

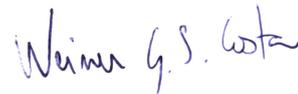
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE COLAPSIBILIDADE DE SOLOS DO ESTADO DA BAHIA ATRAVÉS DE MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS

Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Maria Clara Alves do Nascimento Britto**, apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 11/12/2020.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Professor Msc. Weiner Gustavo Silva Costa
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Orientador



Professor Dr. Mario Sergio de Souza Almeida
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Examinador



Engenheira Camila Maria Torres Pinto
Universidade Federal da Bahia

Examinador

CRUZ DAS ALMAS
DEZEMBRO/2020

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE COLAPSIBILIDADE DE SOLOS DO
ESTADO DA BAHIA ATRAVÉS DE MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS**
**EVALUATION OF THE POTENTIAL FOR COLLAPSIBILITY OF SOILS
FROM THE STATE OF BAHIA USING DIRECT AND INDIRECT METHODS**

Maria Clara Alves do Nascimento Britto¹

Weiner Gustavo Silva Costa²

RESUMO

Alguns solos não saturados são suscetíveis ao fenômeno do colapso devido ao seu comportamento complexo quando entram em contato com líquidos. A característica básica dos solos colapsíveis é a redução de volume que o solo sofre após umedecimento. Os valores elevados de índice de vazios e porosidade, baixo teor de umidade inicial e a condição não saturada dos solos são fatores que favorecem a colapsibilidade. Alguns solos do Estado da Bahia foram estudados buscando identificar se são afetados pela colapsibilidade por meio de ensaios de caracterização física, Ensaio Edométrico Simples (EDS) e Ensaio Edométrico Duplo (EDD). Através de métodos diretos e indiretos avaliou-se o potencial de colapso das amostras em estudo. O colapso foi determinado na condição inundada sob uma pressão de 200kPa no EDS. Os resultados obtidos através dos métodos diretos foram considerados elevados para ambas as amostras, com o potencial de colapso variando entre 7,70% a 18,30% e classificados como “Colapsíveis” e “Problemático” pelos critérios de Vargas (1978) e Jennings e Knight (1975), respectivamente. As curvas de compressibilidade das amostras inundadas e não saturadas permitiram classificar os solos como sendo condicionados ao colapso, ou seja, o solo entra em colapso com o umedecimento e aumento de sobrecarga. Os métodos indiretos apresentaram algumas inconsistências em seus resultados, o que ressalta a necessidade de cuidados ao serem utilizados. Foi identificada a presença de solos potencialmente colapsíveis nos municípios de Cruz das Almas e Morro do Chapéu.

Palavras-Chave: Solos colapsíveis, ensaios edométricos, solos não saturados.

¹ Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) – engmariaclarabritto@gmail.com

² Professor Orientador. Mestre pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) – weiner@ufrb.edu.br

ABSTRACT

Some unsaturated soils are susceptible to the phenomenon of collapse due to their complex behavior when they come into contact with liquids. The basic characteristic of collapsible soils is the shrinkage of the soil after wetting. The high values of voids and porosity, low initial moisture content and the unsaturated condition of the soils are factors that favor collapsibility. Some soils of the state of Bahia were studied seeking to identify whether they are affected by collapsibility through physical characterization tests, simple edometric test (SET) and double edometric test (DET). Through direct and indirect methods, the potential of collapse of the studied samples was evaluated. The collapse was determined in the flood condition for the 200 kPa pressure in the SET. The results obtained through direct methods showed high collapsibility for both samples. The potential for soil collapse ranged from 7.70% to 18.30%, being classified as "Collapsible" and "Problem" according to the criteria of Vargas (1978) and Jennings and Knight (1975), respectively. The compressibility curves of the flooded and unsaturated samples allowed to classify the soils as conditioned to collapse, that is, the soil collapses with wetting and increased overload. The indirect methods showed some inconsistencies in their results, which shows the need for care when using them. The presence of potentially collapsible soils was identified in the municipalities of Cruz das Almas and Morro do Chapéu.

Key words: Collapsible soils, edometric tests, unsaturated soils.

1. INTRODUÇÃO

Para a realização de projetos geotécnicos é imprescindível o conhecimento do comportamento mecânico dos solos, os quais que servem como material de suporte em obras de engenharia. Nesse sentido a prospecção geotécnica é fundamental para identificar as camadas subjacentes de solo e a posição do lençol freático, e, desta forma, permitir o monitoramento dos fatores que podem provocar a ruína de uma estrutura, como por exemplo, recalques excessivos ou ruptura do terreno.

Recalques excessivos podem ocorrer devido ao colapso do solo, que é um fenômeno problemático que pode provocar danos decorrente da redução de volume que o solo sofre após umedecimento (FREITAS, 2016). Os danos devido à presença destes solos, segundo Segantini (2008) podem ser trincas, emperramento de portas e janelas, rupturas de tubulações e até mesmo a ruína da superestrutura.

Solos potencialmente colapsíveis são característicos de regiões com clima tropical devido a sazonalidade peculiar destes locais. Louro *et al.* (2016) afirmam que solos brasileiros, em sua maioria, são não saturados e sua estrutura instável demandam de atenção quanto ao seu comportamento e identificação. Assim, para lidar com solos de comportamento distintos se faz necessário a identificação, por exemplo, do potencial de colapsibilidade.

A literatura cita possíveis métodos de melhoramento de solos colapsíveis. Dos métodos existentes, Ribeiro Júnior (2010) ressalta que o mais utilizado é a remoção da camada superficial do solo problemático e sua recolocação com compactação. No entanto, em algumas situações, se torna inviável a adoção de compactação como solução da problemática presença de solos colapsíveis. A recuperação dos danos devido a solos colapsíveis podem apresentar custos elevados, o que para Souza Neto (2004) compensa o investimento inicial de investigações geotécnicas. O conhecimento da presença de solos problemáticos permite que engenheiros apresentem soluções viáveis, capazes de minimizar os impactos negativos decorrentes da colapsibilidade dos solos.

Com o objetivo de identificar a existência do potencial de colapso e sua magnitude em solos do estado da Bahia através de métodos diretos e indiretos, foram realizados ensaios de caracterização física, Ensaios Edométricos Simples (EDS) e Duplos (EDD). Com base na caracterização física dos solos avaliou-se o potencial de colapsibilidade através de critérios utilizando os limites de consistência e índices físicos das amostras. Com isso, buscou-se identificar se nos locais estudados ocorrem solos colapsíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As obras de engenharia possuem interação com o meio ambiente e elas próprias, o que leva os engenheiros a lidarem com materiais geotécnicos distintos, como os solos colapsíveis e expansivos. Para Souza Neto (2004), a necessidade do conhecimento do comportamento do solo exerce um papel fundamental na tomada de decisão que visa solucionar problemas encontrados no ramo da engenharia.

Em obras sobre depósitos eólicos, aluviais, coluviais e em solos residuais e vulcânicos, por exemplo, podem ser encontrados solos colapsíveis com uma estrutura porosa, potencialmente instável, baixo teor de umidade e agentes cimentantes que estabilizam os contatos intergranulares, que são enfraquecidos durante o umedecimento (REGINATTO e FERRERO, 1973 *apud* BORGES *et al.* 2016).

Sua ocorrência se dá tanto em locais com variações entre chuvas e estiagem como em regiões secas com escassez de umidade, características de regiões áridas e semiáridas. No Brasil, a presença desse solo já foi identificada em diversos estados, como: Amazonas, Bahia, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Sul, São Paulo e no Distrito Federal (SILVA, 2006; BORGES *et al.* 2016; KALANTARI, 2013). Na Figura 2.1 são apresentados solos colapsíveis no Brasil compilado por Ferreira e Lacerda (1993) *apud* Silva (2006).

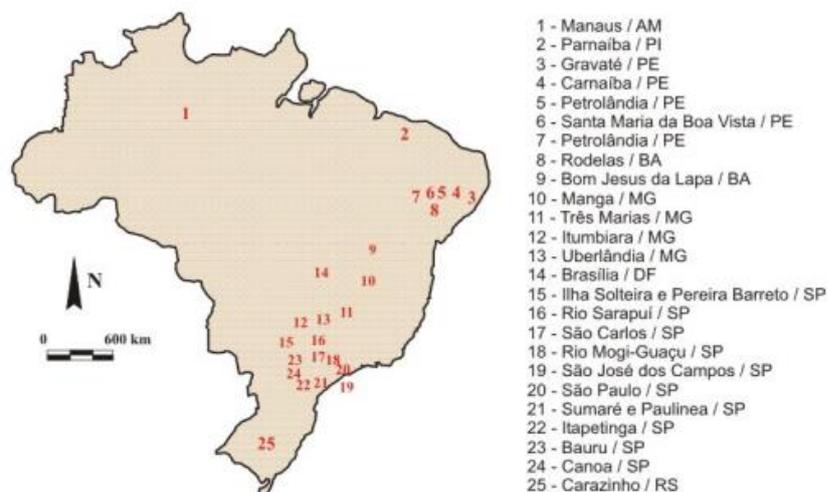


Figura 2.2 – Solos colapsíveis no Brasil.
Fonte: Ferreira e Lacerda (1993) *apud* Silva (2006).

2.2 MECANISMO DO COLAPSO

O colapso ocorre pela redução de resistência entre partículas do solo devido ao aumento da umidade o que desencadeia um rearranjo estrutural levando a uma nova condição ao solo. Pode-se considerar solos como sendo verdadeiramente colapsíveis, quando o umedecimento, sob peso próprio, gera a redução de volume e condicionalmente colapsíveis, os solos que a redução de volume se deve pelo umedecimento do material com acréscimo de carga (CARVALHO *et al.*, 2015).

