

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise da expansibilidade de quatro solos presentes na estratigrafia da Formação Guabirota, extraídos de uma mesma obra em Curitiba (PR)

Jessica Leindorf de Almeida

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, jessica.leindorf@hotmail.com

Carolina Faust Machado

BSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, carolina.faust@hotmail.com

Yeimy Ordoñez Muñoz

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yeordonez29@gmail.com

Paula Caroline Alves Pudell

MSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, pudell@hotmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

DSc, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

RESUMO: A Formação Guabirota é conhecida por seus solos expansíveis e que apresentam alta suscetibilidade a erosão e movimentos gravitacionais de massas. Ela abrange Curitiba e a região metropolitana, fazendo com que a maioria das obras realizadas nesse perímetro estejam sujeitas a danos ambientais e materiais como o deslocamento de encostas, ruptura de cortinas ou degradação de pavimentos. Neste contexto, o objetivo deste artigo é analisar a expansão livre de quatro solos de colorações diferentes da Formação Guabirota (vermelho, rosa, amarelo e cinza) extraídos de diversas estratigrafias de uma mesma obra em Curitiba, PR. Para isso, ensaios de caracterização dos materiais e ensaios edométricos com amostras indeformadas foram realizados. Cargas de 2, 5 e 10 kPa foram aplicadas durante 24 horas em cada amostra para se obter o gráfico de expansão. Dos quatro solos ensaiados o solo amarelo foi o que apresentou maior expansibilidade, sendo que na carga de 5 kPa o acréscimo de altura do corpo de prova foi de 3,76% em relação à altura inicial. Através dos ensaios edométricos também foi possível constatar que as características naturais das amostras indeformadas causaram variações no estudo, mas, apesar disso, o deslocamento vertical sofrido pelos corpos de prova seguiu sendo perceptível.

PALAVRAS-CHAVE: Expansibilidade, Estratigrafia, Formação Guabirota.

ABSTRACT: The Guabirota Formation is known for its expandable soils that are highly susceptible to erosion and mass gravitational movements. The formation covers Curitiba and the metropolitan region, which means that most of the constructions carried out in this perimeter are subject to environmental and material damage, such as displacement of slopes, breakage of curtains, or degradation of pavements. In this context, this article aims to analyze the free expansion of four soils of different colors of the Guabirota Formation (red, pink, yellow, and gray) extracted from several stratigraphies of the same field in Curitiba, PR. For this purpose, material characterization tests and oedometer tests with undisturbed samples were carried out. Charges of 2, 5, and 10 kPa were applied for 24 hours on each specimen to draw the expansion plot. Of the four soils tested, the yellow soil was the most expandable in all applied loads, with the highest variation in height being 3.76% concerning the initial height when the specimen was subjected to a load of 5 kPa. Through the tests, it was possible to verify that the natural characteristics of the undisturbed samples cause variations in the study. However, despite this, the vertical displacement suffered by the specimens remains noticeable.

KEYWORDS: Expandability, Stratigraphy, Guabirota Formation.



1 Introdução

A expansão é a medida da deformação volumétrica causada pela interação entre sucção e tensão do solo (MAHLER, 1994). Esta deformação pode aumentar ou diminuir o volume conforme a variação da umidade. Os solos expansivos podem ser classificados em dois grupos: o primeiro foi originado das rochas ígneas pela decomposição dos minerais feldspato e piroxênio, formando montmorilonita e minerais secundários. O segundo grupo, compreende as rochas sedimentares, que são caracterizados por possuírem a montmorilonita em sua composição e quando fragmentadas em pequenos pedaços dão origem aos solos expansivos (DONALDSON, 1969).

A maior ocorrência de expansibilidade dos solos tem sido observada em regiões áridas e semiáridas, lugares onde a evaporação anual excede a precipitação pluviométrica (CHAGAS, 2014). Portanto, o ambiente está diretamente relacionado com o comportamento expansivo do solo. Algumas condições como a formação geológica, clima, permeabilidade, lençol freático e o grau de saturação interferem no desempenho natural do solo, bem como na composição e textura mineralógica (EL-SAYED & RABBAA, 2009; BARROS & PINTO, 2008).

