

# CONTRIBUIÇÃO PARA DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO DE SOLOS NÃO SATURADOS COLAPSIVOS E EXPANSIVOS PARA APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES

Contribution to the diagnosis and solution for collapsible and expansive unsaturated soils for foundations application

Gleiber da Silva Chagas<sup>a</sup>, Alfran Sampaio Moura<sup>b</sup>, Marcos Fábio Porto de Aguiar<sup>c</sup>, Andressa de Araujo Carneiro<sup>d</sup>, Giullia Carolina de Melo Mendes<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil.

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

<sup>c</sup> Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil.

<sup>d</sup> Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, Brasil.

**RESUMO** – O trabalho trata do estudo do comportamento mecânico de solo tipo silte argiloso não saturado, natural e melhorado por remoção e recompactação, por meio de ensaios de laboratório e campo considerando condições de saturação natural e inundação, para aplicação em fundações. Foram realizadas, em campo, sondagens à percussão (SPT) e provas de carga em placa (situação de saturação natural e inundada), além de coletadas amostras deformadas e indeformadas. Em laboratório, foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação, índice de suporte Califórnia, ensaio de compressão edométricos simples e duplos e cisalhamento direto. Verificou-se a eficiência do ensaio de compressão edométrico duplo na determinação de potenciais de colapso e expansão em amostras de solo, bem como a possibilidade de solução de problemas de colapso e expansão em solos não saturados por meio de remoção e recolocação com compactação controlada. Também foi identificado a diminuição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento após a inundação.

**SYNOPSIS** – The paper presents a study of the mechanical behavior of natural unsaturated clayey silty soil, improved with removal and recompaction, by means of laboratory and field tests considering natural conditions and after flooding, for application in foundations. In the field, Standard Penetration Tests and plate loading tests (natural and flooded conditions) were performed, as well as disturbed and undisturbed samples collected. In the laboratory, the following tests were performed: grain size distribution, Atterberg limits, compaction, California Bearing Ratio, simple and double oedometer and direct shear. The efficiency of the double oedometer test for the determination of collapse and expansion potentials in soil samples was verified, as well as the possibility of improving collapse and expansion in unsaturated soils by means of removal and reworking by controlled compaction. The decrease in shear strength after flooding was also observed.

**Palavras Chave** – Fundações superficiais, solo colapsível, solo expansivo, ensaios de compressão edométricos, ensaios de placa.

**Keywords** – Shallow foundations, collapsible soil, expansive soil, oedometer tests, plate tests.

---

E-mails: gleiberbook@hotmail.com (G. Chagas), alfransampaio@ufc.br (A. Moura), marcosporto@ifce.edu.br (M. Aguiar), andressa.deac@gmail.com (A. Carneiro), giucmendes@gmail.com (G. Mendes)

## 1 – INTRODUÇÃO

Não é incomum a execução de edificações com fundações assentes em solos não saturados. Há solos não saturados que apresentam características indesejadas quanto ao seu uso em obras de engenharia, como exemplo pode-se citar o caso de solos expansivos e colapsíveis. O solo colapsível apresenta variação brusca de volume ao ser submetido a um aumento da tensão aplicada, e uma redução da resistência ao cisalhamento pela perda de coesão ou sucção ao ser inundado. Já no solo expansivo seu volume aumenta quando umedecido e se contrai quando ressecado.

Próximo à superfície do terreno tem-se o ambiente mais propício a variações frequentes de umidade, por alterações nas condições climáticas, com variações consideráveis de sucção. A medida da sucção do solo pode ser feita por diversos métodos como: psicrômetro, papel filtro, tensiômetro, condutividade elétrica, dentre outros.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o perfil de sucção matricial “*in situ*” varia com o tempo e a profundidade. Estações secas resultam em aumento no valor da sucção matricial e, em estações chuvosas, ocorre uma redução. Qualquer mudança na sucção altera o equilíbrio da massa de solo. Estas mudanças afetam tanto a compressibilidade quanto a resistência do solo. Segundo Marinho (2005), o aumento da sucção irá produzir apenas um aumento da força normal nos contatos, reduzindo a tendência de deslizamento entre partículas. Apesar destas mudanças poderem ser resultado de variações na parcela mátrica ou osmótica, já foi verificado que mudanças na sucção osmótica pouco interferem nas propriedades geotécnicas. Entretanto, sua influência passa a ser significativa em problemas de contaminação do subsolo.

Os processos de escavação, de remoldagem e de recompressão resultam em um material não saturado. Os solos compactados são solos naturais em que suas condições iniciais são modificadas para melhorar o comportamento mecânico e sua utilização em obras de terra.

A compactação pode ser utilizada como uma forma de tratamento dos solos expansivos ou colapsíveis, sendo, em muitos casos, uma poderosa forma de viabilizar a adoção de fundações superficiais de edifícios nesses tipos de solos.

Os tipos de problemas envolvendo solos não saturados vão além dos encontrados nos solos saturados (compressibilidade e resistência ao cisalhamento). Dentre eles pode-se citar: empolamento devido à expansão de argilas secas e recalques devidos ao colapso com umedecimento em solos sob cargas e variações nos valores de poropressão negativa associadas a chuvas intensas que podem causar rupturas de taludes, redução da capacidade de carga e do módulo de elasticidade do solo.

Geralmente a ocorrência de solos colapsíveis está relacionada a locais com deficiência hídrica, em regiões de baixos níveis de precipitações pluviométricas, embora tenha havido a constatação desses tipos de solos em outras regiões de maior pluviosidade.

Stefanoff *et al.* (1983) afirmam que, devido à característica colapsível do solo da Bulgária, o uso de camadas cimentadas artificialmente para apoiar fundações superficiais torna-se uma técnica de grande aplicabilidade. Concluíram que camadas estabilizadas de solo-cimento permitem uma boa distribuição das tensões, reduzindo as tensões no subleito.