As características que influenciam o mecanismo do colapso do solo são consideradas bastante complexas, sendo elas: a estrutura do solo; histórico de tensões; a relação das partículas do solo e o fluido percolante; a velocidade com que ocorre o umedecimento do solo e a forma como o ar é expulso do interior dos poros (MARIZ e CASANOVA, 1994; MEDERO, 2005). Em geral os solos colapsíveis se apresentam com baixo grau de saturação, elevados índices de vazios, uma estrutura porosa e baixo teor de umidade.

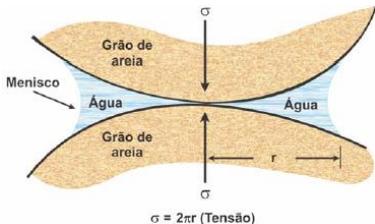
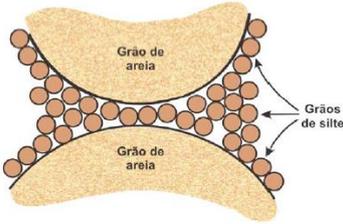
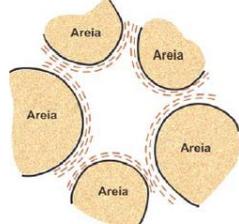
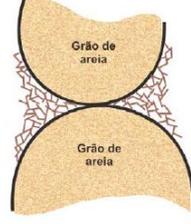
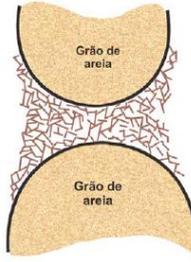
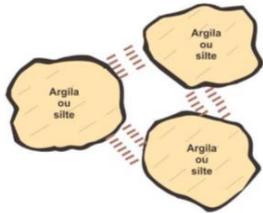
Segundo Gonçalves (2006), não se deve confundir o fenômeno do colapso com o adensamento do solo, porque são considerados fenômenos distintos, onde o adensamento se deve pela expulsão de água, enquanto o colapso ocorre com a expulsão de ar. O autor ainda afirma que no colapso a alteração de volume ocorre em pequeno espaço de tempo e no adensamento é de forma longa.

2.3 ESTRUTURA DOS SOLOS COLAPSÍVEIS

A estrutura do solo influencia diretamente o comportamento de colapsibilidade sob deformações. A natureza metaestável, ou seja, com falta de estabilidade pode ser facilmente perturbada (MEDERO, 2005). A resistência aparente, devido a estrutura do solo, é estabilizada por um período de tempo decorrente da relação interpartículas. Esta relação pode ser alterada ou até mesmo removida pela presença de algum fluido percolante. Assim, as partículas livres podem ocupar os vazios do solo e induzir redução de volume (DAVIES, 2000).

Os elementos fundamentais que garantem a resistência aparente dos solos colapsíveis são: forças eletromagnéticas de superfície, sucção e a existência de substâncias cimentantes (óxidos de ferro e os carbonatos). Ao ocorrer alterações nesses elementos e/ou umedecimento no solo a estabilidade provisória ou aparente pode ser interrompida (RODRIGUES e LOLLO, 2008). A Tabela 2.1 mostra um resumo da estrutura metaestável dos solos colapsíveis.

Tabela 2.1 Estrutura metaestável dos solos colapsíveis

Tipo de Vínculo	Estrutura	Ilustração
Por Capilaridade (Dudley, 1970)	Mantida pela atuação da sucção, que surge quando o solo está na condição não saturada.	
De Silte (Dudley, 1970)	Mantida pela sucção atuante entre os grãos de silte e areia (os grãos de silte e areia estão calçados pelos grãos de silte).	
De argila (Por intemperismo) (Dudley, 1970)	Pode ser devido à ação do intemperismo alterando os minerais primários em argilo-minerais em uma fina camada cobrindo os grãos maiores.	
De argila (Por lixiviação) (Dudley, 1970)	Arranjo entre argila e areia como resultado da ação da lixiviação, que torna as partículas floculadas.	
De argila (Por sedimentação) (Dudley, 1970)	Processo de deposição por sedimentação pode formar estruturas de argila dispersas.	
Microagregações (Por pontes de argila) (Clemence e Finbarr, 1981)	Grãos formados pela agregação de argila ou silte e ligados entre si por pontes de argila.	

Fonte: Adaptado de Dudley (1970) e Clemence e Finbarr (1981) *apud* Silva (2006).

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NO COLAPSO DOS SOLOS

A umidade inicial do solo, o estado de tensão, a vazão de inundação, a composição granulométrica e a estrutura dos solos são fatores que influenciam no comportamento colapsível do solo (BORGES, 2016; SOUZA NETO, 2004).

- Umidade inicial

Segundo Souza Neto (2004) a estação mais seca é a pior situação para se construir uma obra, onde, o solo se encontra mais rígido, devido a sucção, e menores são os valores medidos para o recalque antes da inundação com referência ao recalque total (o que ocorre antes da inundação somado ao que ocorre após a inundação).

Ressalta-se que o aumento da umidade até um valor crítico e a ação de um estado de tensões elevados são condições básicas para deflagrar o colapso. Assim, uma umidade inicial do solo mais elevada diminui o potencial de colapso do solo (CINTRA, 1998 *apud* SOUZA NETO, 2004).

- Estado de Tensão

Para Souza Neto (2004), a tensão a que o solo está sujeito no momento em que é inundado condiciona as deformações sofridas pelo solo colapsível onde o potencial de colapso tende a aumentar com a tensão de inundação, até alcançar um valor máximo, a partir do qual tende a diminuir. E, a tensão para este valor máximo de colapso varia com o tipo e condições iniciais do solo.

- Vazão de inundação

A vazão de inundação pode acontecer de forma lenta ou rápida, e a velocidade com que a água penetra nos vazios do solo tem influência na sua desintegração estrutural, podendo ser menor, maior ou igual à velocidade de destruição das ligações entre as partículas, estando relacionada, entre outros fatores à afinidade interna do solo pelo fluido permeante e à força de coesão entre as partículas agregadas (FERREIRA, 1995 *apud* SOUZA NETO, 2004).

A velocidade com que o fluido permeia pelos poros do solo influencia a sua desintegração estrutural (MOTTA, 2006). A inundação que ocorre instantaneamente provoca um colapso

instantâneo, contudo, de menor potencial do que o que ocorre de maneira lenta. Portanto, os colapsos não são repentinos, são dependentes da vazão com que ocorre a inundação do solo (TEIXEIRA, 2006 *apud* FERREIRA, 1995).

Souza Neto (2004) ressalta a importância de realizar a inundação nos ensaios de laboratório numa vazão próxima a prevista no campo.

- Composição granulométrica

Devido à variedade de tipos de origem que os solos colapsíveis possam ter, a sua textura também torna-se variável. Texturas arenosas são características de solos colapsíveis originados de sedimentos transportados pelo vento e pela água, enquanto os residuais possuem textura controlada pela rocha matriz, decorrentes do intemperismo aos quais estiveram expostos. Solos com textura argilosa são derivados de sedimentos químicos e detríticos finos e rochas ígneas básicas, enquanto os arenosos se derivam de alterações de rochas sedimentares de textura mais grosseiras e rochas ígneas ácidas. Fluxos de lama formam solos colapsíveis com predominância de frações finas (RODRIGUES e LOLLO, 2008).

2.5 IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS COLAPSÍVEIS

A literatura propõem alguns métodos de identificação de solos colapsíveis, que permitem analisar as alterações do comportamento do solo mediante as variações de umidade e/ou tensões aplicadas (GUTIERREZ, 2005). Os métodos de identificação podem ser classificados em diretos ou indiretos e qualitativamente ou quantitativamente. Os critérios, segundo Futai (1997), são baseados em:

- Índices físicos e Limites de Atteberg;
- Microscopia eletrônica;
- Ensaio de campo;
- Ensaio edométrico (simples e duplos)

2.5.1. Métodos Diretos

Os métodos diretos possuem como base a quantificação do potencial do colapso, através de basicamente ensaios de campo e/ou ensaios edométricos (MOTTA, 2006).

Futai (1997), divide a avaliação do colapso em duas metodologias: ensaio edométrico duplo (Figura 2.3) e ensaio edométrico simples (Figura 2.4).

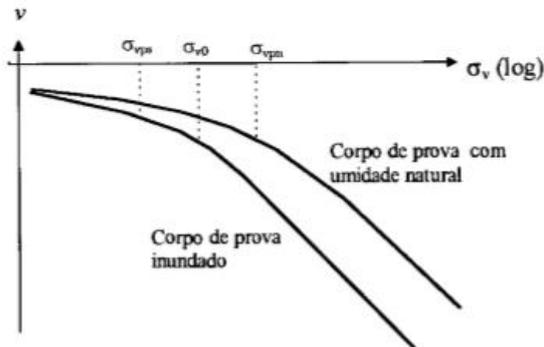


Figura 2.3: Curva deformação volumétrica específica “versus” tensão vertical de ensaios edométricos duplos
Fonte: FUTAI, 1997.