No Brasil, os solos expansivos são comumente identificados nas regiões nordeste e sudeste. Estudos consolidados relatam a presença deste tipo de solo no Recôncavo Baiano, Bahia (OLIVEIRA *et al.*, 2006), na cidade de Icó, Ceará (CHAGAS *et al.*, 2016) e na Formação Guabirotuba, Paraná (KORMANN, 2002).

A Formação Guabirotuba compreende uma área de 3000 km², abrangendo Curitiba e outro seis municípios da região metropolitana da cidade. É caracterizada por seu comportamento higroscópico com sedimentos expansivos e retráteis que propiciam uma alta susceptibilidade à erosão e movimentos gravitacionais de massa em encostas (FELIPE, 2011). O perfil típico dessa formação geológica conta com argilas e argilitos que possuem predominância de esmectitas em sua composição, o que favorece ainda mais seu comportamento expansível (KORMANN, 2002).

O comportamento de expansão causa fadiga nas estruturas e, algumas regiões, são suscetíveis a ciclos de expansão e retração. Além disso, este comportamento se torna um problema significativo quando ocorre a redução da umidade no solo e consequentemente sua retração, ocasionando formação de trincas e assim, iniciando o processo de erosão. A ruptura de pavimentos, escavações, instabilidade de taludes e fundações são indicações comuns deste tipo de zonas (CERRI & AMARAL, 1998).

O principal objetivo deste trabalho é estudar o comportamento das camadas vermelha, rosa, amarela e cinza da Formação Guabirotuba, utilizando ensaios de caracterização geotécnica e ensaio edométrico para compreender a expansibilidade dos solos presentes nessa formação geológica.

2 Programa Experimental

O perfil da formação Guabirotuba possui diferentes cores para cada camada de solo, que variam de acordo com a profundidade de escavação. O primeiro solo presente abaixo da camada orgânica é o vermelho, seguido por uma camada de solo rosa, uma camada de solo amarelo e por último, uma camada de coloração cinza (FELIPE, 2011).

Foram coletadas amostras dos quatro tipos de solo na escavação de uma construção na cidade de Curitiba, Paraná, e realizados os ensaios de caracterização da formação. As amostras utilizadas foram coletadas no estado indeformado. A camada vermelha se encontrava à 0,5 m de profundidade no perfil, seguida pela rosa que foi extraída à 1 m de profundidade, pela amarela à 1,5 m de profundidade e a camada cinza à 2 m.

De acordo com Felipe (2011), o solo vermelho é composto majoritariamente por caulinita, sendo um solo residual maduro; já o solo rosa tem o predomínio de caulinita, plasticidade média e baixa erodibilidade; o solo amarelo, apresenta grãos de feldspato e quartzo, o predomínio de esmectitas, alta erodibilidade, limite de liquidez (LL) de 62,8 e limite de plasticidade de 35,5 (LP). O solo cinza também apresenta alta quantidade de argila, predomínio de esmectitas, erodibilidade muito alta e comportamento expansível.

2.1 Materiais

Foram realizados testes de caracterização de solos seguindo as normas técnicas vigentes. As amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). O ensaio para determinar a granulometria



(ASTM D422-63, 2007) foi realizado em duas partes. A primeira parte consistiu no peneiramento lavado passado o solo pelas peneiras #4 (4,76 mm) a #200 (0,074 mm). Já a segunda parte utilizou o analisador de partículas com difração a laser (*Battersizer S3 Plus*) para obter a granulometria das partículas menores que 0,075 mm (>#200). Os resultados da junção das curvas granulométricas encontram-se na Figura 1.

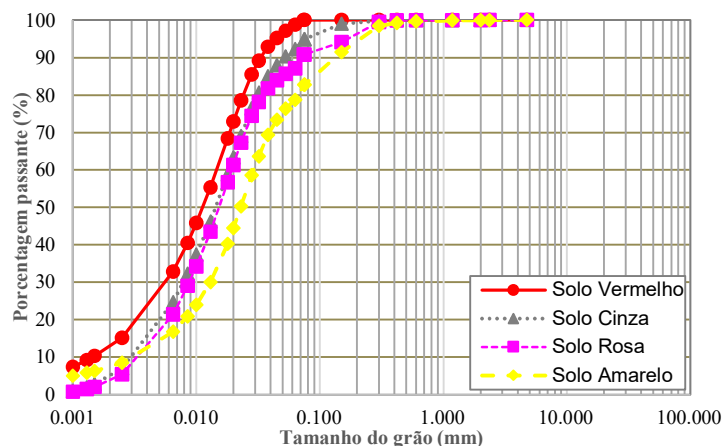


Figura 1. Curva granulométrica.

