

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

Avaliação da Microestrutura de Solo Expansivo antes e após a Variação de Volume

Thalita Cristina Rodrigues Silva

Engenheira, BRK Ambiental, Recife/PE, Brasil, thalitarodrigues@hotmail.com

Felipe Araújo Silva Barbosa

Engenheiro, CODEVASF – 6º SR, Juazeiro/BA, Brasil, felipebarbosa_@hotmail.com

Arthur Gomes Dantas de Araújo

Professor, UFERSA, Natal/RN, Brasil, arthur.araujo@ufersa.edu.br

Antônio Celso Dantas Antonino

Professor, UFPE, Recife/PE, Brasil, antonio.antonino@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira

Professor, UFPE, Recife/PE, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

RESUMO: O artigo analisa o arranjo estrutural de amostra de solo na condição natural e compactada de um solo expansivo de Bonito/PE. Foram realizados ensaios de caracterização química e física, ensaios edométricos na condição natural e saturada e realizadas análises de microestrutura por meio de ensaios de tomografia de Raios-X e microscopia electronica de varredura. O solo expansivo de Bonito apresenta 94% de argila, limite de liquidez de 91% e índice de plasticidade de 58%. Argila de capacidade de troca cationica de 75 cmolc kg⁻¹. A expansão livre na condição natural correspondeu a 10% e tensão de expansão a volume constante foi de 371 kPa, para uma umidade inicial de 27%. As imagens obtidas revelam presença de Montmorilonita e Caulinita e Quartzo. Em termos quantitativos, foi identificado que a macroporosidade do solo da amostra indeformada foi reduzida de 4,58% para 1,85%, enquanto que na amostra compactada a macroporosidade revelou menor redução, variando de 3,97% para 3,26%.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Expansivos, Tomografia de Raios X, Macroporosidade

ABSTRACT: This article analyzes the structural arrangement of the soil in the field and compacted conditions of an expansive soil in the city of Bonito, in the State of Pernambuco-Brazil. Physical and chemical characterization tests were carried out, edometric tests on natural and saturated soil and analysis of the microstructure by X-ray Tomography and Scanning Electron Microscopy – SEM. Bonito's expansive soil has 94% clay, 91% liquidity limit and 58% plasticity index. It is clay with high cation exchange capacity 75 cmolc kg⁻¹. The free expansion of the soil in the natural condition 10% and the expansion stress at constant volume is 371 kPa, for an initial humidity of 27%. The images obtained show the presence of Montmorillonite and Kaolinite and Quartz. In quantitative terms, it was found that the soil macroporosity of the undisturbed sample was reduced from 4.58% to 1.85%, while for the compacted sample the macroporosity showed a lesser reduction, varying from 3.97% to 3.26 %.

KEYWORDS: Expansive Soil, X-Ray Tomography, Macroporosity

1 Introdução

Solos expansivos são solos não saturados que apresentam em sua composição argilominerais responsáveis por proporcionar ao solo instabilidade volumétrica ao serem submetidos à variação de umidade e sucção, com destaque os argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, do grupo das Vermiculitas e Esmectitas, como as Montmorilonitas.



Segundo Pereira (2004), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1%, resultante da mudança de umidade ou sucção. Esse aumento é ocasionado apenas pela alteração da umidade, sem qualquer variação nas cargas aplicadas nesse solo. Para Ayala et al. (1986), o mecanismo de variação de volume dos solos expansivos é complexo e está relacionado a dois fatores: intrínseco e extrínseco. Os autores citam que o fator intrínseco depende da textura, da composição mineralógica e da estrutura do solo. Por outro lado, o fator extrínseco corresponde à climatologia, hidrogeologia, vegetação e ocupação humana.

Na Engenharia Geotécnica, a importância do estudo desses solos se dá em função dos problemas que podem surgir nas edificações assentes sob eles uma vez que o movimento de levantamento (expansão) e recalque (contração) não ocorrem de maneira uniforme. A presença desse tipo de solo pode ser observada em campo durante as estações secas nas fissuras profundas que surgem geralmente poligonais, na superfície dos terrenos. Rogers et al. (2014) informa que a zona que contém flutuação de umidade sazonal pode ser estendida até aproximadamente 0,90 m até 12,19 m de profundidade. Também podem ser identificados solos expansivos por meio do surgimento de fissuras diagonais em edificações ou ainda ondulações e fissuras longitudinais em rodovias.