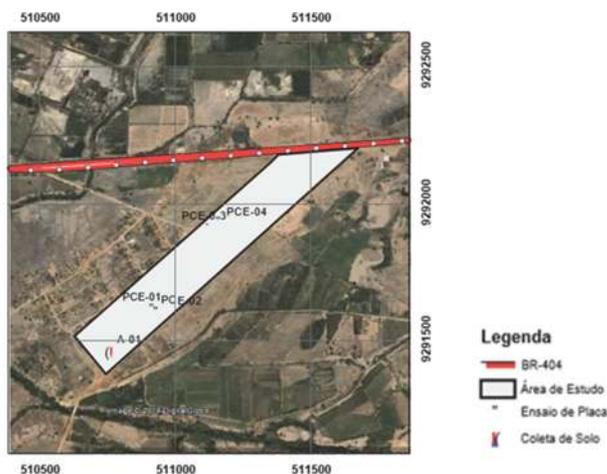
Dentro do contexto abordado, esse trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de provas de carga diretas realizadas em solo silto argiloso na condição de umidade natural e inundada, se há concordância entre previsões de colapso e expansão, efetuadas a partir de ensaios de compressão edométricos no laboratório, assim como verificar alterações nos parâmetros de resistência com a variação da saturação, tendo em vista a aplicação em projeto de fundações.

## 2 – ÁREA DE ESTUDO E ENSAIOS REALIZADOS

O presente estudo foi realizado, inicialmente, a partir da escolha da área de estudo que deveria apresentar perfil de solo não saturado, com potencial de colapso ou de expansão. Dessa forma, foi escolhida uma área localizada no município de Icó que se situa na região sudeste do Estado do Ceará-Brasil, limitando-se com os municípios de Pereiro, Jaguaribe, Orós, Iguatu, Cedro e Umari.

Compreende área irregular de 1.042 km<sup>2</sup> e está inserida nas cartas topográficas Iguatu (SB.24-Y-B-III), Cedro (SB.24-Y-B-VI), Cajazeiras (SB.24-Z-A-IV) e Orós (SB.24-Z-A-I).

O solo em estudo foi caracterizado, além de executados ensaios especiais em laboratório e de campo. A caracterização, realizada em amostra coletada a 0,10m de profundidade, se deu pelos ensaios de granulometria (ABNT, 2018), limite de liquidez (ABNT, 2017a), limite de plasticidade (ABNT, 2016a) e densidade real do grão (DNER, 1995). Os procedimentos de compactação (ABNT, 2016b) e Índice de Suporte Califórnia (ABNT, 2017b) também foram realizados, assim como ensaios de compressão edométricos simples e duplo (ABNT, 1990) e de cisalhamento direto (ASTM, 2011). Já os ensaios de campo executados foram oito sondagens SPT e quatro provas de carga direta com placa em terreno de fundação (ABNT, 1984), sendo duas na condição natural e duas inundadas. A Figura 1 mostra a localização da área de estudo, locando o ponto de coleta de amostra e as provas de carga.



**Fig. 1** – Localização da área de estudo e pontos de coleta de amostra de solo e de realização das provas de carga diretas (Chagas, 2014).

A Figura 2 apresenta a execução das provas de carga direta em placa de 0,80m de diâmetro, no qual foram realizados utilizando-se um conjunto de equipamentos composto por três sistemas básicos: sistema de reação, sistema de transmissão de cargas e sistema de leitura.



**Fig. 2** – Posicionamento das provas de carga (RochaBrasil, 2012).

Para o sistema de reação, utilizou-se caminhão carregado com brita, enquanto que o sistema de transmissão de cargas compreende um macaco hidráulico com capacidade de carga de 500 kN, bomba hidráulica, hastes cilíndricas e placa. No sistema de leitura foram utilizados dois extensômetros, sensíveis a 0,01 mm, colocados em posições diametralmente opostas. O sistema é apresentado na Figura 3.



**Fig. 3** – Vista do sistema de transmissão utilizado no ensaio (RochaBrasil, 2012).

As provas de carga foram executadas com carregamentos do tipo rápido por um tempo de 5 min entre cada estágio, aplicando-se carga até atingir máxima de 35,2 kN, que corresponde a uma pressão máxima de 70 kPa. A saturação do solo, em dois dos ensaios, se deu pela adição de água ao redor da placa, cujo nível foi mantido constante durante toda a execução da prova de carga.

O Quadro 1 apresenta os resultados de índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) ao longo da profundidade das sondagens SPT consideradas para a realização desta pesquisa, e suas respectivas médias.

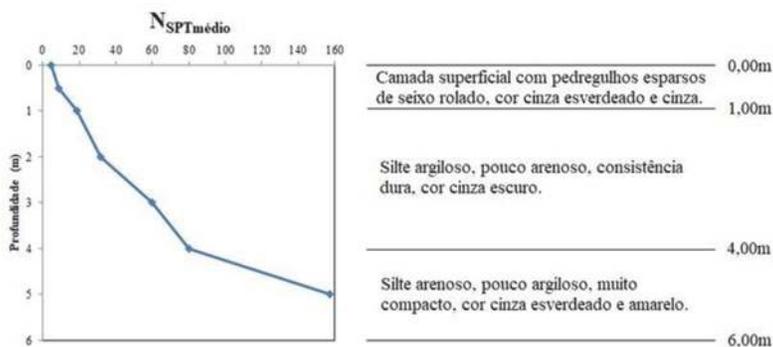
**Quadro 1** – Índices de resistência à penetração das sondagens consideradas.

Profundidade (m)	NSPT (golpes)								Média
	SP-02	SP-03	SP-04	SP-06	SP-13	SP-14	SP-17	SP-19	
0	3	3	5	5	3	6	5	6	4
0,5	4	10	8	8	10	10	8	11	9
1	8	14	17	45	14	17	19	17	19
2	34	27	26	37	27	20	39	45	32
3	39	78	48	45	78	92	26	72	60
4	62	90	41	75	90	72	90	120	80
5	-	200	73	-	200	120	150	200	157

A partir dos resultados das sondagens foi elaborado um gráfico com os valores médios do  $N_{SPT}$  ao longo da profundidade. Na Figura 4 estão representados os valores de  $N_{SPT}$  médio e o perfil geotécnico correspondente. Vale destacar que, nas sondagens utilizadas, o nível freático não foi identificado.

