

PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE SOLOS COLAPSÍVEIS POR MEIO DE CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS EDMÉTRICOS E ENSAIOS SPT

EVALUATION PROCEDURES FOR COLAPSIBLE SOILS THROUGH CORRELATION BETWEEN EDMETRIC TESTS AND SPT TESTS

Paulo Edison Martins da SILVEIRA, Fábio Augusto Gomes Vieira REIS

Universidade Estadual Paulista – UNESP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista, Rio Claro – SP. E-mails: martinsdasilveira@yahoo.com.br; fabio.reis@unesp.br

Introdução
Caracterização da área de estudo
Material e métodos
 Levantamento de campo
 Ensaio geotécnicos de caracterização do solo
 Ensaio edométricos e determinação dos Índices de Colapso (IC)
 Correlação entre índices de resistência a penetração do solo (N-SPT) e os índices de colapso (IC)
Resultados e discussão
Conclusões
Referências

RESUMO - O termo colapsividade de solos nem sempre é compreendido, pois projetos de engenharia raramente levam em consideração os efeitos causados pelo fenômeno, que é responsável por vários problemas em serviços que terraplanagem, canais, cortes de taludes e outros tipos de obras. A ocorrência do colapso está associada ao índice de vazios elevado e a umidade natural inferior à de saturação. Geralmente solos superficiais macroporosos e microagregados lateríticos, pedologicamente desenvolvidos apresentam alguma colapsividade. Os critérios de investigação destes solos são baseados em ensaios de caracterização, ensaios edométricos e ensaios de campo, como o ensaio SPT. Este trabalho apresenta procedimentos de avaliação da ocorrência da colapsividade de solos pela correlação entre análise dos resultados dos ensaios edométricos e ensaios SPT. A metodologia adotada foi a escavação de uma trincheira com coleta de amostras indeformadas para realização de ensaios edométricos e a execução de uma sondagem a percussão com a finalidade de correlacionar os índices de resistência à penetração do solo (N-SPT) e os resultados edométricos. Os resultados demonstraram que, considerando as restrições do uso dos índices de resistência a penetração do solo (N-SPT) para efeito de avaliação da suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade de solos, quando estes são corroborados com os índices de colapsividade determinados por ensaios edométricos, atestam a suscetibilidade preliminarmente determinada pelos critérios investigativos baseados na caracterização geotécnica (índices físicos, aspectos granulométricos, índices de consistência) e na compactação destes materiais.

Palavras-chaves: Solo colapsível. Avaliação de solos colapsíveis.

ABSTRACT - The term collapsibility of soils is not always understood, since engineering projects rarely take into account the effects caused by the phenomenon, which is responsible for several problems in earthmoving services, channels, slope cuts and other types of works. The occurrence of collapse is associated with a high void index and a natural humidity lower than that of saturation. Generally, macroporous and lateritic microaggregated superficial soils, pedologically developed, present some collapsiveness. The research criteria for these soils are based on characterization tests, edometric tests and field tests, such as the SPT test. This work presents procedures for assessing the occurrence of soil collapsibility by the correlation between analysis of the results of the edometric tests and SPT tests. The methodology adopted was the excavation of a trench with the collection of undisturbed samples to perform edometric tests and the execution of a percussion drilling in order to correlate the indices of resistance to soil penetration (N-SPT) and the edometric results. The results showed that, considering the restrictions on the use of soil penetration resistance indices (N-SPT) for the purpose of assessing the susceptibility to the phenomenon of soil collapse, when these are corroborated with the collapse rates determined by edometric tests, they attest the susceptibility preliminarily determined by the investigative criteria based on the geotechnical characterization (physical indices, granulometric aspects, consistency indices) and on the compaction of these materials.

Keywords: Collapsible soil. Assessment of collapsible soils.

INTRODUÇÃO

Para atender suas necessidades em termos de energia, transporte, alimentação, moradia, saúde etc., o homem é levado a ocupar e modificar espaços naturais das mais diversas formas, inclusive espaços urbanos e, desta forma, passou a ser considerado um poderoso agente geológico atuante do planeta. Se algum desses empreendimentos desconsiderar as características dos materiais e processos geológicos naturais, com

que vão interferir e interagir, certamente a natureza responde na forma de acidentes localizados ou problemas regionais (Santos, 2017).

