



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

DEVERSON RAFAEL AMARO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE AO COLAPSO DE UM SOLO LOCALIZADO
NO MUNICÍPIO DE TOUROS/RN ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PROVA DE CARGA
EM PLACA**

ANGICOS

2023

DEVERSON RAFAEL AMARO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE AO COLAPSO DE UM SOLO LOCALIZADO
NO MUNICÍPIO DE TOUROS/RN ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PROVA DE CARGA
EM PLACA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Gomes Dantas de
Araújo.

ANGICOS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Na Nascimento, Deverson Rafael Amaro do.
ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE AO COLAPSO DE UM
SOLO LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE TOUROS/RN ATRAVÉS
DE ENSAIOS DE PROVA DE CARGA EM PLACA / Deverson
Rafael Amaro do Nascimento. - 2023.
34 f. : il.

Orientador: Arthu Gomes Dantas Araujo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Solos colapsíveis. 2. prova de carga em
placa; . 3. potencial de colapso. . I. Araujo,
Arthu Gomes Dantas, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DEVERSON RAFAEL AMARO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE AO COLAPSO DE UM SOLO LOCALIZADO
NO MUNICÍPIO DE TOUROS/RN ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PROVA DE CARGA
EM PLACA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 09 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Arthur Gomes Dantas de Araújo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Wendell Rossine Medeiros de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Paulo Leite de Souza Junior, Prof. Me. (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e discernimento para me manter-me firme diante das barreiras da vida.

Agradeço aos meus amados pais Domingos e Rosa, que sempre me apoiaram, incentivaram a seguir meus sonhos. Aos meus queridos Irmãos Derik e Danil.

A todos meus familiares, que apesar da distancia me apoiaram o torceram pelo meu sucesso.

A minha família que a faculdade me proporcionou, em especial Ingrid, Pablo, Danilo, Ana Vitoria, Vinicius e Pedro, pessoas que aprendia a amar de coração, e a todos os meus colegas que conheci durando minha jornada no curso.

Aos meus professores da UFERSA por todos ensinamentos durante as duas graduações, em especial a professora Enai Taveira que me ensinou a acreditar em min mesmo.

Ao Professor Arthur Dantas, por ter aceitado embarcar nesse projeto comigo, e por toda sua paciência durante o processo.

Por fim sou grato a todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse onde estou.

“O sucesso é a soma de pequenos
esforços repetidos dia após dia.
(Robert Collier)

RESUMO

Solos colapsíveis são solos que sofrem redução de volume ao serem saturados. Sendo assim, são solos problemáticos para obras de engenharia, uma vez que podem causar danos as construções realizadas sobre eles. Existe métodos diretos e indiretos para identificação deste tipo de solo, seja por ensaios em laboratório ou em campo, como é caso do ensaio de prova de carga em placa. O objetivo deste trabalho é analisar os ensaios de prova de carga em placa realizados no Município de Touros/RN, com o intuito de analisar a susceptibilidade ao colapso do solo em estudo. Para isto, foram executados quatro ensaios de prova de carga, inundados durante o ensaio, simulando um ensaio edométrico simples. A partir deles, foram obtidas as curvas Tensão vs Recalque e com estes resultados foram determinado os recalques máximos, e o colapso do solo após inundação. O potencial do colapso foi determinado através dos métodos de Ferreira e Lacerda (1993) e Jennings e Knight (1957). Classificação da gravidade do problema como "sem problema". O resultado obtido por este método é diretamente influenciado pela profundidade que a água percolou provocando o colapso. Recomenda-se, para os ensaios inundados ao longo do ensaio, que seja realizado a determinação da umidade do solo em profundidade, antes e após a inundação.

Palavras-chave: Solos colapsíveis; prova de carga em placa; potencial de colapso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Modelos de estruturas instáveis de solos colapsíveis	19
Figura 2	– Estrutura do solo colapsível carregada: a) antes da inundação; b) depois da inundação	19
Figura 3	– Critério de identificação de solos colapsíveis	22
Figura 4	– Ensaio edométrico simples e duplo	33
Figura 5	– Localização do município de Touros.....	26
Figura 6	– Esquema montagem da prova de carga em placa.....	27
Figura 7	– Tensão vs Recalque (PCP - 01)	29
Figura 8	– Tensão vs Recalque (PCP - 02)	30
Figura 9	– Tensão vs Recalque (PCP - 03)	30
Figura 10	– Tensão vs Recalque (PCP - 04)	31
Figura 11	– Resumo das curvas Tensão vs Recalque.....	32
Figura 12	– Simulação da influência da alteração da espessura da camada de solo que contribui para o colapso h_0	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Métodos de identificação de solos colapsíveis.....	20
Tabela 2	–	Classificação da colapsibilidade em obras de engenharia a partir de resultados de ensaios edométricos simples.....	24
Tabela 3	–	Resumo do ensaios.....	27
Tabela 4	–	Resumo dos resultados obtido.....	31
Tabela 5	–	Potencial de colapso para ensaios segundo Ferreira e Lacerda (1993).....	33
Tabela 6	–	Potencial de colapso para a simulação.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
D	Diâmetro do Placa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
PC	Potencial do Colapso
PCP	Prova de Carga em Placa
PE	Pernambuco
RN	Rio Grande do Norte

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Diâmetro/largura da placa ou sapata
C	Coefficiente de colapsibilidade
CI	Coefficiente de identificação da característica colapsível
E	Módulo de deformabilidade do solo
e_0	Índice de vazios natural
e_1	Índice de vazios amolgado
e_i	Índice de vazios sob a umidade natural
e_c	Índice de vazios após a inundação
ε_i	Deformação volumétrica específica sob a umidade natural
ε_c	Deformação volumétrica específica após a inundação
K	Coefficiente de subsidência
Kd	Índice de consistência de Prikonskij (1952)
KI	Coefficiente de colapsibilidade
kv	Coefficiente de reação vertical
h_0	Espessura da camada que contribui para o colapso
h_i	Altura do corpo de prova na umidade natural
h_c	Altura do corpo de prova após a inundação
Q	Carga aplicada ao solo
Q_{ult}	Carga última ou carga de ruptura
R	Coefficiente de subsidência
S_0	Grau de saturação natural
S_r	Grau de saturação
W	Recalque provocado por uma determinada carga
w	Umidade natural
w_0	Umidade natural
w_l	Limite de liquidez
w_p	Limite de plasticidade
w_{sat}	100% de saturação
Z	Bulbo de tensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.1	Objetivos específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Solos Colapsíveis.....	18
2.2	Identificação de solos colapsíveis.....	20
2.3	Revisão da literatura.....	25
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Local da pesquisa.....	26
3.2	Descrição dos ensaios em placa.....	26
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	29
4.1	Curvas Tensão vs Recalque.....	29
4.2	Identificação da susceptibilidade ao colapso do solo.....	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Segundo Xavier (2018) para garantir um bom desempenho em obras de geotecnia é crucial conhecer o comportamento do solo. Um tipo de solo problemático é o solo colapsível, este já foi encontrado em diversas regiões do Brasil.

