

ANÁLISE DA COLAPSIVIDADE DE UM SOLO TROPICAL DA REGIÃO DE GOIÂNIA-GO

ANALYSIS OF COLLAPSIBLE BEHAVIOR OF A TROPICAL SOIL OF THE REGION OF GOIÂNIA-GO

ALEXANDRE GARCÊS DE ARAUJO

Doutorando PPGA-UFG / Docente e Pesquisador da Universidade Estadual de Goiás /
Engenharia Civil - Campus Henrique Santillo, Anápolis (GO)
alexandregarces@gmail.com

CAMILLA RODRIGUES BORGES

Docente do IFTO / Engenharia Civil
camillarb@gmail.com

EDER CHAVEIRO ALVES

Doutorando PPGA-UFG / Docente e Pesquisador da Universidade Estadual de Goiás /
Engenharia Civil - Campus Henrique Santillo, Anápolis (GO)
ederchaveiro@yahoo.com.br

RICARDO CHAVEIRO ALVES

Aluno voluntário da Universidade Estadual de Goiás / Engenharia Civil - Campus
Henrique Santillo, Anápolis (GO).
ricardochaveiro1@hotmail.com

VLADIA CORRECHEL

Doutora pela USP / Docente e pesquisadora do PPGA/UFG - Escola de Agronomia
vladiacorrechel@hotmail.com

Resumo: O presente artigo, através da realização de ensaios de laboratório, demonstra o comportamento geotécnico do solo e enfatiza a colapsividade do solo argiloso de alta porosidade encontrado na cidade de Goiânia-GO. Com o objetivo de caracterizar esse solo, quanto ao seu comportamento colapsível, foram realizados ensaios de caracterização e Tensaio oedométrico duplo. A partir desses ensaios, observou-se o elevado valor do índice de vazios, fato que demonstra um indício da colapsividade do material, principalmente por se tratar de solo argiloso. Os índices de compressão obtidos por meio dos ensaios oedométrico duplos apresentaram valores semelhantes, porém a pressão de pré-adensamento foi 77,5% menor para o solo inundado, indicando que nesta situação, apesar dos índices de compressão serem semelhantes, as grandes deformações se iniciam para menores pressões. Na análise de colapso, pode-se observar que este fenômeno já ocorre no processo de inundação e apresentou um alto potencial de colapso para as demais tensões aplicadas.

Palavras-chave: Colapso. Duplo Edométrico. Solo Argiloso. Solo Tropical.

Abstract: This paper presents, by laboratory test results, the geotechnical behavior of the soil from the city of Goiânia-GO, Brazil, emphasizing the collapsible behavior of this soil, which is a clayey soil with high porosity. With the objective of identifying the collapsible behavior of this soil, double odometer and

characterization tests were performed. From the characterization tests, a high value was obtained for the void ratio, what is an index of the collapsible behavior of the material. The compression rates obtained from the double odometer tests showed similar values, but the pre-consolidation pressure was 77.5% lower for inundated soil. This result indicates that, in this situation, although the compression rates are similar, the large strains are starting with lower loads. In the analysis of collapse, it can be observed that this phenomenon already occurs during the inundation process and has a high potential for collapse of the applied loads.

Keywords: Collapse, Double Odometer Test, Clayey Soil, Tropical Soil.

1. INTRODUÇÃO

O colapso é um fenômeno que ocorre, geralmente, no solo poroso e não saturado devido a perda da resistência ao cisalhamento quando este é submetido ao processo de inundação e/ou sobre aplicação de sobrecarga. O solo colapsível comporta-se de maneira oposta ao solo expansivo. A poropressão inicial, tanto no colapso, como na expansão do solo, é negativa. Porém, durante o mecanismo ocorre em ambos um decréscimo na poropressão negativa e, portanto, acréscimo da tensão total. O alto índice de vazios e a condição não saturada são fortes indicadores de possível comportamento colapsível (GARCÊS, 2010).