Define-se o colapso de um solo como sendo o fenômeno causado pela brusca redução de vazios ocasionado pelo aumento de umidade, com presença ou não de sobrecarga. As características dos solos colapsíveis dependem de suas

estruturas. Quando estas estruturas são macro porosas, as partículas mais finas conseguem manter uma resistência provisória, pela presença de um vínculo originado por tensões capilares, forças eletromagnéticas de superfície e a presença de substâncias cimentantes, como óxidos de ferro e carbonatos (Dudley,1970). Pinto (2002) define solos colapsíveis como aqueles solos não saturados que apresentam uma considerável e rápida compressão quando submetidos a um aumento de umidade sem que varie a tensão total a que estejam submetidos.

Uma destas características refere-se ao fenômeno da colapsividade de solo, que pode ser definido como sendo o fenômeno causado pela brusca redução de vazios ocasionado pelo aumento de umidade, com presença ou não de sobrecarga. As características dos solos colapsíveis dependem das estruturas que apresentam.

Quando estas estruturas são macro porosas, as partículas mais finas conseguem manter uma resistência provisória, pela presença de um vínculo originado por tensões capilares e a presença de substâncias cimentantes, como óxidos de ferro e carbonatos (Dudley,1970). As condições básicas para um solo ser potencialmente colapsível são encontradas em solos macroporosos e microagregados lateríticos que compõem os solos superficiais, pedologicamente mais desenvolvidos (Nakazawa et al., 1995).

Existem diversos problemas relacionados ao uso e ocupação de terrenos em áreas de solos colapsíveis, dentre eles os recalques de terrenos e de fundação e suas consequências, como

danificação de edificações, de obras de infraestrutura e de leitos viários, que figuram como problemas cada vez mais frequentes em áreas urbanas e rurais. Cuidados devem ser tomados em instalações antigas de redes de água e esgoto, galerias de águas pluviais e ambientes úmidos residenciais, assim como na escolha do tipo de fundação. Os solos colapsíveis podem ser propensos a erosão do tipo piping, segundo Verachtert et al. (2010), neste caso, a macroporosidade destes solos pode conduzir a água para uma rede de tubulação subterrânea e poderá provocar um colapso do solo e o desenvolvimento de cavidades.

Os solos colapsíveis podem ocorrer em várias situações genéticas: depósitos eólicos, aluvionares, coluvionares, solos residuais, materiais de escoamento e até de aterros compactados. A formação destes depósitos depende das variações climáticas e do ambiente geológico (Dudley, 1970; Aragão & Melo,1982).

A presença de solos colapsíveis é mais frequente em regiões de clima quente, todavia, sabe-se da existência destes solos em várias partes do mundo e com climas diversos. Segundo Rodrigues & Lollo (2008), os solos colapsíveis ocupam grandes áreas de todas as regiões do país. Portanto, pode se afirmar que os climas quentes e áridos, embora predominantes, não representam condições essenciais para o desenvolvimento de solos colapsíveis. A distribuição destas localidades onde foram analisadas e estudadas ocorrências no Brasil, pode ser observada na figura 1.



Figura 1. Locais de ocorrência de solos colapsíveis no Brasil - Modificado de Rodrigues & Lollo (2008).

Benatti (2010) esclarece que os solos tropicais apresentam peculiaridades diferentes dos solos de clima temperado. As condições climáticas das regiões tropicais levam à formação de solos lateríticos, dando origem a um horizonte superficial poroso, permanecendo os minerais mais estáveis – quartzo, magnetita, ilmenita e caulinita onde é comum a agregação das partículas finas pela ação dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio com características e comportamentos mecânicos e hidráulicos não condizentes com sua textura. O reconhecimento de um solo colapsível é bastante complexo. Não há possibilidade de se afirmar que um solo é colapsível apenas pela sua textura, estrutura ou gênese, tão menos pelos aspectos climáticos. Daí a razão na busca de ensaios laboratoriais e de ensaios realizados *in situ* cujas análises possam refletir uma fidelidade na avaliação do fenômeno da colapsividade.

Os critérios de investigação de solos colapsíveis podem ser divididos em três grupos. Um primeiro baseado em ensaios de caracterização do solo (índices físicos, índices de consistência, aspectos granulométricos e por vezes aspectos de compactação); um segundo grupo baseado em ensaios edométricos (índice de colapsividade, etc.); e um terceiro grupo representado por ensaios de campo, incluindo aí os ensaios SPT realizados durante as sondagens a percussão, os ensaios de placa e ensaios executados com utilização de expanso-colapsômetro. Os ensaios edométricos mostram serem os instrumentos mais adequados para estes propósitos, segundo Pinto (2000).

