

Caracterização Geotécnica de um Solo Expansivo Produzido Artificialmente

Leandro Gomes Domingos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, leandrotau@gmail.com

Carina Maia Lins Costa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, cmlins@gmail.com

RESUMO: A variação da umidade do solo provoca mudanças acentuadas no volume dos solos conhecidos como expansivos, que expandem quando úmido e contraem quando seco. Em determinados locais essa variação pode causar danos às construções ocasionando, assim, prejuízos socioeconômicos significativos. Contudo, há técnicas para atenuar os efeitos expansivos de um solo e uma forma de avaliar a eficácia de algumas dessas técnicas, bem como aprimorá-las, é testando componentes redutores de expansão em solos expansivos fabricados artificialmente. Sendo assim, este estudo tem como objetivo caracterizar geotecnicamente um solo expansivo produzido artificialmente em laboratório. Para tanto, argila bentonítica foi misturada com areia nas proporções de 25, 30, 35 e 40% de argila em relação à massa seca da areia. Além de ensaios de expansão livre (ASTM D-4556), ensaios de caracterização básica (limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria e massa específica) e ensaios de compactação Proctor Normal foram realizados com as misturas. Esses ensaios de caracterização básica também foram realizados com a areia e a argila bentonítica. Os resultados mostraram que a mistura com 30% de argila bentonítica possui maior similaridade de expansão quando comparado a alguns solos expansivos naturais para as tensões que variaram aproximadamente de 5 a 25 kPa. Verificou-se também que, quanto maior a quantidade de argila no solo, maior é a inclinação da curva tensão-expansão e que diferentes percentagens de argila bentoníticas podem ser utilizadas em função da expansão e do nível de tensão de interesse.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Fabricado Artificialmente, Solo Expansivo, Ensaio de Expansão Livre, Argila Bentonítica.

1 INTRODUÇÃO

A variação da umidade dos solos conhecidos como expansivos causa considerável mudança de seu volume, que expandem quando úmido e contraem quando seco. Esse tipo de solo é encontrado em várias partes do mundo como, por exemplo, nos Estados Unidos (Snyder, 2015), Turquia (Ozer; Ulusay; Isik, 2012) e Austrália (Li; Cameron; Ren, 2014). No Brasil, há relatos de solos expansivos nas regiões Nordeste, Norte e Sul (Ferreira, 2008). Especial ocorrência pode ser vista no estado de Pernambuco onde, inclusive, foi criado um mapa identificando solos com diferentes suscetibilidades à expansão (Ferreira; Amorim; Varejão-Silva, 2008).

Estradas, residências, barragens e demais estruturas construídas em locais com solo expansivo podem sofrer danos consideráveis a cada alternância dos períodos de seca e de chuva. Em regiões semiáridas, por exemplo, os problemas ocasionados por esse tipo de solo são mais evidentes devido aos longos períodos de seca.

Devido aos transtornos e aos danos econômicos causados por solos expansivos, várias técnicas foram criadas com o intuito de tratar áreas com esse tipo de solo. Zornberg et al. (2008) agrupa essas técnicas em três categorias: I) alteração da expansão do solo por forma química, mecânica ou física; II) controle da alteração da umidade do solo; III) utilização de geogrelha como reforço.

Na primeira categoria é comum encontrar pesquisas que misturam cal ao solo. Paiva et al. (2012) verificaram que a percentagem de 5% de cal foi responsável por reduzir a expansão livre de dois tipos de solo expansivos ao um valor praticamente nulo. No terceiro tipo de solo estudado pelos autores foram necessários 11% de cal. No solo estudado por Silva Junior (2012), a percentagem de 9% de cal foi necessária para eliminar o potencial de expansão.

Na segunda categoria de técnicas para a redução dos efeitos expansivos do solo é possível utilizar duas formas, conforme indicado por Jayatilaka e Lytton (1997). Uma das formas é umedecer o solo previamente antes da construção. No caso de rodovias, adiciona-se água nas camadas do pavimento que possuem potencial de expansão antes da colocação da cobertura do pavimento. Porém, essa técnica aumenta consideravelmente o tempo de execução da obra devido ao tempo elevado para a saturação do solo. Nelson et al. (2015) relatam ainda a possibilidade de redução resistência do solo e de que a água não alcance toda a zona do bulbo de tensão que é criado quando uma tensão é aplicada ao solo. A outra forma seria aplicando barreiras físicas que evitariam o contato da água com o solo expansivo. Jayatilaka e Lytton (1997) avaliaram as condições de rodovias que possuíam geomembranas impermeáveis verticais. Os resultados indicaram redução do desenvolvimento de imperfeições no pavimento.