A densidade real dos grãos (G_s) foi determinada de acordo com a DNER ME 093 (Brasil, 1994). O limite de liquidez (LL) foi ensaiado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016) e o limite de plasticidade (LP) de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016). Com os limites definidos foi possível obter o índice de plasticidade (IP). Todos os resultados estão apresentados na Tabela 1.

O potencial de expansão pode ser obtido através de diversos modelos de caracterização. Skempton (1953) declarou que o potencial de expansão poderia ser obtido através da atividade da argila (A), que é definida pela razão entre o índice de plasticidade e a porcentagem de argila (Eq. 1).

$$A = \frac{IP}{\% < 0,002 \text{ mm}} \quad (1)$$

De acordo com Das e Sobhan (2016), quando o valor de atividade de uma argila é maior que 1,25, ela é considerada uma argila ativa, o que implica em um alto potencial de expansão.

Van der Merwe (1964) propôs que a elevação do solo fosse classificada pelo potencial de expansão em muito alto, alto, médio e baixo. Basma (1993) elaborou gráficos para determinar o potencial de expansão e o grau de expansão baseado no índice de plasticidade e a porcentagem de argila no solo estabelecida por regressão linear através do potencial de expansão vs propriedades do solo, incluindo a atividade da argila. A classificação das amostras está apresentada na Tabela 1.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM D2487, 2017), ao relacionar o limite de liquidez e o índice de plasticidade, determina-se um código que correlaciona a plasticidade e a classe do solo, encontrado na Tabela 1 da ASTM D2487, p.3 (2017). A amostra cinza foi classificada como CH, ou seja, uma argila inorgânica de alta plasticidade. Já as amostras vermelha, rosa e amarela foram classificadas como MH, ou seja, siltes inorgânicos. As principais características das argilas (CH) são a alta plasticidade, compressibilidade e expansão. Os siltes (MH), por sua vez, possuem alta plasticidade e comportamento expansivo controlado.

As propriedades imprescindíveis para o estudo são as condições naturais do solo. Sendo assim, o teor de umidade (w_i) foi mensurada através das amostras indeformadas. O peso unitário (γ) e o índice de vazios (e_i) foram obtidos ao moldar as amostras para o ensaio de expansão.

Os minerais das argilas têm influência direta no comportamento dos solos. A caracterização determina as propriedades do solo baseado na presença de minerais, por exemplo, as montmorilonitas ou ilitas estão sujeitas a uma expansão considerável quando saturadas e sofrem elevadas compressões quando secas.



Tabela 1. Resultados da caracterização.

Propriedades	Solo Rosa	Solo Amarelo	Solo Cinza	Solo Vermelho
<i>Limites de consistência</i>				
Limite de liquidez (%)	64,2	63,9	61,1	52,7
Limite de Plasticidade (%)	33,4	45,1	31,2	32,1
Índice de Plasticidade (%)	31	19	30	21
<i>Tamanho do grão</i>				
Areia grossa (4750 - 2000 μm) (%)	0,00	0,01	0,00	0,00
Areia média (2000 - 425 μm) (%)	0,09	0,60	0,03	0,00
Areia fina (425 - 75 μm) (%)	8,69	15,77	4,93	0,00
Silte (75 - 5 μm) (%)	75,34	63,68	76,83	73,81
Argila (< 5 μm) (%)	14,68	13,95	17,09	18,84
<i>Atividade de argila</i>	2,10	1,35	1,75	1,09
<i>Composição química (%)</i>				
SiO ₂	48,532	48,421	51,067	49,254
Al ₂ O ₃	40,854	44,232	42,874	41,58
SO ₃	5,328	5,102	5,203	5,013
TiO ₂	1,837	0,943	0,494	1,097
K ₂ O	2,093	0,822	0,302	1,872
Fe ₂ O ₃	1,203	0,574	0,104	1,125
V ₂ O ₅	0,143	---	---	---
<i>Condições naturais da amostra</i>				
Teor de umidade, w _i (%)	39,07	41,40	36,57	43,84
Peso unitário, γ (kN/m ³)	17,25	18,48	18,00	18,25
Índice de vazios, e _i	1,266	1,246	1,322	1,353
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,670	2,907	2,642	2,645
<i>Grau de expansão</i>				
S.U.C.S.	Médio	Médio	Médio	Médio
	MH	MH	CH	MH