Em linhas gerais, solos colapsíveis são solos porosos e não saturados podem ser afetados pelo fenômeno de colapso, que se manifesta como uma abrupta diminuição de volume do solo quando este é exposto a um aumento na umidade (SILVA, 2022). Deste modo é de suma importância realizar estudos sobre este tipo de solo.

O ensaio de prova de carga em placa é um ensaio realizado em campo, este ensaio fornece uma curva de tensão e deformação, além de outros parâmetros do solo como deformabilidade e resistência, através desse ensaio é possível estimar a capacidade de carga do solo. A literatura da mecânica dos solos sugere que através da análise do ensaio de prova de carga é possível identificar se o solo pode ser caracterizado como solo colapsível.

Através dos resultados do ensaio de placa é possível aplicar critérios com o de Reginatto e Ferrero (1976), que permite analisar a suscetibilidade ao colapso, também é possível aplicar a metodologia proposta por Ferreira e Lacerda (1993) e Jennings e Knight (1957) para medir o potencial de colapso e estimar a gravidade do problema.

1.1 Objetivos

Os objetivos listados a seguir tratam-se do escopo que a presente pesquisa pretende alcançar.

1.1.1 Objetivo geral

Através dos resultados dos ensaios de prova de carga em placa classificar quanto a gravidade do problema e estimar o potencial de colapso de um solo localizado no Município de Touros/RN.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter as curvas Tensão vs Recalque para os ensaios
- Analisar as do ensaio: Tensão máxima atingida, recalque máximo, deslocamento ao colapso.
- Em ensaios de placa, inundados ao longo do ensaio, que simulam ensaio de adensamento simples no laboratório, verificar a interpretação do critério de Ferreira e Lacerda (1993), considerando a profundidade de influência da saturação do solo igual ao bulbo de tensões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solos Colapsíveis

Determinados tipos de solos não saturados, em umidade natural, quando submetidos a carregamentos axial de compressão sofrem pequenas variações de volume, entretanto quando inundados apresentam considerável variação de volume (FERREIRA, 1995). De forma geral, os solos colapsíveis são por definição solos não saturados, que apresentam uma reconfiguração de sua estrutura, e diminuição de seu volume uma vez que são submetidos a inundação, independente de uma aplicação ou não de carregamento externo (XAVIER, 2018).

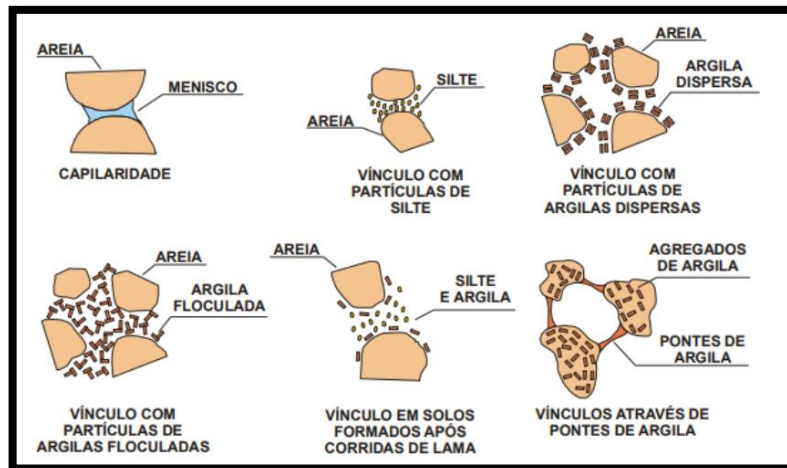
De acordo com Ferreira (1995) os solos colapsíveis podem ser classificados em duas categorias os considerados verdadeiramente colapsíveis, que uma vez submetido a inundação não conseguem suportar o seu peso próprio, e os solos condicionados ao colapso, que ao serem inundados suportam um determinado carregamento, porém, uma vez que essa tensão é ultrapassada ele entra em colapso.

Souza Neto (2004) apud Xavier (2018) descreve que:

“(…) Os solos colapsíveis são caracterizados por materiais com granulometria variando de silte a areia fina ou uma mistura de areia fina, silte e argila, com predominância de areia fina, porém, não há uma faixa granulométrica específica para estes solos, visto que existem vários exemplos na literatura de solos colapsíveis predominantemente argilosos.” (p. 32)

O fenômeno do colapso está diretamente ligado a estrutura ao qual o solo obtém durante a sua formação geológica, além disso, está ligada aos componentes de tensões efetiva aplicada e a de sucção (SOUZA NETO, 2004). A Figura 1 apresenta de forma geral a estrutura dos solos colapsíveis, podemos observar que este tipo de solo apresenta uma granulometria alternando entre areia fina e silte porém não há uma faixa granulométrica específica para esse tipo de solo (SILVA, 2022).

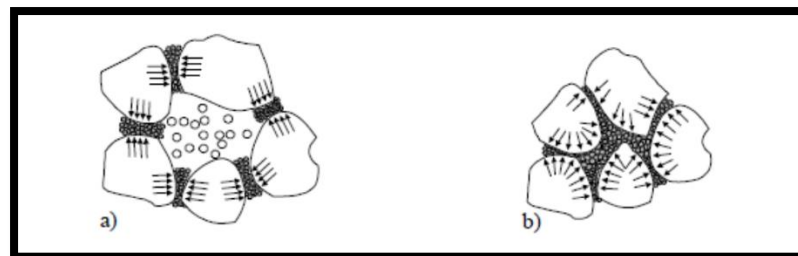
Figura 1: Modelos de estruturas instáveis de solos colapsíveis



Fonte: Adaptado de CLEMENCE e FINBAR, 1981 por AMORIM, 2004.

A instabilidade do solo colapsível é dado devido ao aumento do teor de umidade, uma vez que ao ser exposto a água os vínculos cimentícios do solo é removido ocasionado em um rearranjo estrutural Figura 2, resultando em uma diminuição da resistência e aumento na deformabilidade (XAVIER, 2018).

Figura 2: Estrutura do solo colapsível carregada: a) antes da inundação; b) depois da inundação.



Fonte: JENNINGS E KNIGHT, 1957 Aput XAVIER, 2018.

2.2 Identificação de solos colapsíveis

A identificação de solos colapsíveis é uma etapa essencial para obras de engenharia e uma falha nessa etapa pode comprometer a estrutura e ocasionar gastos com a recuperação. Todavia, a identificação visual deste tipo de solo não é simples, não é possível identificar este tipo de solo somente com métodos tradicionais como o ensaio SPT, a granulometria, e índices de consistências. Entretanto a alguns indicies ligados a pedologia que se associados a ensaios de campo e de laboratório podem identificar o colapso do solo (FERREIRA, 1995).

Mesmo diante da complexidade apresentada pelo mecanismo de colapso, Há propostas de metodologia para identificação de solos colapsíveis essas metodologias se baseiam em critérios, índices, propriedades, e ensaios de laboratório e de campo (XAVIER, 2018). Como é possível observar na Tabela 01, Ferreira (1995) separou os métodos de identificação de solos colapsíveis em direto e indireto.