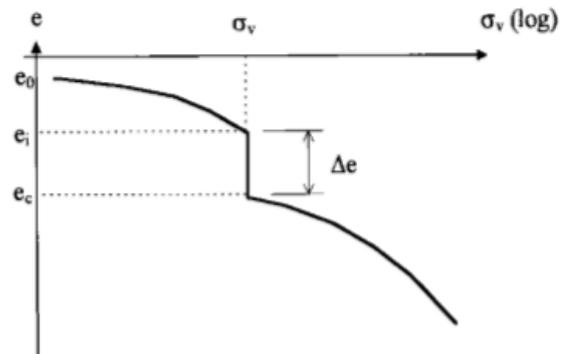


Figura 2.4: Curva índice de vazios “versus” tensão vertical de ensaios edométricos simples
Fonte: FUTAI, 1997.

i. Ensaio Edométrico Duplo

Segundo Futai (1997) a metodologia deste ensaio foi proposta por Jennings e Knight (1957) e Reginatto e Ferrero (1973). Onde, a avaliação e previsão do potencial de colapsibilidade é realizado por dois ensaios edométricos, que utilizam dois corpos de prova nas mesmas condições iniciais. Um com inundação prévia e outro na condição natural, com umidade constante. Ambos realizados com estágios de carregamento normal.

O coeficiente de colapsibilidade definido por Reginatto e Ferrero (1973) toma como referência as tensões, que pode ser obtido através da Equação 2.1.

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

- σ_{vpn} é a tensão de Pré-Adensamento do solo na umidade natural;
- σ_{vps} é a tensão de Pré-Adensamento do solo inundado;
- σ_{v0} é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo.

O coeficiente de colapsibilidade, valores das tensões de Pré-Adensamento do solo natural e inundado e da tensão vertical devido ao peso próprio permite a classificação dos solos de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classificação de Reginatto e Ferrero (1973)

Classificação	Critério
Solo verdadeiramente colapsível	$\sigma_{vps} < \sigma_{v0} \text{ e } C < 0$
Solo condicionado ao colapso	$\sigma_{vps} > \sigma_{v0} \text{ e } 0 < C < 1$
Indefinição de colapso	$\sigma_{vpn} = \sigma_{vps} \text{ e } C = 1$

Fonte: Reginatto e Ferrero (1973) *apud* Almeida (2016); Futai (1997)

Solos que sofrem colapso apenas com atuação de seu peso próprio e aumento de umidade são classificados como verdadeiramente colapsíveis, enquanto os condicionalmente colapsíveis necessitam de, além do umedecimento, alteração em seu estado de tensão.

ii. Ensaio Edométrico Simples

Com metodologia proposta por Jennings e Knight (1957), Vargas (1978) e Lutenegger e Saber (1988) (*apud* FUTAI, 1997) os ensaios edométricos simples são carregados em tensão vertical com umidade constante até uma determinada tensão, onde o corpo de prova é inundado e analisado o colapso. A tensão em que o solo sofre a inundação utilizada por Jennings e Knight e Vargas para determinar o potencial de colapso do solo é de 200 kPa, enquanto Lutenegger e Saber utilizam a tensão de 300 kPa (RODRIGUES e LOLLO, 2008).

A Equação 2.2 determina o potencial de colapso para os critérios mencionados.

$$PC (\%) = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \times 100 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

Δe – variação do índice de vazios devido ao colapso;

e_i – índice de vazios correspondente a tensão em que se realizou a saturação.

Futai (1997) afirma que pode-se substituir o índice de vazios por deformação volumétrica ou altura do corpo de prova em situações específicas. Vargas (1978), citado por Rodrigues e Lollo (2008), classificou os solos que apresentam $PC > 2\%$ como colapsíveis. As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam os limites correspondentes ao potencial de colapso segundo os critérios de Jennings e Knight e Lutenegger e Saber, respectivamente.

Tabela 2.3: Classificação da colapsividade nas obras de engenharia

PC (%)	Gravidade do problema
0 a 1	Sem problema
1 a 5	Problema moderado
5 a 10	Problemático
>20	Problema muito grave

Fonte: Jennings e Knight (1975) *apud* Futai (1997).

Tabela 2.4: Classificação da colapsividade nas obras de engenharia

PC (%)	Gravidade do problema
2	Leve
6	Moderado
10	Alto

Fonte: Lutenegeger e Saber (1975) *apud* Futai (1997)

iii. Outros ensaios

Futai (1997) cita outros ensaios utilizados em estudos para verificar o potencial de colapso dos solos, como, por exemplo:

- Microscopia eletrônica;
- Físico-químicos;
- Análise Mineralógica;
- Ensaios de cisalhamento (direto e triaxiais);
- Ensaios de campo (SPT, CPT, ensaios de placa, pressiômetros);
- Pedologia.

2.5.2 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos fazem uso de parâmetros relacionados as características do solo, como: índices físicos, limites de consistência, granulometria e entre outros aspectos relacionados à textura do solo. Esses parâmetros podem ser obtidos através de ensaios laboratoriais e de campo (BORGES, 2016; SILVA, 2006).

Estes métodos, segundo Motta (2006), não oferecem dados quantitativos em relação a magnitude das deformações volumétricas provenientes do colapso. Não levam em consideração as cargas aplicadas e, em alguns métodos, não consideram as relações de contatos dos grãos, cimentações, formação e constituição do solo.

A Tabela 2.5 reúne alguns dos vários métodos existentes, contendo as referências bibliográficas, as expressões utilizadas para cálculo e os limites correspondentes.

Apenas a função de Basma e Tuncer (1992) não é um método qualitativo. Os métodos citados na Tabela 2.5 são particulares aos solos analisados, entretanto, podem fornecer dados preliminares de como o solo tende a se comportar. É possível que tenham solos colapsíveis com características diferentes dos solos analisados para elaboração das expressões e podem ser identificados como não colapsíveis dentro dos limites citados pelos autores (FUTAI, 1997).

Tabela 2.5 – Critérios de identificação do colapso baseados nos índices físicos e limites de Atterberg

Referência	Expressão	Limites
Denisov (1951) citado por Reginatto (1970)	$K = \frac{e_l}{e_0} \quad (2.3)$	0,5 < K < 0,75 – altamente colapsíveis K = 1 – não colapsível 1,5 < K < 2 – não colapsível
Feda (1966)	$K_l = \frac{\left(\frac{w_0}{S_{r0}}\right) - W_p}{W_L - W_p} \quad (2.4)$	O resultado expressa a colapsividade. $S_{r0} > 80\%$ $K_l > 0,85$ São colapsíveis
Código de obras da URSS (1962), citado por Reginatto (1970)	$\lambda = \frac{e_0 - e_l}{1 + e_0} \quad (2.5)$	$\lambda \geq -0.1$ o solo é colapsível
Priklonskij (1952) citado por Feda (1966)	$K_d = \frac{W_L - W_0}{W_L - W_p} \quad (2.6)$	$K_d < 0$ – altamente colapsível $K_d > 0,5$ – colapsível $K_d > 1,0$ – expansivo
Gibbs e Bara (1962)	$R = \frac{W_{sat}}{W_L} \quad (2.7)$	$R > 1$ – colapsível
Kassif e Henkin (1967)	$K = (\gamma d \cdot w) \quad (2.8)$	$K < 15$ – colapsível
Jennings e Knight (1975)	Cascalho fino Areia fina Silte argiloso	$\left\{ \begin{array}{l} S_r < 6 - \text{colapsível} \\ S_r > 10 - \text{não colapsível} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} S_r < 50 - \text{colapsível} \\ S_r > 60 - \text{não colapsível} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} S_r < 90 - \text{colapsível} \\ S_r > 95 - \text{não colapsível} \end{array} \right.$
Código de obras da URSS (1977) citado por Resnik (1989)	$CI = \frac{e_0 - e_l}{1 + e_0} \quad (2.9)$ $S_r < 80\%$	Ocorrem colapso para: $1\% \leq W_p \leq 10\%$, $CI < 0,1$ $10\% \leq W_p \leq 14\%$, $CI < 0,17$ $14\% \leq W_p \leq 22\%$, $CI < 0,24$
Basma e Tuncer (1992)	$CP = 48,496 + 0,102 \cdot cu - 0,457 \cdot w_0 - 3,533 \cdot \gamma d + 2,80 \cdot \ln \sigma w \quad (2.10)$ $CP = 48,506 + 0,072 \cdot (S - C) - 0,439 \cdot w_0 - 3,123 \cdot \gamma d + 2,85 \cdot \ln \sigma w \quad (2.11)$	O resultado corresponde o potencial de colapso e pode ser avaliado pelas Tabelas 2.3 e 2.4
Handy (1973) citado por Lutenegeger e Saber (1988)	Teor de finos (< 0,002 mm) < 16%	Alta probabilidade de colapso
	16 a 24%	Provavelmente colapsível
	24 a 32%	Probabilidade de colapso <50%
	> 32%	Geralmente não colapsível

Fonte: Modificado de Futai (1997).

Onde:

K – coeficiente de subsidência;

e_l – índice de vazios amolgado correspondente a W_L ;

e_0 – índice de vazios natural;

Kl – coeficiente de colapsividade;

w_0 – umidade natural;

W_l – Limite de Liquidez;

W_p – Limite de Plasticidade;

S_{r0} – grau de saturação;

CP – potencial de colapso;

cu – coeficiente de uniformidade;

$(S - C)$ – diferença entre os teores de areia e argila;

γ_d – peso específico seco;

σ_w – tensão de inundação no ensaio edométrico.

2.6 DANOS PROVOCADOS PELO COLAPSO

Um dos danos importantes que o processo do colapso pode provocar são deslocamentos nas fundações, que possuem a finalidade de receber e transferir as cargas da edificação para o solo. Nas alvenarias e elementos estruturais os danos suscetíveis com o colapso do solo são o surgimento de trincas ou até rachaduras. Este fenômeno também pode afetar elementos como: instalações hidráulicas, instalações elétricas, janelas, portas, vidros e até azulejos presente nas fachadas das edificações. As lajes também podem apresentar trincas e rachaduras provenientes de deformações sofridas por solos colapsíveis. Em condições mais severas, a edificação pode desabar (SEGANTINI, 2008).