Em laboratório, é possível classificar o solo por meio de métodos de ensaios diretos de expansão livre, edométricos simples e duplo ou ainda através de ensaio edométrico com sucção controlada. Ensaios em laboratório que apresentam propósitos diversos também permitem a identificação indireta dos solos expansivos, entre os quais citam-se ensaios de caracterização, difração de Raios X, Microscopia eletrônica de Varredura e tomografia de Raios X.

No Estado de Pernambuco/Brasil, solos expansivos já foram registrados em várias cidades que vão desde o sertão até o litoral, tais como Petrolina, Cabrobó, Pesqueira, Paulista, Ipouca, Olinda, entre outras. O presente trabalho tem o objetivo de estudar o solo da cidade de Bonito, localizada a 136 km da capital de Pernambuco, com clima de estação seca no verão e precipitação média anual de 1.042,57 mm. De acordo com a carta de susceptibilidade de solos expansivos desenvolvida por Amorim (2004), a qual considera aspectos climatológicos, geológicos e pedológicos, o Município de Bonito enquadra-se como região de baixa susceptibilidade à ocorrência de solos expansivos.

2 Programa Experimental

Na literatura não foram encontrados dados referentes ao solo da cidade de Bonito-PE. Sendo assim, o programa experimental desse artigo consistiu na caracterização física e química do solo local, assim como da realização de ensaios edométricos. Também foram executadas investigações à nível microestrutural, por meio de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Tomografia de Raios X.

Os ensaios de caracterização física seguiram as recomendações das Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), enquanto que os ensaios de caracterização química foram baseados na metodologia do Manual de Métodos de Análises de Solos (TEIXEIRA et al., 2017). Para estes, os resultados foram alcançados em função de três repetições, tendo-se considerado que a diferença entre uma determinação e a outra não poderia ultrapassar 0,1% do valor em relação às demais. Durante a realização dos ensaios, em que se observaram valores superiores a essa diferença, foram realizadas repetições até que fosse possível obter resultados dentro da margem de tolerância estabelecida pelo Manual citado anteriormente.

A caracterização da expansividade do solo de Bonito contemplou a determinação da expansão livre e tensão de expansão à volume constante, por meio de ensaios em corpos de prova de amostras indeformadas em anéis de 60 mm² e 20 mm de altura. Para o ensaio de expansão livre, de maneira a permitir a análise dos resultados por meio do método de Vijayverviya & Ghazzaly (1973), o corpo de prova foi submetido a inundação com tensão aplicada de 10 kPa.

A avaliação dos macroporos do solo de Bonito ocorreu de forma não destrutiva por meio do ensaio de escaneamento em equipamento de topografia computadorizada de Raios X. O ensaio foi realizado inicialmente em duas amostras, sendo uma na condição indeformada na umidade natural e outra compactada (Proctor Normal) na umidade ótima. As amostras foram moldadas em anel de PVC com aproximadamente 66 mm de diâmetro e 75 mm de altura.

Em seguida, as amostras foram escaneadas com auxílio do microtomógrafo modelo NIKON XT 225 ST (160 kV, corrente de 180 μ A, e filtro de cobre de 0,5mm de espessura). A duração do escaneamento foi de 100 min, com resolução especial das imagens de 50 μ m (50 x 50 μ m²), sendo utilizado também o “Minimise Ring Artefacts” de maneira a reduzir o aparecimento de artefatos de anéis nas imagens obtidas no



processamento. Após escaneamento, com o objetivo de avaliar e comparar a macroporosidade do solo na condição expandida, os corpos de prova foram inundados durante 30 dias. Na etapa de inundação foi também aferida a expansão livre da amostra na condição inicialmente indeformada e compactada. Na sequência, os corpos de prova seguiram para novo escaneamento, com os mesmos parâmetros do ensaio inicial. De posse das imagens obtidas pelo microtomógrafo, foi realizado o processo de segmentação dos vazios e não vazios, a binarização e por fim a obtenção dos volumes de vazios, com auxílio do programa Image J (software livre). A macroporosidade foi obtida pela relação da Equação 1, em um volume em formato de cubo (840 x 840 x 840) avaliado do centro do corpo de prova.