Tabela 01: Métodos de identificação de solos colapsíveis.

MÉTODOS	SUB-DIVISÕES	DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
INDIRETO	IDENTIFICATIVOS	Microscopia eletrônica de varredura	COLLINS e McGOWN (1974), WOLLE <i>et al.</i> (1978)
	ORIENTATIVOS	Pedologia Ensaio expedito	FERREIRA (1990) e FERREIRA (1993), ARMAN e THORNTON (1972) e JENNINGS e KNIGHT (1975)
	QUALITATIVOS	Índices físicos Ensaio de campo – cone Ensaio SPT-T	DENISOV (1951) ¹ , PRIKLONSKU (1952) ¹ , GIBBS e BARA (1962 e 1967), FEDA (1966), KASSIF e HENKIN (1967), DESIGN OF SMALL DAMS (1960 e 1974) ² , CÓDIGO DE OBRAS DA URSS (1977) CÓDIGO DE OBRAS ³ URSS (1977) DÉCOURT e QUARESMA FILHO (1994)
DIRETO	AVALIATIVOS	Ensaio edométrico duplo	REGINATTO e FERRERO (1973)
	QUALITATIVOS	Ensaio edométrico simples Ensaio de campo	BALLY <i>et al.</i> (1973), JENNINGS e KNIGHT (1975), VARGAS (1978), LUTENEGGER e SABER (1988) FERREIRA e LACERDA (1993)

¹Citado por FEDA (1966) – ²BUERAU OF RECLAMARION – ³Citado por RESNIK (1989).

A identificação de solos colapsíveis podem ser realizadas através de alguns critérios, sendo eles regionais, que são desenvolvidos para determinadas conjunções de solos ou regiões, critérios baseados na consistência e capacidade do solo (VILAR; FERREIRA, 2015). A Figura 3 demonstra alguns desses critérios.

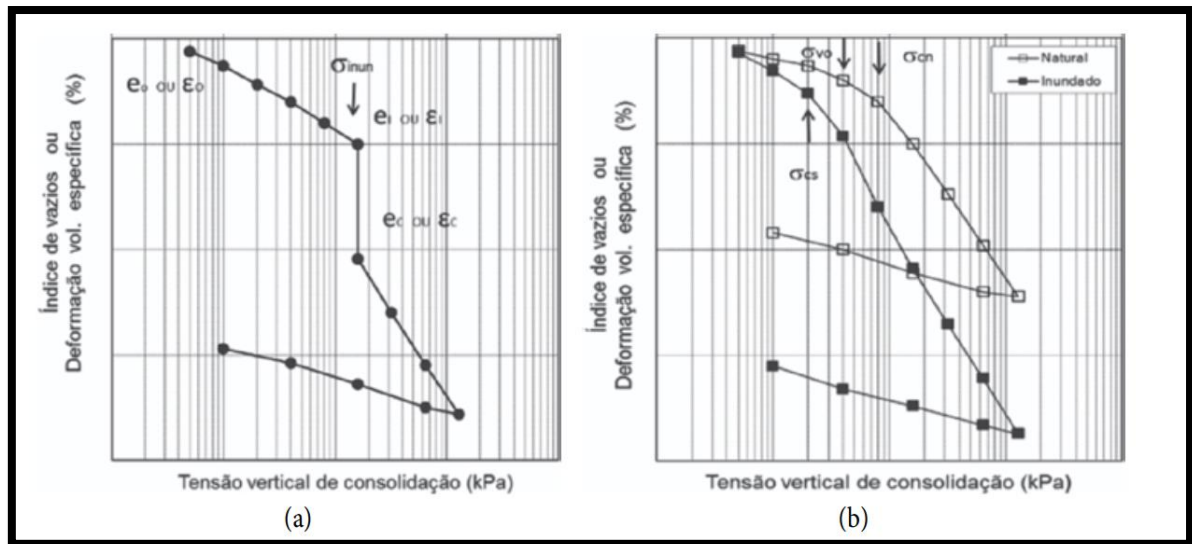
Figura 3: Critério de identificação de solos colapsíveis.

REFÊNCIA	MÉTODO	LIMITES
Denisov (1951) citado por Reginato (1970)	$K = \frac{e_1}{e_0}$	$0,5 < K < 0,75$; altamente colapsível.
		$K = 1$; não colapsível
		$1,5 < K < 2$ não colapsível
Feda (1966)	$Kl = \frac{\left(\frac{w_0}{s_0}\right) - w_p}{w_1 - w_p}$	Se $So > 80\%$ e $Kl > 0,85$; o solo é colapsível
Prikloonskij (1952) citado por Feda (1966)	$Kd = \frac{w_l - w_0}{w_l - w_p}$	$Kd < 0$; Altamente colapsível
		$Kd > 0,5$; colapsível
		$Kd > 1$; Expansível
Gibbs & Baara (1962)	$R = \frac{W_{sat}}{W_l}$	$R > 1$; colapsível
Kassif e Henkin (1967)	$K = gd * W$	$K < 1,5$; colapsível
Jennings e Knight (1975)	Cascalho fino	$Sr < 6\%$; Colapsível
		$Sr > 10\%$; Não colapsível
	Areia fina	$Sr < 50\%$; Colapsível
		$Sr > 60\%$; Não colapsível
	Silte argiloso	$Sr < 90\%$; Colapsível
		$Sr > 95\%$; Não colapsível
Código de obras da URSS (1977) citado por Resnik (1989)	$CI = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$	Ocorre colapso para:
		$1\% \leq Wp \leq 10\%$; $CI < 0,1$
	$Sr < 80\%$	$10\% \leq Wp \leq 14\%$; $CI < 0,17$
		$14\% \leq Wp \leq 22\%$; $CI < 0,24$

Fonte: Adaptado de Vilar; Ferreira, 2015.

De acordo com Vilar e Ferreira (2015), também são considerados critérios de identificação de solos colapsíveis os ensaios edométricos simples e duplos, além dos ensaios *in situ*. No ensaio edométrico a saturação do solo é realizada após a estabilização dos recalques devido ao carregamento, posteriormente a inundação é observado os recalques adicionais (Figura 4a), por vez no ensaio edométrico duplo é realizado dois ensaios, um com o solo na umidade natural e o segundo com o solo inundado antes do carregamento (Figura 4b).

Figura 4: Ensaios edométricos simples e duplo.



Fonte: Adaptado de Vilar; Ferreira, 2015.

Vilar e Ferreira (2015), apontam que a partir dos resultados destes ensaios é possível analisar a potencialidade de colapso (PC) aplicando a Equação 01.

$$PC(\%) = 100 * \frac{e_c - e_i}{1 + e_i} = 100 * \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i} = 100 * \frac{h_c - h_i}{1 + h_i} \quad (1)$$

em que:

e_i , ε_i e h_i - índices de vazios, deformação volumétrica específica e altura do corpo de prova até a tensão considerada sob umidade natural (antes da inundação);

e_c , ε_c e h_c - índices de vazios, deformação volumétrica específica e altura do corpo de prova alcançada em consequência da inundação (após a inundação).