Segundo Clemence e Finbarr (1981), os solos colapsíveis apresentam estrutura instável, alta porosidade e baixo teor de umidade no seu estado natural. Estes são definidos como sendo solos não-saturados que sofrem rearranjo das partículas e redução brusca de volume quando submetidos à inundação ou acréscimo de carregamento.

Maswoswe (1985) cita que a resistência destes solos se dá através de ligações entre as partículas, que podem ser por pontes de argilas e agentes cimentantes químicos, como coloides e óxidos de ferro. Estas ligações tornam o solo estabilizado em condições não-saturadas. O colapso consiste na perda de resistência dessas ligações com a redução da sucção matricial ocorrendo a ruptura localizada.

Lawton et al. (1992) cita que, para ocorrer colapso, são necessárias quatro condições:

- Existência de uma estrutura não saturada;
- Tensões totais suficientes para causar o colapso;
- Presença de um alto valor de sucção ou agente cimentante; e
- Adição de água ao solo.

Maswoswe (1985) definiu o colapso como sendo a instabilidade dos contatos inter-partículas segundo o estado de tensão octaédrica e sucção matricial. A estabilidade seria dada pelo equilíbrio das tensões cisalhantes nos contatos. A variação de volume seria causada pela translação e a rotação dos grãos, sem sua quebra, além das contrações ou expansões da argila. As causas podem ser combinadas ou haver predominância de uma delas, dependendo do estado

de tensões, sucção, quantidade de argila, mineralogia, etc.

Segundo Lessa (2005), os solos colapsíveis são encontrados em alguns estados brasileiros: Amazonas, Piauí, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Tocantins, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Distrito Federal. Na região metropolitana de Goiânia e Brasília, esses solos também foram identificados e estudados por Lima *et al.* (2001), Medero *et al.* (2004), Silva e Carvalho (2003), Garcês (2010), Valencia *et al.* (2011), Ozelin *et al.* (2014).

2. MATERIAS E MÉTODOS

Este artigo estuda um solo colapsível em Goiânia, situado na zona leste da cidade, às margens da rodovia BR-153. A área pertence ao Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu, Grupo Araxá-Sul de Goiás, e apresenta um solo coluvionar sedimentar caracterizado por grande fração de argila, com algum sedimento de areia. Foram obtidas amostras indeformadas retiradas a 5 m profundidade.

Os trabalhos de investigação constaram de ensaios de caracterização de solo e oedométrico duplo proposto por Jennings e Knight (1957), com amostra na umidade natural e inundada, para a determinação da colapsividade do solo. Para realização dos ensaios oedométricos, utilizaram-se amostras indeformadas e prensa convencional de ensaio de adensamento. As amostras foram obtidas por meio da abertura de um poço de inspeção.

O mecanismo de formação do solo pode ser um dos principais fatores responsáveis pela colapsividade desse material. A ocorrência de lixiviação de finos nas camadas superficiais, devido à ação do intemperismo, propõe ao solo índice de vazios elevado e quebra de agregações susceptível quando da ocorrência de aumento do carregamento e/ou grau de saturação. (PEIXOTO *et al.*, 2001).

2.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos padronizados: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização ABNT NBR 6457, determinação do limite de liquidez – ABNT NBR 6459, determinação do limite de plasticidade ABNT NBR 7180, determinação da massa específica – ABNT NBR 6508, análise granulométrica – ABNT NBR 7181.

2.2. Ensaios Oedométricos

Os ensaios mais utilizados em laboratório para analisar a ocorrência de colapso, são os ensaios oedométricos, devido a semelhança de comportamento que o solo sofre neste ensaio em comparação com a situação de campo, no qual as sobrecargas que geram colapso são aplicadas, geralmente, por fundações superficiais. Há duas maneiras de conduzir esses ensaios, o ensaio simples e o duplo. No presente artigo foram realizados ensaios oedométricos duplos. A realização dos ensaios oedométricos duplos consiste em quantificar o colapso a partir dos valores obtidos no ensaio. Moldaram-se dois corpos de prova a partir da amostra indeformada, e posteriormente colocados em células oedométricas convencionais.