2.2 Métodos

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, de maio a novembro de 2020. As propriedades obtidas nos ensaios de caracterização foram necessárias para inserir na prensa automática que efetuou os carregamentos do ensaio edométrico.

Os ensaios edométricos tem como objetivo medir a deformação vertical de amostras cilíndricas saturadas com água destiladas e submetidas a uma carga vertical (ASTM D2435/D2435M, 2020).

As amostras foram ensaiadas na prensa de reação LoadTrac II (GEOCOMP), onde o volume e a carga foram mantidos constantes enquanto a água era adicionada, como definido por Ferreira & Ferreira (2009).

O ensaio de expansão foi realizado utilizando um anel de metal de $50 \pm 0,09$ mm de diâmetro e altura de $19 \pm 0,02$ mm. Antes de executar o ensaio o anel foi pesado vazio, em seguida a amostra indeformada do solo foi moldada no anel e realizada a pesagem novamente. O corpo de prova foi alocado entre papéis filtros e pedras porosas, inserido dentro da célula de carga e ajustado na prensa. Na sequência a amostra foi inundada e o equipamento aplicou as cargas definidas por 24 horas. O ensaio foi realizado garantindo o estado saturado da amostra com pressão controlada, gerando assim, a deformação do solo.

Após o período de ensaio ter sido finalizado, as amostras saturadas eram pesadas e os dados do equipamento coletados e analisados. Cada coloração de solo foi ensaiada com três pressões diferentes sendo aplicada (2, 5 e 10 kPa).

A pressão de expansão, de acordo com Philipponnat (1991), é a pressão que o material expansivo exerce quando a expansão é impedida. Uma das formas convencionais de se obtê-la é através do método de amostra a volume constante, onde a pressão aplicada pode ser apenas o suficiente para ajustar o sistema ou



correspondente as cargas que o material estava submetido em campo. Segundo os ensaios conduzidos por Pereira e Pejon (1999), a pressão de expansão de materiais argilosos da Formação Guabirotuba para amostras com umidade natural ficaram entre 1,6 kPa a 34,2 kPa. Com esses valores, arbitrou-se as três pressões utilizadas nessa pesquisa, levando-se em consideração também as cargas de campo.

Para definir a composição inorgânica do solo foi realizado a espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX) com os resultados apresentados na Tabela 1 presente no Item 2.1 deste trabalho. O equipamento utilizado no ensaio FRX foi o EDX720/800HS (SHIMADZU) que é comumente utilizado na quantificação de argilominerais.

A partir do ensaio FRX foi possível determinar que o elemento químico mais abundante em todos os tipos de solo foi o dióxido de silício, também conhecido como sílica, seguido pelo óxido de alumínio, também chamado de alumina. Esses elementos estão largamente presentes em minerais de quartzo e caulinita.

A expansão pode ter origem mecânica e/ou físico-química. A primeira se deve às forças de descompressão elástica e está ligada ao tempo. A segunda se deve à atração superficial das partículas, repulsão osmótica e hidratação dos cátions nas partículas de argilominerais (Mahler, 1994).

Esta pesquisa discutirá sobre a expansão mecânica. Contudo, minerais como quartzo e caulinita geralmente são encontrados em solos finos tropicais e subtropicais do sudeste do Brasil, e são conhecidos pela ocorrência do comportamento expansivo como os encontrados nas amostras desta pesquisa.

3 Apresentação e Discussão dos Resultados

Após os testes de caracterização do solo terem sido finalizados e a metodologia do teste edométrico ter sido definida foi possível iniciar os testes de expansão livre. Doze amostras indeformadas foram moldadas e testadas, sendo três amostras para cada um dos quatro tipos de solo em três cargas diferentes (2, 5 e 10 kPa).