De acordo com os perfis de sondagens, pode-se perceber que o solo apresenta uma tendência de crescimento do índice de resistência à penetração com o aumento da profundidade. Observa-se que, na média, o  $N_{SPT}$  varia de 5, superficialmente, até o impenetrável à percussão, encontrado a 6,00m de profundidade.

Com relação aos ensaios especiais, realizou-se edométrico simples, edométrico duplo e cisalhamento direto. O Quadro 2 apresenta, de forma sucinta, as condições utilizadas nesses ensaios.



**Fig. 4** – Resultado das sondagens a percussão (Chagas, 2014).

**Quadro 2** – Resumo das condições de ensaio especial.

Ensaio	Tipo de amostra	Condição de saturação
Oedométrico simples	Indeformado	Inundado com tensão de 25 kPa
	Compactado	
Oedométrico duplo	Indeformado	Umidade natural
		Inundado
	Compactado	Umidade natural
		Inundado
Cisalhamento direto	Indeformado	Umidade natural
		Inundado
	Compactado	Umidade natural
		Inundado

Os ensaios de compressão edométricos simples e duplo, executados de acordo com ABNT (1990), com a amostra de solo indeformada foram iniciados pela moldagem do corpo de prova conforme ilustrado na Figura 5.



**Fig. 5** – Moldagem do corpo de prova para ensaio de compressão edométrico a partir de amostra indeformada (Chagas, 2014).

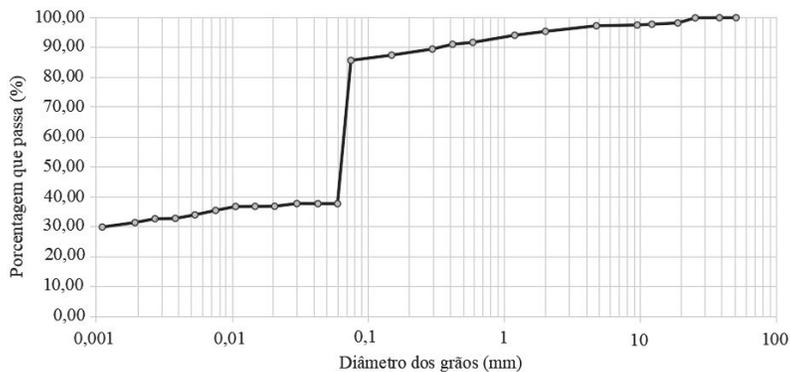
O ensaio de compressão edométrico duplo consiste da realização, em conjunto, de ensaios edométricos em duas amostras de solo, uma com umidade natural e outra inundada desde o início da execução do ensaio. No ensaio de compressão edométrico simples o corpo de prova é inundado na carga de trabalho para que se possa, principalmente, avaliar seu potencial de expansão ou colapso.

Vale salientar que, no caso das amostras compactadas, tanto para o ensaio de compressão edométrico, quanto para o cisalhamento direto, os corpos de prova foram moldados a partir da compactação de solo na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, determinados no ensaio de compactação para a energia de Proctor Normal (ABNT, 2016b).

### 3 – RESULTADOS

A caracterização do solo em estudo foi realizada pela execução dos ensaios de granulometria (ABNT, 2018), limites de liquidez (ABNT, 2017a) e plasticidade (ABNT, 2016a). Ensaios de compactação (ABNT, 2016b) e índice de suporte Califórnia (ABNT, 2017b) também foram realizados e os resultados são apresentados a seguir.

Na Figura 6 apresenta-se a curva granulométrica da amostra de solo deformada coletada a cerca de 0,10 cm de profundidade da superfície do terreno.



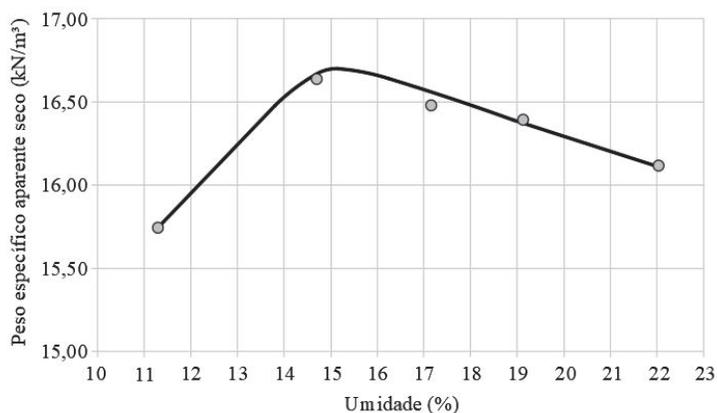
**Fig. 6** – Curva granulométrica do solo em estudo (Chagas, 2014).

De acordo com a classificação do Sistema de Classificação Unificado-SUCS (Lambe e Whitman, 1969) a amostra de solo corresponde a um solo do tipo ML, um silte de baixa compressibilidade. Essa classificação está compatível com os resultados obtidos pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia, onde foi obtido para o solo em estudo um ISC de 3%, vale lembrar que, para solos desse grupo, o valor do Índice de Suporte Califórnia varia, em geral, entre 2% e 15%. Pela classificação do Transportation Research Board-TRB (DNIT, 2006), a amostra se enquadra no subgrupo dos solos A-6.

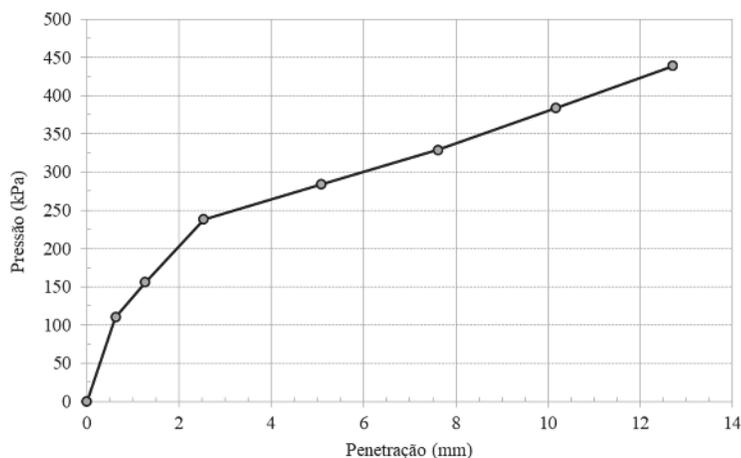
A atividade do solo ensaiado foi de 1,26, que de acordo com Pinto (2006), corresponde a uma argila ativa. Segundo Nelson e Miller (1992), argilas ativas apresentam um maior potencial para a expansão.

