



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**ISABELA AUGUSTO SILVEIRA**

**ESTUDO DA COLAPSIBILIDADE EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES  
DE COMPACTAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO NÃO SATURADO**

Bauru  
2019

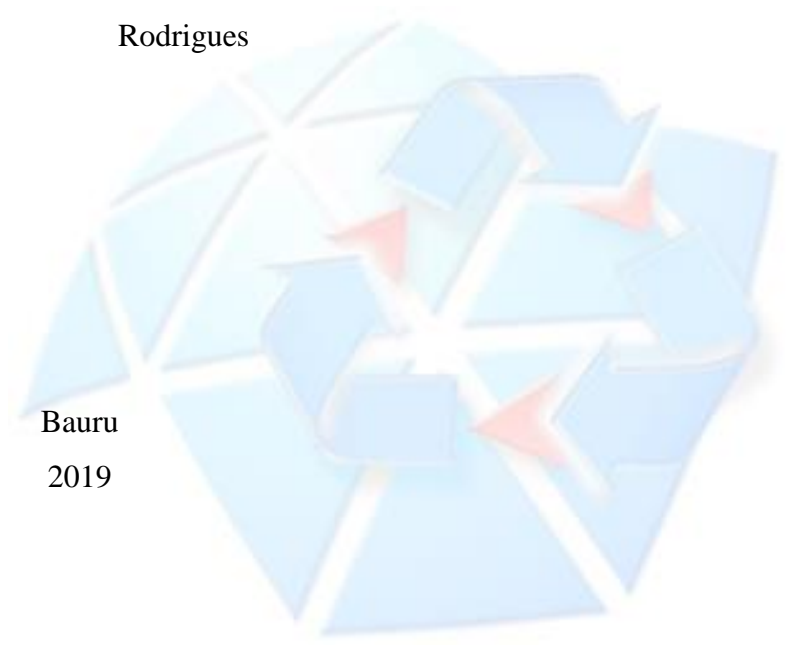


**ISABELA AUGUSTO SILVEIRA**

**ESTUDO DA COLAPSIBILIDADE EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES  
DE COMPACTAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO NÃO SATURADO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues



Bauru  
2019

Silveira, Isabela Augusto.

Estudo da colapsibilidade em função das condições de compactação de um solo arenoso não saturado/  
Isabela Augusto Silveira, 2019

72 f. : il.

Orientador: Roger Augusto Rodrigues

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Solos não saturados. 2. Solos colapsíveis. 3. Compactação. 4. Sucção. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

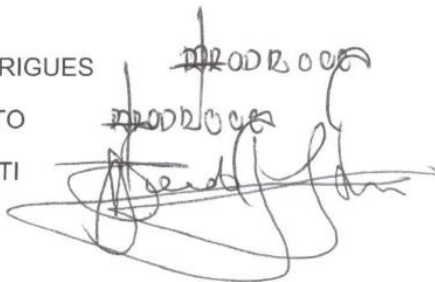
**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ISABELA AUGUSTO SILVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 29 dias do mês de agosto do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Dr. MIGUEL ANGEL ALFARO SOTO do(a) FUNDUNESP / Fundação para o Desenvolvimento da UNESP, Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ISABELA AUGUSTO SILVEIRA, intitulada **Avaliação do colapso em função das condições de compactação de um solo arenoso não saturado**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES

Dr. MIGUEL ANGEL ALFARO SOTO

Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI



- PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:  
**ISABELA AUGUSTO SILVEIRA**

DE: "AVALIAÇÃO DO COLAPSO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COMPACTAÇÃO DE UM SOLO  
ARENOSO NÃO SATURADO"

PARA:

estudo da colapsibilidade em função das condições  
de compactação de um solo arenoso não saturado.

Bauru, 29 de agosto de 2019.

*Rodrigues*

Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues  
Orientador

**Aos meus pais Luiz Elias e Rosângela**  
**À minha irmã Marina**

## AGRADECIMENTOS

*Aos meus pais, Rosângela e Luiz que me apoiam incondicionalmente e sempre me incentivam na busca de meus sonhos;*

*À minha irmã Marina, meu exemplo de vida e inspiração; and to Steve, for being a great brother-in-law and always willing to help;*

*À minha família, em especial às minhas avós Anita e Odete, que sempre foram exemplo de resiliência e força diante das adversidades;*

*Aos meus padrinhos: Fernanda e Valmir, Tatá e Guto, pelo zelo e torcida;*

*Ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues pela orientação, confiança e conhecimento compartilhado;*

*Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti pela amizade, conselhos e ensinamentos;*

*Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental e a todos os professores que tive durante minha caminhada escolar, esta honrosa profissão me inspirou a ser quem sou hoje;*

*Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos, Gustavo e Sérgio pelas instruções, dedicação e paciência, exercendo um trabalho exemplar no Laboratório;*

*Aos amigos da pós: Amanda, André, Alfredo, Breno, Diego, Heber, Jhaber, Júnior, Marcela e Tamara, por todos os momentos de descontração, cafés e risadas;*

*À Elenice e José Roberto, minha família de coração;*

*Aos amigos de longa caminhada;*

*Aos meus primos, Carol, Júlia, Juliana, Ana Laura, Nathália, Clara, Cauê e Alécio;*

*À Camila, por toda ajuda prestada, mas principalmente pela companhia e amizade;*

*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida a qual tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.*

## RESUMO

SILVEIRA, I. A. **Estudo da colapsibilidade em função das condições de compactação de um solo arenoso não saturado**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2019.

Solos colapsíveis apresentam deformações volumétricas bruscas quando umedecidos sem que haja variação da tensão atuante. Técnicas para redução ou mitigação dos recalques devido ao colapso podem ser utilizadas, das quais se destaca a compactação. Diversos trabalhos a respeito de solos não saturados compactados são encontrados no meio técnico, no entanto, poucos têm abordado o uso da compactação como método de melhoria dos solos colapsíveis, especialmente usando os conceitos próprios dos solos não saturados, como o efeito da sucção após a compactação. Desta forma, o propósito desta dissertação é estudar o comportamento colapsível de um solo arenoso compactado variando-se o grau de compactação, a umidade de compactação, a sucção inicial e a tensão de inundação. Os graus de compactação e as umidades de moldagem foram definidos considerando situações de obras cujo controle inadequado da compactação pode levar a problemas relacionados ao colapso, seja por deficiência de densidade ou desvio da umidade ótima. Ensaio edométrico convencionais com determinação de sucção pela técnica do papel filtro e ensaios edométricos com sucção controlada foram conduzidos para este fim. Os resultados experimentais demonstraram a influência das variáveis estudadas no colapso do solo, onde o solo foi mais afetado pelo umedecimento quando compactado com menor grau de compactação, apresentando colapso expressivo em tensões relativamente baixas. A depender da umidade de moldagem, igual à ótima ou mais seca que à ótima, o potencial de colapso teve magnitude e comportamento distinto na faixa de tensão analisada. Os resultados também demonstraram que o potencial de colapso dos solos com menor grau de compactação foi mais afetado por variações na sucção inicial. De forma geral, esta abordagem contribuiu para o entendimento do mecanismo e os parâmetros que regem o colapso nos solos compactados.

Palavras-chave: solo não saturado, solos colapsíveis, compactação, sucção.

## **ABSTRACT**

**SILVEIRA, I. A. Collapsibility study as a function of the compaction conditions of an unsaturated sandy soil.** 2019. Thesis (Master Degree) – School of Engineering, Bauru, São Paulo State University (UNESP), 2019.

Collapsible soils exhibit abrupt volumetric deformations upon wetting without variations of the applied stresses. Techniques for reduction or even mitigation the settlements due to collapse can be used, standing out the compaction process. There are several studies about compacted unsaturated soil. Although few studies are concentrated on the use of compaction as a method to improve the features of collapsible soils, especially using the unsaturated soil concepts, as the effect of suction after compaction. In this regard, this works aims to study the collapsible behavior of a compacted sandy soil varying the relative compaction, the as-compacted water content, the initial suction and the inundation stress. The relative compaction and the water content were defined considering situation which the inappropriate control of the design compaction parameters could lead to problems related to collapse, either due to density deficiency or deviation from optimum water content. Conventional oedometer tests with determination of suction via filter paper method and suction-controlled oedometer tests were performed for this purpose. The experimental results showed the influence of the study variables at the soil collapse. The soil was more affected by wetting when compacted with low relative compaction, showing significant collapse potentials at relatively low stresses. Depending on the water content, equal to the optimum or drier than the optimum water content, the collapse potential had distinct magnitude and behavior in the analyzed stresses. The results also demonstrated that the collapse potential of the lower compacted soils was more affected by variations in the initial suction. Overall, this approach contributed to the understanding of the mechanism and the parameters governing collapse in compacted soils.

Key-words: unsaturated soil, collapse, compacted soil, suction.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	3
1.2. JUSTIFICATIVA .....	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. SOLOS NÃO SATURADOS E SUCÇÃO .....	5
2.2. SOLOS COLAPSÍVEIS .....	8
2.3. COMPACTAÇÃO EM SOLOS COLAPSÍVEIS .....	11
2.3.1. <i>Mitigação e melhoria de solos colapsíveis</i> .....	11
2.3.2. <i>Teoria da compactação e solos colapsíveis compactados</i> .....	13
<b>CAPÍTULO 3 - LOCAL DE ESTUDO E HISTÓRICO DE INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS.....</b>	<b>16</b>
3.1. LOCAL DE ESTUDO: ILHA SOLTEIRA .....	16
3.2. HISTÓRICO DE INFORMAÇÕES .....	17
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA E COMPACTAÇÃO .....	23
4.2. ENSAIO EDOMÉTRICO CONVENCIONAL SIMPLES .....	24
4.3. ENSAIO EDOMÉTRICO COM SUCÇÃO CONTROLADA .....	26
4.4. TÉCNICA DO PAPEL FILTRO .....	30
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>32</b>
5.1. ENSAIO EDOMÉTRICO CONVENCIONAL SIMPLES .....	32
5.2. PAPEL FILTRO .....	40
5.3. ENSAIOS EDOMÉTRICOS COM SUCÇÃO CONTROLADA.....	42
5.4. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INVESTIGADAS .....	45
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Diversas situações práticas da geotecnia estão associadas com o uso de solo compactado na condição não saturada, como aterros, fundações e estradas. A compreensão do comportamento de solos compactados é particularmente complexa, visto que há a coexistência de três diferentes fases: sólida, líquida e gasosa, que interagem entre si. Assim, a análise hidromecânica destes solos é uma fronteira na Mecânica dos Solos não Saturados.