No ensaio, ambos os corpos de prova foram inicialmente submetidos a uma tensão de assentamento de 5kPa. As tensões verticais aplicadas foram de 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 640kPa. O descarregamento foi realizado nos dois corpos de prova, nas tensões de 400, 200 e 5kPa. O corpo de prova inundado sofreu o processo de saturação no estágio de assentamento, com duração de 24 horas, para aproximar-se de 100% do grau de saturação. Em seguida, aplicaram-se os novos estágios de tensão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios de Caracterização

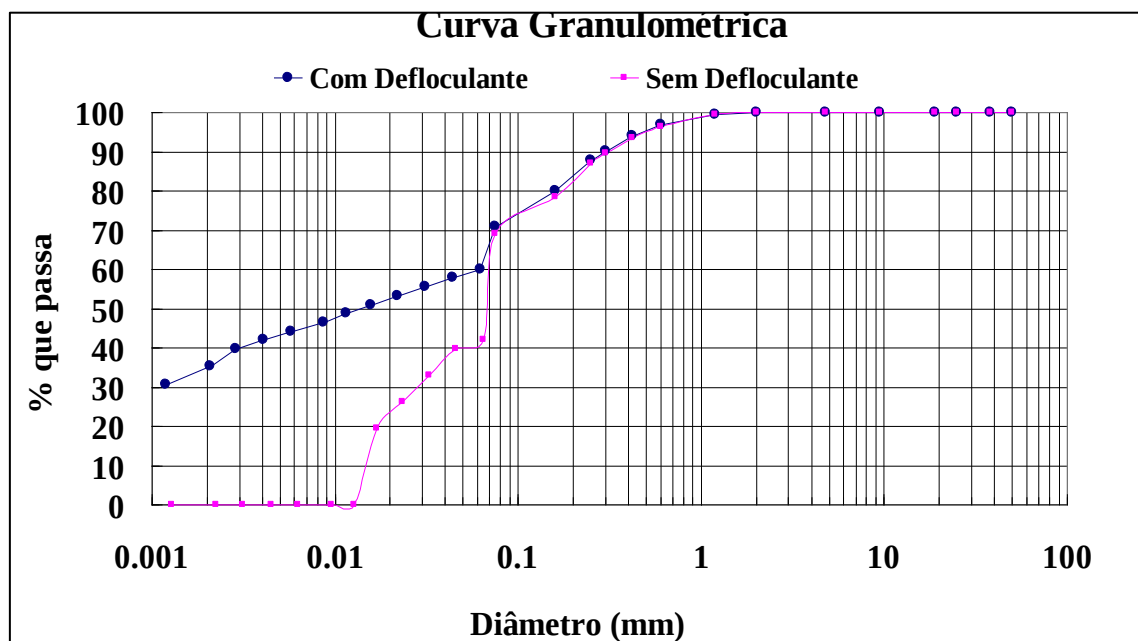
Na análise de granulometria conjunta, no processo da sedimentação, foram realizados ensaios com defloculante e sem defloculante. Esses dois métodos objetivam-se na observação da agregação das partículas sem a presença de um agente químico desagregador. Observou-se que com a utilização de defloculante o solo é constituído por argila siltosa de cor vermelha. Pelo sistema de classificação HRB, este solo pertence ao grupo A-6 e pelo sistema de classificação USCS pertence ao grupo do CL, argila pouco plástica. Já no caso do ensaio sem a utilização de defloculante o solo mostra sua composição como um silte arenoso. A **Tabela 01** mostra os valores obtidos relacionados à caracterização deste solo e a **Figura 01** relaciona a distribuição granulométrica do solo, com e sem defloculante de hexametáfosfato de sódio.