A densidade real dos grãos ( $\delta$ ) foi determinada pelo método do picnômetro por meio da realização de três ensaios, onde foram obtidos resultados em média de 2,55 para amostra de solo em estudo (DNER, 1995). De acordo com Pinto (2006), valores típicos de solos ficam em torno de 2,7 podendo variar para argilas até 3.

O ensaio de compactação foi realizado com uma energia do Proctor normal, aplicando 12 golpes por camada, num total de três camadas. Com os resultados do ensaio de compactação pode-se construir a curva de compactação apresentada na Figura 7.



**Fig. 7** – Ensaio de compactação com energia normal (Chagas, 2014).



**Fig. 8** – Resultado do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) (Chagas, 2014).

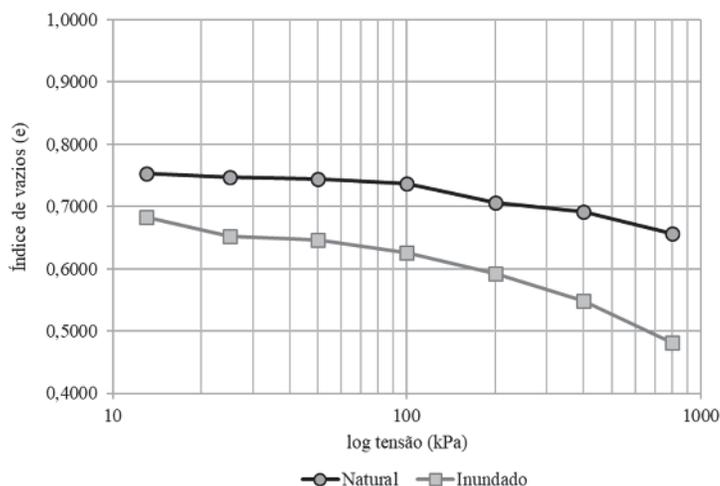
De acordo com a curva de compactação, determinou-se que o solo em estudo quando compactado, apresenta umidade ótima de 15,3% e peso específico aparente seco máximo igual a 16,7 kN/m<sup>3</sup>.

Por meio da realização do ensaio ISC, obteve-se as penetrações 12, 17, 26, 31, 36, 42 e 48 mm, no tempo respectivamente de 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 min.

Com os resultados obtidos foi elaborado o gráfico da curva pressão versus penetração do solo em estudo, conforme apresentado na Figura 8. Dessa forma, o ISC obtido para o solo ensaiado foi de 3%.

No ensaio de compressão edométrico duplo com amostra indeformada, os dois corpos de prova foram submetidos a estágios de tensão de compressão até estabilização das deformações. Um dos corpos de prova foi inundado na tensão de projeto (25 kPa), enquanto o outro foi mantido na umidade natural durante todos os estágios de carga. Os estágios de pressão aplicados foram os seguintes: 13 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa e 800 kPa (ABNT, 1990).

A Figura 9, mostra os resultados do ensaio de compressão edométrico duplo com amostra de solo indeformada.



**Fig. 9** – Gráfico de índice de vazios  $\times$   $\log \sigma$  para ensaio de compressão edométrico duplo com amostra indeformada (Chagas, 2014).

A partir da proposta de Reginatto e Ferrero (1973), estimou-se o coeficiente de colapsividade (c) do solo em 0,21%, utilizando-se a equação seguinte:

$$c = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (1)$$

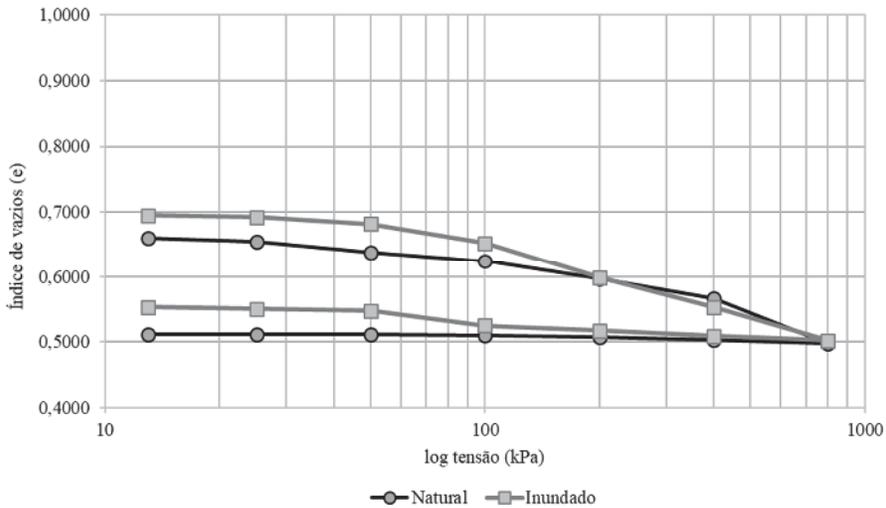
Onde  $\sigma_{vpn}$  é a tensão de pré adensamento virtual do solo na umidade natural,  $\sigma_{vps}$  é a tensão de pré adensamento virtual do solo inundado,  $\sigma_{v0}$  é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo.

De acordo com Reginatto e Ferrero (1973), a amostra ensaiada apresenta potencial de colapso que a qualifica como “condicionada ao colapso”. Neste caso, se a tensão vertical (geostática + carregamento externo),  $\sigma_v$ , for inferior a  $\sigma_{vps}$  (50 kPa) não ocorre colapso. Mas se,  $\sigma_v$  superar  $\sigma_{vps}$ , mas não superar  $\sigma_{vPA}$  (200 kPa), ocorrerá colapso quando o solo for inundado após carregamento. No entanto, se  $\sigma_v$  superar  $\sigma_{vPA}$ , ocorrerá colapso mesmo sem inundação.