O fenômeno do colapso pode gerar instabilidade de taludes, deficiência nas obras de drenagem, contaminação do subsolo através de ruptura de redes sanitárias, e assim, aumentar os danos materiais, gerar gastos econômicos ou até provocar perdas de vida (LOLLO, 2008). As Figuras 2.5 até a 2.8 apresentam exemplos de danos provocados pelo processo do colapso.



Figura 2.5: Rachadura em alvenaria provocada por recalque do solo abaixo da edificação
Fonte: Rodrigues, 2008



Figura 2.6: Trinca em laje de concreto
Fonte: Segantini e Rodrigues, 2008



Figura 2.7: Trinca em elemento estrutural de pequena edificação devida a processo de colapso do solo
Fonte: Rodrigues, 2008



Figura 2.8: Desabamento de edificação causado por deformações induzidas por colapso de solo
Fonte: Cerri, 2008

2.7 MÉTODOS DE MELHORAMENTO DE SOLOS COLAPSÍVEIS

Campos *et al.* (2019), enfatiza a necessidade de projetos de drenagem das vias de acesso e também, de áreas tanto já construídas quanto as que ainda serão realizadas construções. Esses projetos possuem o intuito de permitir a correta coleta e destinação das águas pluviais e assim evitar a inundação do solo por infiltração que é um dos principais fatores que deflagram o colapso do solo.

Ferreira (2017), constatou, a partir de ensaios edométricos de amostras deformadas e indeformadas, que o solo compactado aumenta a capacidade de carga e torna possível o uso de fundações diretas em solos tratados corretamente, por reduzir o colapso à medidas aceitáveis. Freitas (2016) também enfatiza a redução do índice de vazios, a densificação do solo ao seu entorno e a elevação da carga de ruptura através da compactação do solo melhora o comportamento do solo.

A literatura especializada indica como métodos de melhoramento de solos colapsíveis: a substituição do solo comprometido; a inundação prévia; a inundação acompanhada corretamente; a estabilização química e/ou térmica; a realização de colunas de deslocamento e como já mencionado anteriormente a compactação controlada (CAMPOS *et al.*, 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PROPRIEDADES DO SOLO ESTUDADO

Os solos estudados localizam-se nos municípios baianos de Cruz das Almas e Morro do Chapéu (Figura 3.1).

No município de Cruz das Almas, a amostra coletada possui localização em área remanescente florestal urbana – conhecida como “Mata de Cazuzinha” – a 150 m da entrada principal, do lado esquerdo da estrada interna do parque municipal. A amostra tem formação geológica do grupo de Barreiras.

A amostra de solo do município de Morro do Chapéu foi retirada do lado direito da estrada de Morro do Chapéu – América Dourada/BA a 4,4 km do Hotel Vila Amélia e possui formação geológica Pré-Cambriano (A) (LIMA, 2020).

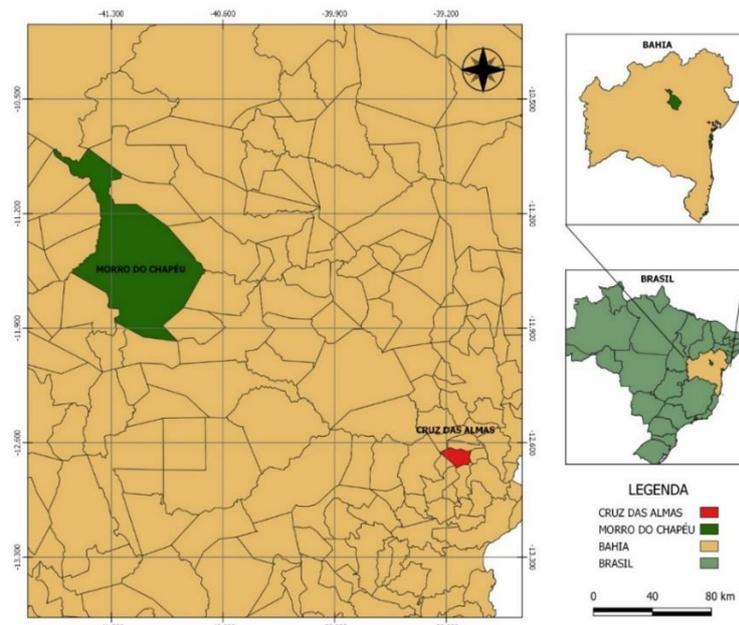


Figura 3.1: Mapa de localização dos municípios dos solos estudados

A Tabela 3.1 apresenta as coordenadas geográficas, o perfil dos solos em estudo, o clima de acordo com a classificação de Köppen, a precipitação média anual e a altitude dos municípios de onde foram retiradas as amostras. Os solos em estudo são oriundos de áreas com relevo plano. A profundidade de coleta foram de duas profundidades distintas, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Os solos do município de Morro do Chapéu possuem formação geológica a partir de uma bacia sedimentar, com deposição de cascalhos, areias, argilas e calcários do grupo Chapada

Diamantina, de idade Tércio-Quaternária (CPRM, 1995). Já a geologia do município de Cruz das Almas é formada por três unidades diferentes: rochas metamórficas Pré-Cambrianas do Complexo Graulínítico; material sedimentar Tércio-Quaternário da Formação de Capim Grosso; depósitos de sedimentos aluvio-coluvionais e detríticos Quaternários (CBPM, 1997; RIBEIRO, 1998 *apud* RODRIGUES *et al.* 2009).

Tabela 3.1: Características geográficas e climáticas de solos em estudo

Município	Amostra	Coordenadas Geográficas	Perfis de solos em estudo	Clima de acordo com a classificação de Köppen	Precipitação média anual (mm)	Altitude (m)
Cruz das Almas	CAZ Intermediária	12°40'12" S	Argissolo Amarelo Distrocoeso Típico	Tropical úmido (Am) com estações secas e chuvosas	1200	220
	CAZ Abaixo	39°06'07" W				
Morro do Chapéu	CHAPADA Intermediária	11°33'00" S	Latosolo Amarelo Distrófico Típico	Semiárido quente e seco (Cwb)	800	1011
	CHAPADA Abaixo	41°09'22" W				

Fonte: Adaptado de Lima (2020).

Tabela 3.2: Cota de retirada das amostras de solo em estudo

Amostra		Profundidade (cm)	Município
CAZ	Intermediária	55-130	Cruz das Almas
	Abaixo	130-180	
CHAPADA	Intermediária	48-135	Morro do Chapéu
	Abaixo	135-180	

Fonte: Adaptado de Lima (2020).

Os solos estudados apresentam estrutura fraca, média em blocos subangulares, característicos de solos caulíníticos. Além disso, o solo em estudo de Cruz das Almas evidenciou estrutura maciça nos horizontes BA a Bt1 e classe textural predominante franco-argiloarenosa, enquanto o solo de Morro do Chapéu apresentou a classe textural argilo-arenosa (LIMA, 2020).

O predomínio da fração de areia das amostras em estudo é ligeiramente evidenciado na Tabela 3.3. O teor de areia é mais elevado nos horizontes superficiais e diminuem com a profundidade e, aumentando, conseqüentemente, a fração de argila. Enquanto a amostra CAZ apresenta baixo teor de silte, a amostra CHAPADA apresenta um teor mais elevado, justificado pelo município de Morro do Chapéu estar localizado em uma região de clima mais quente e seco, o que representa um grau de intemperismo menor em relação ao solo de Cruz das Almas. Os solos em estudo foram classificados como Argissolo Amarelo Distrocoeso Típico (CAZ) e

Latossolo Amarelo Distrófico típico (CHAPADA), sendo considerados bastante profundos (profundidade superior a 150 cm) e bastante homogêneos (LIMA, 2020).

Tabela 3.3: Caracterização física das amostras em estudo.

Hor.	Prof.	Dp	Ds	PT	Areia Total	AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila
-	cm	-kg.dm ⁻³	m ³ .m ⁻³		-----g.kg ⁻¹ -----							
CAZ – Cruz das Almas												
O/A	0-2	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-	-
A1	2-7	2,60	1,25	0,482	730	40	250	270	140	30	20	250
A2	7-21				730	40	210	270	180	30	20	250
AB	21-56				680	40	200	220	170	50	60	260
BA	56-85	2,50	1,35	0,538	600	40	170	200	140	50	50	350
Bt1	85-130				450	30	120	140	110	50	60	500
Bt2	130-220+	2,50	1,55	0,621	410	20	110	130	110	40	50	540
CHAPADA – Morro do Chapéu												
A	0-12	2,61	1,33	0,510	550	10	30	120	320	70	100	350
AB	12-31				550	10	30	120	300	70	100	350
BA	31-55	2,58	1,63	0,631	500	10	20	110	290	70	110	390
Bw1	55-90				460	10	20	90	270	70	120	420
Bw2	90-146	2,61	1,33	0,512	440	0	20	80	260	80	160	400
Bw3	146-200+				430	10	30	80	240	70	130	440

Legenda - AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina; Ds = Densidade do solo; Dp = densidade de partícula; PT = porosidade total; Hor = horizonte; Prof = Profundidade.