As amostras foram ensaiadas e os dados finais exportados e tratados para traçar-se o gráfico apresentado na Figura 2, onde a porcentagem de expansão vertical foi analisada em função da raiz quadrada do tempo.

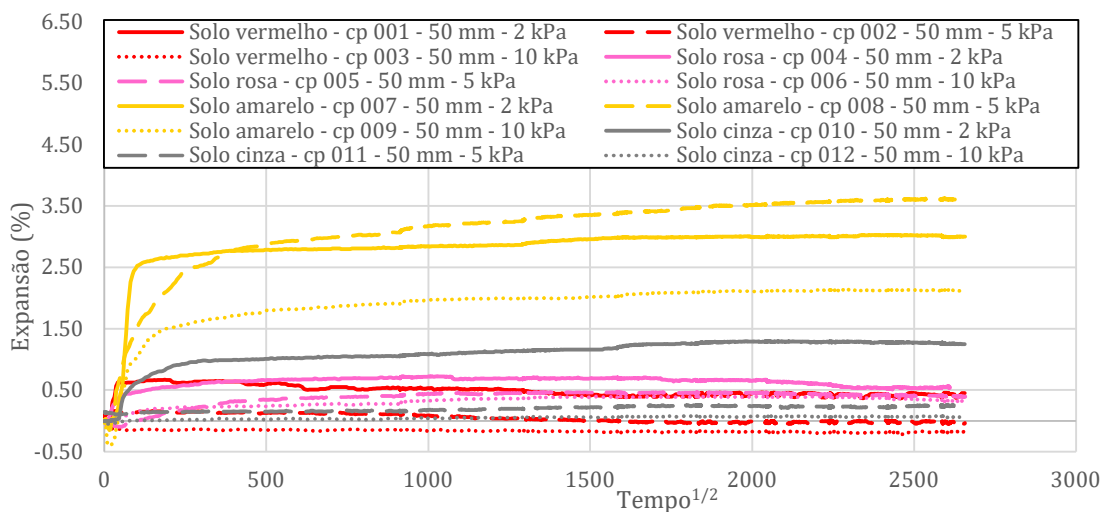


Figura 2. Porcentagem de expansão em função da raiz quadrada do tempo de todas as amostras.

Através da análise do gráfico é perceptível que o solo com maior potencial de expansibilidade foi o solo de coloração amarela. Dos quatro solos ensaios, ele foi o mais expansível em todas as cargas aplicadas e, quando submetido a carga de 5 kPa, apresentou a maior variação de altura dentre as amostras, com 3,76% de diferença em relação à sua altura inicial, seguido então pela amostra do mesmo solo, porém com 2 kPa de carga aplicada, obtendo uma variação de 3,48% de altura. Já para a carga de 2 kPa, excluindo-se o solo amarelo, o solo que obteve a maior expansão foi o cinza (ganhando 0,25 mm em sua altura), seguido pelo rosa (0,14 mm) e vermelho (0,13 mm). Na carga de 5 kPa, seguiu-se após o amarelo, o solo rosa, vermelho e cinza. Na



carga de 10 kPa o solo rosa e o solo cinza expandiram, entretanto, o solo vermelho adensou, ou seja, sua altura reduziu 0,04 mm em relação à altura inicial.

Analisando o teor de umidade no início dos testes de expansão e após, percebe-se que ele também aumenta. Em outras palavras, os vazios que antes eram preenchidos com ar e água passam a expelir o ar devido a carga ser aplicada constantemente por um longo período e esses vazios que antes possuíam ar, passam a ser preenchidos somente com a água que foi utilizada para inundar as amostras. Desta forma, a água penetra nos poros e contribui para que haja alterações na altura das amostras (expansão). A Tabela 2 demonstra esse aumento no teor de água para cada tipo de solo.

Tabela 2. Variação da umidade das amostras antes e após o ensaio edométrico.