Uma vez que obtido o valor de PC, para interpretar o resultado utiliza-se a Tabela 2, proposta por Jennings e Knight (1957; 1975), esse método serve para tensões de carregamento de 200kPa. Para ensaios de campos como o ensaios de placa, que simulam o ensaio edométrico duplo existe uma metodologia proposta por Ferreira e Lacerda (1993).

Tabela 2: Classificação da colapsibilidade em obras de engenharia a partir de resultados de ensaios edométricos simples.

Jennings e Knight (1957)		Lutenegger e Saber (1988)	
PC (%)	Gravidade dos Problemas	PC (%)	Grau de severidade ao colapso
0 a 1	Sem Problemas	2	Leve
1 a 5	Problema moderado	6	Moderado
5 a 10	Problemático	10	Alto
10 a 20	Problema grave	-	-
> 20	Problema muito grave	-	-

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2021.

A Equação 2 é resultante da metodologia proposta por Ferreira e Lacerda (1993), nela é possível obter o potencial de colapso através da razão entre variação da altura sofrida pelo colapso e a espessura da camada do solo que sofre colapso.

$$PC(\%) = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2)$$

em que:

Δh - Variação de altura sofrida pelo solo no colapso;

h_0 – Espessura da camada de solo que contribui para o colapso.

Oliveira (2021) sugere uma metodologia para obtenção de h_0 , sendo ela baseada na altura abaixo da placa onde ocorre a transição de tensão, ou seja, o bulbo de tensões. De acordo com Cintra e Aoki (2011), o bulbo de tensões para sapatas ou placas circulares é $Z = 2B$.

Outra metodologia para analisar a susceptibilidade de colapso do solo foi proposta por Reginatto e Ferrero (1973), esse critério baseasse nos resultados de ensaios edométricos e, ou a simulação do mesmo em campo. As tensões são analisadas no estado natural e saturado utilizando a Equação 03.

$$C = \frac{\sigma_{cs} - \sigma_{v0}}{\sigma_{cn} - \sigma_{v0}} \quad (3)$$

em que:

C - Coeficiente de colapsibilidade;

σ_{cn} - Tensão de pré-adensamento ou de cedência virtual do solo na umidade natural;

σ_{cs} - Tensão de pré-adensamento ou de cedência virtual do solo inundado;

σ_{v0} - Tensão vertical devida ao peso próprio do solo em campo.

De acordo com Vilar e Ferreira (2015):

- O solo é verdadeiramente colapsível quando $\sigma_{cs} < \sigma_{v0}$ e $C < 0$;
- O solo é condicionalmente colapsível quando $\sigma_{cs} < \sigma_{v0}$ e $0 < C < 1$;
- E, há indefinição quando $\sigma_{cs} = \sigma_{cn}$ e $C = 1$.

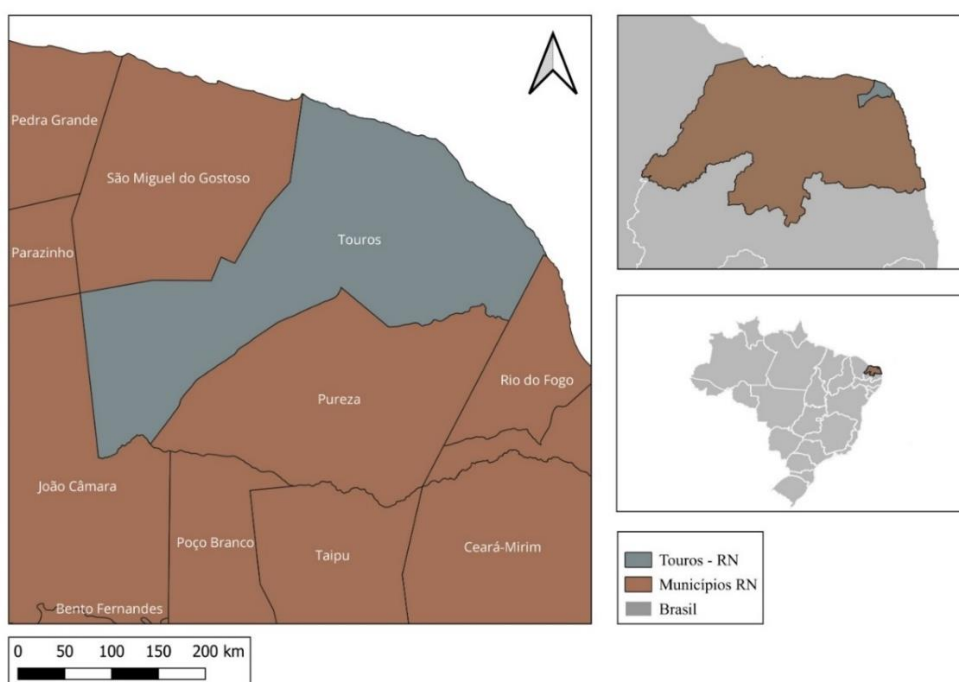
3 METODOLOGIA

Neste item serão abordados os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

3.1 Local da pesquisa

A obra em que foi realizada a pesquisa era uma subestação de energia elétrica localizada no Município de Touros, estado do Rio Grande do Norte.

Figura 05: Localização do município de Touros



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Município de Touros possui uma área territorial de 753,961 km², está localizada na mesorregião Leste Potiguar e fica localizada a 87 km da capital Natal.

3.2 Descrição dos ensaios em placa

Foram realizados ensaios de prova de carga em placa, demoniado neste trabalho por PCP-01, PCP-02, PCP-03, PCP-04 e foram executados seguindo as premissas da norma NBR 6489/2019. A Tabela 3 apresenta as condições de saturação, carga atingida, e as datas da realização dos ensaios.

Tabela 3: Resumo dos ensaios.