Recentemente, pesquisas estão direcionadas para o estudo de solos compactados considerando-se seu comportamento frente sua condição de não saturação, como é o caso de abordagens experimentais variando-se as condições de compactação (GAO et al., 2019; KIM; HWANG; KIM, 2018), abordagens numéricas (WHEELER; SIVAKUMAR, 2000; KODIKARA, 2012; ZHOU; SHENG, 2015) e abordagens quanto à estrutura do solo compactado (ALONSO; PINYOL; GENS, 2013; NG et al., 2016).

Em um solo compactado, o comportamento geotécnico do material depende da massa específica seca, da umidade de compactação e da sucção atuante, dentre outros fatores (ALONSO; PINYOL; GENS, 2013), onde a sucção é considerada uma variável de estado independente do solo não saturado (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977).

Dos problemas relacionados aos solos não saturados, o colapso é um dos principais. Este pode ser compreendido como uma deformação causada pelo umedecimento do solo sem que haja grande variação das cargas aplicadas. A colapsibilidade não inviabiliza que obras de engenharia sejam diretamente apoiadas nestes solos. Na literatura, são descritas técnicas para reduzir ou mitigar os efeitos dos recalques de colapso em solos colapsíveis (e.g. GARAKANI et al., 2018; HOUSTON et al., 2001; KAMPALA; HORPIBULSUK, 2013; ROLLINS K. M.; ROGERS G. W., 1994) das quais destaca-se a compactação, que resulta na melhoria das propriedades dos solos.

Diversos trabalhos que tratam de estudos de solos não saturados compactados são encontrados no meio técnico. Porém, poucos trabalhos têm abordado o uso da compactação como método de melhoria dos solos colapsíveis (e.g. BOOTH, 1975; HOUSTON et al., 2001; VILAR; GAIOTO, 1994), especialmente usando os conceitos

próprios da Mecânica dos Solos não Saturados, como o efeito da sucção atuante após a compactação (e.g. RAO; REVANASIDDAPPA, 2000; SUN; SHENG; XU, 2007).

A compactação é uma técnica de baixo custo que se for rigorosamente realizada pode diminuir e até eliminar os efeitos da colapsibilidade (ROLLINS; KIM, 2010; VILAR; GAIOTO, 1994). No entanto, solos com deficiências de compactação podem apresentar problemas de colapso em função da massa específica seca atingida, umidade de compactação, sucção atuante e tensão na qual ocorre a inundação (RAO, S. M.; REVANASIDDAPPA, K., 2000; SURIOL; GENS; ALONSO, 2002).

Geralmente em obras de pequeno porte não há controle adequado do processo de compactação, podendo conduzir a danos estruturais em decorrência da deformação volumétrica devido ao colapso do solo. Métodos expeditos, como aquele proposto por Vilar e Rodrigues (2015), indicam que a fronteira da classificação entre solo colapsível e solo não colapsível ocorre para o grau de compactação de 90% na umidade ótima, sem considerar outras variáveis, como tensão de inundação e sucção atuante.

Assim, a presente pesquisa é uma oportunidade de estudar o comportamento colapsível de um solo compactado sob a ótica da Mecânica dos Solos Não Saturados, por meio de ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada. As variáveis de interesse para avaliar o comportamento colapsível do solo frente à compactação foram o grau de compactação, umidade de compactação, sucção inicial e tensão de inundação. A aplicação deste estudo é direcionada para os casos de obras cuja deficiência na compactação pode conduzir a problemas de recalques em decorrência de deformações por colapso.

## 1.1. OBJETIVOS

São objetivos desta pesquisa:

- Estudar o comportamento colapsível de um solo arenoso compactado variando-se os graus de compactação, as umidades de compactação e as tensões de inundação, por meio de ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada;
- Verificar a influência da sucção inicial no comportamento colapsível de um solo compactado.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Nesta pesquisa buscou-se estudar o comportamento colapsível de um solo arenoso do interior de São Paulo quando compactado variando-se as condições de compactação. A pesquisa buscou compreender os mecanismos do colapso à luz da Mecânica dos Solos Não Saturados em um solo compactado, para isto, a consideração da sucção no comportamento colapsível do solo compactado foi considerada e avaliada.

A temática de solos não saturados colapsíveis pode ser mais bem explorada considerando a técnica da compactação. Trata-se de um tema de grande relevância, pois permite estudar uma prática comum na engenharia, cujas bases remetem à Mecânica dos Solos clássica e pode ser estendida para avaliar o comportamento de um solo não saturado. Além disto, na prática, são inúmeros os exemplos de construções que apresentam problemas relacionados ao colapso devido à má compactação do solo, seja por deficiência de densidade (isto é, baixa massa específica seca) e/ou excesso de umidade.

Esta abordagem busca contribuir para o entendimento do mecanismo de colapso dos solos compactados e como a sucção influencia na ocorrência do fenômeno, além de ser uma oportunidade de se estudar os parâmetros que regem o colapso. Portanto, a motivação principal e a justificativa que fundamenta esta pesquisa refere-se ao contexto em que o tema proposto está inserido no cenário científico.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O texto foi dividido em seis capítulos e o conteúdo de cada capítulo é apresentado brevemente.

No Capítulo 1 são introduzidos conceitos básicos que permeiam todo o trabalho e também é apresentado o objetivo desta pesquisa e a justificativa de fazê-la.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica acerca o contexto e informações básicas da Mecânica dos Solos Não Saturados, bem como a definição de sucção, variável de estado amplamente discutida ao longo do trabalho. Como objeto de estudo desta dissertação, foi também introduzido conceitos básicos de solos colapsíveis e a técnica de compactação como método de mitigação de colapso.

No Capítulo 3 são apresentadas as características do local de estudo e o histórico de informações geotécnicas disponíveis para o solo estudado. Os dados lá apresentados foram importantes para condução do programa experimental desta pesquisa.

O Capítulo 4 é dedicado ao detalhamento do programa experimental, os ensaios desenvolvidos e as bases teóricas de tais ensaios.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais dos ensaios conduzidos, bem como uma discussão a respeito das variáveis de estudo na colapsibilidade do solo compactado.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. SOLOS NÃO SATURADOS E SUCCÃO

Desde o seu primórdio, a Mecânica dos Solos clássica desenvolveu seus fundamentos com base nas características dos solos saturados e secos. O impasse para o desenvolvimento inicial das teorias que concernem os solos não saturados pode ter sido reflexo das formações saturadas, que são favorecidas pelo clima temperado da região na qual a Mecânica dos Solos inicialmente evoluiu; e ainda, a aceitação do princípio de tensões efetivas e de que a condição saturada tende a ser mais crítica (VILAR, 2004).

Tem-se que os solos não saturados diferenciam dos saturados pela ocorrência da sucção. Uma das formas de definir a sucção atuante nos poros do solo não saturado é através da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo, cujos conceitos são embasados na termodinâmica. Manipulações matemáticas e físicas dos princípios de trabalho e energia livre de Gibbs levam a definição da equação psicrométrica:

$$\Psi = \frac{-RT}{V_w M_w} \ln \left( \frac{p_v}{p_{vs}} \right) \quad (1)$$

Em que:  $R$  é a constante dos gases ideais ( $8,3143 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ );  $T$  é a temperatura absoluta ( $293 \text{ °K}$ );  $V_w$  é o volume específico da água;  $M_w$  é a massa molecular da água ( $0,018 \text{ kg.mol}^{-1}$ );  $p_v$  é a pressão parcial de vapor e  $p_{vs}$  é a pressão de vapor de saturação.

A sucção pode ser compreendida com base nos conceitos de energia advindos da Termodinâmica e Física dos Solos, que remetem a estudos clássicos como em Aitchison (1965). Os gradientes que determinam o fluxo água do solo podem ser expressos, quantitativamente, em termos da energia livre em relação à água padrão. O potencial total da água do solo ( $\Psi$ ) é composto pela soma do potencial matricial, osmótico e pneumático, além de outras componentes de menor importância (AITCHISON, 1965).

No estudo do comportamento mecânico e hidráulico de solos não saturados, o potencial matricial e potencial osmótico são os principais responsáveis pela sucção.

Assim, a sucção é interpretada como uma pressão isotrópica resultante da interação entre as fases sólida, líquida e gasosa constituintes do solo, sendo capaz de descrever a afinidade que um solo não saturado tem por água.

Desta forma, a sucção é dividida em duas parcelas, a matricial e a osmótica, onde a sucção osmótica é proveniente da concentração de solutos no solo e a sucção matricial é conceitualmente definida pela diferença entre a pressão no ar e a pressão na água intersticial do solo ( $s = u_a - u_w$ ). A sucção matricial é a mais importante fonte de sucção a interferir no comportamento mecânico dos solos não saturados (ALONSO; GENS; HIGHT, 1987), especialmente em solos arenosos como o aqui estudado. Por tal motivo, apenas a sucção matricial foi considerada neste trabalho.

Aliado ao entendimento da sucção no solo, o início do estudo de solos não saturados remonta à década de 50 e 60, cujos esforços eram centralizados na tentativa de se desenvolver uma expressão capaz de descrever a tensão efetiva de um solo não saturado (BISHOP, 1959; BISHOP; BLIGHT, 1963; CRONEY; COLEMAN; BLACK, 1958; JENNINGS; BURLAND, 1962). Tal lacuna ainda existe, visto que as equações apresentadas possuem grande valia na análise da resistência do solo, mas foram ineficientes na predição da deformabilidade.

Em paralelo, foi observado que a sucção afeta o estado de tensão do solo não saturado. A busca da definição de variáveis de estado que governam o comportamento do solo não saturado podem ser vistas em Coleman (1962, *apud* FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2013), que sugeriu variáveis com base em interpretações de ensaios triaxiais ( $\sigma_1 - u_a$ ;  $\sigma_3 - u_a$  e  $u_w - u_a$ ). No ano seguinte, Bishop e Blight (1963) notaram que a variação da sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) não resulta na mesma variação do comportamento do solo quando alterada a tensão líquida. A variação de volume do solo em respeito à tensão aplica ( $\sigma - u_a$ ) e a sucção matricial foi analisada por Matyas e Radhakrishna (1968).