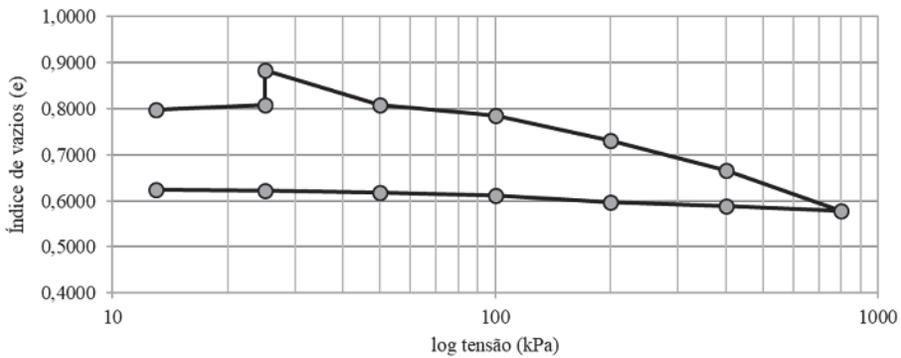
O ensaio de compressão edométrico duplo foi realizado em amostra compactada, com intuito de verificar se a compacta o do solo   capaz de reduzir, ou mesmo eliminar, o potencial de colapso do solo. O corpo de prova foi moldado com a umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, obtidos no ensaio de compacta o com energia normal. A Figura 10, apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão edométrico duplo para amostra compactada.

Com os resultados   possível observar que as curvas obtidas com os ensaios de compressão edométricos duplos (situa es natural e inundada) são bem próximas, indicando que o processo de compacta o praticamente anulou o potencial de colapso do mesmo, demonstrando que a compacta o pode ser um processo eficaz para o tratamento de solos colapsíveis. Esse efeito também foi estudado por autores como Rollins e Rogers (1994), Junior e Futai (2010), Feng *et al.* (2014) e Ferreira (2017).

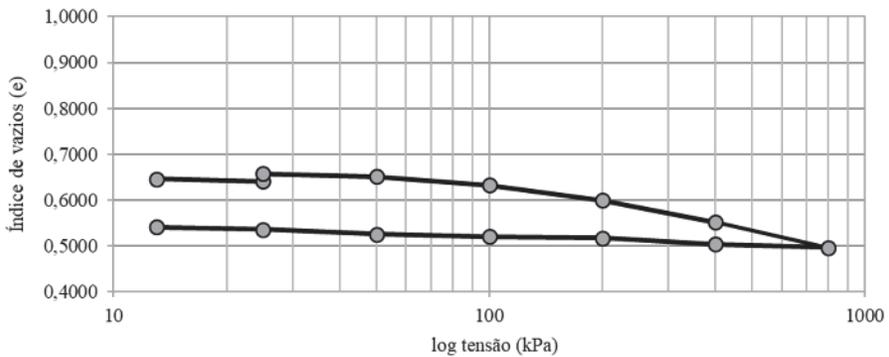
Foram realizados dois ensaios de compressão edométricos simples com amostra indeformada e compactada. Durante a realiza o do ensaio, o corpo de prova foi submetido a tensão de compressão até o segundo estágio, que corresponde a carga de 25 kPa (tensão de projeto), nesse momento realizou-se a inunda o da amostra e aguardou-se a estabiliza o das deforma es.



**Fig. 10** – Gráfico de índice de vazios x  $\log \sigma$  para ensaio de compressão edométrico duplo com amostra compactada (Chagas, 2014).



**Fig. 11** – Gráfico de índice de vazios x  $\log \sigma$  para ensaio de compressão edométrico simples com amostra indeformada (Chagas, 2014).



**Fig. 12** – Gráfico de índice de vazios x  $\log \sigma$  para ensaio de compressão edométrico simples com amostra compactada (Chagas, 2014).

Em seguida procedeu-se de maneira convencional aplicando-se os incrementos de cargas correspondentes a cada estágio de compressão. As cargas aplicadas foram de 13 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa. Na Figura 11, apresenta-se os resultados do ensaio de compressão edométrico simples com amostra de solo indeformada, e é possível observar que houve uma expansão do corpo de prova com a saturação.

Para a amostra compactada, o corpo de prova foi moldado com umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtido no ensaio de compactação com energia normal. Percebe-se pela Figura 12 que a expansão do corpo de prova foi minorada a partir do ensaio realizado na amostra compactada, reforçando que o processo de compactação reduz o potencial de expansão do solo.

A determinação da expansão livre do solo, foi realizada a partir da medida da variação da espessura da amostra, em função do tempo, em relação a sua altura inicial, conforme expressa a equação seguinte:

$$E = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 \quad (2)$$

onde E,  $\Delta H$  e  $H_0$  são a expansão livre, acréscimo de altura máximo por saturação e altura inicial do corpo de prova antes da saturação, respectivamente.

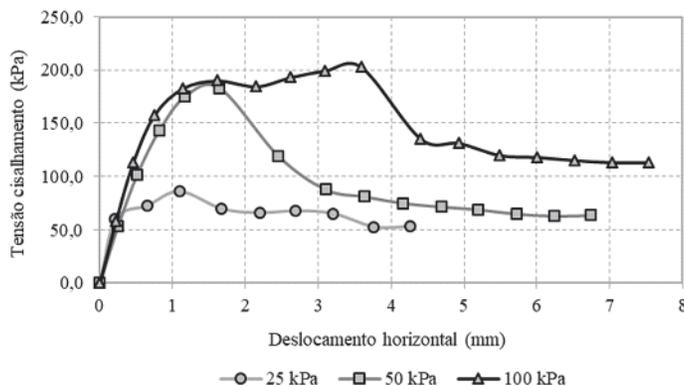
Obteve-se altura inicial do corpo de prova igual a 25,7 mm, e após saturada a altura atingiu 26,7 mm. Dessa forma, a expansão livre (E) foi estimada em 3,9 %.

No ensaio de compressão edométrico simples com amostra compactada, inicialmente o corpo de prova tinha uma altura de 24,8 mm e após a saturação atingiu uma altura máxima de 25,07 mm. Nesse caso, a expansão livre correspondeu a 1,08%.