Tipo de solo	Carga (kPa)	$w_f - w_i$	Tipo de solo	Carga (kPa)	$w_f - w_i$
Vermelho	2	5,17%	Amarelo	2	8,97%
	5	3,47%		5	10,09%
	10	1,32%		10	14,47%
Rosa	2	3,39%	Cinza	2	3,43%
	5	6,14%		5	1,53%
	10	0,91%		10	1,20%

Por essa tabela é possível perceber que o solo amarelo, que apresentou o maior comportamento de expansão, foi também o que apresentou maior variação entre a umidade final e inicial. Isso valida o fato que se discutiu no Item 2.2 quando se afirmou que a expansão pode ter origem mecânica e/ou físico-química, pois a presença de maior teor de água no solo indica que provavelmente houve uma maior hidratação nas partículas de cátion dos minerais do solo amarelo comparado com os demais, atrelando novamente a expansão a características mecânicas e químicas.

Além desses resultados, foi possível traçar os gráficos apresentados na Figura 3 que relacionam a expansão (em mm) e a carga aplicada (em kPa) de cada tipo de solo, sendo possível ainda encontrar uma equação que melhor representa o comportamento a expansão de cada amostra de solo.

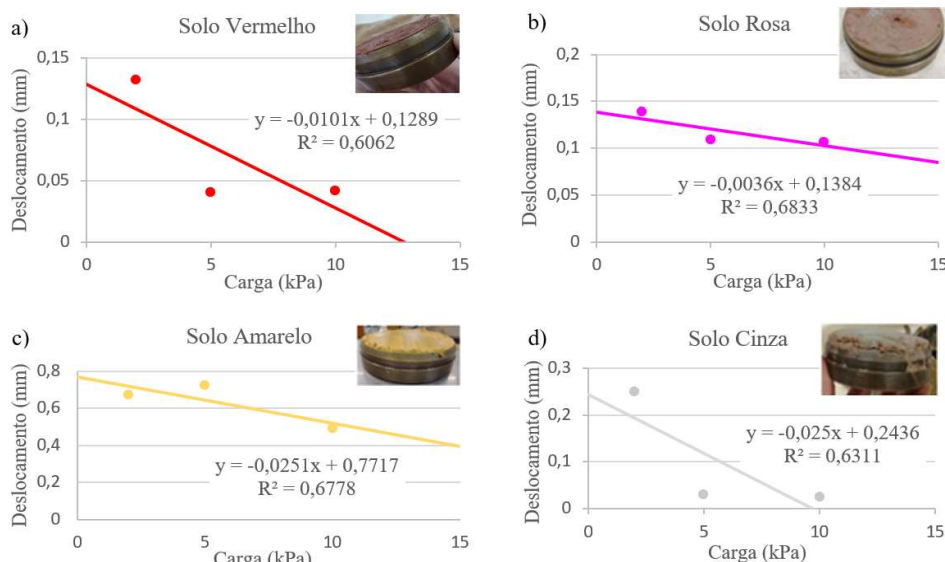


Figura 3. Expansão (mm) x Carga (kPa): a) Solo vermelho; b) Solo rosa; c) Solo amarelo; d) Solo cinza.

Nas equações, o eixo das ordenadas corresponde à expansão em mm e o eixo das abscissas representa a carga aplicada no maciço em kPa. Ao lado dos gráficos, uma imagem de cada solo mostra a variação na altura das amostras após o ensaio de expansão ter sido finalizado.

O solo vermelho obteve uma variação de altura de 0,685 mm na amostra que mais expandiu (com 2 kPa); o rosa apresentou variação de 0,741 mm; no amarelo foi de cerca de 3,762 mm e no cinza foi de 1,303



mm, o que significa que o solo amarelo expandiu aproximadamente 5 vezes mais do que o solo vermelho, que foi o menos expansível entre os ensaiados. Comparando esses resultados com os valores definidos por Van der Merwe (1964) para solos com expansão média, fica claro que o comportamento dos solos nesta pesquisa era esperado. Segundo o autor, o valor de referência seria 1/4 in./ft (~3 mm) e apenas o solo amarelo ultrapassou em 0,762 mm o proposto pelo autor.

A partir da determinação das equações para cada solo, o rosa e o amarelo foram os que melhores se ajustaram, com R^2 de 0,68, seguido do cinza com R^2 de 0,63 e o vermelho, com R^2 de 0,61.

Como as amostras testadas eram indeformadas, as variações apresentadas são consideradas aceitáveis, visto que a expansão foi influenciada pelas características do solo, fatores ambientais externos e estado de estresse no solo (El-Sayed & Rabbaa, 2009; Barros & Pinto, 2008).