Fonte: Adaptado de Lima (2020)

Tabela 3.4: Caracterização química das amostras em estudo

Hor.	Prof.	C.O	P	Ca	Mg	K	Na	Al	H + Al	SB	T	V	m
-	cm	%	mg.kg ⁻¹	----- cmolc dm ³ -----					-----		%		
CAZ – Cruz das Almas													
A1	2-7	2,00	7,44	0,40	0,25	0,11	0,05	0,65	6,11	0,81	6,91	12	45
A2	7-21	1,61	8,01	0,25	0,55	0,08	0,05	0,75	5,78	0,93	6,71	14	45
AB	21-56	0,66	4,60	0,20	1,10	0,09	0,06	0,95	5,12	1,45	6,57	22	40
BA	56-85	0,34	2,87	0,10	0,80	0,14	0,09	0,85	3,47	1,12	4,59	24	43
Bt1	85-130	0,33	2,17	0,15	1,05	0,18	0,69	0,75	2,15	2,07	4,21	49	27
Bt2	130-220+	0,33	2,18	0,03	1,05	0,12	0,09	1,05	2,64	1,28	3,92	33	45
CHAPADA – Morro do Chapéu													
A	0-12	1,08	2,41	0,20	0,80	0,08	0,02	0,85	4,62	1,09	5,71	19	44
AB	12-31	0,72	1,98	0,20	0,30	0,08	0,02	0,85	4,79	0,59	5,38	11	59
BA	31-55	0,71	1,70	0,15	1,00	0,02	0,04	0,88	3,96	1,21	5,17	23	42
Bw1	55-90	0,61	2,21	0,40	0,70	0,02	0,04	0,55	3,30	1,16	4,46	26	32
Bw2	90-146	0,59	1,67	0,30	0,50	0,01	0,06	0,25	0,66	0,87	1,53	57	22
Bw3	146-200+	0,34	1,59	0,20	1,00	0,01	0,04	0,15	5,61	1,26	6,87	18	11

Legenda - Hor = horizonte; Prof = profundidade; SB = soma bases; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; T = capacidade de troca de cátions.

Fonte: Adaptado de Lima (2020)

Conforme estudo de Lima (2020), as características químicas dos perfis estudados, apresentados na Tabela 3.4, demonstraram baixa disponibilidade de nutrientes, com baixos valores de soma bases (SB), baixa capacidade de troca de cátions (T) e altos valores de saturação por Al^{3+} (m). O autor também identificou teores de matéria orgânica inferiores a 20 g kg^{-1} , com exceção apenas no horizonte A do solo de Cruz das Almas, devido o mesmo se encontrar em área de floresta secundária.

A caulinita e goethita são os minerais que compõem predominantemente os solos em estudo. A caulinita predominante juntamente com a presença de frações de areia e de argila conferem o empacotamento denso das camadas do solo, enquanto, a presença de óxidos de ferro (goethita e hematita) e de alumínio (gibbsita), e matéria orgânica elevada desfazem o empacotamento denso gerado pela caulinita (UFV, 1984; SOUZA, 1996; CÔRREA, 2008 *apud* LIMA, 2020).

As características mineralógicas dos solos estudados são consideradas simples, com predominância de quartzo (acima de 80%) e caulinita, circunstância padrão de solos dos Tabuleiros Costeiros, de origem sedimentar do grupo Barreiras e correlatos. O solo de Cruz das Almas possui predominância de grãos rugosos, característica que pode estar relacionada ao processo de intemperismo sofrido devido a sua localização em ambiente mais úmido, onde os grãos de areia sofrem ataque químico. A presença de matéria orgânica ou óxido de ferro e ciclos de umedecimento e secagem desfavorecem a organização das partículas desse solo, e, conseqüentemente reduzem sua coesão. Os solos de Morro do Chapéu apresentam maior proporção de grãos lisos do que rugosos quando comparado aos solos de Cruz das Almas. Essa característica infere que haverá uma menor aderência entre as partículas, dificultando o seu empacotamento. A proporção do grau de arredondamento desse solo está associado ao processo de formação da rocha sedimentar da região e da intensidade da erosão eólica sobre o material de origem (LIMA, 2020).

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no Laboratório de Solos e Fundações.

As amostras em estudo consistiram de 4 (quatro) blocos cúbicos (Figura 3.2), envolvidos com uma camada de papel laminado, uma outra camada de tecido e, por fim, uma camada de papel filme, devidamente identificados.

Para realização dos ensaios de caracterização foram utilizados os excessos de solo decorrentes das moldagens dos corpos de prova dos ensaios edométricos (Figura 3.3).



Figura 3.2: Amostras de solo em blocos cúbicos

A partir das amostras de solo, foram realizados ensaios de caracterização seguindo as Normas da ABNT: NBR 6457 para Preparação de Amostras (ABNT, 2016); NBR 6508 para Massa Específica dos Grãos dos Solos (ABNT, 1984); NBR 6459 para Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984) e NBR 7180 para Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984). As cinco frações de areia (muito grossa: 2-1 mm; grossa: 1-0,5 mm; média: 0,5-0,25 mm; fina: 0,25-0,10 mm; e muito fina: 0,10-0,05 mm) foram determinadas por peneiramento seguindo o critério de USDA (1993).



Figura 3.3: Amostras para realização de ensaios de caracterização

3.3 ENSAIOS EDMÉTRICOS

Os Ensaio Edométricos Simples (EDS) e Duplos (EDD) foram realizados na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no Laboratório de Solos e Fundações e Laboratório de Pavimentação, respectivamente.

Com intuito de se obter parâmetros fundamentais para identificação de colapsibilidade do solo, como deformação sob diferentes tensões, foram realizados ensaios Edométricos Simples e Duplos, que forneceram curvas de compressibilidade. O procedimento do ensaio seguiu as diretrizes estabelecidas na NBR 12007 (ABNT, 1990).

3.3.1. Preparação do corpo de prova

Os corpos de prova utilizados nos EDS foram moldados com anéis (2A, 3A e 4A) que apresentam dimensão em média de 19,24 mm de altura, 76,22 mm de diâmetro e peso médio de 97,24 g, enquanto os EDD com anéis (15M e 16M) em média de 19,98 mm de altura, 71,21 mm de diâmetro e massa média de 48,24g.

Para os ensaios edométricos foram moldados anéis dos blocos indeformados e o excesso de solo retirado das moldagens foram utilizados para determinação da umidade inicial (Figura 3.4).



Figura 3.4: Moldagem do corpo de prova

3.3.2. Procedimento do ensaio EDS

A prensa de adensamento edométrico para os ensaios é apresentada na Figura 3.5. O equipamento é constituído com prensa de carregamento e a célula edométrica. A célula é composta por uma base rígida, o anel para conter o corpo de prova, duas pedras porosas que são colocadas acima e embaixo da amostra e permitem a entrada e saída de água, e um cabeçote rígido de carregamento que tem função de distribuir uniformemente o carregamento aplicado. Esta célula é fixada na prensa de carregamento para aplicação de cargas.



Figura 3.5: Aparelho utilizado nos Ensaios.

Foram realizados quatro EDS. Sendo um para cada amostra.

Antes de iniciar o ensaio decidiu-se adotar a seguinte sequência de carregamento: 12,5; 25,0; 50,0; 100,0; 200,0; 400,0 e 800,0 kPa. E inundação ao atingir 200,0 kPa, ou seja, os estágios de carregamento foram realizados com o solo em umidade natural, até atingir a tensão de 200 kPa, onde, adicionou-se água destilada para analisar o potencial de colapso do solo devido a inundação.

As leituras de deformação foram medidas em intervalos de 1, 2, 4, 8 e 1440 minutos, para todas aplicações de carga: 12,5; 25,0; 50,0; 100,0; 200; 400,0 e 800,0 kPa. Também foram medidas as leituras de descarregamento para as tensões de 800,0; 400,0; 100,0 e 25,0 kPa.

Quando necessário ajustava-se o extensômetro antes da inundação evitando que passasse do valor de 0 mm. Todas as medidas foram anotadas para determinação da deformação ocorrida.

3.3.3. Procedimento do ensaio EDD

A Prensa utilizada no EDD possui as mesmas características da prensa utilizada no EDS (Figura 3.5). Foram realizados oito ensaios edométricos, sendo quatro amostras ensaiadas na condição natural e quatro com inundação prévia.

Adotou-se a seguinte sequência de carregamento para os ensaios das amostras inundadas e na condição natural: 5,0; 10,0; 20,0; 40,0; 80,0; 160,0; 320,0; 640,0 e 1280,0 kPa.

As leituras de deformação foram medidas em intervalos de 1, 2, 4, 8 e 1440 minutos, para todas aplicações de carga. Também foram medidas as leituras de descarregamento para as tensões de 1280,0; 640,0; 320,0; 160,0 e 5,0 kPa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A Tabela 4.1 apresenta os índices físicos dos solos em estudo na sua condição natural para o Ensaio Edométrico Simples.

Tabela 4.1: Índices Físicos das amostras na condição natural (EDS).

Amostra	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	W_o (%)	e_0	η	Sro (%)
CHAPADA Intermediária	14,20	13,89	24,70	2,23	0,78	0,44	7,20
CHAPADA abaixo	12,99	12,37	24,83	5,06	1,01	0,50	12,72
CAZ Intermediária	16,17	15,49	24,72	4,41	0,60	0,37	18,65
CAZ abaixo	15,92	14,53	25,72	9,58	0,77	0,44	32,61

Onde:

γ – Peso específico;

γ_d – Peso específico seco;

γ_s – Peso específico dos sólidos;

W_o – Umidade natural;

e_0 – Índice de vazios inicial;

η – Porosidade;

Sro (%) – Grau de saturação;

Os índices físicos encontrados na Tabela 4.1 apresentam semelhança com os valores apresentados por Rodrigues e Lollo (2008) para solos colapsíveis brasileiros. Os altos valores de índices de vazios e porosidade superior a 40% caracterizam as amostras como macroporosa e representam uma tendência a colapsividade, assim como os baixos valores do grau de saturação (inferior a 60%) e teor de umidade natural. Os resultados do grau de saturação das amostras demonstram o caráter não saturado dos solos em estudo. As amostras, CHAPADA Intermediária e CHAPADA Abaixo, apresentam maior índice de vazios, portanto, tendem a apresentar um potencial de colapso superior as amostras CAZ Intermediária e CAZ abaixo, que apresentam um menor índice de vazios.