De acordo com Nelson e Miller (1992), a literatura indica que solos que podem exibir considerável expansão no campo são aqueles que apresentam expansão livre da ordem de 50%. Os valores obtidos para o caso do solo ensaiado no estado natural foram bem inferiores, indicando que em uma futura obra, não teríamos problemas de comportamento do solo relacionados a sua expansão. Por outro lado, o processo de compactação reduziu o comportamento “expansivo” do solo, minorando, ainda mais, o risco futuro de problemas relacionados a expansão.

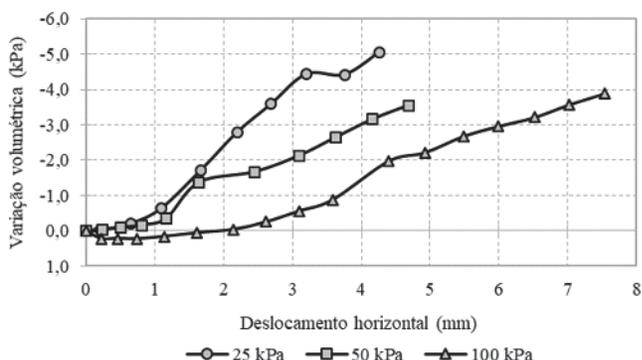
Os ensaios de cisalhamento na amostra no estado natural foram realizados a partir da moldagem de três corpos de prova que foram extraídas do bloco de solo indeformado (ASTM, 2011).

Na Figura 13, observa-se o crescimento da tensão cisalhante até um pico máximo a partir do qual há um decréscimo da tensão com o deslocamento horizontal, onde fica evidente a ruptura do solo.



**Fig. 13** – Deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante da amostra indeformada na umidade natural (Chagas, 2014).

A Figura 14 apresenta a variação volumétrica *versus* deslocamento horizontal, obtidos no ensaio de cisalhamento direto com amostra indeformada rompida na umidade natural.



**Fig. 14** – Variação volumétrica obtida no cisalhamento direto com amostra indeformada rompida na umidade natural (Chagas, 2014).

O Quadro 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto para amostra de solo indeformado, ensaiado na umidade natural e saturado com água, e amostra compactada, ensaiada na umidade ótima e saturada com água. O elevado valor obtido para a coesão da amostra indeformada em umidade natural, é atribuído a coesão aparente que o solo apresenta na umidade natural, devido a elevada sucção apresentada. Já na amostra indeformada no estado saturado, observa-se uma coesão inferior a amostra no estado natural, já que com a saturação do corpo de prova tem-se a redução da coesão aparente, pela diminuição da sucção.

Acredita-se que com a saturação do corpo de prova houve algum tipo de alteração estrutural, por colapso ou expansão, provocando uma variação acentuada no ângulo de atrito do corpo de prova, quando comparado com o ângulo de atrito do corpo de prova que não foi saturado durante o ensaio. Comparando os parâmetros da amostra indeformada e a amostra compactada na umidade ótima, observa-se que houve um decréscimo de ambos os parâmetros de resistência. Esse resultado é justificado pela maior umidade encontrada no corpo de prova compactado.

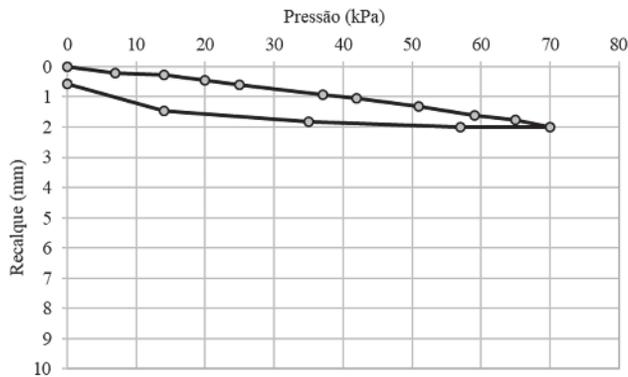
**Quadro 3** – Resultado dos ensaios de cisalhamento direto.

Amostra	Tensão (kPa)	Tensão de cisalhamento máxima (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Indeformada (wnatural)	25	85,86	75	54,3
	50	183,06		
	100	202,84		
Indeformada (saturada)	25	24,09	9,3	30,46
	50	38,59		
	100	68,16		
Compactada (wótima)	25	69,47	58	29,6
	50	91,1		
	100	113,54		
Compactada (saturada)	25	21,47	12,97	26,06
	50	43,05		
	100	60,05		

É possível observar que parâmetros de resistência da amostra compactada saturada e da amostra compactada na umidade ótima, sem saturação, praticamente houve redução apenas no valor da coesão. Isso já era esperado pois o aumento da umidade pela saturação do corpo de prova, teoricamente provoca redução apenas na coesão aparente pela perda de coesão.

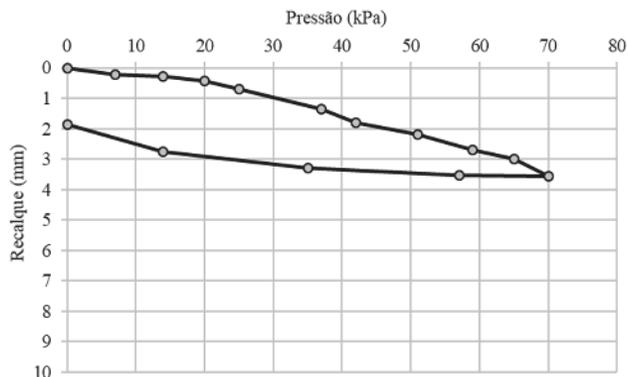
Foram realizados quatro ensaios de prova de carga, sendo duas executadas na condição natural e duas realizadas com inundação.

A previsão do comportamento geotécnico, em termos de resistência e deformabilidade pode ser obtida, com boa acurácia, a partir da realização de provas de carga direta, considerando, porém, as extrapolações pertinentes na interpretação para aplicação em fundações superficiais (Aguiar *et al.*, 2014). A Figura 15 apresenta o comportamento da curva pressão *versus* recalque para o ensaio de placa 01 executado na condição de umidade natural. No ensaio foi aplicada pressão máxima de 70 kPa, obtendo um recalque total de apenas 2,01 mm.