Souza Neto (2004), cita solos colapsíveis sob clima árido e semi-árido, que mostraram altos índices de resistência a penetração do solo (N-SPT) durante a seca. Como exemplo, o N-SPT realizado em um solo arenoso de Petrolândia- PE apresentou N-SPT superior a 10. Após três horas de inundação, o N-SPT foi reduzido em 70% deste valor e após as chuvas, os valores de N-SPT foram reduzidos de 10 a cerca de 5, mostrando a influência da umidade e sucção sobre o número de golpes. Segundo Vilar & Rodrigues (2015), a

relação entre N-SPT e colapso do solo deve ser vista com cautela, já que este índice é influenciado por umidade ou sucção e é de valor limitado na identificação de solos colapsíveis. Apesar disso, alguns autores apontam uma correlação deste índice com solos colapsíveis: Lommler & Bandini (2015) sugerem um $N-SPT \leq 10$; Cintra (1998), segundo Brizolari et al. (2018), apresentaram para as mesmas condições um $N-SPT \leq 4$; Brizolari et al. (2018) realizaram estudo comparativo de solos colapsíveis em áreas sabidamente suscetíveis a este fenômeno no município de Araraquara-SP, observando que o fenômeno da colapsividade atingia profundidades nos perfis de sondagens no quais os índices chegaram em $N-SPT \leq 8$.

Testes realizados por Mendes & Lorandi (2008), estudando as variações de N-SPT em função da oscilação do nível d'água na cidade de São José do Rio Preto-SP, sugerem que a causa da variabilidade de valores N-SPT relaciona-se com a ocorrência de solos colapsíveis, dos efeitos hidrológicos e condições meteorológicas durante o ano. O desenvolvimento desta pesquisa definiu como área de estudo um local na cidade de Piracicaba (SP), mais precisamente nos terrenos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo-ESALQ/USP, na divisa com o Aeroporto Pedro Morganti e que contempla os sedimentos de uma cobertura cenozoica correlata a Formação Rio Claro e que pedologicamente são classificados como Latossolo Vermelho Amarelo de textura média, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). Zaine (2000) aponta comportamento colapsível na cobertura de material inconsolidado da Formação Rio Claro na área urbana de Rio Claro.

O objetivo principal deste trabalho foi o de estabelecer procedimentos para avaliação de ocorrência da suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade de solos pela correlação entre os resultados dos ensaios edométricos e os resultados do ensaio “*Standard Penetration Test*” (SPT), aplicado na cobertura cenozoica correlacionável a Formação Rio Claro.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na zona urbana do município de Piracicaba, onde ocorre cobertura cenozoica correlata à Formação Rio Claro com aproximadamente 20 metros de espessura, constituída por sedimentos arenosos e que na base por

vezes conglomeráticos. Estes depósitos correspondem aos materiais de cobertura inconsolidados, encontrados nos atuais divisores d'água e suas encostas, com espessuras e composições variáveis. Em geral, são mais

desenvolvidos nos relevos mais aplainados e nos altos topográficos.

A área de estudo está compreendida na Depressão Periférica do Estado de São Paulo, em relevo aplainado de colinas amplas e próximas da cota de 580m, com declividades de até 15% e amplitudes locais inferiores a 100m. No local há ocorrência de latossolo vermelho amarelo (LVA)

de textura média, solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico profundo.

Estes solos têm como material de origem, quando de textura média, os sedimentos da Formação Rio Claro. Ocorrem em relevo suave ondulado a aplainado se distribuindo entre as cotas 580 e 620 m.

MATERIAL E MÉTODOS

Levantamento de campo

A primeira atividade desta pesquisa foi uma visita de reconhecimento geológico e pedológico do local escolhido em terreno da ESALQ na divisa com o terreno do Aeroporto Pedro Morganti na cidade de Piracicaba-SP e a marcação de um ponto para abertura de uma trincheira e locação do ponto de execução de uma sondagem a percussão. Foi realizada a escavação de uma trincheira de 9,20 m de profundidade realizada em terreno contemplado com sedimentos pouco consolidados de cobertura cenozoica correlata à Formação Rio Claro e pedologicamente descrita como Latossolo Vermelho Amarelo de textura média. Foi realizada a descrição de todo perfil e coletadas amostras indeformadas, uma a cada metro até a profundidade de nove metros para serem submetidas aos ensaios edométricos para a verificação da presumível colapsividade de solos. Também foram coletadas amostras deformadas entre as profundidades de 1,2 a 1,5m para realização de ensaios geotécnicos de caracterização. Na base desta escavação, foi ainda executada uma sondagem a trado com seis metros de profundidade. Esta tradagem permitiu uma amostragem de solo que possibilitou a identificação e caracterização do mesmo até a profundidade de 15 metros em relação a superfície do terreno. Ao lado da trincheira executou-se uma sondagem a percussão até atingir o impenetrável ao SPT a fim de permitir uma correlação entre os índices N-SPT e os resultados obtidos nos ensaios edométricos de amostras indeformadas coletadas na trincheira.