Na década de 70, Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram o princípio de variáveis de estado no solo não saturado até hoje utilizado. A tração na água dos poros do solo tende a aproximar as partículas, e conseqüentemente, aumentar a tensão. Desta forma, o comportamento do solo quanto ao estado de tensões que este se encontra pode ser avaliado pela combinação de duas das três variáveis de estado independentes ( $\sigma - u_w$ ), ( $\sigma - u_a$ ) e ( $u_a - u_w$ ), sendo as duas últimas mais amplamente utilizadas.

A definição das variáveis de estado independentes constituiu uma base para a ciência do solo não saturado. Neste cenário, ensaios laboratoriais capazes de controlar

os componentes do estado de tensão (sucção e tensão líquida) tornaram-se essenciais para o entendimento das características fundamentais do solo (BLATZ; CUI; OLDECOP, 2009; BLATZ; GRAHAM, 2000; CHEN et al., 2019).

Ainda, o conhecimento das variáveis de estado permitiu o avanço de modelos constitutivos. No final da década de 80, modelos elastoplásticos com base na teoria de estados críticos foram introduzidos. Neste sentido, Alonso, Gens e Josa (1990) apresentaram uma abordagem em que a tensão líquida ( $p - u_a$ ) e a sucção ( $s = u_a - u_w$ ) são tratadas como variáveis de estado independentes, conhecido como Modelo Básico de Barcelona (BBM).

O modelo proposto pelos autores impulsionou à análise dos solos a partir de uma abordagem numérica. Wheeler, Gallipoli e Karstunen (2002) estenderam o BBM para casos não antes previstos, por exemplo, para a situação em que o colapso do solo não é crescente com a tensão de inundação. Gallipoli et al. (2003) propuseram um modelo elastoplástico para solos não saturados incorporando os efeitos da sucção e do grau de saturação no comportamento mecânico. Além de contribuições nacionais quanto a modelos elastoplásticos em solos não saturados (FUTAI, 1997; MACHADO, 1998).

No cenário atual da pesquisa científica, a tendência de uso de modelos constitutivos na predição do comportamento de solos não saturados é ainda corrente e de grande interesse (PASHA; KHOSHGHALB; KHALILI, 2019; ROJAS et al., 2019). Assim, pesquisas com enfoque laboratorial, como esta conduzida, além de permitir entender o comportamento do solo não saturado, são primordiais como subsidio para análises numéricas, visto que modelos necessitam de resultados de laboratório para calibração.

Em respeito ao estado da água no solo, vale salientar a definição de curva de retenção de água no solo (SWRC ou SWCC). Esta descreve a relação entre a quantidade de água no solo e a energia necessária para removê-la. A água é quantificada em termos de umidade gravimétrica ( $w$ ), umidade volumétrica ( $\theta$ ) ou grau de saturação ( $S_r$ ) e a energia, como sucção matricial ou total. A curva de retenção pode ser entendida como uma medida da capacidade de armazenamento de água do solo quando sujeito a alterações nos valores de sucção (VANAPALLI; FREDLUND; PUFAHL, 1999).

A curva de retenção não tem um formato único, sendo dependente do tipo de solo (FREDLUND; XING, 1994), em função dos macro e microporos podem ser unimodais ou bimodais (WIJAYA; LEONG, 2016) e ainda podem apresentar histerese,

ou seja, para um mesmo valor de sucção, o solo apresenta maior quantidade de água na curva de secagem do que na curva de umedecimento (KIM; HWANG; KIM, 2018).

Tem-se que a curva de retenção de água não é um parâmetro intrínseco do solo. Esta sofre a influência de certos fatores que alteram a sua singularidade, tal como o histórico de tensões ao qual o solo foi submetido, particularmente em sucções mais baixas (FREDLUND; PHAM, 2006; MALAYA; SREEDEEP, 2011).

A curva de retenção é de grande valia, pois, além de permitir o estudo da água no solo não saturado, o conhecimento dos parâmetros hidráulicos da curva de retenção permite realizar previsões do comportamento geotécnico. Na literatura é possível encontrar estudos bem embasados que utilizam a curva de retenção de água para prever aspectos essenciais do solo, como a tensão de cisalhamento não saturada e o coeficiente de permeabilidade (FREDLUND; XING; HUANG, 1995; PUPPALA; PUNTHUTAECHA; VANAPALLI, 2006; VANAPALLI; FREDLUND; PUF AHL, 1996).

Certas técnicas de laboratório permitem o controle e conhecimento da sucção, as quais se citam: técnica do papel filtro (utilizada nesta pesquisa e melhor descrita no item 4.4, do capítulo 4), funil de Haines (ou funil de pedra porosa), câmara de pressão de Richards, entre outros. Maior detalhamento a respeito destas e outras técnicas laboratoriais para imposição da sucção e determinação da curva de retenção de água no solo é encontrado na literatura (BICALHO et al., 2009; FREDLUND; RAHARDJO, 1993; LIBARDI, 2012; SOTO, 2004).

## **2.2. SOLOS COLAPSÍVEIS**

O colapso é um fenômeno bem conhecido na geotecnia, sendo observado em alguns solos não saturados cuja estrutura metaestável permite uma deformação abrupta quando umedecido, sem que haja aumento significativo da tensão atuante.

A ocorrência desses solos está relacionada à formação geológica, ao meio físico e aos fatores climáticos. O colapso é um comportamento típico de solos não saturados de baixa densidade que podem ser encontrados em diversos lugares do mundo, como formações aluviais (THOMPSON; HOUSTON, 2016), coluviais (DE FREITAS; TSUHA; VILAR, 2017), solos residuais (PEREIRA; FREDLUND, 2000), além de aterros com deficiência na compactação (DUDLEY, 1970).

Certas características são flagrantes para ocorrência do colapso, como uma estrutura aberta instável, umidade inferior ao necessário para saturação e elevado índice de vazios. O valor máximo do colapso depende do tipo de solo, densidade, umidade e tensão de inundação. Deformações maiores estão associadas a baixas densidades e baixos graus de saturação antes da inundação (BENATTI; MIGUEL, 2013; DUDLEY, 1970; GUTIERREZ; NÓBREGA; VILAR, 2009).

A estrutura dos solos colapsíveis é mantida por meio de vínculos capazes de conferir uma resistência adicional temporária e aparente, proveniente do efeito da sucção e/ou substâncias cimentantes, como óxidos de ferro e carbonatos. Tal resistência tende a diminuir ou desaparecer quando o solo é umedecido (BARDEN; MCGOWN; COLLINS, 1973; GUTIERREZ; NÓBREGA; VILAR, 2009). O efeito do colapso geralmente ocorre antes de o solo alcançar completa saturação, por tal motivo, os conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados são utilizados para o estudo e entendimento do fenômeno (LI; VANAPALLI; LI, 2016).

Os solos de região de clima tropical, devido à intensa migração das partículas pela ação da infiltração e evaporação da zona ativa não saturada, apresentam grandes horizontes superficiais porosos com minerais estáveis, como quartzo, magnetita, ilmenita e caolinita, caracterizando-o como solos de comportamento laterítico (BENATTI; MIGUEL, 2013). Tais peculiaridades propiciam que alguns solos destas regiões sejam suscetíveis ao fenômeno do colapso, por tal motivo, casos de colapso são verificados na literatura nacional (COLLARES, 2002; GUTIERREZ, 2005; RODRIGUES, 2007).

No campo, os solos das regiões tropicais sofrem variação paulatina da umidade por conta das estações de seca e de chuva, o que pode influenciar a magnitude das deformações induzidas pelo umedecimento. Quanto maior a sucção no solo antes da inundação, ou seja, antes da indução ao colapso, mais seco e rígido encontra-se o solo e, portanto, maior será o seu colapso com a inundação (VILAR; RODRIGUES, 2011).

O comportamento característico de solos colapsíveis frente ao umedecimento explica o fato de fundações apresentarem desempenho satisfatório durante algum tempo, até que haja problemas decorrentes de recalques repentinos pela presença de água. Tem-se que a ocorrência do fenômeno pode ocorrer em qualquer fase da vida útil da obra e, quando somado aos recalques normais, podem conduzir a danos estruturais quando ultrapassado os recalques admissíveis das fundações (CINTRA; AOKI, 2009).

Assim, o estudo do colapso apresenta-se como necessário no contexto geotécnico devido à disseminação desses solos em diversas regiões do país e aos problemas de engenharia civil que estes acarretam.

Quanto à identificação de solos colapsíveis, tradicionalmente, o método mais difundido é baseado em ensaios laboratoriais de compressão edométrica (JENNINGS; KNIGHT, 1957), seja por indução ao colapso através da inundação do solo ou pela comparação entre as curvas de compressão do solo previamente saturado com o solo em condição natural.

Métodos baseados em ensaios de campo também podem ser utilizados para identificação desses solos ou quantificação do colapso pela inundação, como provas de carga em placa (AGNELLI, 1992; COSTA, 1999) e ensaio de penetração de cone e ensaio dilatométrico (ROCHA, 2018).

O comportamento colapsível do solo pode ser também identificado utilizando métodos expeditos, desenvolvidos a partir de conceitos empíricos. Estes são de interesse nas etapas iniciais de investigação, como um indicativo de colapso e apoio à investigação mais detalhada. Os métodos expeditos, é claro, não excluem a necessidade de técnicas de investigação mais elaboradas. Dentre os métodos existentes, destaca-se àquele proposto por Gibbs e Bara (1967), o qual correlaciona o limite de liquidez e o peso específico seco do solo. O seu uso, apesar de bem sucedido, apresenta limitações na identificação de solos poucos plásticos. Diante desta lacuna, Vilar e Rodrigues (2015) propuseram um critério no qual é assumido que a densidade é fator fundamental para o solo apresentar comportamento colapsível. Os autores resgataram as propostas de Gibbs (1961, *apud* USBR, 1998), levando em consideração o grau de compactação natural do solo ( $GC_n$ ) e o desvio que umidade ( $\Delta w$ ), que trata da diferença entre a umidade do solo *in situ* ( $w$ ) e a umidade ótima ( $w_{ot}$ ).

