colapso sob tensão	180	239	150
3 Volume constante	275	242	193
Média	252	271	201

3.2 Caracterização da Cal

Os resultados das análises químicas da cal são apresentados na Tabela 5. A determinação da finura (ABNT, 1998) encontrou um resultado de: peneira 30 – 0,600 mm 0,1% e na peneira 200 – 0,075 mm 0,129%, onde a cal com o selo de qualidade CHI apresenta limites de $\leq 0,5\%$ e $\leq 10\%$ respectivamente. A retenção de água (ABNT 1996) foi obtida 87% e a norma coloca um limite de $\geq 75\%$. Verifica-se que todos os parâmetros analisados apresentam resultados compatíveis com uma cal de ótima qualidade CHI segundo a ABNT (2003a). Os valores do óxido de cálcio determinados segundo as recomendações da norma ABNT (2003b), Tabela 3, e pela técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raio-X, (Tabela 5), foram próximos.

3.3 Mistura Solo – Cal

No solo de Paulista ocorreu um decréscimo no limite de liquidez, acréscimo no limite de plasticidade e redução do índice de plasticidade quando foi adicionado cal ao solo, (Figura 4). Brandl (1981) atribuiu que as rápidas mudanças

nos valores dos limites de Atterberg com adição de cal, devem-se as transformações estruturais e floculação do material.

Tabela 5. Resultados das análises químicas.

Determinações	Unidade	Resultado
Umidade	%	1,31
Perda ao fogo	%	24,23
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	%	0,22
Óxido de cálcio total (CaO_T)	%	66,93
Óxido de cálcio disponível (CaO_D)	%	58,49
Anidrido Carbônico (CO_2)	%	4,09
Massa específica	g/mL	0,445
Finura Peneira 30 – 0,600 mm	%	0,10
Peneira 200 - 0,075 mm	%	0,13
Retenção de água	%	87,00

A adição de cal aos solos causou um acréscimo nos valores do pH em água, Figura 5. O acréscimo de 5% de cal ao solo eleva o valor do pH das misturas superiores a 12,4 considerado por Eades e Grim (1966), como o pH que proporciona a maior redução do potencial de expansão indicando o teor de cal ótimo.

A adição de cal ao solo reduziu os valores da expansão “livre” (Figura 6) e da tensão de

expansão (Figura 7) na mistura solo-cal. No solo de Paulista-PE a adição de 5% de cal estabilizou o solo quanto à expansão “livre” e tensão de expansão. No solo de Ipojuca a estabilização quanto à expansão “livre” e a

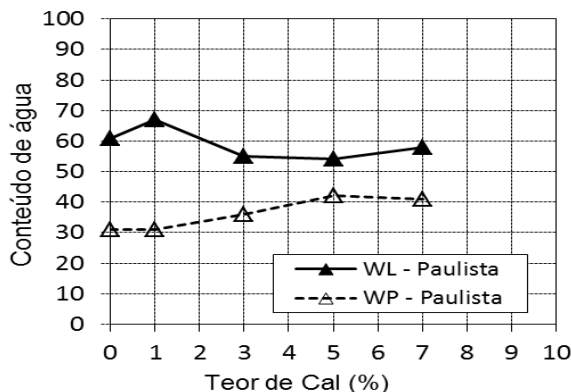


Figura 4. Variação do conteúdo de água com o teor de cal

tensão de expansão (Método a Volume Constante) foram atingidas com a adição 9% de cal.