Na terceira categoria está a possibilidade de reduzir as consequências da expansão do solo com a utilização de geogrelha. Nas rodovias de baixo tráfego estudadas por Dessouky et al. (2014) houve a combinação de pavimento reforçado com geogrelha e cimento e ou cal. Os autores mostraram que há eficácia na combinação de ambas as técnicas para pavimentos construídos em solos com baixa a moderada plasticidade. Os autores concluem a possibilidade de utilização dessa técnica após análise econômica com outras técnicas como, por exemplo, utilizar solos de outras áreas, para poder identificar qual a alternativa economicamente viável (Dessouky et al., 2014).

Conforme visto, vários autores têm se

dedicado ao estudo de técnicas para reduzir a expansão do solo. Uma forma de avaliar algumas dessas técnicas é testando materiais com características de redução de expansão em um solo expansivo fabricado. Um material que pode ser utilizado na fabricação desse tipo de solo é a argila bentonítica, por sua disponibilidade no mercado. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo fabricar um solo expansivo misturando areia com argila bentonítica para a obtenção de misturas com expansão semelhante a solos expansivos naturais. Os resultados dos ensaios de expansão livre das misturas foram confrontados com resultados de expansão livre de solos expansivos naturais com o intuito de avaliar qual mistura possui comportamento expansivo similar a solos expansivos naturais. O solo expansivo artificialmente fabricado nesta pesquisa poderá ser utilizado em estudos que visem testar novos materiais com potencial de redução de expansão do solo como, por exemplo, com inclusão de fibras ou camadas de EPS. A fabricação de solo em laboratório tem como a vantagem a possibilidade de se obter mais facilmente diferentes valores de expansão para um mesmo nível de tensão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A areia foi coletada numa área dentro do campus universitário da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A argila bentonítica utilizada é da marca Nercongel, da Nercon – indústria, comércio e transportes LTDA, cuja jazida fica localizada no município de Boa Vista, estado da Paraíba.

Inicialmente, foram realizados ensaios de compactação Proctor Normal (ABNT, 1986) e ensaios de expansão livre (ASTM, 2008) em misturas com teor de 25, 30, 35 e 40% de argila bentonítica calculado com base na massa seca da areia. Essas misturas foram identificadas nesta pesquisa como BT25, BT30, BT35 e BT40, respectivamente. Os parâmetros massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, obtidos dos ensaios de compactação, foram utilizados para moldar os corpos de prova do ensaio de expansão livre. A norma desse ensaio indica três métodos: A, B e C. Nesta

pesquisa utilizou-se uma modificação do método A, conforme feito por Snyder (2015), que basicamente reduziu a altura da amostra de 20 mm para 10 mm.

A metodologia do ensaio de expansão livre consiste, em sequência, colocar o solo ou a mistura, que devem estar na umidade ótima, em um anel metálico; verificar a massa do material mais anel mais papel filme; compactar o solo ou mistura até a altura de 10 mm; colocar o anel metálico com o material na célula de adensamento que, por fim, é colocado na prensa endométrica de Bishop. Nesta pesquisa foi utilizado um anel metálico de 20 mm de altura e 70 mm de diâmetro. Após zerar o relógio que medirá a expansão, coloca-se o menor peso na prensa que gera a menor tensão do ensaio, neste caso a menor tensão utilizada foi de 6,2 kPa. Após cinco minutos, colocam-se os demais pesos quando são avaliadas as expansões com a tensão acima da menor utilizada. Depois de 30 minutos após a colocação a carga mínima na prensa, a célula de adensamento é inundada. São feitas leituras no momento antes de inundar a célula de adensamento e até 72 horas após a adição da água. As leituras com a amostra saturada podem ocorrer no intervalo de tempo menor em que já se verifica o final da primeira expansão. Nesta pesquisa, verificou-se fim da primeira expansão após 48 horas.

Cada amostra gerou um gráfico similar ao indicado na Figura 1, que apresenta a expansão da amostra em função do tempo. Nessa figura, a interseção de duas retas tangentes indica o final da primeira expansão. O valor total da expansão é a percentagem de quanto à amostra expandiu desde a inundação do corpo de prova até o fim da primeira expansão.