Ponto	Condição do ensaio	Carga atingida no ensaio	Data
PCP-01	Parcialmente saturado	300 kPa	26/06/2023
PCP-02	Parcialmente saturado	240 kPa	22/07/2023
PCP-03	Parcialmente saturado	240 kPa	23/07/2023
PCP-04	Parcialmente saturado	240 kPa	24/07/2023

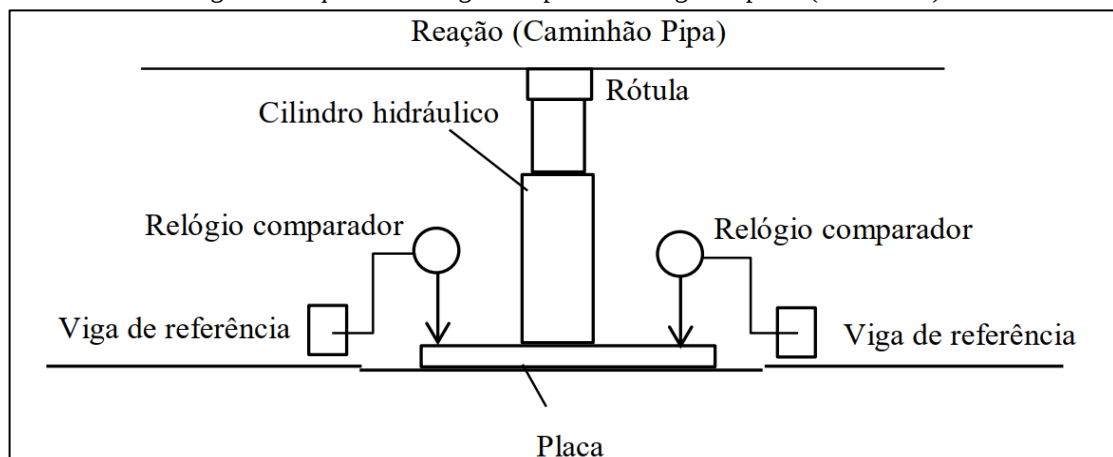
Fonte: Autoria Própria.

Os ensaios foram realizados inicialmente em solos com a umidade natural, sendo posteriormente saturado ao atingir a tensão máxima de ensaio, exceto o ensaio PCP – 01 e foi inundado ao atingir a tensão de 85 kPa.

A placa utilizada para a realização dos ensaios possuía 25 mm de espessura e diâmetro de 50 cm. As tensões foram aplicadas com o auxílio de um cilindro hidráulico com capacidade de 500kN, alimentado por uma bomba manual e medido por um manômetro, com escala de 1kgf/cm².

Para medir os recalques da placa foram utilizados quatro relógios comparadores mecânicos com resolução de 0,01mm e curso de 50mm, instalados diametralmente opostos com o auxílio de bases magnéticas articuláveis fixadas em vigas metálicas de 3m de comprimento, disposta de forma transversal.

Figura 6: esquema montagem da prova de carga em placa (sem escala)



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 6 mostra o esquema que compõe a prova de carga em placa, o sistema de reação do ensaio foi constituído por um caminhão pipa, de maneira que fornecesse uma carga

útil de pelo menos 8 toneladas, garantido assim uma tensão superior a máxima prevista para o ensaio de prova de carga em placa.

Nas provas de carga PCP-02, PCP-03 e PCP-04 foi aplicada uma tensão equivalente a 10% da tensão de ensaio em cada estágio, que por vez foi de 240kPa, e foram aplicadas cargas iguais sucessivas de 24kPa, até atingir a carga máxima de ensaio. Em cada estágio, foram medidos os recalques em intervalos de tempo de 0 min e 10min, com exceção do carregamento de 240kPa, em que foram realizadas as leituras dos recalques nos tempos 0 min, 10 min, 30min, 60min ... até 320 min. Após a leitura no tempo 320 min iniciou-se a inundação da cava, posteriormente já na condição saturada observou-se os recalques nos tempos 0 min, 10min, 30min, 60 min ... até 320 min. A descarga ocorreu em cinco estágios, ao qual foram realizadas as leituras dos recalques nos tempos 0 min e 10 min, com exceção do último estágio, no memo foram adquiridas leituras nos tempos 0 min, 10 min e 60 min.

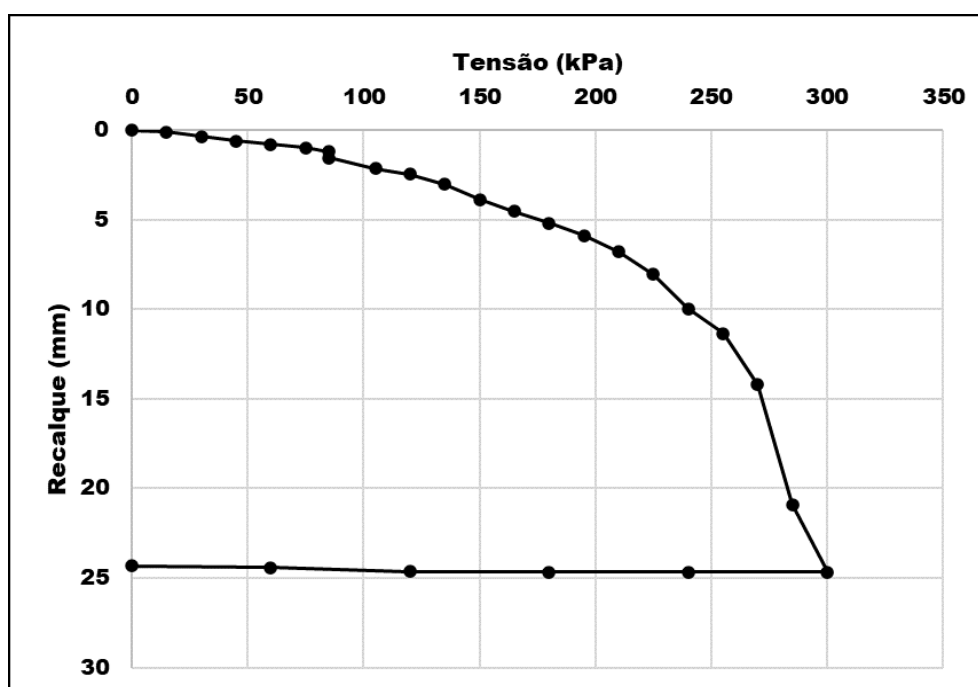
Na PCP-01 foi realizado o mesmo procedimento das anteriores, entretendo, para uma carga de ensaio de 300kPa, por vez na PCP-02 foi realizada a inundação previa pelo período de 24 horas na cava onde foi realizado o ensaio, tal procedimento teve por objetivo ocasionar a saturação do solo em estudo.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de placa. Foi analisado a susceptibilidade ao colapso de quatro ensaios de placa que simulam ensaios edométricos simples, e por fim foi realizado uma análise do critério proposto por Jennings e Knight (1957; 1975).