Tabela 4.2: Limites de Consistência das amostras em estudo.

Amostra	W_L (%)	W_P (%)	IP (%)
CHAPADA Intermediária	26	19	7
CHAPADA Abaixo	27	19	8
CAZ Intermediária	24	18	6
CAZ Abaixo	33	24	9

Os valores encontrados para os Limites de consistência, apresentados na Tabela 4.2, estão dentro das variações apresentadas pelos estudos de solos colapsíveis brasileiros de Rodrigues e Lollo (2008). Os dados de limite de liquidez (inferior a 45%) e índice de plasticidade (inferior a 20%) dos solos estudados são característicos de solos colapsíveis. Analisando-se as características de plasticidade, verifica-se que os solos apresentam valores de índice de plasticidade (IP) entre 7 e 15, o que os classificam como mediamente plásticos.

4.2 ENSAIO EDMÉTRICO SIMPLES (EDS)

A figura 4.1 mostra os resultados obtidos através dos Ensaio Edométrico Simples para as amostras em estudo.

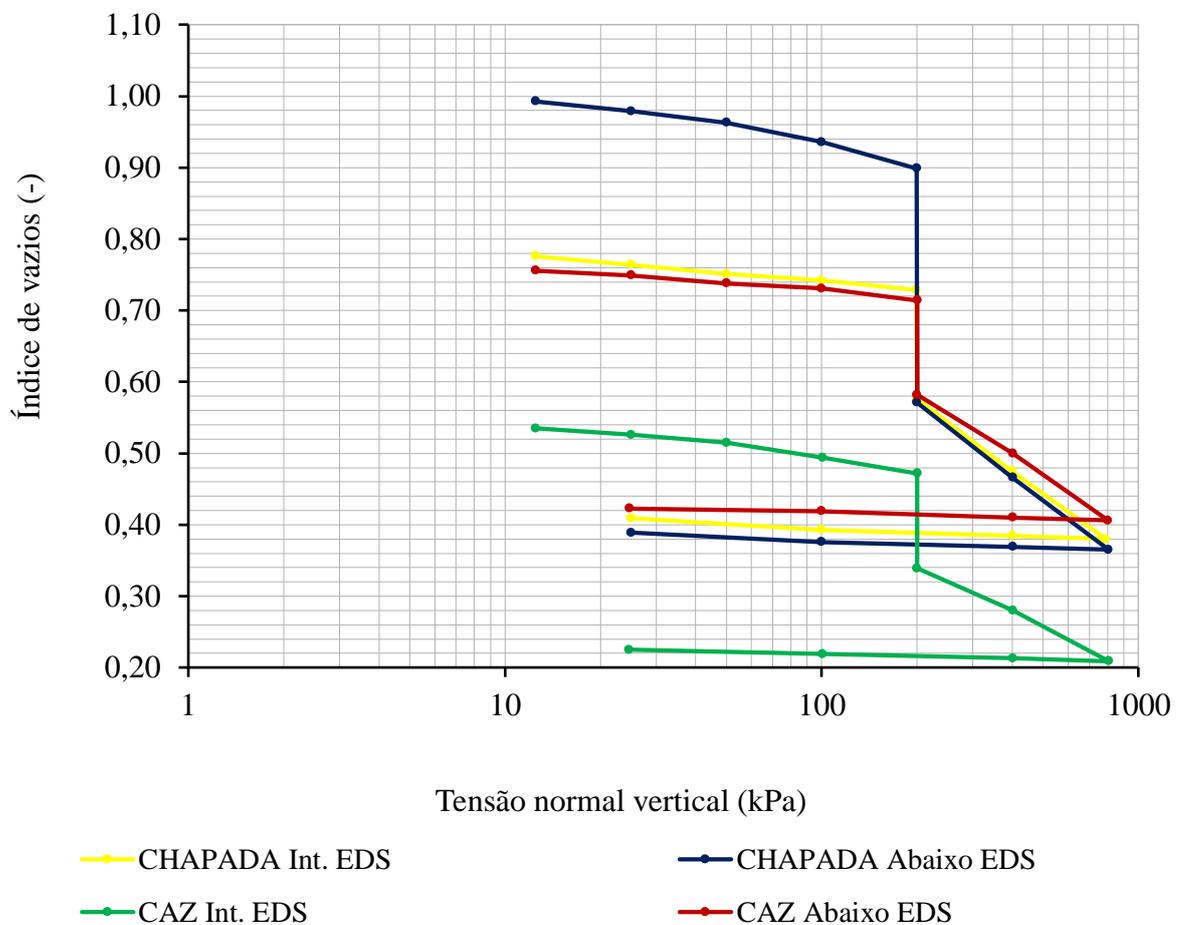


Figura 4.1: Curvas de Compressibilidade – EDS

4.3 CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE DAS AMOSTRAS INUNDADAS E NÃO SATURADAS

A figura 4.2 mostra as curvas de compressibilidade das amostras inundadas e não saturadas estudadas.

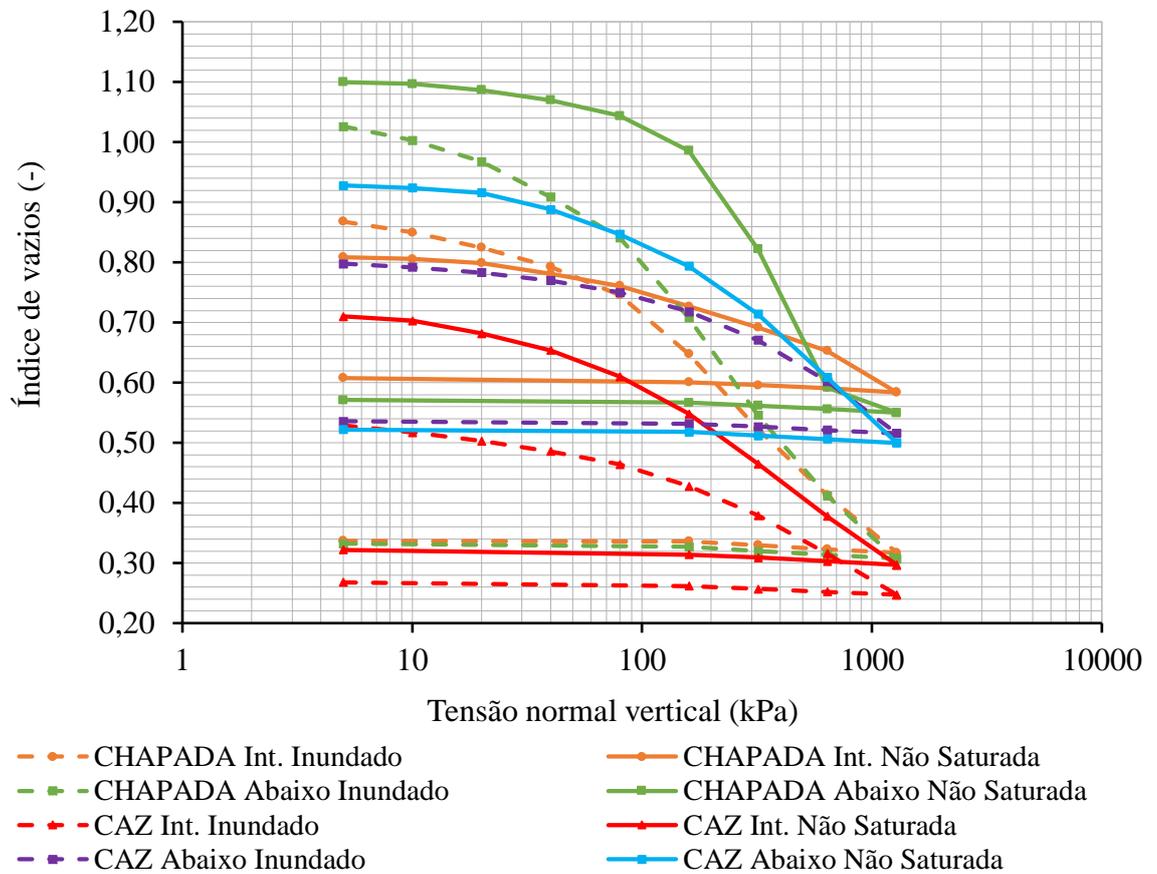


Figura 4.2: Curvas de Compressibilidade – EDD

4.4 ANÁLISE DO POTENCIAL DE COLAPSO DAS AMOSTRAS DE SOLO ESTUDADA

- **Classificação da colapsibilidade do solo através dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.**

A análise qualitativa do potencial de colapso das amostras em estudo baseou-se nos índices físicos (Tabela 4.1), limites de consistência (Tabela 4.2) e expressões 2.4, 2.6 e 2.7 apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 4.3: Análise do potencial de colapso – Métodos Indiretos

Amostra	Feda (1966)		Priklonskij (1952)		Gibbs e Bara (1966)	
	<i>Kl</i>	Classificação	<i>Kd</i>	Classificação	<i>R</i>	Classificação
CHAPADA Intermediária	1,67	Solos Colapsíveis	3,41	Solos Expansivos	1,18	Colapsível
CHAPADA Abaixo	2,64	Solos Colapsíveis	2,82	Solos Expansivos	1,47	Colapsível
CAZ Intermediária	0,96	Solos Colapsíveis	3,42	Solos Expansivos	0,99	Não Colapsível
CAZ Abaixo	0,6	Solos Colapsíveis quando saturados	2,54	Solos Expansivos	0,89	Não Colapsível

O critério de Feda (1966) se aplica apenas para solos com grau de saturação inferior a 60%, deste modo, pode-se aplicar o critério para todas as amostras em estudo. Ao analisar a Tabela 4.3 pode-se observar que todas as amostras constam com classificação de solos colapsíveis, com exceção do CAZ Abaixo que foi classificado como solos colapsíveis quando saturados por possuir $Kd < 0,85$. Entretanto, Bianchi & Ramos (2013) identificaram em sua pesquisa que o critério de FEDA considera um alto fator de segurança, onde classifica solos como colapsíveis mesmo quando apresentam potencial de colapso baixo.