Tabela 01 - Ensaios de caracterização do solo e índices físicos e granulometria.

Ensaio n°.	01	02
Defloculante	COM	SEM
Profundidade	5,0 m	5,0 m
$\rho_s (g/cm^3)$	2,926	2,926
Argila (%)	34,83	0,00
Silte (%)	24,96	41,40
Areia fina(%)	23,63	40,94
Areia média (%)	13,35	13,93
Areia grossa (%)	3,15	3,66
HRB ⁽¹⁾	A-6	A-6
USCS ⁽²⁾	CL	CL
$w^{(3)}$ (%)	7,64	7,64
$w_L^{(4)}$ (%)	37,3	37,3
$w_p^{(5)}$ (%)	23,5	23,5
$S_r^{(6)}$ (%)	14,6	14,6

(1) Classificação do Highway Research Board, (2) Sistema unificado de classificação de solos, (3) Umidade inicial, (4) Limite de liquidez, (5) Limite de plasticidade e (6) Grau de saturação

Fonte: Autores, 2016

**Figura 01** - Curvas granulométricas

Fonte: Autores, 2016

3.2. Ensaios Oedométricos

Determinaram-se os parâmetros de adensamento do solo e verificou-se o potencial de

colapsividade por meio da comparação das duas condições analisadas: umidade natural; e inundado. Os valores de pressão de pré-adensamento, índice de compressão, coeficiente de adensamento, índice de recompressão, índice de compressibilidade e índice de vazios obtidos são apresentados na **Tabela 02**.

Tabela 02 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios oedométrico duplo

Ensaio nº.	01	02
Tipo de amostra	Indeformada	Indeformada
Condição do ensaio	Natural	Inundada
Profundidade	5,0 m	5,0 m
Tipo de solo	Argila	Argila
e_{inicial} ⁽¹⁾	1,53	1,53
e_{final} ⁽²⁾	1,25	0,73
w_{inicial} ⁽³⁾ (%)	7,63	7,64
w_{final} ⁽⁴⁾ (%)	15,0	24,72
S_{r inicial} ⁽⁵⁾ (%)	14,65	14,55
S_{r final} ⁽⁶⁾ (%)	35,08	99,08
σ'_{pa} ⁽⁷⁾ (kPa)	200	45
C_r ⁽⁸⁾	0,036	0,223
C_c ⁽⁹⁾	0,470	0,575
c_{v 40} ⁽¹⁰⁾ (cm ² /min)	1,546	0,166
c_{v 80} ⁽¹¹⁾ (cm ² /min)	0,411	0,255
c_{v 160} ⁽¹²⁾ (cm ² /min)	0,122	1,745
c_{v 320} ⁽¹³⁾ (cm ² /min)	0,115	1,863
c_{v 640} ⁽¹⁴⁾ (cm ² /min)	0,103	2,764

(1) e_{inicial} : índice de vazios inicial, (2) e_{final} : índice de vazios final, (3) w_{inicial} : umidade inicial, (4) w_{final} : umidade final, (5) S_{r inicial} : grau de saturação inicial, (6) S_{r final} : grau de saturação final, (7) σ'_{pa} : tensão de pré-adensamento, (8) C_r : índice de recompressão, (9) C_c : índice de compressibilidade, (10) c_{v 40} : coeficiente de adensamento para tensão de 40kPa, (11) c_{v 80} : coeficiente de adensamento para tensão de 80 kPa, (12) c_{v 160} : coeficiente de adensamento para tensão de 160 kPa, (13) c_{v 320} : coeficiente de adensamento para tensão de 320kPa e (14) c_{v 640} = coeficiente de adensamento para tensão de 640kPa

Fonte: Autores, 2016

Ressalta-se que este solo apresenta um valor de índice de vazios inicial de 1,53. Índice de vazios do solo no estado natural com valor maior do que 1,00, indica característica estrutural de solo poroso. Com as tensões utilizadas para o carregamento simulado no ensaio de adensamento, na condição de umidade natural, o índice de vazios reduziu, chegando a atingir valores da ordem de 1,22. Este resultado ainda representa um solo poroso, mostrando que, mesmo com essa estrutura, o solo possui fortes ligações entre as partículas.