Ensaio geotécnicos de caracterização do solo

Amostras coletadas deformadas entre as profundidades de 1,2 a 1,5m foram submetidas aos ensaios geotécnicos de caracterização (índices físicos, índices de consistência, granulometria, e estudo de compactação) com a finalidade de avaliar preliminarmente a

suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade de solo local e permitir as classificações granulométrica textural, unificada e rodoviária, pelo menos até esta profundidade. Apesar destas classificações não expressarem efetivamente a possibilidade de colapso de um solo, conforme citado por Vilar & Rodrigues (2015), podem refletir as características colapsíveis destes solos no âmbito da área de estudo.

Com os resultados obtidos foi feita uma avaliação preliminar da suscetibilidade a colapsividade de solo considerando os critérios propostos por Feda (1966), Andrei & Athanasiu (1979), Zuquette (1993), Vilar & Rodrigues (2015) e Lommler & Bandini (2015).

Ensaio edométricos e determinação dos índices de colapso de solos (IC)

Com as amostras indeformadas coletadas na trincheira escavada, foram executados nove ensaios edométricos. A execução dos ensaios de adensamento seguiu a metodologia D 2435-96 “*Standard Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils*” (ASTM, 1996) e o potencial de colapsividade destes solos pode ser avaliado pelo método desenvolvido na norma técnica D5333 “*Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*” (ASTM, 2003). Em função dos resultados obtidos nestes ensaios, os solos podem ser classificados em graus de suscetibilidade ao colapso pelos índices de colapso (Ic), conforme já apresentado na tabela 1.

Correlação entre os Índices de Resistência a Penetração do Solo (N-SPT) e os Índices de Colapsividade (IC)

Após análise dos resultados obtidos nos ensaios edométricos para determinação dos Índices de colapsividade (Ic) ao longo do perfil da trincheira, foi possível estabelecer uma correlação com os índices de resistência a penetração do solo (N-SPT) obtidos na sondagem a percussão ao lado nas profundidades correspondentes.

Tabela 1 - Classificação dos Índices de Colapso.

Grau de colapsividade	Índice de colapso I_c (%)
Nulo	0
Leve	0,1 a 2,0
Moderado	2,1 a 6,0
Moderadamente Severo	6,1 a 10,0
Severo	> 10,0

Fonte: D 5353 (ASTM, 2003)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição pedológica do perfil do solo da trincheira aberta no local é apresentada na tabela 2.

Na sondagem a trado realizada a partir da base da vala escavada pode-se identificar a presença do arenito pouco consolidado, com a presença de cascalho nos metros finais, indicando a proximidade do contato geológico basal da Formação Rio Claro. Os resultados dos ensaios de caracterização com amostra obtida entre 1,2 e 1,5 são apresentados na tabela 3.

O ensaio de granulometria conjunta demonstrou uma areia argilosa, com a seguinte distribuição granulométrica: areia grossa 1,5%, areia média 26,5%, areia fina 47,5%, silte 4,5% e argila 20%.

Pela análise dos resultados de ensaios de caracterização do solo local avalia-se que o mesmo apresenta suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade, de acordo com os critérios de Feda (1966), Andrei & Athanasiu (1979) e Lommler & Bandini (2015).

Tabela 2 - Descrição do perfil do solo na área de estudo.