A partir da análise da Tabela 4.3 nota-se que os resultados, obtidos pelo método de Priklonkij (1952), classificam os solos como expansivos, ou seja, não apresentam caráter colapsível. O critério de Priklonskij (1952) não se aplica para os solos em estudo pois apresentam classificação contrária com a realidade. Bianchi & Ramos (2013); Feuerharmel (2003); Moraes *et al.* (2019) e Muti (2019) apresentam em seus estudos que esse critério não é indicado para identificar solos colapsíveis, também, devido a incompatibilidade das classificações com a realidade dos solos estudados.

A Tabela 4.3 também apresenta a classificação dos solos estudados a partir do critério de Gibbs e Bara. As amostras CHAPADA Intermediária e CHAPADA abaixo foram identificadas como colapsíveis, enquanto, as amostras CAZ Intermediária e CAZ abaixo como Não colapsível.

Vale ressaltar que os critérios baseados nos índices físicos e limites de consistência não levam em consideração o tipo de estrutura, o tipo de cimentação e as tensões que atuam no solo (HOUSTON *et al.*, 1998 *apud* AGNELLI, 1997). Esses critérios são uteis para uma indicação preliminar do potencial de colapso do solo e devem ser utilizados com cautela. Para uma maior segurança na análise do comportamento dos solos é necessário utilizar métodos que além de

identificá-los como colapsíveis possam mensurar o valor do potencial de colapsibilidade. Assim, os ensaios edométricos simples e duplos permitem uma identificação e quantificação da colapsibilidade de um solo através de critérios como o de Jennings e Knight, Vargas e Reginatto e Ferrero.

- Classificação da colapsibilidade do solo através dos resultados do Ensaio Edométrico Simples.

Para as análises do potencial de colapso, segundo os métodos de Jennings e Knight (1975) e Vargas (1978), utilizou-se o índice de vazios correspondente a tensão de 200 kPa e a variação do índice de vazios devido a inundação.

Os resultados apresentados nas Tabela 4.4 mostram que as amostras de solo estudadas apresentam comportamento problemático, segundo critério de Jennings e Knight e possuem potencial colapsível conforme critério de Vargas. A amostra CHAPADA Abaixo apresentou maior potencial de colapso, o que pode ser justificado por também ser a amostra que apresentou o índice de vazios mais elevado, quando comparada com as outras amostras.

Tabela 4.4: Análise do potencial de colapso – Métodos Diretos

Amostra	Dados do solo			PC (%)	Classificação	
	e_i	e_{fi}	Δe		Jennings e Knight (1975)	Vargas (1978)
CHAPADA Intermediária	0,73	0,58	0,15	8,80	Problemático	Colapsível
CHAPADA Abaixo	0,9	0,57	0,33	17,30	Problemático	Colapsível
CAZ Intermediária	0,47	0,34	0,13	9,10	Problemático	Colapsível
CAZ Abaixo	0,71	0,58	0,13	7,70	Problemático	Colapsível

A Tabela 4.5 apresenta um comparativo do índice de vazios e umidade inicial e final do Ensaio Edométrico Simples dos solos em estudo.

Tabela 4.5: Índice de vazios inicial, final e potencial de colapso das amostras em estudo.

Amostra	Dados Iniciais		Dados Finais		PC (%)
	w_n (%)	e_0	w_f (%)	e_f	
CHAPADA Intermediária	2,23	0,78	18,78	0,38	8,80
CHAPADA Abaixo	5,06	1,01	18,66	0,36	17,30
CAZ Intermediária	4,41	0,60	14,72	0,21	9,10
CAZ Abaixo	9,58	0,77	18,43	0,41	7,70

Pode-se observar na Tabela 4.5 que o maior potencial de colapso ocorreu na amostra CHAPADA Abaixo que possui o índice de vazios inicial mais elevado quando comparado com as outras amostras. Observa-se, também, a expressiva variação de umidade e índice de vazios que ocorreu em todas as amostras após o ensaio realizado.

- Classificação da colapsibilidade do solo através dos resultados do Ensaio Edométrico Duplo.

Na Tabela 4.6 estão apresentados o índice de vazios iniciais e finais dos corpos de prova com umidade natural e inundada dos ensaios apresentados na Figuras 4.2. Pode-se observar que o índice de vazios variou em todas as amostras, tanto para os ensaios realizados nas condições de umidade natural e inundada. Observa-se, também, que os índices de vazios diminuíram, e as amostras subjacentes variaram mais do que as amostras mais superficiais.

Tabela 4.6: Índice de vazios iniciais e finais dos EDD para as amostras em condição inundada e natural.

Amostra	Amostra Inundada			Amostra não saturada		
	Condições iniciais			Condições finais		
	e_0	e_f	Δe	e_0	e_f	Δe
CHAPADA Intermediária	0,869	0,337	0,532	0,809	0,608	0,201
CHAPADA Abaixo	1,026	0,332	0,694	1,100	0,571	0,529
CAZ Intermediária	0,529	0,268	0,261	0,710	0,322	0,388
CAZ Abaixo	0,798	0,536	0,262	0,928	0,522	0,406

A Tabela 4.7 apresenta as deformações máximas sofridas para as condições natural e inundada, na máxima tensão aplicada. Na condição de ensaio de umidade natural e inundada, a amostra CHAPADA Abaixo apresentou um maior valor de deformação que a amostra CHAPADA Intermediária, ou seja, a camada subjacente está mais propícia a sofrer deformações em ambas as situações. Ao contrário das amostras da CHAPADA, a amostra CAZ intermediária apresenta maior deformação que a amostra CAZ Abaixo, em ambas as condições, natural e inundada. Ou seja, a camada mais superficial está mais propícia a sofrer deformações.

Tabela 4.7: Variação máxima de deformação para a tensão vertical de 1280 kPa

Amostra	Amostra Inundada	Amostra Não Saturada
	Def. Vertical (%)	Def. Vertical (%)
CHAPADA Intermediária	30,47	12,66
CHAPADA Abaixo	35,90	26,31
CAZ Intermediária	19,46	24,48
CAZ Abaixo	16,67	22,41

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os resultados da tensão de pré-adensamento e os parâmetros de compressibilidade do solo (C_c e C_r), obtidos através das curvas de compressibilidade das amostras inundadas e não saturadas, respectivamente. Para obter a tensão de pré-adensamento utilizou-se os métodos de Casagrande e Pacheco Silva.

Tabela 4.8: Parâmetros de compressibilidade dos solos na condição inundada.

Amostra	Tensão de Pré-Adensamento		Parâmetros de Compressibilidade	
	Casagrande (1936) (kPa)	Pacheco Silva (1970) (kPa)	C_c	C_r
CHAPADA Intermediária	64	56	0,370	0,095
CHAPADA Abaixo	55	59	0,448	0,100
CAZ Intermediária	96	106	0,254	0,043
CAZ Abaixo	150	175	0,256	0,033

Tabela 4.9: Parâmetros de compressibilidade dos solos na condição natural

Amostra	Tensão de Pré-Adensamento		Tensão Atuante (σ_{vo}) (kPa)	Parâmetros de Compressibilidade	
	Casagrande (1936) (kPa)	Pacheco Silva (1970) (kPa)		C_c	C_r
CHAPADA Intermediária	46	48	7,44	0,113	0,050
CHAPADA Abaixo	130	157	19,82	0,681	0,063
CAZ Intermediária	52	69	7,36	0,289	0,066
CAZ Abaixo	130	155	19,50	0,366	0,066

Pode-se identificar na Tabela 4.9 que as tensões de pré-adensamento, identificadas pelo método de Casagrande e Pacheco Silva, são maiores que as tensões atuantes, portanto, os solos em estudo são classificados como pré-adensados.

A Tabela 4.10 apresenta a classificação quanto a colapsibilidade dos solos utilizando o método de Reginatto e Ferrero (1973) e o método de Pacheco Silva para obtenção das Tensões de Pré-Adensamento. Pode-se verificar que ambas as amostras são classificadas como solos condicionado ao colapso ($\sigma_{vps} > \sigma_{vo}$ e $0 < C > 1$), pelo método de Reginatto e Ferrero (1973). Ou seja, ocorrerá colapso quando existir tensão externa, além do aumento da umidade.

Tabela 4.10: Classificação quanto a colapsibilidade dos solos segundo a proposta de Reginatto e Ferrero (1973)

Amostra	σ_{vps} (kPa)	σ_{vpn} (kPa)	σ_{vo} (kPa)	C	Classificação
CHAPADA Intermediária	56	48	7,44	1,20	Solo condicionado ao colapso
CHAPADA Abaixo	59	157	19,82	0,29	Solo condicionado ao colapso
CAZ Intermediária	106	69	7,36	1,60	Solo condicionado ao colapso
CAZ Abaixo	175	155	19,50	1,15	Solo condicionado ao colapso

A Tabela 4.11 apresenta um resumo da análise do potencial de colapso obtido através dos ensaios realizados.