No ensaio inundado, verifica-se que a redução de índice de vazios é maior do que no ensaio realizado com a amostra na condição natural. Dessa forma, tem-se que a presença de água causa grandes mudanças na estrutura do solo rompendo as ligações estruturais.

No ensaio de adensamento a variação volumétrica é unidirecional, devido ao anel de

confinamento, no sentido vertical de carregamento. Assume-se o diâmetro constante, e a variação volumétrica é expressa em termos da variação de altura da amostra, com consequente redução do índice de vazios. Assim, pode-se medir o colapso, em função do comportamento desta redução.

As amostras estudadas apresentam índice de vazios inicial elevados, sendo importante avaliar a colapsividade deste solo, pois este é um importante fator indicador de possível comportamento colapsível. Para a realização da análise, deve-se preparar as curvas de adensamento dos solos, tanto na condição natural como na condição saturada. Assim, com os dados de ensaios, pode-se determinar o coeficiente de colapso (i) conforme apresentado na Equação 1. O potencial de colapso é quantificado em termos da mudança volumétrica ocorrida quando um solo é inundado.

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_{\text{natural}}} \quad (1)$$

Em que:

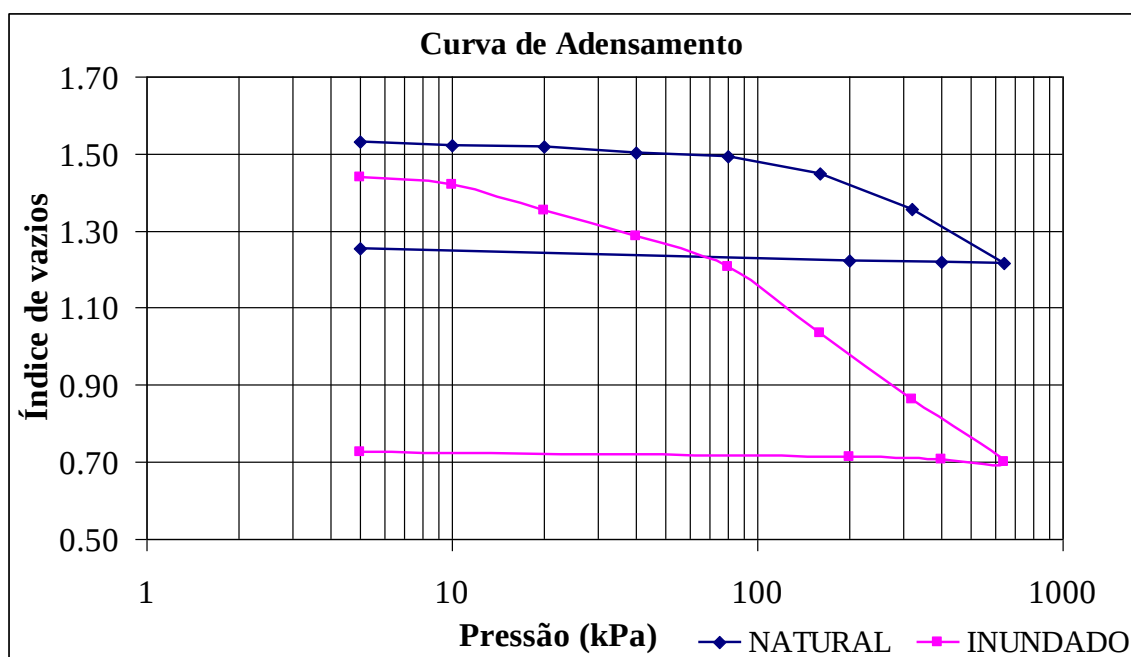
– Δe = variação do índice de vazios (natural – saturado);

– e_{natural} = índice de vazios natural numa determinada tensão.