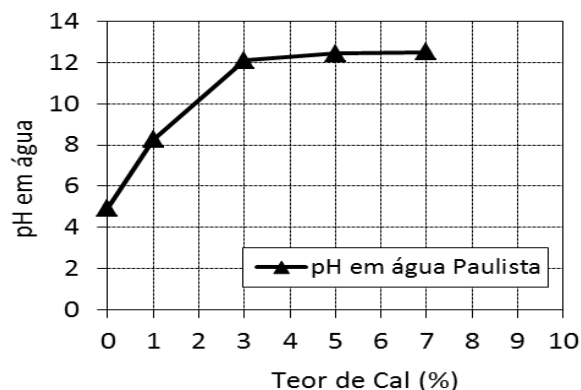


Figura 5. Variação do pH em água com o teor de cal

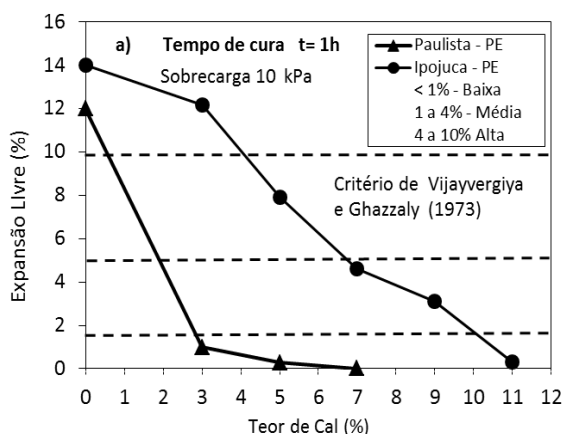


Figura 6. Variação da expansão livre com o teor de cal

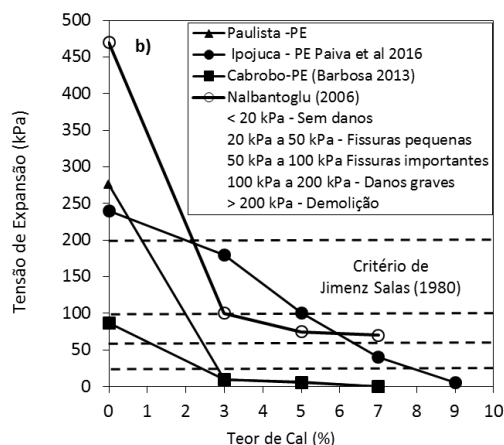


Figura 7. Variação da tensão de expansão com o teor de cal

4 CONCLUSÕES

O solo natural de Paulista tem alta expansividade pelo critério de Vijayvergiya Ghazzaly (1973). A determinação da tensão de expansão é influenciada pela trajetória de tensão seguida durante o ensaio. O valor de 5% de cal hidratada adicionado ao solo expansivo de Paulista reduziu a expansão livre e tensão de expansão a valores praticamente nulos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio na realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

Araujo, A. F. (2009). *Avaliação de misturas de solos*

estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias no estado do Ceará. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes Civil), UFC. Fortaleza, 175p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 6459, (1984a). Solo - Determinação do limite de liquidez.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 7180, (1984b). Solo - Determinação do limite de plasticidade

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 6508, (1984c). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR-07181 (1984d) Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 9604 (1986a). Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 6457, (1986b). Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT, NBR 9290, (1996). Cal hidratada para argamassas – determinação de retenção de água.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT, NBR 9289, (1998). Cal hidratada para argamassas – determinação da finura.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT, NBR 7175, (2003a). Cal hidratada para argamassas – Requisitos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT, NBR 6473, (2003b). Cal virgem e cal hidratada – Análise química.
- Barbosa, V. (2013) Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Dissertação de MSc, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 115p
- Boscov, M. E. G. (1990). *Estudo comparativo do comportamento de um solo saprolítico e de um solo laterítico estabilizado com cal*. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 123p
- Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. In *International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering*, 10., Stockholm. Proceeding... Rotterdam: A. A. Balkema, v.1, p.587-595.
- Castro, F. J. C. O. (1981). *Um estudo físico químico matemático de estabilização alcalina de solos argilosos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE-UFPE. Rio de Janeiro, 476p.
- Chleborad A.F, Diehl S.F, Cannon S.H (1996) Geotechnical properties of selected materials from the Slumgullion landslide. In: Varnes DJ, Savage WZ (eds) *The Slumgullion earth flow: a large-scale natural laboratory*. U.S. Geological Survey Bulletin 2130, pp 67–71.
- Daksanamurty V, Raman. V., “A simple method of identifying an expansive soil”. *Soils and Foundation*, v.13, n. 1 pp. 97-104, 1973.
- Delgado, A. (1986). *Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las Arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Eades. J. L. e Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Record*, Washington, D.C., n 139, p.61-72.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa (1997). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 212p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (1999). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 412p.
- Ferreira, S. R. M., Amorim, S. F., Varejao-Silva, M. A. (2008). Tecnologia da geoinformação aplicada aos estudos dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco In: *II Simpósio Brasileiro de Ciência Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação*, Recife: Universitária, v.1. 91-99.
- Ferreira, S. R. M. (2008), Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil In: *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Salvador. EDUFBA. v.2. p.593 – 619.
- Ferreira, S. R. M. e Ferreira, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de umidade em um Vertissolo no Semi-Árido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (Impresso), v. 33, p. 779-791, (2009).
- Justino da Silva, J. M. (2001). Variação volumétrica de uma argila contrátil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 249 p
- Lima, M.A.A. (2014). Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Suape, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Dissertação de Mestrado da UFPE.
- Paiva, S.C., Lima, M.A.A., Ferreira, M.G.V.X., Ferreira, S.R.M. (2016). Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Revista Matéria*. (No Prelo).
- Nóbrega, M. T. (1985) As reações dos argilos-minerais com a cal. *V Reunião Aberta da Indústria da Cal*. Anais, p.57-78, São Paulo.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R. “Prediction of swelling potencial for compacted clays”. *Journal Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v. 88, SM3, pp. 53-87, 1962
- Silva, M. J. R.; Ferreira, S. R. M. (2007). Estudo da variação volume de um solo expansivo de Pesqueira/PE. In: *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Salvador: ABMS, v. 1. p. 159-164.
- Souza, E. M. (1999). *Levantamento radiométrico das unidades estratigráficas da Bacia Paraíba*. Dissertação de Mestrado da UFPE, Recife, 152p.
- Skempton, A.W. (1953). The colloidal activity of clays, In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering*, 3. v.1, pp.587-595, London, 1953
- Vijayvergiya, V. N. e Ghazzaly, O. I. (1973), Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Hayfa, Vol. 1, pp. 227 - 236.
- Yilmaz, I (2006). Indiret estimation of the swwlling and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering geology*, 85, 295-301.
- Van der Merwe D.H, (1964). The prediction of Heave from the Plasticity Index and the Clay Fraction. *Civil Engineering*, South Africa v. 6 p. 103 - 107.