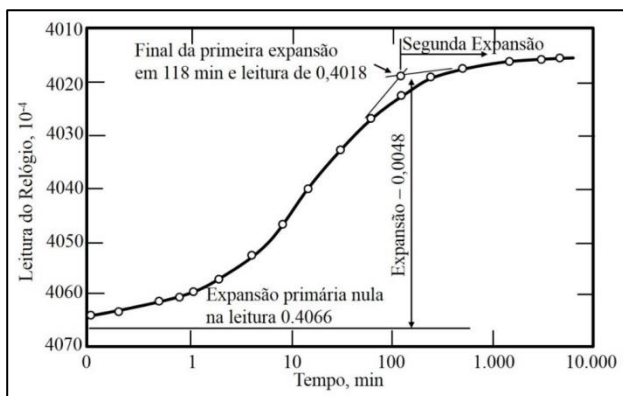


Figura 1 – Tempo por curva de expansão. Fonte: Adaptado de ASTM (2008).

Foram realizados ainda os ensaios de análise granulométrica (ABNT, 1984d), massa específica dos sólidos (ABNT, 1984b), limite de liquidez (ABNT, 1984a) e limite de plasticidade (ABNT, 1984c) para caracterização geotécnica tanto das misturas quanto dos solos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de granulometria estão indicados na Figura 2. A areia utilizada é um solo uniforme, classificada como SP no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). O resultado da distribuição granulométrica da argila bentonítica indicou que o solo possui 62.8% de argila, 19.2% de silte e 18% de areia. Quando são observadas a granulometria das misturas, verifica-se aumento gradativo de argila e silte em função da adição da argila bentonítica. As misturas foram classificadas como areia argilosa (SC), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de solos.

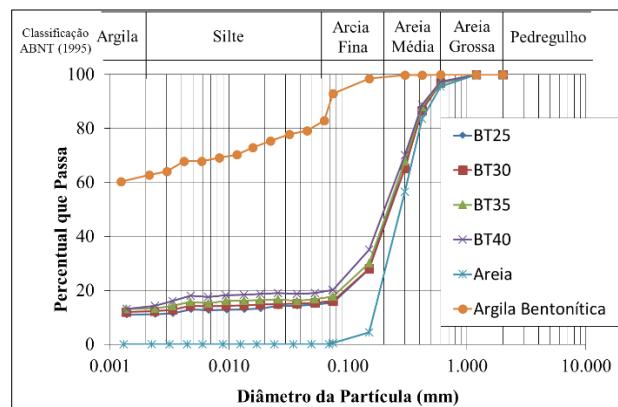


Figura 2. Curva granulométrica dos materiais ensaiados.

Os resultados de massa específica dos sólidos estão indicados na Tabela 1. O alto grau de expansão da argila bentonítica dificulta a obtenção desse parâmetro pelo método indicado na norma NBR 6508 (ABNT, 1984b). Por causa disso, alguns autores reduziram a quantidade de amostra exigida por essa norma para a execução do ensaio (Lukiantchuki, 2007; Camargo, 2012). Nesta pesquisa, essa dificuldade também foi encontrada. Contudo, como esse parâmetro apenas foi utilizado para o cálculo dos resultados da granulometria do solo, preferiu-se adotar uma média dos valores encontrados para argilas bentoníticas extraídas do mesmo

município da argila utilizada nesta pesquisa (Tabela 2). Os resultados das misturas também apresentaram a mesma dificuldade. Sendo assim, estimou-se esse parâmetro através da média ponderada com base na percentagem de areia e da argila bentonítica adicionada à mistura.

Tabela 1. Resultados da massa específica dos sólidos.

Amostra	ρ_s (g/cm ³)
Areia	2.614
BT25	2.642
BT30	2.647
BT35	2.653
BT40	2.658

Tabela 2. Valores de massa específica dos sólidos da argila bentonítica encontrados por outros autores.

Referência	ρ_s (g/cm ³)
Amorim (2003)	2.715
Maia (2004)	2.730
Ferraz (2006)	2.727
Média	2.724

Em relação aos resultados de limite de liquidez e limite de plasticidade (Tabela 3), a areia é um material não plástico. Os valores obtidos para a argila bentonítica estão próximos dos encontrados em outros estudos (Tabela 4), que utilizaram esse tipo de solo extraído da mesma cidade. Ressalta-se que os valores dos limites de consistência, assim como a composição granulométrica das argilas bentoníticas, variam devido ao processo industrial e época de extração do solo. Como esperado, os resultados das misturas para os limites de consistência indicaram valor crescente com o aumento da quantidade de argila bentonítica. Com base nos valores do índice de plasticidade, todas as misturas foram classificadas como altamente plástica, segundo a classificação de Burmister (1949 apud Das e Sobhan, 2014).