Classificação Pedológica	Descrição
Ap - 0-10 cm (5YR 4/4)	franco arenoso (~ 18%); fraca pequena granular; ligeiramente dura, muito friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e clara
AB - 10-40 cm (5YR 4/4)	franco arenoso (~ 21%); fraca médio blocos subangulares que se desfazem em fraco pequenos blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e clara
BA - 40-75 cm (5YR 4/6)	franco arenoso (~ 23%); fraca médio blocos subangulares que se desfazem em granular muito pequena; ligeiramente dura, friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e clara. Presença de linhas de carvão
Bw1 - 75-345 cm (5YR 4/6)	franco arenoso (~ 25%); fraca médio blocos subangulares que se desfazem em fraco pequenos blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e clara
Bw2 - 345-500 cm (2,5YR 4/6)	franco arenoso (~ 32%); fraca médio a grandes blocos subangulares que se desfazem em granular pequena; ligeiramente dura, friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e clara
Bw3 - 500-650 cm- (2,5YR 4/6)	argiloso (~ 38%); moderado médio blocos subangulares que se desfazem em fraco granular; ligeiramente dura, friável, não plástica a ligeiramente plástica, não pegajosa a ligeiramente pegajosa; transição plana e clara
Bw4 - 650- 780 cm (2,5YR 4/6)	argiloso (~ 45%); moderado médio a grandes blocos subangulares que se desfazem em fraco pequenos blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara
Bw5 - 650- 780 cm (2,5YR 4/6)	argiloso (~ 50%); moderado médio a grandes blocos subangulares que se desfazem em fraco pequenos blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara
Bw6 - 780-920+ cm (2,5YR 3/6, úmida)	argiloso (~50%); moderado médio a grande; blocos subangulares que se desfazem em fraco pequenos blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização na amostra de solo superficial.

Parâmetro/Classificação	Resultados
Massa específica natural (g/cm^3)	1,668
Teor de umidade natural (%)	9,25
Massa específica seca (g/cm^3)	1,527
Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	2,563
Índice de vazios	0,68
Porosidade (%)	40,48
Grau de Saturação (%)	34,86
$\phi < 2,00mm$ (%)	33,09
Limite de liquidez - LL (%)	19,0
Limite de plasticidade - LP (%)	16,1
Índice de plasticidade - IP (%)	2,9
Teor de umidade ótimo (Proctor) (%)	10,15
Massa específica seca máxima (Proctor) (g/cm^3)	2,004
Classificação Unificada	SM
Classificação Rodoviária	A 2- 4

Tabela 4 - Resultados obtidos nos ensaios edométricos da etapa de detalhe.

AMOSTRA	ESTÁGIO (TENSÃO) kPa	CV (cm ² /s)	IC (%)
P65 (0,00 - 1,00)	10	0,021954	0,76
	25	0,000550	
	50	0,002448	
	100	0,003383	
	200	0,001764	
	400	0,003191	
P65 (1,00 - 2,00)	1	0,000525	19,89
	9	0,010289	
	26	0,013980	
	56	0,045761	
	101	0,017948	
	200	0,015643	
P65 (2,00 - 3,00)	12,5	0,000756	4,17
	25	0,007055	
	50	0,003642	
	100	0,014050	
	200	0,009765	
	200 + Inundação	0,001895	
P65 (3,00 - 4,00)	1	0,000625	0,00
	9	0,033233	
	26	0,029120	
	56	1,416531	
	101	0,040200	
	200	0,006363	
P65 (4,00 - 5,00)	1	0,054558	7,81
	9	0,008392	
	26	0,003741	
	56	0,003878	
	101	0,008962	
	200	0,006606	
P65 (5,00 - 6,00)	9	0,222079	14,20
	26	0,540783	
	56	0,539757	
	101	1,229549	
	200	0,074686	
	440	0,198345	
P65 (6,00 - 7,00)	9	0,086523	8,11
	26	0,012820	
	56	0,085659	
	101	0,188714	
	200	0,182006	
	440	0,178629	
P65 (7,00 - 8,00)	10	4,124998	6,58
	25	0,224707	
	50	0,087117	
	100	0,088499	
	200	0,200052	
	400	0,203888	
P65 (8,00 - 9,00)	10	0,021504	0,66
	25	0,124864	
	50	0,013876	
	100	0,239158	
	200	0,224818	
	400	0,086105	

CV: Coeficiente de adensamento; CC: Coeficiente de compressão; IC: Índice de Colapsividade.

Os resultados obtidos nos ensaios edométricos das amostras indeformadas coletadas na trincheira para confirmação do fenômeno da colapsividade são apresentados na tabela 4. A figura 2 apresenta os gráficos de adensamento para cada metro, entre as profundidades de 0,00 a 9,00 m. Os resultados do perfil de sondagem a percussão com ensaios SPT demonstraram que

até a profundidade de 09 metros do furo de sondagem, os valores de N-SPT são muito baixos que definem compacidade do solo como sendo de fofa a pouco compacta, com valores N-SPT menores de 7.