Na Figura 1 é apresentada a proposta de Vilar e Rodrigues (2015), bem como dados de solos colapsíveis ao redor do mundo. Fica evidente que solos colapsíveis têm, em sua maioria, baixa densidade e deficiência de umidade. Além disso, o critério sugere que a fronteira de classificação de solos colapsíveis para não colapsíveis na umidade ótima ocorre para o grau de compactação de 90%. Nesta análise, não são consideradas outras variáveis que influenciam no colapso do solo, como tensão de inundação e sucção atuante.

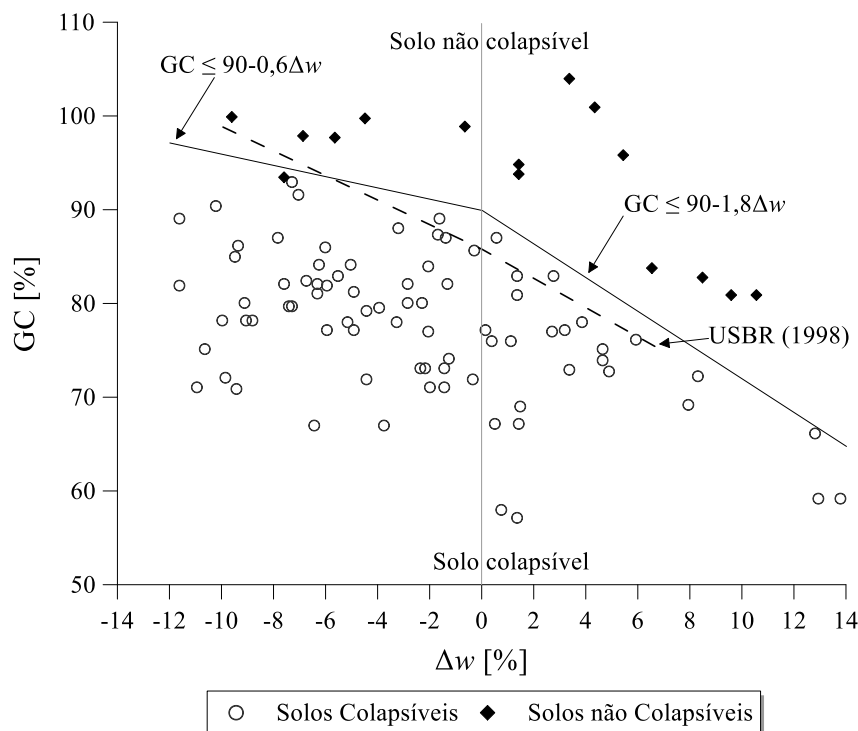


Figura 1. Grau de compactação natural versus desvio de umidade de solo colapsíveis e não colapsíveis (modificado de VILAR; RODRIGUES, 2015)

## 2.3. COMPACTAÇÃO EM SOLOS COLAPSÍVEIS

### 2.3.1. Mitigação e melhoria de solos colapsíveis

Devido à disseminação de solos colapsíveis no Brasil e, no caso, no interior do estado de São Paulo, torna-se necessário considerar suas características ao se projetar obras apoiadas nestes solos.

No tocante aos tipos de fundações em solos colapsíveis, é corrente na engenharia prática a adoção de fundações profundas como alternativa para minimizar o efeito das deformações por colapso, visto que a colapsibilidade do solo é mais pronunciada nas camadas superficiais. Esta prática, apesar de apresentar bons resultados, é uma alternativa onerosa e, assim como todo elemento estrutural, fundações possuem tempo de vida útil.

No entanto, o fenômeno do colapso não inviabiliza que obras da engenharia estejam diretamente apoiadas nestes solos. Na literatura, são descritas técnicas para reduzir ou mitigar os efeitos nocivos do recalque de fundações diretas apoiadas em solos colapsíveis, nas quais se destaca: estabilização química (KAMPALA;

HORPIBULSUK, 2013), pré-inundação (GIBBS; BARA, 1967) e compactação (BOOTH, 1975).

Apesar de se ter distintas técnicas de mitigação, poucos estudos são concentrados na comparação entre os métodos. A definição da técnica a ser adotada depende de certos fatores, como a etapa no qual o problema do colapso foi descoberto (antes, durante ou depois da obra), a viabilidade econômica e possíveis dificuldades construtivas (HOUSTON et al., 2001). A título de ilustração, cita-se o trabalho desenvolvido por Rolling e Rogers (1994), os autores verificaram que a compactação apresentou melhores resultados na mitigação do colapso.

Além disso, métodos como estabilização não são muito eficientes para solos lateríticos. O uso de aditivos na compactação como o solo-cimento (PITTA, 1984), solo-cal (GEORGE, 1968), solo-fibra (TEODORO, 1999) e estabilização física (FAGUNDES et al., 2016) é uma alternativa com custo elevado, o que inviabiliza esses métodos para melhoria de solos colapsíveis, uma vez que somente compactação já é suficiente para reduzir a colapsibilidade dos solos, quando realizada de forma correta.

Em geral, a melhoria do comportamento do solo através da compactação é uma prática corrente e amplamente conhecida. Aliado a isso, a técnica apresenta resultados satisfatórios na mitigação do colapso (DAS; THYAGARAJ, 2018; ROTISCIANI et al., 2016; SHAHNOORY; SUGIYAMA, 2016), desde que as premissas de controle de compactação sejam respeitadas, e de forma geral, tem custos relativamente baixos para execução.

A compactação pode ser empregada como solução para fundações em sapata em solos colapsíveis. O método consiste na remoção da camada de apoio correspondente à largura da sapata e posterior reposição em subcamadas compactadas. A compactação pode ser feita ao longo de todo bulbo de tensões, pois quanto mais espessa a camada melhor o resultado de mitigação das deformações por colapso, ou até a metade do bulbo, por conta do espraiamento das tensões e aspectos econômicos (CINTRA, 1998; CINTRA, 2003; VARGAS, 1951).

Desta forma, dado os bons resultados práticos em fundações e o conhecimento já bem embasado, o objeto de estudo deste trabalho é a compactação em solo colapsível, a qual será mais bem explanada.

### 2.3.2. Teoria da compactação e solos colapsíveis compactados

A compactação é um procedimento comum e conhecido de melhoria do solo, cujas bases remetem a estudos clássicos, como aqueles conduzidos por Proctor, em 1933. O processo consiste na redução dos índices de vazios do solo devido à expulsão de ar, dado uma aplicação de carga, dinâmica ou estática.

Um dos princípios mais importantes da teoria de compactação dos solos é a curva de compactação, que relaciona o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) com a umidade do solo ( $w$ ), para uma determinada energia de compactação. A inflexão da curva fornece o peso específico seco máximo e a umidade ótima do solo.

A execução correta da compactação em campo é fator decisivo para o bom desempenho do comportamento do solo. Tem-se que energia e a umidade influenciam na estrutura do solo (de forma simplificada, floclulada ou dispersa). Com relação à compressibilidade do solo, verifica-se que baixas tensões não são suficientes para interferir na estrutura dos solos, enquanto que elevados níveis de tensões podem ser suficientes para tornar a estrutura do tipo floclulada (ramo seco) em dispersas (ramo úmido) (LAMBE, 1958).

No contexto de solos colapsíveis, conforme já apresentado, a compactação mostra-se como uma alternativa interessante, particularmente em solos localizados em áreas de clima tropical. O processo de laterização sofrido por estes solos promoveu o acúmulo de caolinita, óxido de ferro e alumínio na fração de argila. Tal particularidade resulta em boas propriedades após a compactação, como aumento da tensão de cisalhamento e redução da permeabilidade quando compactado próximo à umidade ótima (NOGAMI; VILLIBOR, 1995 *apud* DE FREITAS; TSUHA; VILAR, 2017).

A técnica de compactação é bem conhecida na literatura e o estudo do colapso em solos compactados oferece o atrativo de se ter ensaios em que se pode controlar e reproduzir facilmente determinadas características do solo.

Booth (1975) estudou a influência da umidade e da densidade inicial seca no potencial de colapso do solo compactado, sendo ambos apontados pelo autor como os fatores mais importantes na ocorrência do fenômeno. Basma e Tuncer (1992) apontaram que o fator que mais afeta o colapso é a densidade inicial seca, quanto mais denso o solo estiver, menor o colapso, assim como quanto maior a umidade inicial, menor é o potencial de colapso. E ainda, a colapsibilidade aumenta com as tensões aplicadas no solo até determinada tensão, no caso dos solos argilosos estudados, e aumentam

continuamente, para os solos arenosos. Lawton, Frigaszy e Hetherington (1992) trazem uma extensa revisão acerca do mecanismo do colapso em solos compactados.

As variações das propriedades da engenharia para um dado solo colapsível quando compactado em diferentes massas específicas secas e umidades são reportadas. No entanto, à luz da Mecânica dos Solos Não Saturados, torna-se interessante a análise do fenômeno do colapso com base nos conceitos desenvolvidos para tal ciência. Como já apresentado, a tensão normal líquida ( $\sigma - u_a$ ) e a sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) são apontadas como as variáveis de estado independentes do solo não saturado (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977). Durante a inundação de um solo colapsível, a variável de estado que altera é a sucção matricial, enquanto que a tensão líquida total é mantida constante, e a pressão no ar ( $u_a$ ) é usualmente assumida com igual valor à pressão atmosférica.

Deste modo, estudos acerca a compactação em solos não saturados colapsíveis tornam-se mais completos quando considerado o efeito da sucção. Tal estudo é de interesse, pois permite apreciar como técnicas típicas, usualmente aplicáveis a solos saturados, foram adaptadas para o entendimento de solos não saturados.

No entanto, ainda existem impasses entre a mecânica dos solos não saturados e os princípios básicos de compactação. Como a simplicidade do ensaio de Proctor comparado à complexidade de ensaios com controle de sucção e o desconhecimento de leis constitutivas que expliquem como a tensão e a sucção durante a compactação estão relacionadas com o comportamento do solo pós compactado (CAICEDO et al., 2014).