$$H (\%) = (V_{porototal} / V_{totalsubvolume}) \times 100 \quad (1)$$

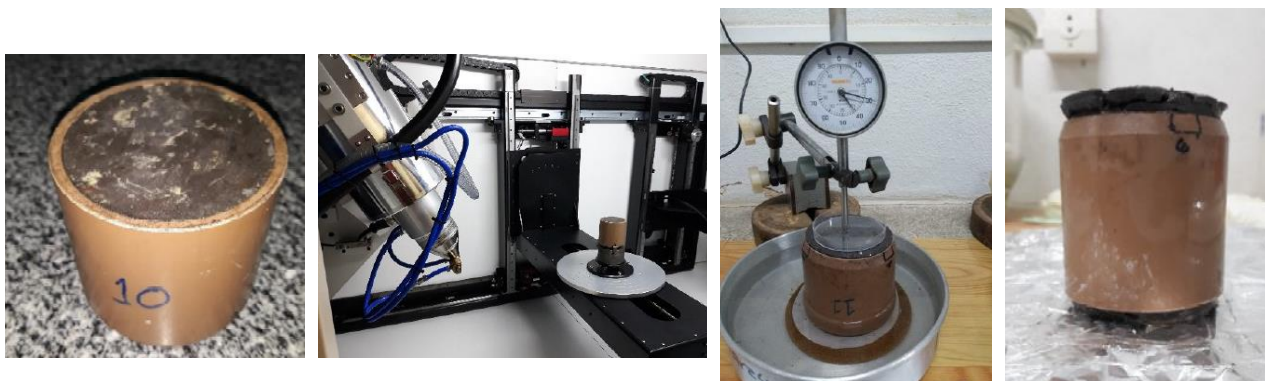


Figura 1. Etapas do ensaio de Topografia de Raios X.

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizado com amostra indeformada no formato prismático seca ao ar. O corpo de prova foi posicionado em placa plana metálica e transferido para equipamento Cressington Carbon Coater 108 Carbon/A, quando passou por processo de metalização com película de grafite, de modo a permitir boa condução do feixe de elétrons em virtude do carregamento eletrostático. Posteriormente, o corpo de prova foi posicionado no microscópio eletrônico, modelo JSM 6460 Scanning Electron Microscope (SEM) fabricação Jeol, 30 kV, para captação e ampliação das imagens em 2,000.00; 1,000.0; 500; 100 vezes (Figura 2), tendo-se realizado ajustes nas características de foco, brilho, contraste.

3 Resultados

3.1 Caracterização Física

A Figura 2. mostra as curvas granulométricas do solo com e sem adição de defloculante. A Tabela 1 exibe os percentuais de material com diâmetro das partículas correspondentes à argila, silte, areia. Nos ensaios sem o uso de defloculante, é possível identificar o aumento do percentual de silte e areia e redução do percentual de argila, uma vez que não ocorre a dispersão da fração fina de argila. Em síntese, as partículas agrupadas em forma de flocos sedimentam mais rapidamente, levando maior percepção da fração de solo com diâmetro correspondente à fração mais grossa. A densidade real dos grãos obtidas a partir da média de duas determinações correspondeu a 2,584, valor próximo a densidade dos grãos identificadas por Larcera (2019) em solo Expansivo de Cabrobó/PE. Quanto aos ensaios de limites de Atterberg, o solo apresentou Limite de Liquidez correspondente a 91%, limite de plasticidade igual a 33% e limite de contração de 17%. O Índice de Plasticidade foi de 58% e atividade de 0,60. Diante desses resultados, considerando a carta de plasticidade, o solo de Bonito caracteriza-se como argila de alta compressibilidade.