A correlação entre os valores de resistência a penetração do solo N-SPT e os índices de colapsividade IC é apresentada na tabela 5.

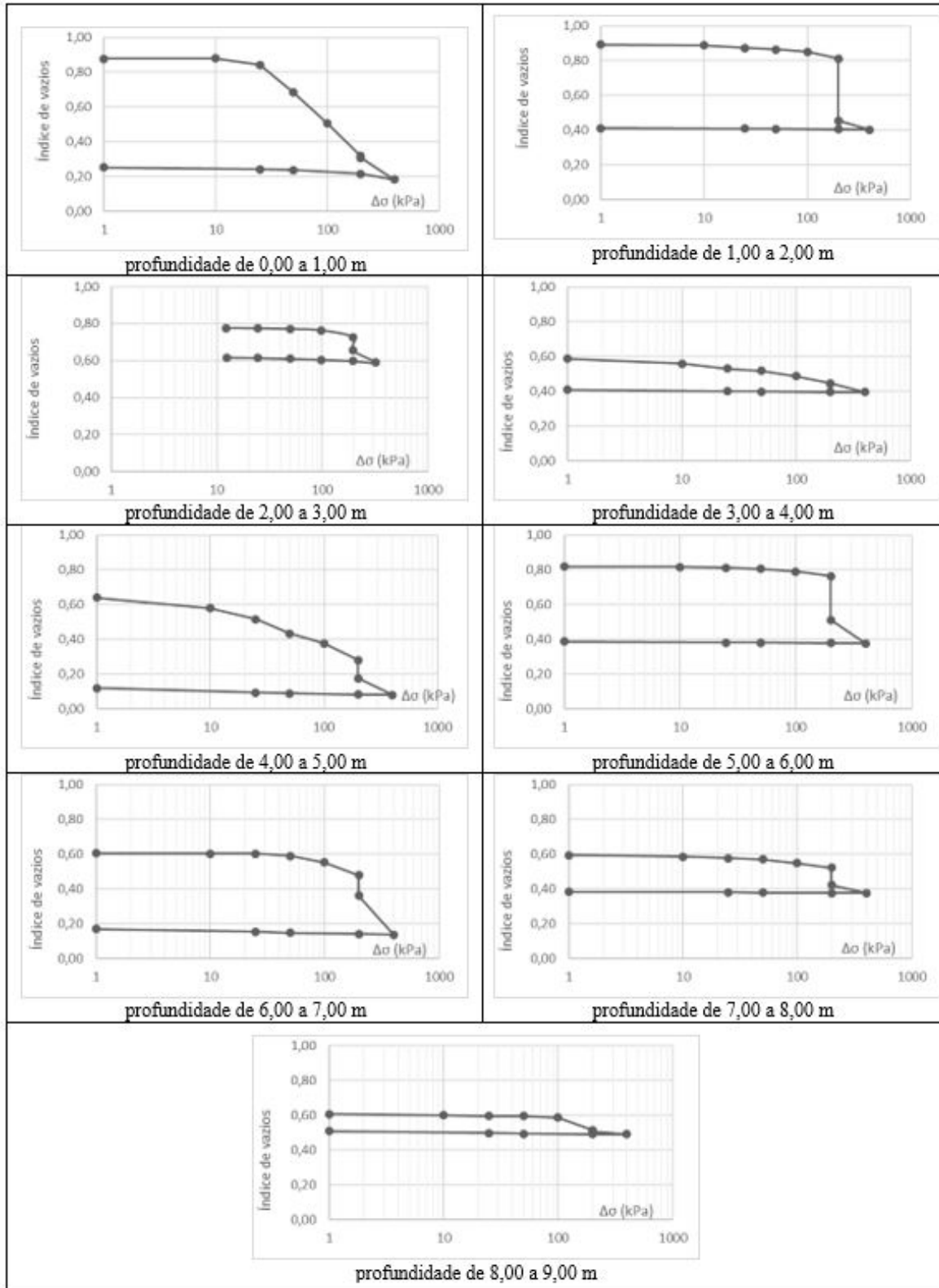


Figura 2 - Gráfico de adensamento a cada metro entre as profundidades de 8,00 a 9,00 m.

Tabela 51 - Correlação entre os valores de resistência a penetração do solo N-SPT e os índices de colapsividade IC.