Tabela 4.11: Resumo da análise do potencial de colapso

Amostra	Métodos Indireto			Métodos Direto		
	Prikloński	FEDA	Gibbs e Bara	Jennings e Knight	Vargas	Reginatto e Ferrero
CHAPADA Intermediária	Solos Expansivos	Solos colapsíveis	Colapsível	Problemático	Colapsível	Condicionado ao colapso
CHAPADA Abaixo	Solos Expansivos	Solos colapsíveis	Colapsível	Problemático	Colapsível	Condicionado ao colapso
CAZ Intermediária	Solos Expansivos	Solos colapsíveis	Não Colapsível	Problemático	Colapsível	Condicionado ao colapso
CAZ Abaixo	Solos Expansivos	Solos Colapsíveis quando saturados	Não Colapsível	Problemático	Colapsível	Condicionado ao colapso

4.5 MAPA DE LOCAIS AFETADOS POR SOLOS COLAPSÍVEIS NO BRASIL

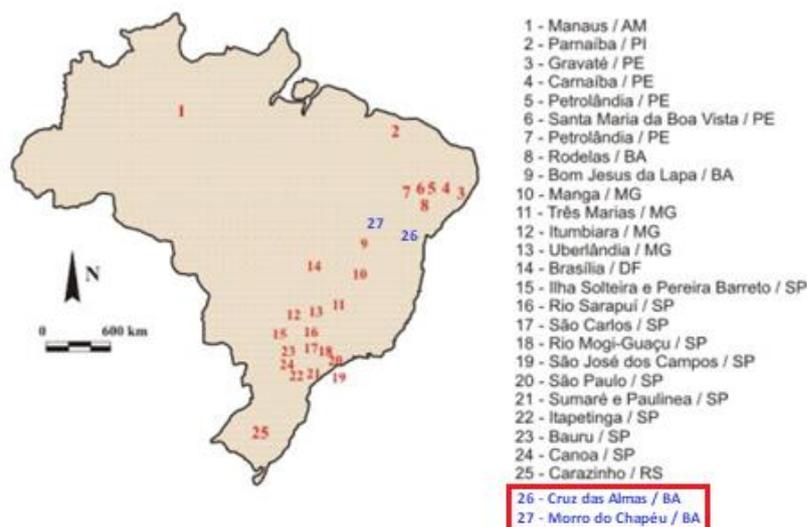


Figura 4.9: Identificação de locais afetados por solos colapsíveis
 Fonte: Modificado de Ferreira e Lacerda (1993) *apud* Silva (2006).

Com os resultados obtidos dos solos estudados do município de Cruz das Almas e Morro do Chapéu, foram identificados como sendo solos potencialmente colapsíveis até a profundidade estudada.

5. CONCLUSÕES

Os índices físicos e limites de consistência encontrados para as amostras de solos estudadas nesta pesquisa apresentaram valores dentro do limite dos solos identificados com potencial de colapsibilidade na literatura. Os resultados obtidos através do critério de Prikloňskj (1952) foram inconsistentes para ambas as amostras, a literatura também ressalta a incoerência desse critério. O critério de Feda (1966) apresentou compatibilidade para ambas as amostras, enquanto o critério de Gibbis e Bara (1967) apresentou compatibilidade apenas para as amostras de Morro do Chapéu, identificadas como Chapada Intermediária e Chapada Abaixo. As inconsistências encontradas através do Método Indireto representam a necessidade de cautela em sua aplicação. Com intuito de se garantir uma maior confiabilidade e segurança dos resultados obtidos, uma investigação mais criteriosa a respeito do comportamento do solo, deve ser complementada, com outros métodos.

Ambos os critérios adotados no método direto, Jennings e Knight (1975) e Vargas (1978), apontam potencial de colapsibilidade para as amostras ensaiadas, sendo classificadas como solos problemáticos e colapsíveis, respectivamente.

O critério de Reginatto e Ferrero (1973) classificou os solos estudados como sendo solos condicionados ao colapso, onde, necessitam do aumento de tensões aplicadas e umedecimento para deflagrar o colapso.

Portanto, os municípios do Estado da Bahia, Cruz das Almas e Morro do Chapéu, apresentaram solos com comportamento potencialmente colapsível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 6508**: Massa específica dos grãos dos solos. Rio de Janeiro, 8 p., 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 8 p., 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p., 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 12007**: Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 15 p., 1984.

AGNELLI, N. **Comportamento de um solo colapsível inundado com líquidos de diferentes composições químicas**. 1997. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

ALMEIDA, R. O. **Estudo geotécnico e análise de estabilidade da encosta Bela Vista no município de Ipojuca-PE**. 2016. 183f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

BIANCHI, L. H.; RAMOS, M. S. **Correlações com parâmetros de colapsibilidade de um solo da região de Campinas/SP**. 2013. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BORGES, J. J. S. **Avaliação do módulo de elasticidade, resistência de ponta e variação de volume em campo com e sem inundação em solo colapsível**. 2016. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

BORGES, J. J. S., TORRE, M. S., VERÍSSIMO, K. J. S., FREITAS, M. L. A. A., & FERREIRA, S. R. M. **Estudo do efeito da inundação na variação de volume, na resistência de ponta e no módulo de elasticidade de um solo colapsível do Semiárido de Pernambuco**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21(4), 996-1011. (2016).

CAMPOS, G. C.; SANTOS, F. S. **Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho - Rondônia: impactos em Habitações Populares**. *Revista Ipt Tecnologia e Inovação: Artigos Técnicos*, [s.l.], v. 3, n. 11, p. 22-34, ago. 2019. Mensal. *Revista IPT: Tecnologia e Informação*. <http://dx.doi.org/10.34033/2526-5830>.

CARVALHO, J. C. *et al* (org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759 p.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1995. **Projeto Mapas Municipais Município de Morro do Chapéu (BA): informações básicas para o planejamento e administração do meio físico**. 3v. Salvador. P. 286, 1995.

DAVIES, G. I. **Análise e modelagem do comportamento colapsível de um solo arenoso**. 2000. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

FERREIRA, J. A. C. **Melhoramento de Solos Colapsíveis para suporte de Fundações Superficiais: Análise de um estudo de caso**. 2017. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2017.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre. (2003).

FREITAS, M. C. **Avaliação de Técnica de Melhoria de Solos Colapsíveis por Meio de Colunas de Solo Laterítico Compactado**. 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

FUTAI, M. M. **Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsíveis**. 1997. 255 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

GONÇALVES, R. L. **Estudo do comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível da região de Londrina/PR**. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Curso de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

GUTIERREZ, N. H. M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná**. 311 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

LOLLO, J. A. (org.). **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2008. 262 p.

KALANTARI, B. Foundations on collapsible soils: A review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering. 166, 2013. 57-63.

LIMA, A. V. **Morfologia e Mineralogia de Solos Coesos e Não Coesos Oriundos de Sedimentos Cenozóicos no Estado da Bahia**. 2020. 38 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrônoma, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2020.

LOURO, C. F., SOARES, F. T., RIBEIRO, K. F. A. **Utilização de Expansocolapsômetro na Determinação do Colapso no Solo de Rondonópolis – MT**. COBRANSEG, 9 p.

MARIZ, D.F. & CASANOVA, F.J. **Alguns aspectos relevantes no mecanismo de colapso de solos do Planalto Central**. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2, Recife. Anais..., p. 129-134, 1994.

MEDERO, G.M. **Comportamento de um solo colapsível artificialmente cimentado**. 2005. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MORAES, S. C. J. de *et al.*, **Análise da colapsibilidade de um solo do município de São Carlos-SP inundado com água e com gasolina**. REGEO, 8 p. 2019.

MOTTA, E.Q. **Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

MUTI, J. M. **Avaliação do potencial de colapsibilidade de dois solos do município de Cruz das Almas-BA através de métodos diretos e indiretos**. 37 p. 2019.

RIBEIRO JUNIOR, I. **Estudo de Caso de um Melhoramento de Solos Colapsíveis com Compactação**. COBRAMSEG, 8 p. (2010).

RODRIGUES, M. G. F. *et al.*, **Solos e suas relações com as paisagens naturais do município de Cruz das Almas – BA**. In: REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA. v. 9, n2. 2º Semestre 2009.

RODRIGUES, R. A.; LOLLO, J. A. Características dos Solos Colapsíveis; Identificação dos solos Colapsíveis. In: LOLLO, José Augusto de (org.). **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2008. p. 59-72; 129-153.

SALES, L. F. P. **Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos Tratados**. 1998. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Curso de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SEGANTINI, A. A. S. Consequências do Processo de Colapso. In: LOLLO, José Augusto de (org.). **Solos Colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2008. p. 119-128.

SILVA, J. D. **Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo Fluxo de contaminantes**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Brasília-DF, 2006.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um Solo Colapsível Avaliado a partir de Ensaios de Laboratório e Campo, e Previsão de Recalques devidos à Inundação (Colapso)**. 2004. 432 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

TEIXEIRA, M. M. C. A. D. **Modelagem Hidro-Mecânica dos Solos Colapsíveis de Petrolândia**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

VILAR, O. M., FERREIRA, S. R. M., “Solos colapsíveis e expansivos”, In: Solos não saturados no contexto geotécnico, 1 ed., capítulo 15, São Paulo, ABMS, 2015.