Tabela 3. Resultados dos ensaios de limite de consistência.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Areia	0	0	0
BT25	78	18	60
BT30	87	19	68
BT35	114	20	94
BT40	125	22	103
Argila Bentonítica	369	45	324

Tabela 4. Valores de limites de consistência para a argila bentonítica.

Estudo	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Ritter (1998)	331	59	218
Maia (2004)	317	51	266
Ferraz (2006)	435	46	389

Quando os valores dos limites de consistência das misturas são comparados com limites de consistência de solos expansivos naturais, verificam-se valores próximos desses índices entre a mistura BT30 e o solo Monteola Clay (Tabela 5). De forma geral, tanto para as misturas quanto para os solos expansivos naturais, os valores elevados do índice de plasticidade já indicam elevado potencial de expansão.

Tabela 5. Limite de consistência de alguns solos expansivos. Fonte: adaptado pelos autores.

Solo Expansivo	Referência	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Eagle Ford Clay	Kuhn (2005 apud Plaisted, 2009)	88	39	49
Cook Mountain	Armstrong (2014)	58	17	41
Del Rio Claro	Snyder (2015)	48	14	34
Monteola Clay	Snyder (2015)	80	24	56
Tan Taylor Clay	Snyder (2015)	95	26	69
Solo de Suape	Paiva et al. (2012)	81	44	37

Em relação aos resultados de compactação (Figura 3 e Tabela 6), verifica-se valor crescente de umidade ótima com o aumento da quantidade de finos no solo ao passo que houve redução da massa específica aparente seca máxima causada também pela maior concentração da argila bentonítica. Ambos os resultados estão dentro do esperando.

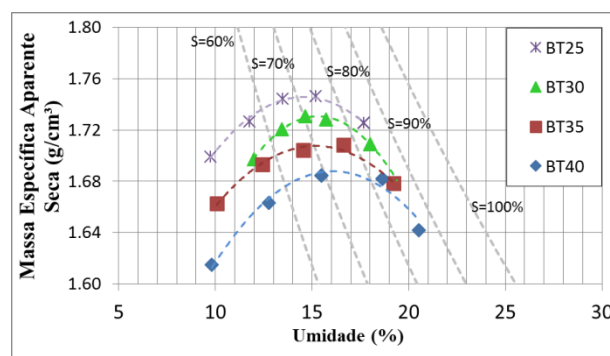


Figura 3. Resultados dos ensaios de compactação das misturas.

Tabela 6. Parâmetros obtidos dos ensaios de compactação.

Amostra	$\rho_{dm\acute{a}x.}$ (g/cm ³)	$w_{\acute{o}t}$ (%)
BT25	1.75	14.8
BT30	1.73	15.2
BT35	1.71	15.4
BT40	1.69	16.2

A Figura 4 mostra os resultados dos ensaios de expansão em função da tensão aplicada. Linhas de tendência utilizando-se a Equação 1, são ainda mostradas nessa mesma figura. A Tabela 7 apresenta os coeficientes “a” e “b” das linhas de tendência obtidas.

$$y = a - b \ln(x) \quad (1)$$

onde,

y – valor da expansão do solo;

x – tensão aplicada;

a, b – coeficientes obtidos mediante regressão.

Nos resultados de expansão livre observa-se elevado grau de expansão da mistura BT40 quando comparado com a mistura BT25 para a mesma tensão (Figura 4). A diferença de 15% de argila bentonítica entre as misturas foi responsável por alterar significativamente a expansão da amostra.

Os resultados mostrados na Figura 4 indicam diferentes graus de expansão para as diferentes misturas e quanto maior a quantidade da argila bentonítica, maior será a inclinação da curva tensão-expansão, como pode ser observado pelos valores de “b” presentes na Tabela 7. Em solos expansivos naturais estudados por Snyder (2015) também se verificou uma inclinação maior da curva expansão-tensão em solos com maior quantidade de argila.