Prof. (m)	N-SPT	IC	Grau de Colapsividade (D-5333/ASTM 2003)	Índices de Vazios: Pré-ensaio	Redução do índice de vazios (%): 200 kPa	Redução do índice de Vazios (%): Pós-saturação	Observações
0,00	-	0,76	Leve	0,88	63,64	64,72	Adensamento pré-saturação ou provável saturação antes de iniciar o estágio de 200 kPa
1,00	2/45	19,89	Severo	0,89	8,99	49,44	
2,00	2/45	4,17	Moderado	0,79	7,73	16,86	
3,00	1/30	0,00	Nulo	0,59	23,73	23,73	Adensamento pré-saturação ou provavelmente não foi saturado
4,00	2	7,81	Moderadamente Severo	0,64	56,25	71,88	
5,00	2	14,20	Severo	0,82	7,32	37,80	
6,00	4	8,11	Moderadamente Severo	0,61	13,00	40,98	
7,00	7	6,58	Moderadamente Severo	0,59	11,86	28,81	
8,00	6	0,66	Leve	0,61	14,51	16,39	Adensamento pré-saturação
9,00	7	-	-				
10,00	10	-	-				

Os ensaios laboratoriais geotécnicos de caracterização e de compactação utilizados se mostraram compatíveis para uma determinação preliminar do potencial de suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade do solo local de acordo com critérios estabelecidos.

Em alguns níveis da trincheira não foram constatados altos índices de colapsividade, baseando-se nos índices de colapsividade (Ic) determinados de acordo com a norma técnica adotada (D5353-ASTM,2003), contrariando assim as expectativas.

Algumas amostras submetidas aos ensaios edométricos apresentaram, presumivelmente, colapsividade antes da saturação com estágio de carga igual a 200 kPa. Segundo Soto (2007), existem deformações causadas por acréscimo de umidade sem, contudo, atingir a saturação completa e assim podem ocorrer deformações. Desta forma, cabe aqui algumas considerações sobre amostras ensaiadas em determinadas profundidades:

- 0,0 a 1,0m: com IC=0,76, duas situações podem ter ocorrido, em uma primeira situação pode ter ocorrido um adensamento pré-saturação ou em uma segunda situação, houve uma saturação antes de executar o estágio de 200 kPa somente com a umidade natural e isto pode ter

comprometido a determinação do IC. De qualquer forma, observou-se uma redução de aproximadamente 64 % do índice de vazios inicial após a aplicação da tensão de 200 kPa e isto permite avaliar que houve colapso;

- 3,0 a 4,0m: com IC nulo, da mesma forma anterior, pode ter ocorrido adensamento pré-saturação ou não tenha sido saturado. Neste caso houve uma redução de aproximadamente 24 % do índice de vazios. Assim, pode se afirmar um colapso do solo; e

- 8,00 a 9,00m: com IC=0,66, deve ter ocorrido adensamento pré-saturação, pois houve também uma redução de aproximadamente 16% o que também expressa o comportamento colapsível.

Em função dos resultados obtidos nos ensaios edométricos, considera-se como suscetível ao fenômeno da colapsividade o solo investigado no local, pelo menos até a profundidade de 8,00m da trincheira aberta. Tendo-se em conta os resultados obtidos e suas considerações e uma corroboração com os baixos valores de N-SPT obtidos na sondagem a percussão, conclui-se que o fenômeno da colapsividade tenha sido mais expressiva até a profundidade de 5,0 metros, não obstante o fenômeno tenha ocorrido até a profundidade aproximada de 09 metros.

CONCLUSÕES

Os critérios de Feda (1966); Andrei & Athanasiu (1979); Zuquette (1993); Lommler & Bandini (2015); e Vilar & Rodrigues (2015) utilizados para uma avaliação preliminar de suscetibilidade se mostraram bastante coerentes e atenderam às expectativas.

Os resultados obtidos no ensaio SPT apontaram valores dos índices de resistência a penetração do solo ($N-SPT \leq 7$ em todo o perfil da trincheira e, portanto, valores próximos aos citados por Brizolari et al. (2018) quando realizaram um estudo comparativo de solos colapsíveis em áreas sabidamente suscetíveis a este fenômeno no município de Araraquara-SP.