Knight (1963) apud Trivedi e Sud (2004) definem o potencial de colapso no nível de tensão de 200kPa, considerando o índice de vazios inicial o valor obtido no início do ensaio. Quando o coeficiente de colapso é menor que 0.01, geralmente não há risco de colapso no campo.

Lutenegger e Saber (1988) apud Trivedi e Sud (2004) sugerem a utilização do índice de vazios inicial após a saturação, calculado no nível de tensão de 300kPa, e recomendam que o solo seja levemente colapsível, caso o valor do coeficiente de colapso esteja num limite de 0.02. A **Figura 02** mostra as curvas do ensaio oedométrico duplo, tanto na condição de umidade natural e como na inundada.

Observa-se que o corpo de prova ao ser inundado entra em colapso apenas com o peso próprio. E logo após a tensão de assentamento o colapso ocorre devido à combinação do aumento do grau de saturação com a aplicação das sobrecargas. A **Tabela 03** mostra os valores dos coeficientes de colapsividade para vários níveis de tensão (10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 kPa).

**Figura 02** – Curvas do ensaio oedométrico duplo

Fonte: Autores, 2016

Tabela 03 - Avaliação da colapsividade dos solos

	i (%)	Classificação quanto ao colapso
$i_5^{(1)}(\%)$	3,56	Solo colapsível
$i_{10}^{(2)}(\%)$	3,95	Solo colapsível
$i_{20}^{(3)}(\%)$	6,54	Solo colapsível
$i_{40}^{(4)}(\%)$	8,56	Solo colapsível
$i_{80}^{(5)}(\%)$	11,32	Solo colapsível
$i_{160}^{(6)}(\%)$	16,26	Solo colapsível
$i_{320}^{(7)}(\%)$	19,53	Solo colapsível
$i_{640}^{(8)}(\%)$	20,30	Solo colapsível

(1) i_5 : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 5 kPa, (2) i_{10} : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 10 kPa, (3) i_{20} : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 20 kPa, (4) i_{40} : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 40 kPa, (5) i_{80} : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 80 kPa, (6) i_{160} : Coeficiente de colapso para o nível de tensão de 160 kPa, (7) i_{320} : coeficiente de colapso para o nível de tensão de 320 kPa e (8) i_{640} : coeficiente de colapso para o nível de tensão de 640 kPa.

Fonte: Autores, 2016

Por este critério, solos que apresentam valores de i superiores a 2% são considerados colapsíveis. Assim, para as tensões consideradas, o solo analisado apresenta potencial de colapso quando em contato com a água. Cabe ressaltar que o colapso se dá em microescala, pois o confinamento da amostra durante o ensaio impede a ruptura generalizada e são estas as responsáveis pela colapsividade do solo.

4. CONCLUSÃO

Os critérios oedométricos de classificação do solo quanto a colapsividade, consideram como uma das características mais importantes o elevado valor do índice de vazios natural para um material tipicamente argiloso. Esta característica é muito importante para identificação de solos com grande potencial de colapso (LIMA *et al.*, 2001; LESSA, 2005; VALENCIA *et al.*, 2011). Os ensaios de granulometria por sedimentação, em conjunto com informações complementares, e a caracterização do solo também indicam a agregação das partículas, justificando a porosidade e, por consequência, também contribuindo para identificação do potencial de colapso.

Os índices de compressão obtidos por meio dos ensaios de adensamento, em solo com umidade natural e inundado, apresentaram valores semelhantes. A pressão de pré-adensamento determinada foi 77,5% menor para o solo inundado, indicando que nesta situação, apesar de os índices de compressão serem semelhantes, as grandes deformações se iniciam nas menores pressões aplicadas, representando a fragilidade da estrutura quando se combina a aplicação de carga e presença de água no solo. Esse resultado mostra a importância da investigação de características básicas do solo durante o planejamento de obras.