A priori, verifica-se que quando duas amostras solicitadas à compressão, compactadas com o mesmo índice de vazios, mas com umidades distintas, a amostra mais seca exhibe uma maior tensão de pré adensamento. Tal comportamento é decorrente da sucção matricial atuante (GENS; ALONSO, 1992).

A sucção matricial atuante nas amostras compactadas depende principalmente da umidade, com pouca influência da massa específica seca e da técnica de compactação, isto é, estática ou dinâmica (GONZÁLEZ; COLMENARES, 2006), sendo que a sucção tem influência significativa na reta virgem (SIVAKUMAR; WHEELER, 2000).

Ainda, a relação entre a sucção matricial e o grau de saturação é distintamente afetada pelo grau de compactação, poros menores de amostras mais densificadas conduzem a sucções mais elevadas (RAO; REVANASIDDAPPA, 2000). E em amostras menos densas, um aumento na sucção matricial produz um aumento no potencial de colapso, em contrapartida, a colapsibilidade daquelas compactadas com

maior grau de compactação é menos afetada pela variação da sucção inicial (RAO; REVANASIDDAPPA, 2000; GONZÁLEZ; COLMENARES, 2006).

Sun, Sheng e Xu (2007) investigaram a influência da densidade inicial e o estado de tensão na deformação e características hidráulicas de solos compactados durante o processo de colapso, através de ensaios isotrópicos com sucção controlada. O estudo revelou que as deformações por colapso devido à redução da sucção dependem primordialmente do índice de vazios inicial e do estado de tensão do solo, e que, para um solo submetido a uma mesma sucção inicial e mesma tensão líquida, a amostra menos compactada resulta no maior potencial de colapso, independente do nível de tensão na qual a sucção foi reduzida.

## CAPÍTULO 3

### LOCAL DE ESTUDO E HISTÓRICO DE INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS

#### 3.1. LOCAL DE ESTUDO: ILHA SOLTEIRA

O município de Ilha Solteira situa-se no extremo noroeste do estado de São Paulo ( $20^{\circ}25'52''S$ ,  $51^{\circ}20'17''W$ ), à margem paulista do rio Paraná (Figura 2). A cidade, localizada a 650 quilômetros da capital, conta com a maior Usina Hidrelétrica (UHE) do estado de São Paulo e terceira maior do país, a Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. Em conjunto com a UHE Três Irmãos e UHE Engenheiro Souza Dias, formam um importante complexo hidrelétrico (Complexo Urubupungá). Além da Usina, a cidade ainda conta com uma das unidades da UNESP, o que propicia um importante acervo de estudos conduzidos com o solo da região.



Figura 2. Localização de Ilha Solteira no estado de São Paulo

O solo estudado em questão foi amostrado no campo experimental da UNESP de Ilha Solteira (FEIS). A região pertence à bacia sedimentar do Paraná, onde se encontra basalto em diversas áreas cobertas por sedimentos do grupo Bauru. Estes são compostos essencialmente por arenitos de granulação fina e coloração vermelha, resultando em um solo arenoso com teor variável de argila. Ainda há a presença de lentes finas de seixos

de quartzo junto ao solo residual ou ao basalto (CAVALCANTE et al., 2006; SOUZA, 1993).

Trata-se de um solo superficial poroso, submetido a um intenso processo de laterização devido às alternâncias dos períodos de seca e chuva. Tais características são flagrantemente para a ocorrência de solos colapsíveis.

### 3.2. HISTÓRICO DE INFORMAÇÕES

Devido sua importância econômica e energética para o Brasil, o solo de Ilha Solteira possui um grande acervo de estudos conduzidos na região por conta das barragens do complexo Urubupungá (MELLIOS, 1985; MONTEIRO, 1985). Além disso, desde a criação do campo experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, em 1988, são conduzidos estudos acerca o solo colapsível da região, como a proposta de uma carta de risco geotécnica destes solos na área urbana (OLIVEIRA, 2002), provas de carga em estacas (DEL PINO JÚNIOR, 2003) e ensaios edométricos duplos e simples (RODRIGUES, 2003).

As informações geotécnicas apresentadas nesta seção foram utilizadas para guiar os estudos e procedimentos experimentais abordados na presente dissertação, destacando-se os resultados de Soares (2018). Como o objeto de estudo são os solos superficiais, zona na qual o colapso é mais pronunciado, as informações aqui contidas referem-se a ensaios laboratoriais executados nas amostras coletadas superficialmente.

A Tabela 1 agrupa os resultados de ensaios de caracterização do solo de Ilha Solteira (CAVALCANTE et al., 2006).

Tabela 1. Quadro resumo dos ensaios de caracterização do solo de Ilha Solteira (CAVALCANTE et al., 2006)

<b>Prof. (m)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia Fina</b>	<b>Areia Média</b>	<b>w (%)</b>	<b>w<sub>ótima</sub> (%)</b>	<b><math>\rho_{dmáx}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
0,7 - 1,0	23	14	2,69	29	8	59	4	10,9	11,7	1,96
1,7 - 2,0	24	15	2,71	29	8	59	4	11,7	11,2	1,97
2,7 - 3,0	24	17	2,72	20	11	65	4	11,2	11,3	1,97
3,7 - 4,0	26	16	2,72	30	11	56	3	11,4	11,8	1,95
4,7 - 5,0	27	16	2,71	33	8	56	3	11,8	12,6	1,94

Como complemento aos dados fornecidos na Tabela 1, na Figura 3 tem-se a curva de compactação de Proctor Normal obtida por Soares (2018). Esta indica que o solo de Ilha Solteira possui massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) de 1,965 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima de 11,4%.

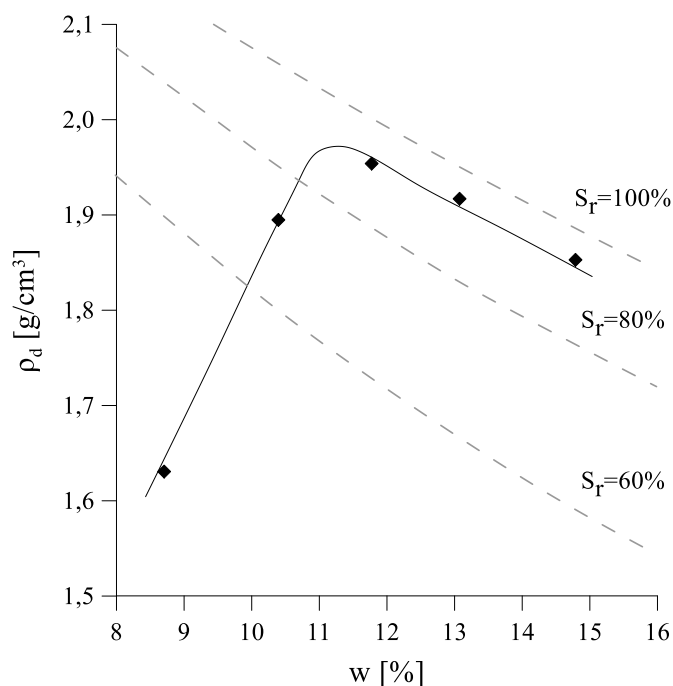


Figura 3. Curva de compactação - Proctor Normal (SOARES, 2018)

Os dados dispostos na Tabela 1, bem como àqueles fornecidos pela curva de compactação de Proctor normal (Figura 3), indicam que o solo de Ilha Solteira encontra-se naturalmente próximo da umidade ótima. O grau de compactação natural (massa específica seca natural em relação à massa específica seca máxima) varia de 83 à 70%, de 0,5 a 2,0 metros de profundidade (SOUZA, 1993).

A curva de retenção de água no solo foi obtida tanto para o solo em condição natural quanto compactada, com  $GC= 94\%$  e  $\Delta w= 3\%$  (Figura 4). As curvas foram obtidas a partir de técnicas combinadas: Funil de Haines, Câmara de Richards e técnica do papel filtro. Ambas as curvas foram determinadas por secagem, ou seja, os corpos de prova foram inicialmente saturados por capilaridade e secos até a umidade ou sucção de interesse (SOARES, 2018).

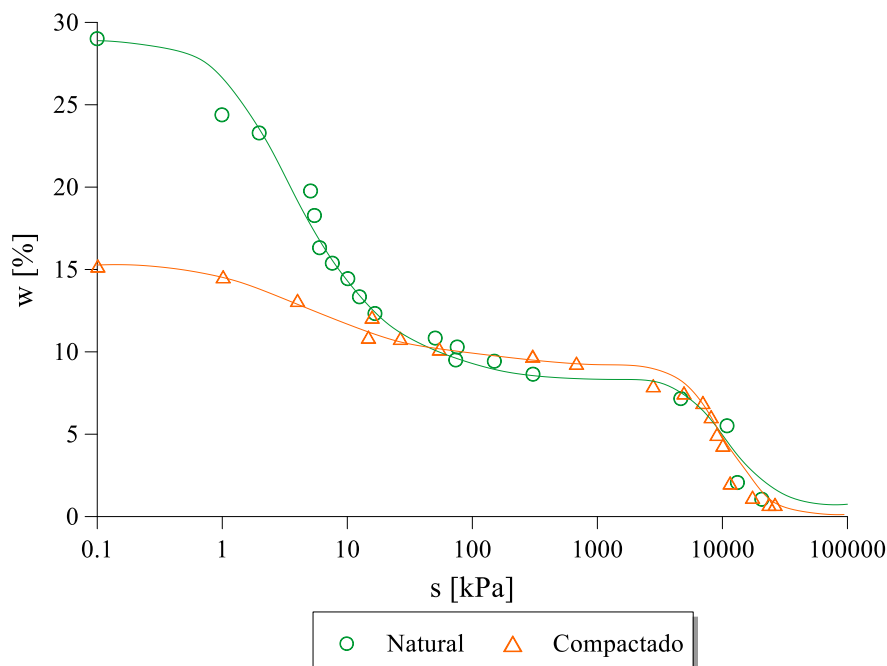


Figura 4. Curva de retenção de água no solo para a condição natural e compactada (SOARES, 2018)

As curvas de retenção são típicas de um solo arenoso, com baixo valor de entrada de ar (próximo de 1 kPa) e trecho de dessaturação bem definido, ou seja, pequenas variações de sucção conduzem a variações significativas de umidade. Ainda, conforme observado por Soares (2018), a compactação afeta principalmente o trecho anterior à sucção de 10 kPa. Ou seja, a compactação diminui os vazios entre as partículas e, portanto, a quantidade de água que o solo retém nos macroporos é menor para o solo compactado. A compactação, entretanto, não afeta os microporos, e, portanto, retém a mesma quantidade de água.