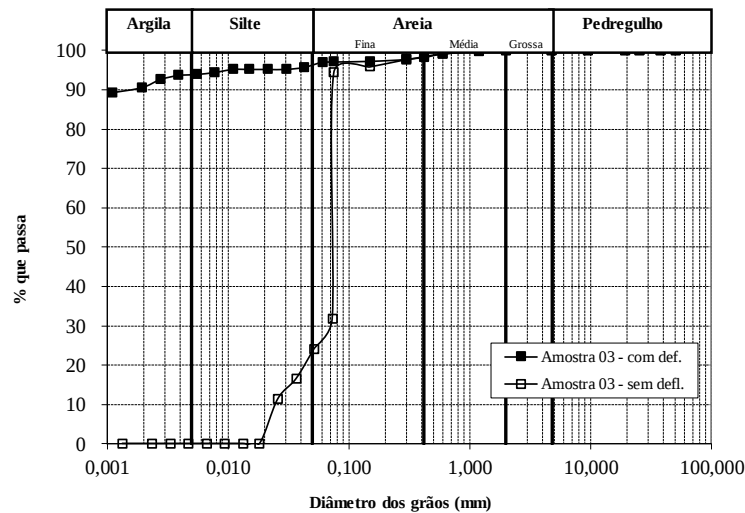


Figura 2 – Curva granulométrica da amostra de Bonito.

Tabela 1. Frações do solo em percentual

Bonito's Sample	Com defloculante	Sem defloculante
Argila (%)	94	0
Silte (%)	2	24
Areia (%)	4	76

Ainda com base nos resultados de caracterização, identifica-se o solo de Bonito com elevado potencial de expansão segundo critérios de Seed et al. (1962); Chen (1965); Daksanamurthy e Raman (1973). A Figura 3 exibe a curva de compactação da amostra com aplicação de energia do Proctor Normal, cujo valor de umidade ótima correspondeu a 35 % e Peso Específico seco máximo a 13,75 kN/m³. O Elevado percentual de umidade ótima ocorre em função da presença de quantidade material fino (94% de argila), o que proporciona grande absorção de água.

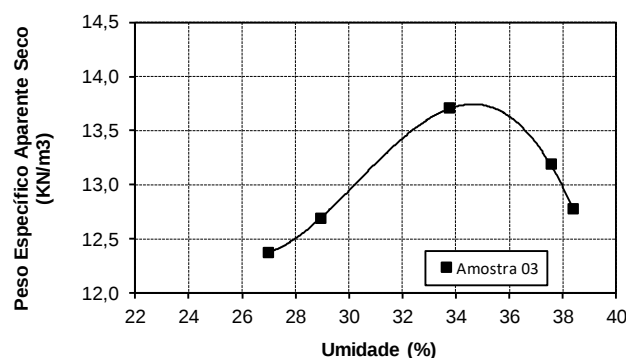


Figura 3. Curva de compactação.

3.2 Caracterização Química

Os principais resultados dos ensaios químicos são apresentados na Tabela 2. O solo é ácido ($4,5 < \text{pH} < 5,4$), com baixo teor de matéria orgânica ($< 5\%$), eutrófico ($V > 50\%$) e de caráter solódico ($n < 15\%$). Apresentou ainda alta capacidade de troca catiônica ($> 27 \text{ cmolc/kg}$), o que reflete solo com potencial de expansão.



Tabela 2. Resultados da caracterização química.

Itens	Unidade	Resultados
pH em água	-	4,84
Materia Orgânica	g/kg	1,29
Alumínio trocável (Al ³⁺)	cmolc/kg	0,25
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmolc/kg	6,50
Magnésio trocável (Mg ²⁺)	cmolc/kg	29,50
Sódio trocável (Na ⁺)	cmolc/kg	4,40
Potássio trocável (K ⁺)	cmolc/kg	0,00
% Saturação de Sódio (n)	%	5,87
Soma de Cátions (S)	cmolc/kg	40,44
Hidrogênio Extraível (H ⁺)	cmolc/kg	1,30
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	cmolc/kg	75,14
% Saturação de Base (V)	%	53,82
% Saturação de Alumínio (m)	%	0,01

3.3 Caracterização da Expansividade

O comportamento da curva de deformação devido à inundação no ensaio de expansão livre (10 kPa) é revelado na Figura 4, cuja variação de expansão se deu até aproximadamente 24 h (1.440 min), momento em que ocorre tendência à estabilização da expansão. Para definição da curva, foi utilizada a formulação hiperbólica proposta por Dakshanamurthy (1978). O corpo de prova iniciou o ensaio com altura de 19,72 mm e umidade de 27,43 %, e terminou com altura de 21,68 mm e umidade de 37,38 %, correspondendo a expansão livre de aproximadamente 10 %, próximo à expansão livre do solo de Paulista (10,70%) investigado por Paiva (2016).