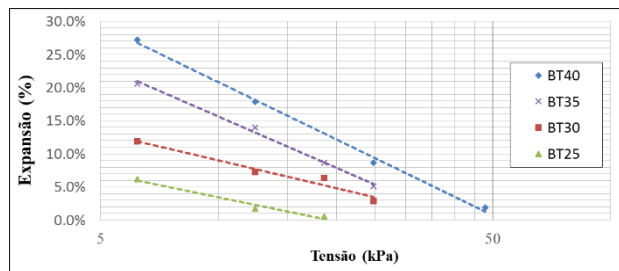


Figura 4. Expansão em função da tensão.

Tabela 7. Coeficientes das linhas de tendência das misturas.

Mistura	a	b	R^2
BT40	0.4955	0.125	0.9966
BT35	0.4138	0.112	0.9935
BT30	0.2299	0.061	0.9567
BT25	0.1562	0.053	0.9680

A Figura 5 mostra os resultados da expansão livre das misturas estudadas e de solos expansivos naturais. Por essa figura, verifica-se maior coincidência de tensão e expansão da mistura BT30 com os solos expansivos naturais. Dependendo da tensão aplicada, a expansão dessa mistura apresenta expansão de magnitude semelhante aos solos Del Rio Clay, Mantoela Clay e Tan Taylor Clay. A mistura BT25 possui expansão parecida com o solo Del Rio Clay para a tensão com menor valor. Por outro lado, a mistura BT35 para a tensão mais elevada possui expansão similar ao solo Cook Mountain e, para a tensão de 18.6 kPa, a expansão é próxima ao solo de Suape. A mistura BT40 também apresentou expansão próxima a curva do solo de Suape, mas para a tensão de 25 kPa. De forma geral, as misturas apresentam elevada redução de expansão com o aumento da tensão aplicada, enquanto que nos solos naturais essa redução é menos acentuada. De qualquer forma, os valores de expansão apresentados pelas misturas simularam a magnitude de expansão de solos naturais.

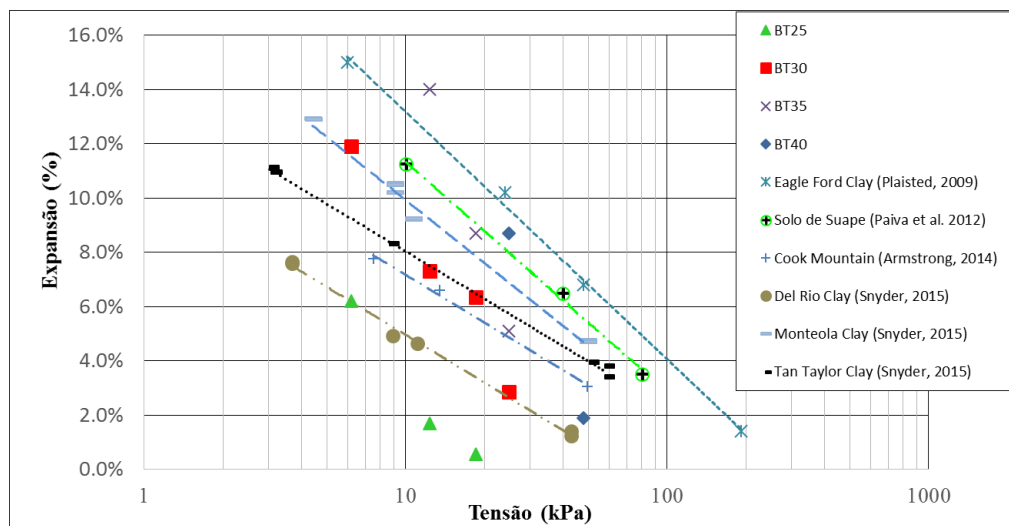


Figura 5. Comparação entre resultados.

4 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa argila bentonítica e areia foram misturados com o intuito de fabricar um solo expansivo. Ensaios de expansão livre e compactação Proctor Normal foram realizados em quatro misturas. Também com essas misturas, assim como com a areia e a argila bentonítica, ensaios básicos de caracterização geotécnica foram realizados.