4 Conclusões

Com o objetivo de compreender o comportamento de expansão das diferentes camadas da Formação Guabirotuba, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e ensaios de expansão edométrica em 4 solos de diferentes horizontes desta formação (vermelho, rosa, amarelo e cinza).

Pelos resultados dos testes foi possível afirmar que ao se ensaiar amostras indeformadas, as suas características naturais, ou seja, os fatores externos do maciço de solo de onde elas foram retiradas, causam variações no estudo. Apesar disso, a expansão dos solos ensaiados pode ser analisada pois a caracterização mineralógica mostrou a presença de quartzo e caulinita que são minerais que auxiliam na expansão dos solos.

Foi possível constatar também que a expansão foi maior quando a pressão aplicada foi menor. O solo amarelo expandiu 5 vezes mais que o solo vermelho, que foi o menos expansível dos solos ensaiados. O solo amarelo também foi o solo a apresentar maior variação entre a umidade final e inicial, ou seja, sua maior expansibilidade também pode estar ligada à sua capacidade de reter mais água no seu interior.

Por fim, este estudo é relevante para solucionar problemas em obras geotécnicas em que há a remoção de solos superficiais em formações que são compostas por solos expansíveis e em cidades suscetíveis a grandes variações de precipitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (PPGEC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing Materials (2007). D422-63. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil*. Pennsylvania.
- American Society for Testing Materials (2017). D2487-17e1. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Pennsylvania.
- American Society for Testing Materials (2020). D2435/D2435M. *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. Pennsylvania.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo – determinação do limite de liquidez – procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- Barros, P.L.A.; Pinto, P.R.O. (2008) Oedometer Consolidation Test Analysis by Nonlinear Regression. *Geotechnical Testing Journal*, 31 (1): 1-8.



- Basma, A.A. (1993). Prediction of expansion degree for natural compacted clays. *Geotech. Test. J.*, 16 (6): 542-549.
- Cerri L.E.S. and Amaral, C. P. (1998) Riscos geológicos. In: A. M. S. Oliveira and S. N. A. Brito (eds). *Geologia de Engenharia*, ABGE, 301-310.
- Chagas, G.S. (2014) *Estudo experimental do comportamento mecânico de estrato silto-argiloso (Massapê) para fundações superficiais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará/UFC, 111 p.
- Chagas, G.S.; Moura, A.S.; Carneiro, A.A. (2016) Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/expansão de um solo silto argiloso de massapê da cidade de Icó – CE. REEC – Rev. Eletrônica de Eng. Civil, 13 (1).
- Das, B. M.; Sobhan, K. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering*. 9. ed. Cengage Learning, Boston.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (1994). DNER-ME 093. *Solo – determinação da densidade real*. Brasília.
- Donaldson, G.W. (1969) The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature. In: Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Soils. College Station, Texas A&M University Press, 25–36.
- El-Sayed, S.T., Rabbah, S.A. (2009) Factors affecting behavior of expansive soils in the laboratory and field – a review. *Geotechnical Engineering*, 17 (1): 89-107.
- Felipe, R. S. (2011) Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba. *MINEROPAR*, 1 (1), 48 p. Curitiba.
- Ferreira, S.R.M. and Ferreira, M.G.V.X. (2009). Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 33 (4): 779-791.
- Kormann, A.C.M. (2002) *Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo/USP. 429 p.
- Mahler, C.F. (1994) *Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 255 p.
- Oliveira, A.G.S.; Jesus, A.C.; Miranda, S.B. (2006) Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano. In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - Geojovem. Rio de Janeiro.
- Pereira, E.M. & Pejon, O. J. (1999) *Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu-PR*. Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba. ABMS/UFPR. Curitiba, 17-28.
- Philipponnat, G. (1991). Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Revue Française de Géotechnique*, 57: 5-22.
- Skempton, A.W. (1953). The colloidal activity of clays. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering*. London (UK). 3 (1): 587-595.
- United States Department of Agriculture (1978). Chapter 3 - Engineering Classification of Earth Materials. In: *National Engineering Handbook (NEH)*, Part 631, Section 8, Engineering Geology.
- Van der Merwe, D.H. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *The Civil Engineer in South Africa*, 6 (6): 103 – 107.