Verifica-se que o colapso já ocorre no processo de inundação somente com seu peso próprio, sendo que no ensaio com umidade natural houve pouca redução do índice de vazios. Este resultado mostra que a estrutura do solo é muito mais sensível com a presença de água, que desfaz as ligações ou cimentações entre as partículas, do que com a aplicação de carregamentos, apesar de colapsos pela segunda opção também serem muito comuns.

5. REFERÊNCIAS

ARAUJO, A. G.; **Análise do desempenho de poços de infiltração na cidade de Goiânia - GO**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de solo** - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457). Rio de Janeiro: ABNT, 1986, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm** - determinação da massa específica (NBR 6508). Rio de Janeiro: ABNT, 1984, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo** - análise granulométrica

(NBR 7181). Rio de Janeiro: ABNT, 1984, 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo** - determinação do limite de liquidez (NBR 6459). Rio de Janeiro: ABNT, 1984, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo** - determinação do limite de plasticidade (NBR 7180). Rio de Janeiro: ABNT, 1984, 3 p.

CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. Design considerations for collapsible soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 3, p. 305-317, 1981.

JENNINGS, J. E., KNIGHT, K. **The additional settlement of foundations due to a collapse of struture of sand subsoils on wetting**. London: Proc. 4th ICSMFE, 1957.

LAWTON, E.C.; FRAGASZY, R.J.; HETHERINGTON, M.D. Review of wetting-induced collapse in compacted soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 9, sep. 1992. 15 p.

LESSA, M. A. S. **Influência de índices pluviométricos na umidade de solos tropicais como indicador da sucção aplicado a fundações**. 2005. 213 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

LIMA, M. C.; CARVALHO, J. C.; PEREIRA, H. F. Caracterização geotécnica de perfis de solo da voçoroca Ceilândia - Distrito Feeral. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, VII, 2001, Goiânia. **Anais...**Goiânia: SNCE, 2001. 9 p.

MASWOSWE, J. **Stress path for a compacted soil during collapse due to wetting**. London: Imperial College London, 1985.

MEDERO, G. M.; WHEELER, S. J.; SCHNAID, F.; GEHLING, W. Y. Y.; Fatores que comandam o comportamento mecânico de um material colapsível. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5, 2004. São Carlos. **Anais...** São Carlos: ABMS, 2004. p. 87-93.

OZELIN, L. C. S. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; ARAÚJO, G. L. S.; PALMEIRA, E. M.; CARVALHO, J. C.; A aplicação de novos paradigmas para o entendimento do fenômeno de adensamento em solos estruturas e colapsíveis. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XVII, 2014. Goiânia. **Anais...** Goiânia: COBRAMSEG, 2014. 6 p.

PEIXOTO, R. J.; FEITOSA, J. H. P.; GITIRANA, G. F. N.; CUNHA, R. P.; CARVALHO, J. C. Superfície de estado do solo poroso colapsível do Distrito Federal (Brasil). In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS**, 4, 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Wai Ying Yug Gehling e Fernando Schnaid, 2001. p. 93-109.

SILVA, M. T. M.; CARVALHO, J. C.; Variabilidade econômica na utilização de solo-cimento em solos poroso. In: **SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE**, I, 2003, Brasília. **Anais...** Brasília: UnB / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2003. p. 283-290.

TRIVEDI, A. SUD, V. K. Collapse behavior of coal ash. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 4, p. 403-415, 2004.

VALENCIA, Y.; CARVALHO, J. C.; LARA, L.; Aplicaciones adicionales de los resultados de pruebas de cargas estáticas em el disseno geotécnico de cimentaciones. **Dyna**, Medellin, n. 175, p. 82-190, 2012.