A fim de avaliar as características mecânicas do solo, Soares (2018) realizou quatro ensaios edométricos com sucção constante de 50 e 300 kPa, tanto para a condição natural quanto compactada ( $GC = 94\%$  e  $\Delta w = 3\%$ ). O autor também conduziu dois ensaios saturados desde o início para ambas as condições. Os resultados são apresentados nas Figura 5 e 6.

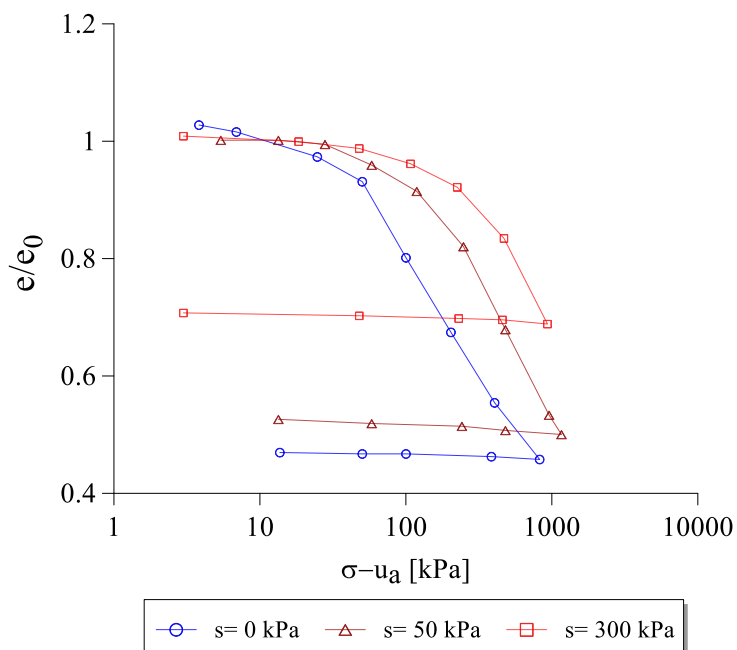


Figura 5. Ensaio edométrico com sucção constante de 0, 50 e 300 kPa para o solo natural (SOARES, 2018)

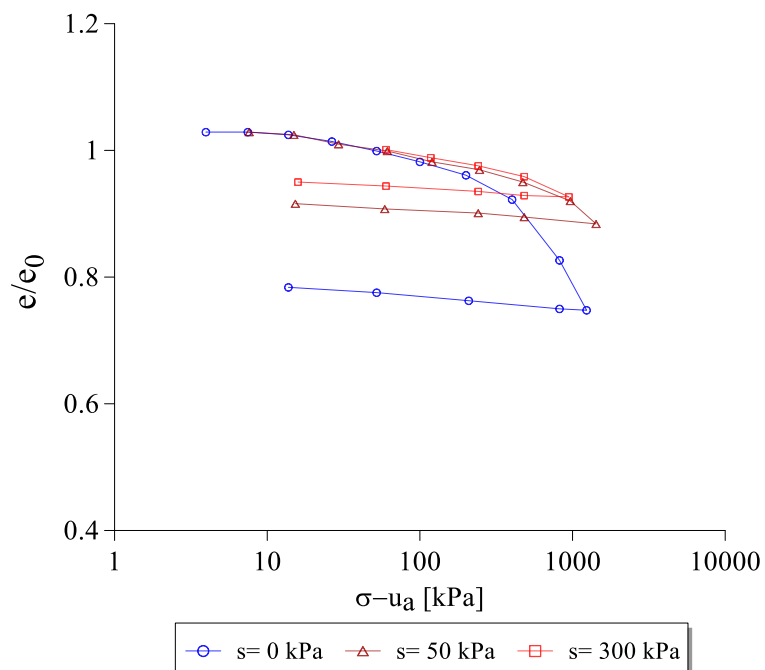


Figura 6. Ensaio edométrico com sucção constante de 0, 50 e 300 kPa para o solo compactado (SOARES, 2018)

Nos resultados dos ensaios edométricos ficou evidente o benefício da compactação, tanto em condição saturada quanto em não saturada, bem como a influência da sucção na tensão de cedência do solo e inclinação da reta virgem, sendo o efeito da sucção menos pronunciado para o solo em condição compactada.

Soares (2018) também conduziu ensaios de permeabilidade tanto para o solo em condição natural, quanto compactada. Em condição natural, foi realizado o ensaio de permeabilidade com carga constante, resultando em um coeficiente de permeabilidade de  $1,4 \cdot 10^{-5}$  m/s. Para o solo em condição compactada, o ensaio de permeabilidade foi conduzido com carga variável, resultando no coeficiente de permeabilidade de  $6,48 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Outro estudo que cabe destacar é aquele realizado por Souza (1993). O autor estudou os recalques em fundações rasas apoiadas tanto no solo natural quanto compactado, no campo experimental de Ilha Solteira. Foram executadas quatro provas de carga para as condições: cava seca, cava inundada, cava seca com 0,60m de solo compactado e cava inundada com 0,60 m de solo compactado. Foi verificada a eficiência da compactação do solo subjacente. Quando inundada, a cava compactada apresentou acréscimo de 110% na carga admissível comparada com a cava sem camada compactada e houve redução dos recalques por colapso em mais de 70%.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi conduzido a fim de investigar o comportamento colapsível do solo compactado de Ilha Solteira – SP, variando-se o grau de compactação, a umidade de compactação, sucção inicial dos corpos de prova e a tensão de inundação. Para tal, foram realizados ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada.

Os graus de compactação foram definidos com base no critério proposto por Vilar e Rodrigues (2015) (Figura 1, capítulo 2). O grau de compactação de 90% corresponde à situação em que o solo é classificado como não colapsível, enquanto que o grau de compactação de 85% representa uma deficiência na densidade e consequente comportamento colapsível. Os ensaios foram conduzidos para o solo com umidade ótima e umidade de 9,5% ( $\Delta w = -1,9\%$ ), esta correspondente ao grau de compactação de 90% no ramo seco da curva de Proctor.

Tem-se que obras de pequeno porte, donde muitas vezes não se tem controle adequado da compactação, podem apresentar problemas relacionados ao colapso devido à má compactação, sejam por deficiência de densidade ou grande desvio da umidade ótima. Deste modo, os graus de compactação (GC=85 e 90%) e as umidades de compactação ( $\Delta w = 0\%$  e  $\Delta w = -1,9\%$ ) escolhidas para este estudo visaram considerar tal situação.

A fim de incorporar o efeito da tensão de inundação no colapso do solo compactado, visto que a magnitude do colapso depende também do estado de tensão no qual este se encontra, os ensaios edométricos convencionais simples foram inundados nas tensões de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, totalizando 20 ensaios. Neste caso, as sucções dos corpos de prova compactados foram determinadas por meio da técnica de papel filtro.

No ensaio edométrico com sucção controlada, a sucção inicial de 100 kPa foi mantida constante até as mesmas tensões de inundação do ensaio convencional, para em seguida ser reduzida até a saturação dos corpos de prova ( $s = 0$  kPa), totalizando 10 ensaios edométricos com sucção controlada.

A estrutura do programa experimental pode ser vista por meio do fluxograma (Figura 7).

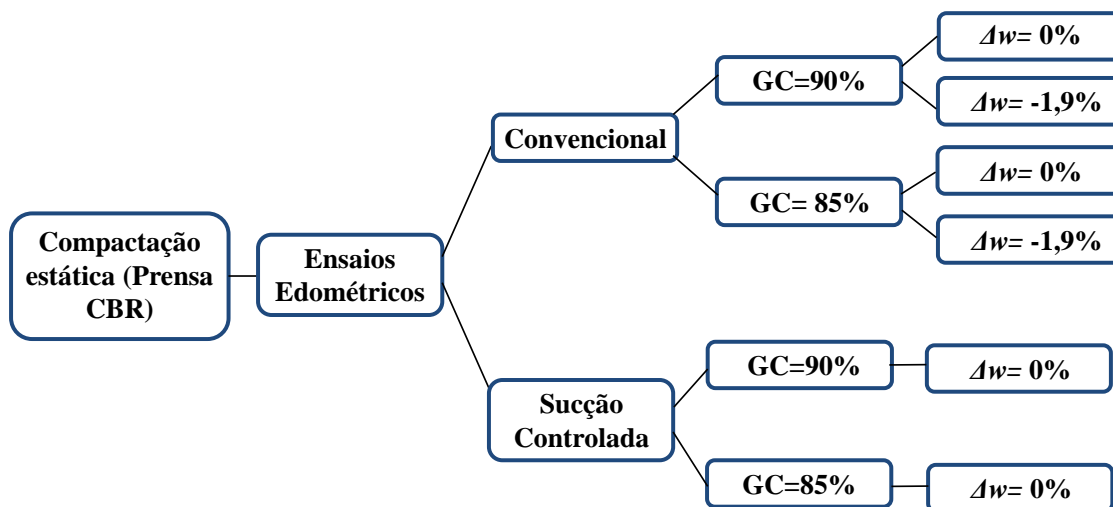


Figura 7. Fluxograma do programa experimental

Detalhes acerca os ensaios e procedimentos utilizados são apresentados nesta seção.

#### 4.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA E COMPACTAÇÃO

O solo ensaiado foi coletado a 1 metro de profundidade por meio de amostras deformadas, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos. A preparação da amostra foi realizada conforme recomendações da ABNT NBR 6457 (2016).

Tendo em mãos a curva de compactação de Proctor Normal do solo (vide Figura 3, capítulo 3) e a umidade da amostra, calculou-se o volume de água a acrescentar no solo para atingir a umidade de interesse e a massa de solo requerida para se obter o grau de compactação alvo. Salienta-se que o solo possui massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) de 1,965 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima de 11,4% (SOARES, 2018), tais valores foram adotados como referência para condução dos ensaios do programa experimental.