A tensão de expansão obtida pelo método a volume constante foi equivalente a 371 kPa.

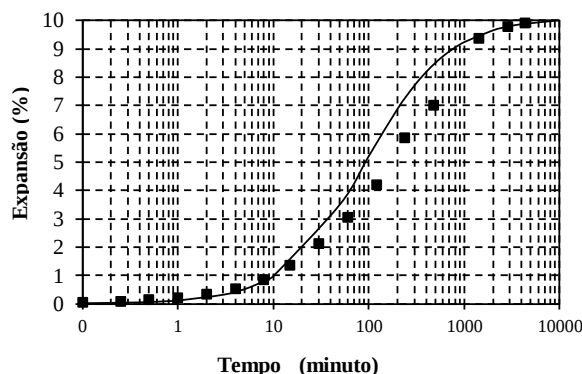


Figura 4. Curva de expansão livre

3.4 Tomografia de Raio x

O primeiro ensaio de escaneamento no tomógrafo de Raios X foi realizado em corpo de prova na condição indeformada com umidade de 22,36 % e altura de 75,4 mm. Após inundação, a umidade alcançou 32,58% e altura aumentou para 89,22 mm, com expansão de 18,34 %. Nessa condição, o corpo de prova foi novamente escaneado. A Figura 5.i e 5.ii revela comparativo do escaneamento na condição indeformada na umidade natural e expandida. Na imagem binarizada, a cor branca representa os vazios e a cor preta a parte sólida. Na imagem em 3D, a cor em cinza corresponde aos vazios. Por meio de comparativo, é possível observar que ao sofrer aumento de umidade e variação de volume, o solo da amostra indeformada sofreu modificação da macroestrutura através da reordenação do arranjo dos grãos e, redução do espaço poroso.

O segundo ensaio consistiu no escaneamento de corpo de prova compactado na umidade ótima (34%) e altura de 75,25 mm. Posteriormente, o corpo de prova foi inundado atingindo umidade de 35,22% e altura de



78,32 mm, o que corresponde a uma expansão de 4,08%. A Figura 5.iii e 5.iv exibe o comparativo entre as imagens do ensaio na condição compactada na umidade ótima e do mesmo corpo de prova após expansão. As cores das imagens são as mesmas detalhadas no ensaio anterior. Na condição compactada, após inundação, a amostra apresentou baixo ganho de umidade e pequeno percentual de expansão, sendo identificada reduzida variação no arranjo dos grãos e volume de vazios, justificado pelo processo de compactação que proporciona reorientação das partículas e menor permeabilidade.