4.1 Curvas Tensão vs Recalque

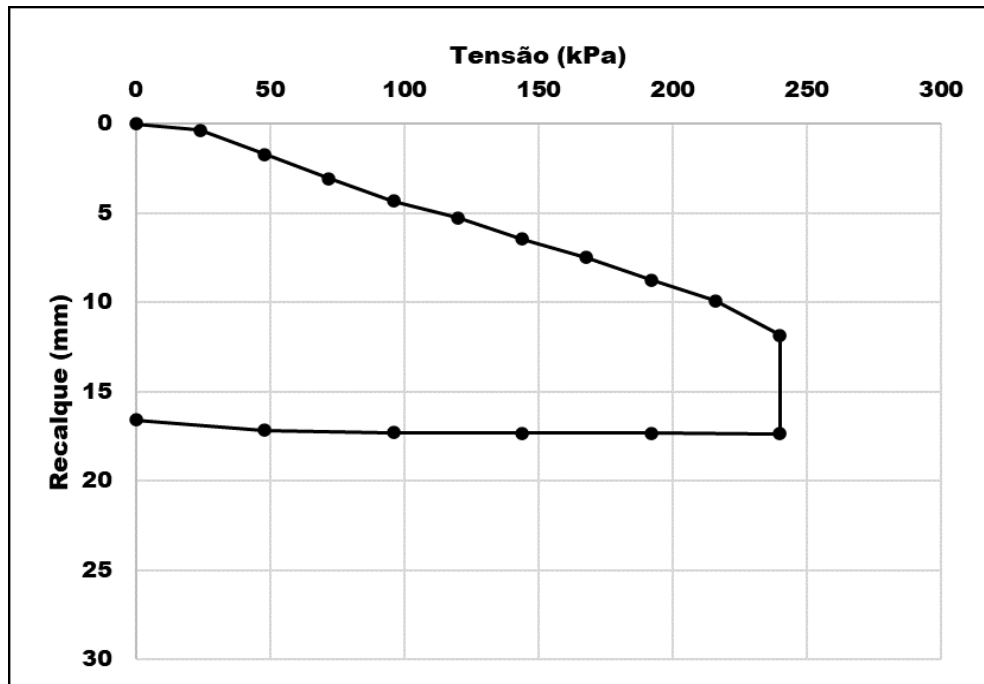
Figura 7 : Tensão vs Recalque (PCP - 01)



Fonte: Autoria Própria

A prova de carga em placa, PCP – 01, ensaiado na condição parcialmente saturado, atingiu uma tensão máxima de ensaio de 300 kPa, recalque máximo de 24,67 mm, recuperação elástica de 0,34 mm recalque residual de 24,33 mm e deslocamento ao colapso de 0,33 mm.

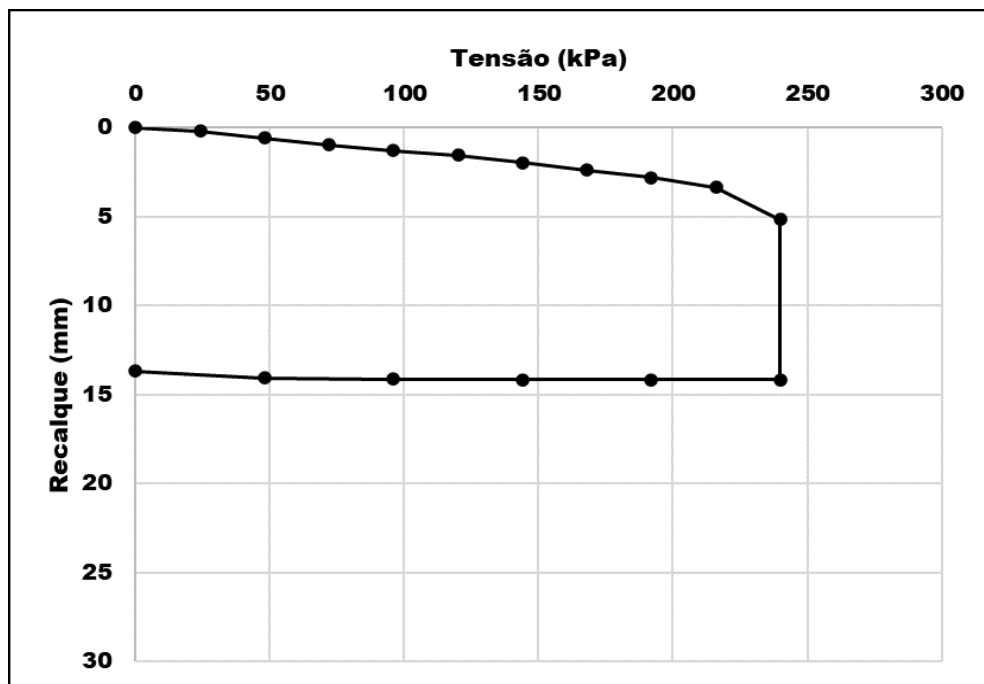
Figura 8: Tensão vs Recalque (PCP - 02)



Fonte: Autoria Própria.

O ensaio PCP – 02, ensaiado na condição parcialmente saturado atingiu uma tensão máxima de ensaio de 240 kPa, recalque máximo de 17,24 mm, recuperação elástica de 0,68 mm, recalque residual de 16,56 mm e deslocamento ao colapso de 5,55 mm.

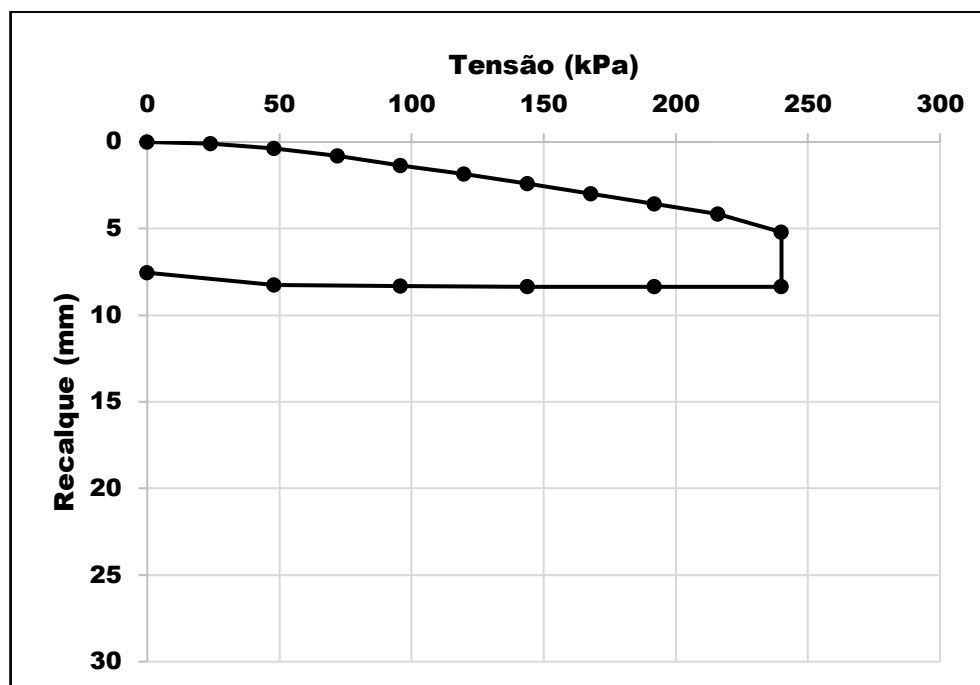
Figura 9: Tensão vs Recalque (PCP - 03)



Fonte: Autoria Própria.

O ensaio PCP – 03, ensaiado na condição parcialmente saturado atingiu uma tensão máxima de ensaio de 240 kPa, recalque máximo de 14,17 mm, recuperação elástica de 0,49 mm, recalque residual de 13,68 mm e deslocamento ao colapso de 9,01 mm.