Feito o acerto da umidade, o solo foi compactado no próprio anel do ensaio edométrico, por meio de um molde de compactação especialmente construído para este fim. A compactação foi quase estática e o equipamento utilizado foi uma prensa CBR, com velocidade de 1,27 mm/min. A compactação foi feita em uma camada de solo.

A Figura 8 ilustra o procedimento de compactação dos corpos de prova.

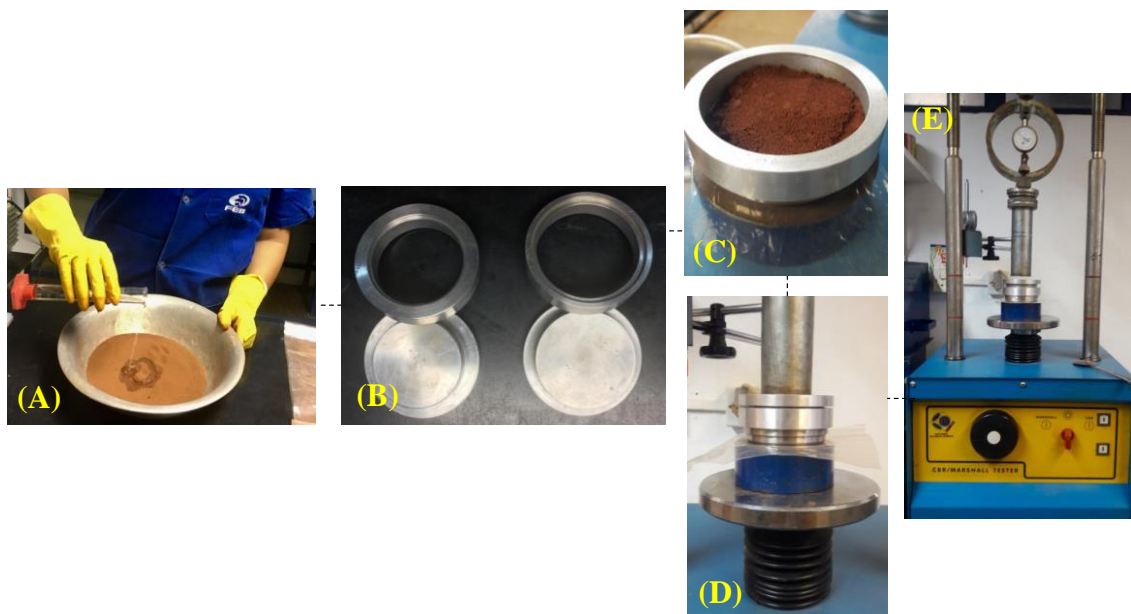


Figura 8. Procedimentos para compactação dos corpos de prova no próprio anel edométrico: (A) acerto da umidade do solo; (B) e (C) molde de compactação para ensaio edométrico convencional e com sucção controlada; (D) e (E) compactação na prensa CBR.

## 4.2. ENSAIO EDMÉTRICO CONVENCIONAL SIMPLES

Foram conduzidos ensaios edométricos convencionais simples, ou seja, ensaio no qual o corpo de prova é induzido ao colapso por meio da inundação em determinada tensão (conforme a metodologia clássica de JENNINGS; KNIGHT, 1975). Na Figura 9 são apresentados os aparatos utilizados para realização dos ensaios edométricos convencionais simples.

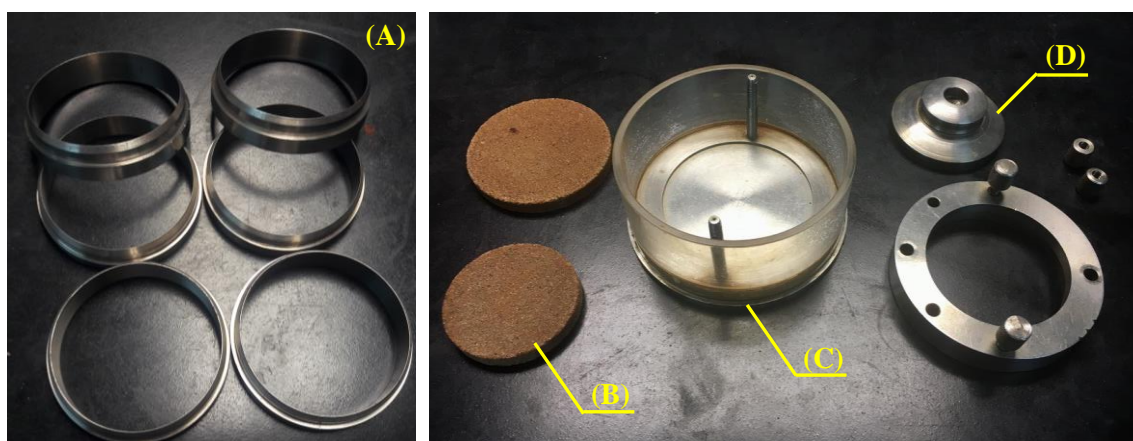


Figura 9. Ensaio edométrico convencional: (A) anéis edométricos rígidos; (B) pedras porosas simples de topo e base; (C) câmara edométrica convencional; (D) cabeçote de distribuição de carga (*top cap*).

Inicialmente, os corpos de prova (com altura de 19 mm e diâmetro de 75 mm, aproximadamente) foram compactados nas umidades e grau de compactação de interesse no próprio anel edométrico (anel rígido que garante que não haja deslocamento lateral), conforme descrito no item 4.1. Após, prosseguiu-se para a montagem do ensaio, cujo esquema é apresentado na Figura 10.

Na base da câmara edométrica, o corpo de prova é posicionado entre duas pedras porosas comuns, a fim de se garantir a drenagem topo-base. Sobre este conjunto, é colocado um cabeçote de distribuição de carga (*top cap*), cuja função é distribuir uniformemente as tensões oriundas do pistão da prensa edométrica.

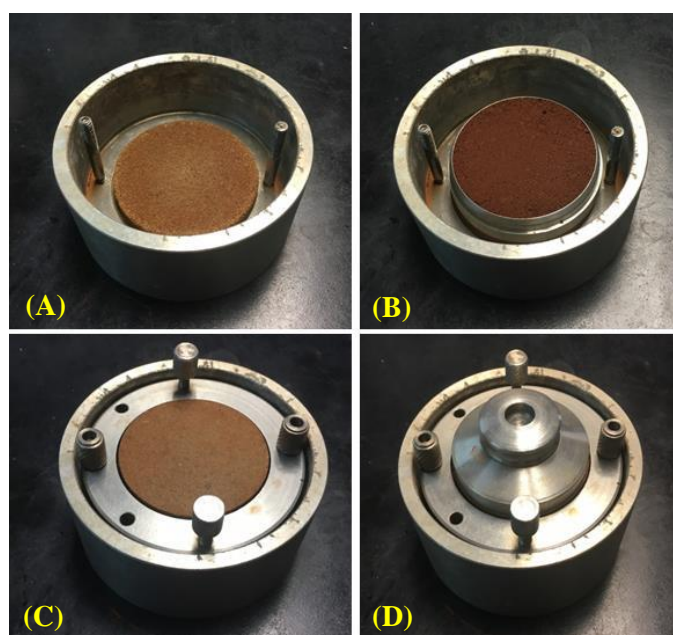


Figura 10. Esquema de montagem do ensaio edométrico convencional: (A) pedra porosa convencional na base; (B) corpo de prova; (C) pedra porosa convencional no topo; (D) cabeçote de distribuição de carga (*top cap*)

A câmara é então posicionada sobre a prensa, na qual é ajustado um extensômetro para medidas de deformação axial do corpo de prova ao longo do ensaio. A deformação axial do solo com o aumento da tensão dá-se por estágios de carregamentos por meio da colocação de anilhas de ferro de massa conhecida na alavanca do sistema. As tensões variaram entre 4 kPa (tensão de ajuste) a 800 kPa. O tempo entre os carregamentos foi o suficiente para que houvesse estabilização das deformações do carregamento anterior.

Por se tratar de ensaios edométricos simples, o solo foi carregado até atingir as tensões de inundação de interesse, no caso, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Uma vez estabilizada a deformação nestas tensões, o corpo de prova foi saturado com o auxílio de uma pisseta preenchida por água destilada e deaerada, com carregamento constante. Após 24 horas, tempo necessário para que todo colapso se processe, o solo saturado foi novamente carregado até a tensão máxima.

Cabe destacar que no ensaio edométrico convencional não há controle da umidade e, conseqüentemente, da sucção. Para se evitar a perda da umidade do solo na etapa inicial pré inundação, visto que se trata de uma câmara aberta, foram utilizados algodões úmidos sobre a câmara edométrica.

### **4.3. ENSAIO EDMÉTRICO COM SUCCÃO CONTROLADA**

Opções mais modernas de ensaios edométricos são utilizadas no estudo de solos não saturados, como os que permitem o controle da sucção no solo. Neste caso, é de se reconhecer o avanço significativo que o controle de sucção proporciona ao entendimento do comportamento dos solos não saturados (HOYOS; SUESCÚN-FLOREZ; PUPPALA, 2015; SOTO, 2004; SURIOL; GENS; ALONSO, 1998).

Neste trabalho, foram conduzidos ensaios edométricos com sucção inicial controlada e posterior redução da sucção (inundação) nas tensões de interesse. A sucção inicial adotada foi de 100 kPa e as tensões de inundação foram: 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Os ensaios foram conduzidos a fim avaliar a influência da sucção no comportamento mecânico do solo compactado.

Foram utilizados edômetros que permitem a imposição e o controle da sucção pela técnica de translação de eixos (TTE). A TTE é factível quando se dispõe de uma câmara hermética provida com uma placa porosa de alto valor de entrada de ar (HAEV) e um sistema de compressores, para controle da pressão no ar.

As câmaras edométricas utilizadas são de duralumínio, com diâmetro interno de 80 mm, espessura de 27,5 mm e profundidade de 70 mm. As placas porosas HAEV têm diâmetro de aproximadamente 75 mm, sendo fixadas no centro da base das câmaras edométricas (Figura 11, A). A placa porosa HAEV permite apenas o fluxo de água e não de ar, dentro de certos limites, permitindo a aplicação da técnica de translação de eixos.