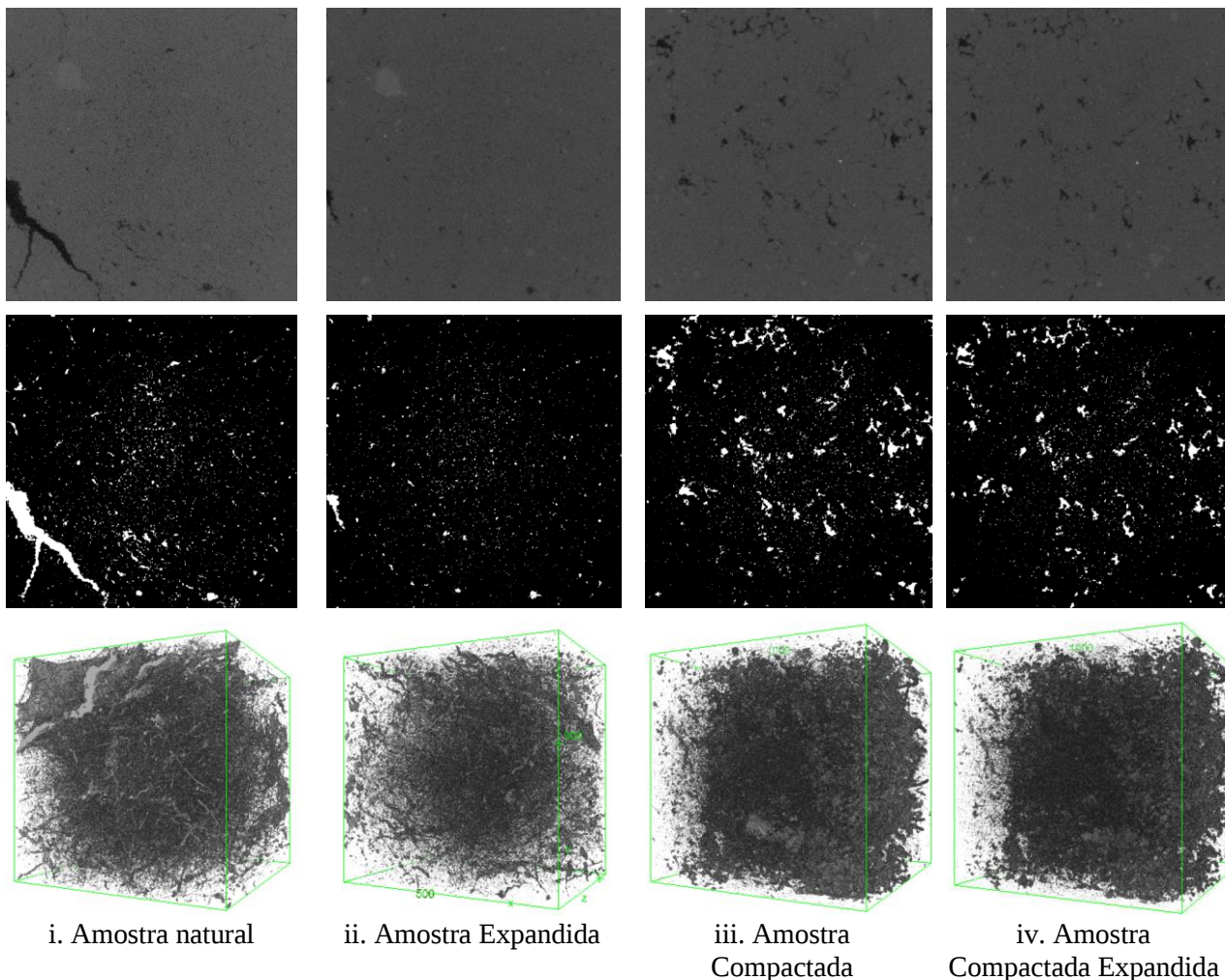


Figura 5. Comparativo dos resultados de tomografia

A Tabela 3 apresenta a macroporosidade obtida por meio da relação entre o volume de vazios e volume total. Observa-se redução do volume de poros quando da expansão da amostra, corroborado pelo registro das imagens anteriormente expostas. Para a condição indeformada a variação correspondeu a 59,60% e para a condição compactada a redução foi equivalente a 17,88 %. Esse aspecto foi também observado por Barbosa (2019) em amostras de Paulista/PE. Outro aspecto confirmado foi que a macroporosidade na condição indeformada foi superior à da amostra compactada, uma vez que na condição indeformada estão presentes as trincas existentes no solo, bem como o processo de compactação proporciona maior densidade do corpo de prova e redução dos vazios.



Tabela 3. Macroporosidade da amostra de Bonito.

Sample	Macroporosity (%)
Indeformada	4,58
Indeformada após expansão	1,85
Compactada	3,97
Compactada após expansão	3,26

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As eletromicrografias obtidas no ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura são mostradas na Figura 6. Observa-se a presença de poros finos a médios intra-agregados e médios a grosseiros entre-agregados. Não se verifica a presença de orientação referencial e ocorrência de vazios entre as placas de caulinita. Nota-se a presença de argilominerais dos grupos da Montmorilonita e Caulinita e Quartzo. É possível verificar floclação borda-borda e borda-face de agregados de argila ligados por contatos estreitos, formando poros intra-agregados finos a médios e estrutura pouco aberta do tipo “castelo de livros” com base em Collins & Mc Gown (1974).