Apesar das restrições apresentadas sobre a confiabilidade dos índices de resistência a penetração do solo ($N-SPT$) para efeito de avaliação da suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade de solos, estes quando apresentam valores baixos e corroborados com os índices de

colapsividade determinados por ensaios edométricos, tornam-se importantes e atestam a suscetibilidade preliminarmente determinada pelos critérios investigativos baseados na caracterização geotécnica (índices físicos, aspectos granulométricos, índices de consistência) e na compactação destes materiais e atestam a presumível colapsividade analisada dos resultados obtidos nos ensaios edométricos.

Sugere-se aqui, que em trabalhos pertinentes a solos colapsíveis, diante da complexidade do assunto requer, também sejam realizados outros ensaios tecnológicos para confirmação da suscetibilidade ao fenômeno da colapsividade, tais como os ensaios de placa ou com utilização de expanso-colapsômetro.

Além disto, sugere-se também que os ensaios edométricos sejam mais pormenorizados com ensaios realizados em várias situações de carga e umidade.

REFERÊNCIAS

- ANDREI, S. & ATHANASIU, C. Test data systematization and stockage to predict the parameters describing the behaviour of unsaturated soils. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS & FOUNDATION ENGINEERING, 7, 1979. **Proceedings...** Brighton: ECSMFE, 1979, v. 1, p. 91-94.
- ARAGÃO, C.J.G. & MELO, A.C. Fundações rasas em solos colapsíveis: um caso no semiárido de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7, 1982. **Anais...** Olinda: ABMS, 1982. v. 2, p. 19-40.
- ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Method for One- Dimensional Consolidation Properties of Soils**. West Conshohocken: ASTM International, 1996. Designation: D 2435-96.
- ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of soils**. West Conshohocken: ASTM International, 2003. Designation: D 5353- 2003.
- BENATTI, J.C.B. **Colapsividade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP**. Campinas, 2010. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas,
- BRIZOLARI, G H.S.; FLORIAN, F.; MORONI, J.E. Solos colapsíveis: estudos de três casos por meio de sondagem a percussão no município de Araraquara-SP. **Revista Científica Semana Acadêmica**, n. 144, p. 1-18, 2018.
- CINTRA, J.C.A. **Fundações em Solos Colapsíveis**. 1ed. São Carlos: EESCUSP, 106. p., 1998.
- DUDLEY, J.H. Review of collapsing soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 96, n. SM3, p. 925-947, 1970.
- EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- FEDA, J. Structural stability of subsident loess soil from Praha- Dejvice. **Engineering Geology**, v. 3, p. 201-219, 1966.
- LOMMLER, J.C. & BANDINI, P. Characterization of collapsible soils. In: INTERNATIONAL FOUNDATIONS CONGRESS & EQUIPMENT EXPOSITION, 2015, Saint Antonio. **Proceedings...** Saint Antonio: ASCE, 2015. p. 1834-1841.
- MENDES, R.M. & LORANDI, R. Analysis of spatial variability of SPT Penetration resistance in collapsible soils considering water table depth. In: **Engineering Geology**, v. 101, p. 218-235, 2008.
- NAKAZAWA, V.A.; PRANDINI, L.F.; DINIZ, N.C. Subsídências e colapsos de solo em áreas urbanas. In: BITAR, O.Y. (coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE-DIGEO, p. 101-133. 1995.
- PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 355 p., 2002.
- RODRIGUES, R.A.& LOLLO, J.A. Características dos solos colapsíveis. In: Lollo, J.A. (org), **Solos colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**, p. 59-72. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2008.
- SANTOS, A.R. **Geologia de engenharia, o que é, como trabalha e suas relações com a engenharia geotécnica**. 2002. Disp. em: www.ambientelegal.com.br. Acessado em: 10 set2017.
- SOTO, M.A.A. Deformaciones volumétricas com y sin colapso de algunos suelos no saturados. In: **Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 31, n. 120, p. 355-362, 2007.
- SOUZA NETO, J.B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo e previsão de recalques devidos a inundação (colapso)**. Rio de Janeiro, 2004. 432 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- VERACHTERT, E.; EECKHAUT, M.V.D.; POESEN, J.; DECKERS, J. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess- derived soils: a case study from central Belgium. **Geomorphology**, v. 118, n. 3-4, p. 339-348, 2010.
- VILAR, O. M. & RODRIGUES, R. A. Classical Methods to Identify Collapsible Soils. **Soils and Rocks**, v. 38, n. 3, p. 265-278, 2015.

ZAINE, J.E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro.** Rio Claro, 2000. 149 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** São Carlos, 1993. 369 p. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Submetido em 26 de agosto de 2020

Aceito em 15 de setembro de 2021