Figura 10: Tensão vs Recalque (PCC - 04)



Fonte: Autoria Própria

O ensaio PCP – 04, ensaiado na condição parcialmente saturado atingiu uma tensão máxima de ensaio de 240 kPa, recalque máximo de 8,36 mm, recuperação elástica de 0,80 mm, recalque residual de 7,56 mm e deslocamento ao colapso de 3,15 mm.

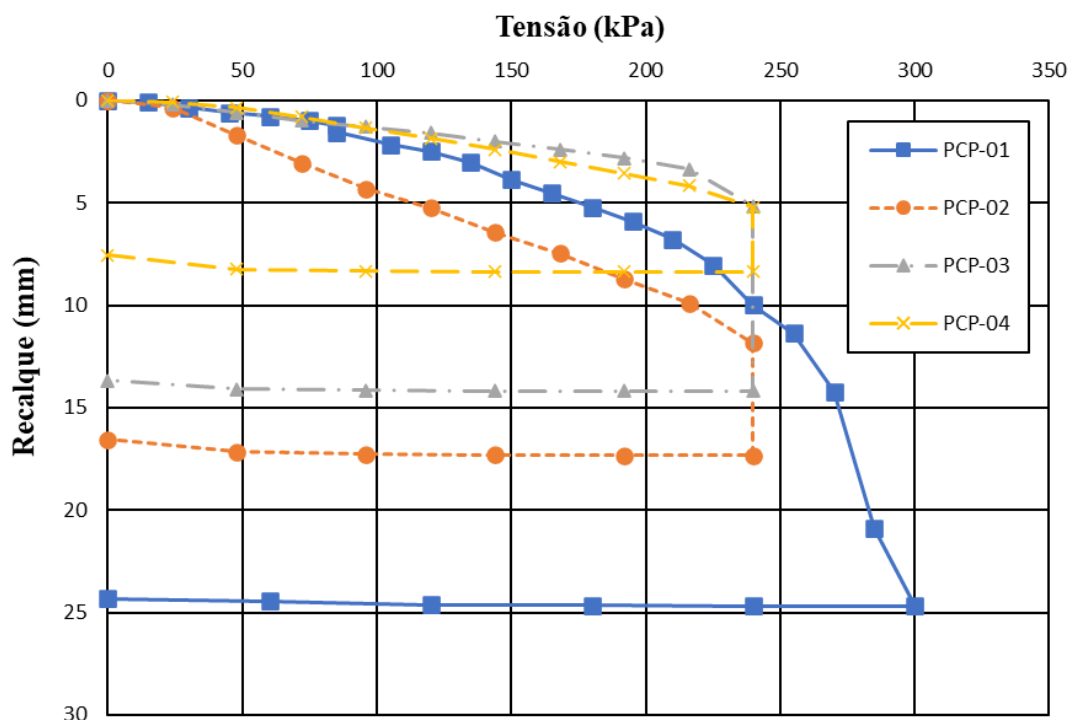
A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtido através do ensaio de placa e o Figura 11 apresenta todas as curvas dos ensaios de placa.

Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos.

Ensaio	Cota (m)	Tensão máxima atingida (kPa)	Recalque máximo (mm)	Recuperação elástica (mm)	Recalque residual (mm)	Deslocamento do colapso (mm)
PCP - 01	- 1,00	300	24,67	0,34	24,33	0,33
PCP - 02	- 1,00	240	17,24	0,68	16,56	5,55
PCP - 03	- 2,75	240	14,17	0,49	13,68	9,01
PCP - 04	- 1,50	240	8,36	0,80	7,56	3,15

Fonte: Autoria Própria

Figura 11: Resumo das curvas Tensão vs Recalque



Fonte: Autoria Própria

O ensaio PCP – 01 foi levada a maior tensão, 300kPa, diante disto apresentou o maior recalque entre os ensaios (24,67mm). A inundação deste ensaio ocorreu na tensão de 85 kPa e o incremento de recalque devido a inundação foi de apenas 0,33 mm.

Os ensaios PCP – 01 e PCP – 02 foram executados na mesma cota, 1 m abaixo do nível do terreno, o primeiro ensaio apresentou recalque máximo de 24,67 mm enquanto o segundo teve um recalque máximo de 17,24 mm este por vez foi menor do que o anterior devido ao fato que a tensão máxima atingida foi menor do que o PCP – 01.

Apesar de serem ensaiados na mesma cota, e o PCP – 01 ter obtido recalques maiores, o deslocamento do colapso do PCP – 01 foi menor em comparação ao PCP – 02, isso se deu porque a tensão de inundação do PCP – 01 foi de 85 kPa, enquanto, a do PCP – 02 foi 240 kPa.

Os ensaios PCP – 02, PCP – 03 e PCP – 04 foram inundados na mesma tensão, 240 kPa, porem foram executados em cotas diferentes, a maior cota de ensaio foi a do PCP – 03 (- 2,75 m), seguido pelo PCP – 04 (-1,50 m) e PCP – 02 (-1,00 m), dentre eles o terceiro ensaio apresentou um maior deslocamento ao colapso, seguido pelo segundo e terceiro respectivamente. Com relação aos recalques máximos o maior registrado pelo ensaio segundo ensaio, registrando um recalque máximo de 17,24 mm, ensaio três teve um recalque de 14,17 mm e o quarto ensaio 8,36 mm.

4.2 Identificação da susceptibilidade ao colapso do solo

Os ensaios realizados em campo têm por objetivo simular ensaios edométricos simples realizados em laboratório. Neste trabalho não foi possível utilizar o método de Reginatto e Ferrero (1976), pois em todos os ensaios de placa, a inundação ocorreu durante o ensaio.

Deste modo, foi medido a potencial ao colapso (PC) do solo através da metodologia proposta por Ferreira e Lacerda (1993) e Jennings e Knight (1957). A espessura da camada de solo que contribui para o colapso foi determinada pela relação do bulbo de tensões, $Z=2B$, para placas circulares, proposto por Cintra e Aoki (2011). A Tabela 5 apresenta a profundidade do bulbo de tensões (Z), o colapso medido Δh e o potencial do colapso (PC).