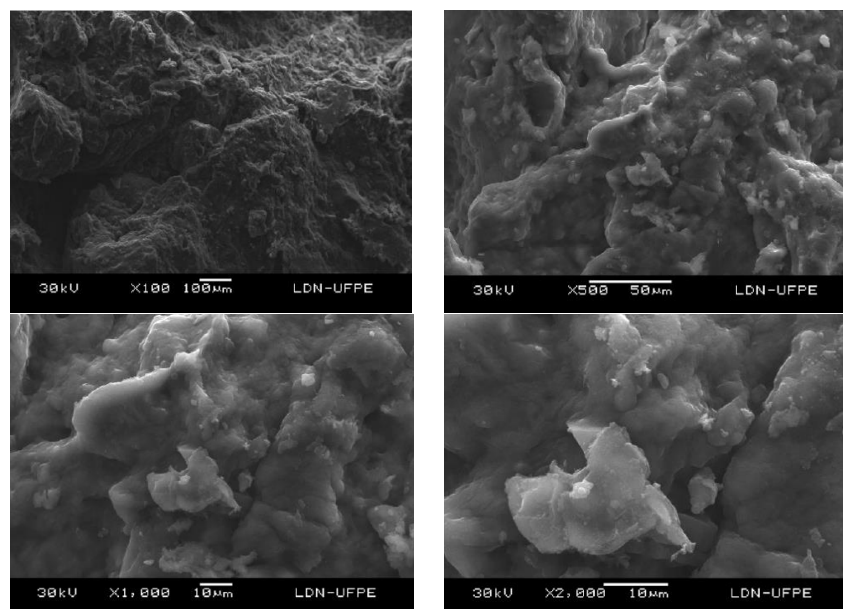


Figura 6. Eletromicrografias do Solo de Bonito.

4 Conclusões

Apesar da cidade de Bonito apresentar baixa susceptibilidade à presença de solo expansivos segundo critérios adotados por Amorim (2004), foi identificado solo com alto potencial de expansão através dos ensaios de caracterização física e caracterização da expansividade. O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura, além de permitir a visualização microestrutura do solo, possibilitou ratificar a presença de argilominerais expansivos. Tais resultados revelam a importância de investigação geotécnica adequada para uma correta caracterização do solo antes de execução de obras. Considerando a análise da macroestrutura do solo foi verificada a redução do tamanho dos vazios do corpo de prova após sofrer expansão, em maior proporção na condição indeformada e em menor proporção na amostra compactada.

AGRADECIMENTO

Os autores agradece ao CNPq pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa Processo: 421087 / 2018-8.

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, S. F. Contribuição à cartografia geotécnica: Sistema de Informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). 2004. 244p. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- AYALA, J.F.; GIJON, M. F.; MOZO, C. O. E RODRIGUEZ J. L. S. Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argillas En Espana a Escala 1:1.000.000. Serie:Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de Espana. Madrid. 1986.
- BARBOSA, F. A. S. Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo. 2019. p. 132. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2019.
- COLLINS, K. & MCGOWN, A. The Form and Function of Microfabric Features in a Veriety of Natural Soils. *Geotechnique*, v. 24, no 2, p. 223-254. 1974. CHEN, F.H. The Use of Piers to Prevent the Uplifting of Lightly Loaded Structures Founded on Expansive Soils. In: International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, 1, 1965. Texas A&M University, edited by College Station. Texas A&M University. 1965.
- DAKSHANAMURTHY, V. & V. RAMAN. A Simple Method of Identifying na Expansive Soil. *Soils and Foundations*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 13, n. 1, pp 97-104, 1973.
- DAKSHANAMURTHY V., (1978), A new method to predict swelling using a hyperbolic equation”, *Geotechnical Engineering*, Vol. 9, pp. 79 –87.
- PEREIRA, E. M. Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. 2004. 227 p. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Sao Carlos, 2004.
- ROGERS, J. D.; OLSHANSKY, R.; ROGERS, R. B. Damage to Foudations From Expansive Sols. Disponível em: http://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf. Acesso em: 07 de Marco de 2018.
- SEED, H.B.; R.J. WOODWARD, JR.; & R. LUNDGREN. Perditiion of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civil Eng*88. 1962.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Metodos de Análise de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Embrapa Solos. 3a edicao. Brasilia. EMBRAPA. p. 573, 2017.