Os resultados dos ensaios de expansão livre indicaram elevada expansão nas misturas BT35 e BT40 para a tensão mais baixa utilizada (5 kPa), resultado este não encontrado em solos expansivos naturais comparados. Por outro lado, a mistura BT30 apresentou maior semelhança de expansão quando comparado a três tipos de solos expansivos naturais para as tensões de 5 a 20 kPa. Porém, a inclinação da curva expansão-tensão possui elevada inclinação para todas as misturas, algo não encontrado nos solos expansivos naturais comparados. Todavia, isso não invalida a aplicação desse tipo de solo em pesquisas que avaliam algumas técnicas com potencial de redução de expansão, pois foi possível fabricar solos com diferentes magnitudes de expansão e que se assemelham a valores de expansão de solos naturais. Misturas com diferentes percentagens de argila bentoníticas podem ser utilizadas em função da expansão e da tensão a serem testadas. Em comum aos solos expansivos naturais ou fabricados foi o aumento

da inclinação da curva expansão-tensão com o aumento da percentagem da argila.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM, D 4546-08, (2008) Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils.
- Amorim, L. V. (2003) *Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo*. Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 326 f.
- Armstrong, C. P. (2014) *Effect of fabric on the swelling of highly plastic clays*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Geotecnia, University of Texas at Austin. 195 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 6459, (1984a). Solo – determinação do limite de liquidez.
- ____ ABNT, NBR 6508, (1984b). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.
- ____ ABNT, NBR 7180, (1984c). Solo – determinação do limite de plasticidade.
- ____ ABNT, NBR 7181, (1984d). Solos – análise granulométrica.
- ____ ABNT, NBR 7182, (1986). Solo – ensaio de compactação.
- ____ ABNT, NBR 6502, (1995). Rochas e solos.
- Camargo, K. R. (2012) *Avaliação da condutividade hidráulica e de resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS)*. Dissertação de mestrado, Mestrado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, 111 p.

- Das, B.; Sobhan, M. K. (2014) *Principles of Geotechnical Engineering*, 8nd ed., Cengage Learning, Stamford, CT, USA 767 p.
- Dessouky, S. H. et al. (2014) Investigation of various pavement repairs in low-volume roads over expansive soil. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 29, n. 6.
- Ferraz, R. L. (2006). *Acoplamento dos processos do adensamento e do transporte de contaminantes em solos compressíveis*. Tese de Doutorado, Doutorado em Ciências em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 246 p.
- Ferreira, S. R. de M. (2008). Solos colapsáveis no Brasil: caracterização e comportamento geotécnico de alguns solos. In: *IV Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia e XI Congresso Nacional De Geotecnia*. Coimbra: Associação Portuguesa de Geotecnia, Vol. 1, p. 1-8.
- _____; Amorim, S. F.; Varejão-Silva, M. A. (2008). Tecnologia da geoinformação aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsáveis do estado de Pernambuco. In: *Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, 12, Recife. Recife: CTG/UFPE.
- Jayatilaka, R.; Lytton, R. L. (1997) *Prediction of expansive clay roughness in pavements with vertical moisture barriers*. Austin: Texas Transportation Institute.
- Li, J.; Cameron, D. A; Ren, G. (2014) Case study and back analysis of a residential building damaged by expansive soils. *Computers and Geotechnics*, Vol. 56, p. 88-99.
- Lukiantchuki, J. A. (2007). *Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 150 p.
- Maia, A. D. (2004). *Avaliação da geração de drenagem ácida em um solo fabricado em laboratório contendo sulfeto de ferro e matéria orgânica*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Ciências em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 225 p.
- Nelson, J. D. et al. *Foundation engineering for expansive soils*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- Ozer, M.; Ulusay, R.; Isik, N. S. (2012). Evaluation of damage to light structures erected on a fill material rich in expansive soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 71, pp 21-36.
- Paiva, S. C. et al. (2012). Estabilização de solos expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape/PE com Cal. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 16, Porto de Galinhas: ABMS, p. 264-264.
- Plaisted, M. D. (2009). *Centrifuge testing of an expansive clay*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Geotecnia, University of Texas at Austin, 133 p.
- Ritter, E. (1998). *Efeito da salinidade na difusão e sorção de alguns íons inorgânicos em um solo argiloso saturado*. Tese de Doutorado, Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 229 p.
- Silva Junior, M. A. M. (2012). Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental*, Vol. 2, n. 1, p. 57-72.
- Snyder, L. M. (2015). *Determination of the potential vertical rise in expansive soils using centrifuge technology*. 399 f. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Geotecnia, University of Texas at Austin, 399 p.
- Zornberg, J. G. et al. (2008). *Validating mechanisms in geosynthetic reinforced pavements*. Austin: Center for Transportation Research.