**Fig. 15** – Curva pressão x recalque – Prova de carga 01 (Chagas, 2014).

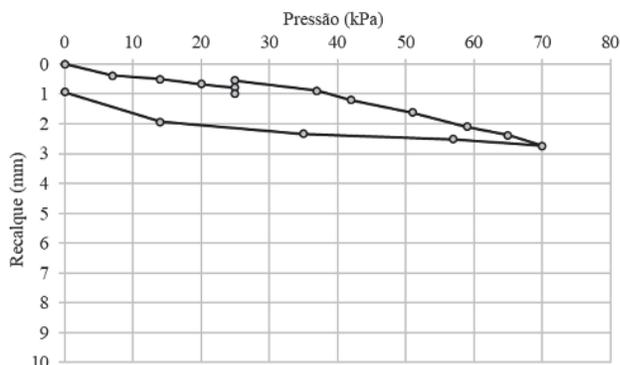
O ensaio de prova de carga 02, também executado na condição de umidade natural, foi realizado com aplicação de uma pressão máxima de 70 kPa, e obteve-se novamente um recalque baixo, neste caso o valor máximo foi de 3,56 mm. O comportamento da curva pressão *versus* recalque está representado na Figura 16.



**Fig. 16** – Curva pressão x recalque – Prova de carga 02 (Chagas, 2014).

Foram executados dois ensaios de prova de carga com inundação com água mantendo-se o nível de água constante durante todo o ensaio. Além disso, foram realizadas provas de carga sobre uma pequena camada de areia de 0,10 m de espessura compactada com soquete manual.

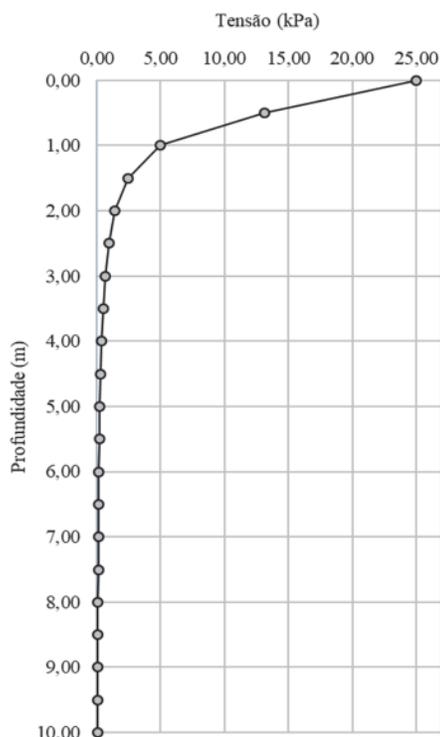
Na Figura 17 apresenta-se o comportamento da curva pressão versus recalque para o ensaio de placa 03 executado com inundação com água. Neste ensaio foi aplicada pressão máxima de 70 kPa, obtendo um recalque total de 2,74 mm.



**Fig. 17** – Curva pressão x recalque – Prova de carga 03 (Chagas, 2014).

Observa-se que a saturação ao redor da placa praticamente não alterou a relação pressão *versus* recalque. Por outro lado, houve uma expansão de 0,016%, que assim como os resultados dos ensaios de compressão edométricos simples, não chegou a caracterizar o solo como expansivo. Vale observar que para o cálculo da expansão adotou-se como espessura do solo a profundidade significativa do bulbo de tensão gerado pela placa durante o ensaio.

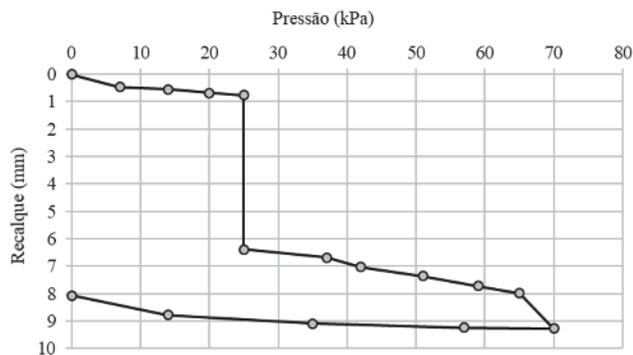
Com base na prova de carga direta, foi determinado o comportamento dos acréscimos de tensão com a profundidade no eixo da suposta fundação (Figura 18) que é correspondente às placas



**Fig. 18** – Acréscimos externos de tensão para uma superfície flexível e circular (Chagas, 2014).

utilizadas. Foi considerada a tensão superficial de projeto de 25 kPa.

A Figura 19 apresenta o gráfico do resultado referente ao ensaio de prova de carga 04, também executado com inundação com água, foi realizado com aplicação de uma pressão máxima de 70 kPa, e obteve-se um recalque total de 9,26 mm.



**Fig. 19** – Curva pressão x recalque – Prova de carga 04 (Chagas, 2014).

Neste caso, foi observado colapso do solo na pressão de 25 kPa e que foi provocado pela inundação do solo. O colapso foi estimado em 0,16%.

Comparando o colapso obtido na referida prova de carga com o colapso obtido pelo ensaio de compressão edométrico duplo, que foi de 0,21%, são observados resultados estimados com excelente concordância, demonstrando que ensaios de compressão edométricos duplos são capazes de indicar situações de colapso com confiabilidade bastante razoável. Outro fato que merece destaque é que, para esse caso, o uso de soquete manual para a compactação do solo abaixo da placa não apresentou eficácia suficientemente adequada que fosse capaz de anular o comportamento supostamente colapsível do solo.

Comparando a pequena expansão obtida na prova de carga 03 com os resultados dos ensaios de compressão edométricos simples, verifica-se que houve uma concordância na previsão da expansão que, em ambos os casos, apresentaram valores tão reduzidos que não foram capazes de caracterizar o solo como um solo expansivo.

O Quadro 4 traz um resumo de fatores obtidos a partir dos ensaios edométricos do solo na condição indeformado, compactado na umidade natural e inundado com água. A análise foi considerada para o solo no estado pré-adensado.