Tabela 5: Potencial de colapso para ensaios segundo Ferreira e Lacerda (1993)

Ensaio	Z (mm)	Δh (mm)	PC (%)
PCP - 01	1000	0,33	0,03
PCP - 02	1000	5,50	0,55
PCP - 03	1000	9,01	0,90
PCP - 04	1000	3,15	0,32

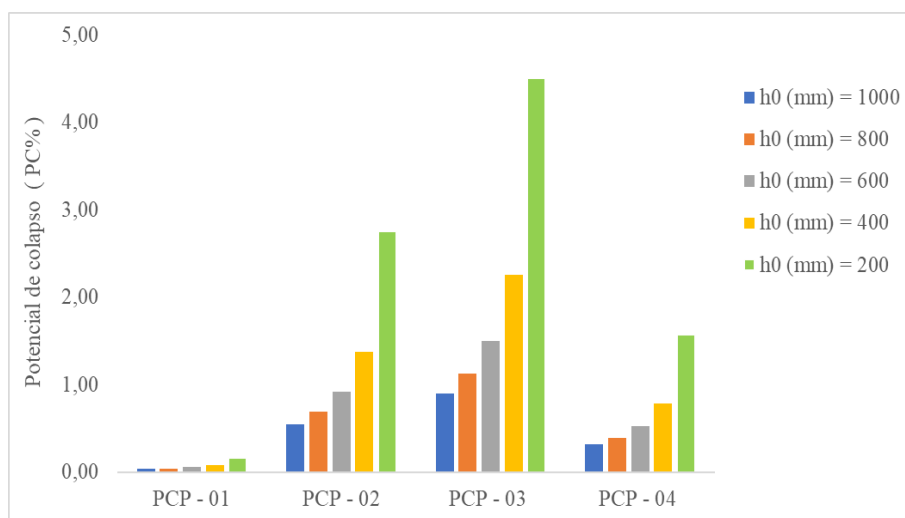
Fonte: Autoria Própria

Com os resultados apresentados é possível consultar a Tabela 03 de Jennings e Knight (1957) para determinação da gravidade dos problemas em obras de engenharia. Sendo assim, o solo foi classificado como “sem problemas” para os quatro ensaios.

É importante observar que a profundidade de influência do colapso é uma variável importante do método. A metodologia mais indicada é a determinação da umidade do solo em profundidade, antes e após a inundação, através de uma perfuração a trado manual no local do ensaio. Desse modo, a profundidade de influência é aquela em que a umidade do solo não foi modificada diante da inundação do ensaio.

Utilizar o bulbo de tensões como profundidade de influência ao colapso pode negligenciar um solo colapsível. Diante disso, foi determinado o potencial de colapso para profundidade igual a 800 mm, 600 mm, 400 mm e 200 mm (Figura 6).

Figura 12: Simulação da influência da alteração da espessura da camada de solo que contribui para o colapso h_0 .



Fonte: Autoria Própria

Tabela 6: Potencial de colapso para a simulação.

Ensaio	h_0 (mm)	Δh (mm)	PC (%)	Gravidade do problema
Para $Z = 1000$ mm				
PCP - 01	1000	0,33	0,03	Sem problemas
PCP - 02	1000	5,50	0,55	Sem problemas
PCP - 03	1000	9,01	0,90	Sem problemas
PCP - 04	1000	3,15	0,32	Sem problemas
Para $Z = 800$ mm				
PCP - 01	800	0,33	0,04	Sem problemas
PCP - 02	800	5,50	0,69	Sem problemas
PCP - 03	800	9,01	1,13	Problema moderado
PCP - 04	800	3,15	0,39	Sem problemas
Para $Z = 600$ mm				
PCP - 01	600	0,33	0,06	Sem problemas
PCP - 02	600	5,50	0,92	Sem problemas
PCP - 03	600	9,01	1,50	Problema moderado
PCP - 04	600	3,15	0,53	Sem problemas
Para $Z = 400$ mm				
PCP - 01	400	0,33	0,08	Sem problemas
PCP - 02	400	5,50	1,38	Problema moderado
PCP - 03	400	9,01	2,25	Problema moderado
PCP - 04	400	3,15	0,79	Sem problemas

Para Z = 200 mm				
PCP - 01	200	0,33	0,17	Sem problemas
PCP - 02	200	5,50	2,75	Problema moderado
PCP - 03	200	9,01	4,51	Problema moderado
PCP - 04	200	3,15	1,58	Problema moderado

Fonte: Autoria Própria

Pode-se concluir que quanto menor a profundidade de influência no colapso, maior é o potencial de colapso do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das curvas Tensão vs Recalque foi possível analisar os recalques máximos de cada ensaio, notou-se que o maior recalque ocorreu no ensaio PCP – 01, o recalque máximo foi influência direta da tensão máxima atingida para o ensaio, que foi de 300 kPa.

Os deslocamentos do colapso dos ensaios um e dois puderam ser comparados, uma vez que ambos foram ensaiados na mesma cota, o PCP – 02 teve o maior deslocamento do colapso dentre eles, concluindo-se que a tensão de inundação influencia diretamente no resultado. Com os resultados obtidos nos ensaios dois, três e quatro, pode-se notar que a cota ao qual os ensaios realizados influenciam no valor do deslocamento ao colapso.

Para os ensaios de prova de carga em placa foram obtidos deslocamentos ao colapso de 0,33 mm, 5,55 mm, 9,01 mm e 3,15 mm, foi obtido o potencial ao colapso pelo método de Ferreira e Lacerda (1993), e classificado em “sem problemas” pelo critério de Jennings e Knight (1957) para todos os ensaios.

Foi verificado a influencia a altura do solo que contribui para o colapso, conclui-se que se faz necessário uma investigação criteriosa da variável h_0 do método de Ferreira e Lacerda (1993), uma que se negligenciada tal variável pode ocasionar em uma interpretação equivocada dos resultados, podendo chegar a um parecer errôneo do potencial de colapso do solo.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. G. D. et al. **Identificação de Solos Colapsíveis da Região de São Bento do Norte/RN através de Ensaios de Caracterização e Provas de Carga em Placa.** In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, XIX. Salvador, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2019). **NBR 6489: Prova de carga direta sobre o terreno de fundação.** Rio de Janeiro, 2019.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N; ALBIERRO, J. H. **Fundações Diretas: projeto geotécnico.** Oficina de textos: São Paulo, 2011.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** Oficina de Textos: São Paulo, 2010.

XAVIER, J. M. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais.** Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018. 175 p.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. **Solos colapsíveis e expansivos.** Solos não saturados no contexto geotécnico, v. 1. São Paulo, ABMS, 2015. p. 415-440

IBGE – Instituto Brasileiro de geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: < [Touros \(RN\) | Cidades e Estados | IBGE](#) >. Acesso em: 28/07/2023.

OLIVEIRA, I. M. S. **Capacidade de carga e identificação de colapsibilidade de um solo localizado no município de Terra Nova/PE através de ensaios de prova de carga em placa.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos, 2021.

FREITAS, M. Lúcia R. A. **Comportamento geomecânico de um solo colapsível de Petrolina-PE avaliado por meio de ensaios de campo e laboratório / Marta Lúcia Rolim de Almendra Freitas.** Tese (Doutorado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. 148p.

SILVA, L. F. **Solos colapsíveis no semiárido brasileiro: uma visão panorâmica**. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2022. 184 p.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão em solos naturais não saturados devido a inundação**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.

JENNINGS, J.E.; KNIGHT, K. **The Additional Settlement of Foundations due to a Collapse of Structure of Sand Subsoils on Wetting**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, IV. v. 1, 1957. p. 316- 319.

REGINATTO, A.R.; FERRERO. **Collapse Potential of Soils and Soil-Water Chemistry**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, VIII. vol. 2, Moscou, 1973. p. 177-183.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. **Solos colapsíveis e expansivos**. Solos não saturados no contexto geotécnico, v. 1. São Paulo, ABMS, 2015. p. 415-440