Vale observar que o módulo de elasticidade (E) foi obtido a partir do módulo edométrico utilizando-se a equação seguinte:

$$E_{EOD} = \frac{E(1 - \nu')}{(1 + \nu').(1 - 2\nu')} \quad (3)$$

Além disso, a partir de retroanálise das provas de carga realizadas estimaram-se valores para o módulo de elasticidade do solo de fundação das provas de carga. Dessa forma para a prova de carga 01 o módulo de elasticidade retroanalísado foi 22,5 kPa, para a prova de carga 02 foi 13,3 kPa, para a prova de carga 03 foi igual a 2,1 kPa e para a prova de carga 04 o valor estimado foi de 9,8 kPa.

Comparando-se os valores de E obtidos pelas provas de carga com as estimativas realizadas a partir de ensaios de compressão edométricos, observam-se diferenças consideráveis de valores estimados. Atribui-se as diferenças obtidas aos diferentes níveis de deformação dos ensaios, às condições de contorno também distintas, além da influência da amostragem nos resultados dos ensaios de compressão edométricos.

**Quadro 4** – Resumo de fatores obtidos pelo ensaio de compressão edométrico do solo em estudo (Chagas, 2014).

Parâmetros	Condição			
	Indeformado		Compactado	
	Natural	Inundado	wótima	Inundado
$\sigma_c$ (kPa)	170	180	210	67
Cc	0,048	0,14	0,1	0,15
Cr	0,0069	0,048	0,014	0,027
Eoed (kPa)	13837,3	3958,9	2585,5	4273,2
E (kPa)	6457,4	1847,5	1206,5	1994,2
Coesão (kPa)	75	9,3	58	12,97
Ângulo de atrito ( $^\circ$ )	54,3	30,46	29,6	20,06
LL (%)	40			
LP (%)	29			
$\gamma_{scampo}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,8			
w <sub>natural</sub> (%)	8			

#### 4 – CONCLUSÕES

Por meio da realização desta pesquisa foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

Com a realização de ensaios de compressão edométricos duplos, o solo avaliado foi qualificado como “condicionado ao colapso”;

A compactação do solo, avaliada a partir de ensaios de compressão edométricos duplos, anulou o potencial de colapso, indicando ser um tratamento adequado para solos de comportamento colapsível;

A partir de ensaios de compressão edométricos simples, os corpos de prova ensaiados na condição de umidade natural exibiram um comportamento expansivo de baixa magnitude, que foi praticamente anulado com a compactação do mesmo;

Os parâmetros de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ) estimados a partir de ensaios de cisalhamento direto nos corpos de prova na umidade natural, apresentaram redução apreciável de valores com a inundação. A redução na coesão ( $c'$ ) é atribuída a perda de sucção com a saturação e a redução do ângulo de atrito ( $\phi'$ ) se atribui a alteração estrutural ocorrida com a inundação do corpo de prova, provavelmente devido ao colapso;

Nos corpos de prova compactados, houve redução apenas da coesão ( $c'$ ) com a inundação, pela perda de sucção. O ângulo de atrito ( $\phi'$ ), praticamente, ficou inalterado por não ter havido colapso durante o cisalhamento dos corpos de prova compactados.

Comparando-se os módulos de elasticidade (E) obtidos a partir de retroanálises das provas de carga com estimativas realizadas a partir de ensaios de compressão edométricos, foram observadas diferenças consideráveis. Atribui-se as diferenças obtidas aos diferentes níveis de deformação dos ensaios, às condições de contorno também distintas, além da influência da amostragem nos resultados dos ensaios de compressão edométricos.

#### 5 – AGRADECIMENTOS

A CAPES, pelo apoio financeiro pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro na concessão da bolsa de Iniciação Científica.

À ROCHABRASIL pelo apoio na presente pesquisa.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). NBR 6489/84 – *Prova de Carga Direta sobre Terreno de Fundação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (1990). NBR 3336/90 – *Ensaio de Adensamento Unidimensional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2016a). NBR 7180/16 – *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2016b). NBR 7182/16 – *Solo – Ensaio de Compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2017a). NBR 6459/17 – *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2017b). NBR 9895/17 – *Solo – Índice de Suporte Califórnia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2018). NBR 7181/18 – *Solo – Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Aguiar, M. F. P.; Oliveira, F. H. L.; Matos, Y. M. P.; Monteiro, F. F. (2014). *Estudo da Extrapolação do Coeficiente de Reação em Solos Arenosos para Fundações a Partir de Provas de Carga em Placa*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia-GO.
- ASTM D3080M-11 (2011). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. ASTM Standards.
- Chagas, G. S. (2014). *Estudo Experimental do Comportamento Mecânico de Estrato Silto-Argiloso (Massapê) para Fundações Superficiais*. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 112 p.
- DNER (1995). DNER-ME 084/95 – *Agregado Miúdo-Determinação da Densidade Real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasil.
- DNIT (2006). Publicação IPR-719, *Manual de Pavimentação*, 3ed, Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Feng, S. J.; Du, F. L.; Shi, Z. M.; Shui, W. H.; Tan, K. (2014). *Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction*. Engineering geology, p. 105-115.
- Ferreira, J. A. C. (2017). *Melhoramento de solos colapsíveis para suporte de fundações superficiais: análise de um estudo de caso*. Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, Paraíba.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York.
- Junior, I. R.; Futai, M. M. (2010). *Estudo de caso de um melhoramento de solos colapsíveis com compactação*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. New York: J. Wile.
- Marinho, F. A. M. (2005). *Os Solos não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Nelson, J.; Miller, D. J. (1992). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley e Sons, Inc., p. 259.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, Ed. Oficina de Textos.
- Reginatto, A. R.; Ferrero, J. C. (1973). *Collapse Potential of Soil Water Chemistry*.
- RochaBrasil. (2012). *Relatório Prova de Carga Direta*, Icó-CE.
- Rollins, K. M.; Rogers, G. W. (1994). *Mitigation measures for small structures on collapsible alluvial soils*. *Journal Geotechnical of Engineering*, pp. 1533-1553.
- Stefanoff, G.; Jelle, J.; Tsankova, N. (1983). *Stress and Strain State of a Cement-loess Cushion*. In: *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.