Nas câmaras, a entrada de ar comprimido utilizado para pressurização ocorre por

um orifício na parte superior dos edômetros (Figura 11, B). Outro dispositivo necessário é a mangueira de água, que se conecta ao lado inferior da placa porosa e permite a saída de água dos corpos de prova, por meio do orifício lateral (Figura 11, C). Na base de cada câmara ainda existe um orifício secundário para a entrada de água (Figura 11, D).

Para a aplicação das cargas nos ensaios edométricos, há um pistão na parte superior das câmaras (Figura 11, E). A carga aplicada neste pistão é transferida para a área superficial dos corpos de prova através de um cabeçote de distribuição de carga (*top cap*) posicionado sobre uma pedra porosa, colocada sobre os corpos de prova. A estanqueidade das câmaras é assegurada por “*o-rings*” posicionados entre a junção das câmaras edométricas e as bases (Figura 11, F).

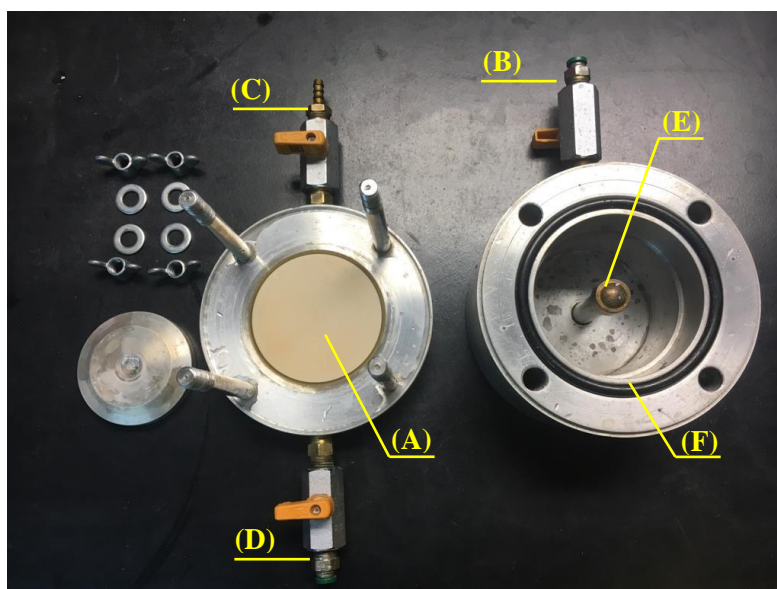


Figura 11. Câmara edométrica com sucção controlada utilizada

Os ensaios foram realizados com corpos de prova de solo compactados no próprio anel rígido em aço inoxidável, que garante que não haja deslocamentos laterais durante o ensaio, com 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura (conforme descrito no item 4.1). Após a compactação, cada corpo de prova foi saturado por capilaridade sobre uma placa porosa grossa parcialmente submersa em água destilada e deairada numa bandeja por 24 horas.

Os corpos de prova foram então dispostos na Câmara de Richards para imposição prévia da sucção (Figura 12). É importante frisar que a placa porosa contida no interior da Câmara de Richards deve ser saturada previamente por submersão e

injeção de água destilada e deaerada pelo orifício contido na própria placa. O processo de saturação é de grande relevância, pois, a garantia de saturação da placa HAEV e saturação da mangueira que conecta a câmara à bureta graduada permite que a pressão na água seja igual à pressão atmosférica relativa e, conseqüentemente, a sucção seja numericamente igual à pressão de ar aplica no interior da câmara por meio do sistema de ar comprimido.

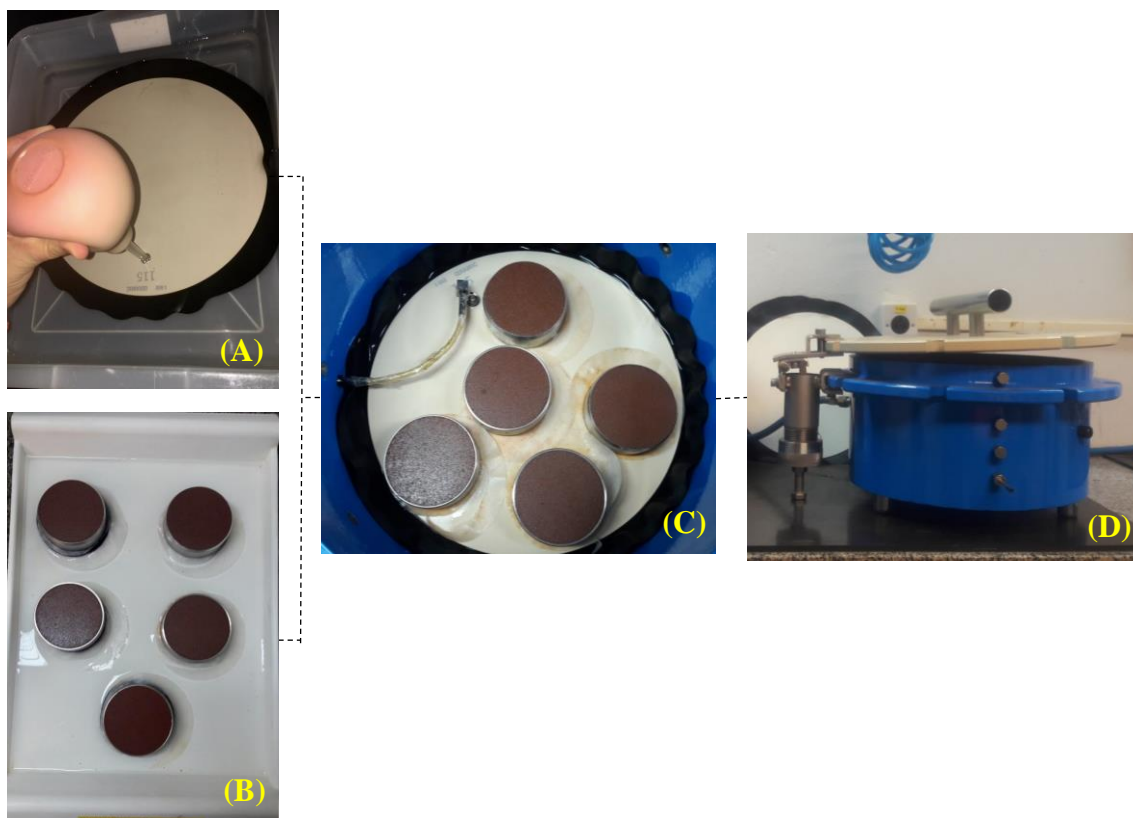


Figura 12. Imposição da sucção nos corpos de prova: (A) Saturação da HAEV; (B) Saturação por capilaridade dos corpos de prova; (C) Disposição dos corpos de prova no interior da Câmara; (D) Sistema de Câmara de Richards.

O equilíbrio da sucção no corpo de prova dá-se quando as medidas periódicas de água da bureta graduada conectada à base da câmara tornam-se constantes, o que indica que o corpo de prova já sofreu a dessaturação necessária para atingir a sucção de interesse. Após o intervalo para equilíbrio da sucção na Câmara de Richards, os corpos de prova foram dispostos nas câmaras edométricas, onde foi imposta a sucção de interesse e novamente esperou-se atingir o equilíbrio da sucção atuante para então iniciar o ensaio.

Ressalta-se a necessidade de a HAEV contida na câmara edométrica também

estar saturada antes do início da montagem do experimento. Para realização deste procedimento, certa quantidade de água deaerada foi inserida no interior da câmara, sem o corpo de prova. A mangueira de ar comprimido e a mangueira de saída de água foram ligadas aos orifícios correspondentes, sendo esta última também conectada a uma bureta graduada. Permitiu-se o fluxo de água deaerada pela base da câmara edométrica, saindo da placa em direção à bureta, dada a aplicação de uma pressão de ar comprimido.

O procedimento de saturação da placa porosa é uma oportunidade de se determinar o coeficiente de permeabilidade da placa, o qual é calculado através de medidas de vazão de água pela bureta, dimensões da placa e pressão de ar aplicada.

A Figura 13 ilustra os procedimentos realizados para saturação da placa porosa de alto valor de entrada de ar contida na base da câmara edométrica e a Figura 14, o esquema de montagem do corpo de prova na câmara.

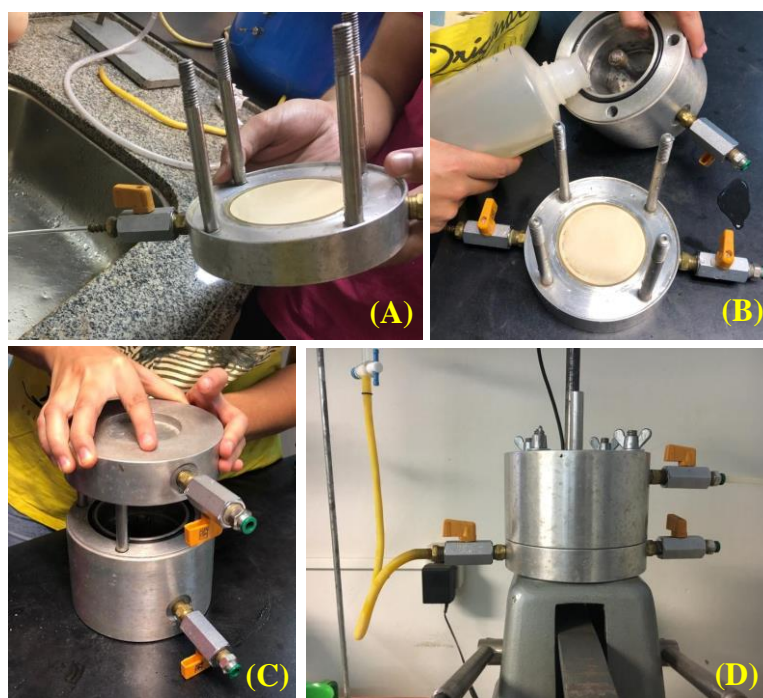


Figura 13. Saturação da placa porosa de alto valor de entrada de ar contida na câmara edométrica: (A) Percolação de água na base do edômetro; (B) Colocação de água deaerada no interior da câmara edométrica; (C) Fechamento da câmara edométrica; (D) Percolação de água deaerada no edométrico sob pressão de ar até equilíbrio da vazão (saturação da HAEV).

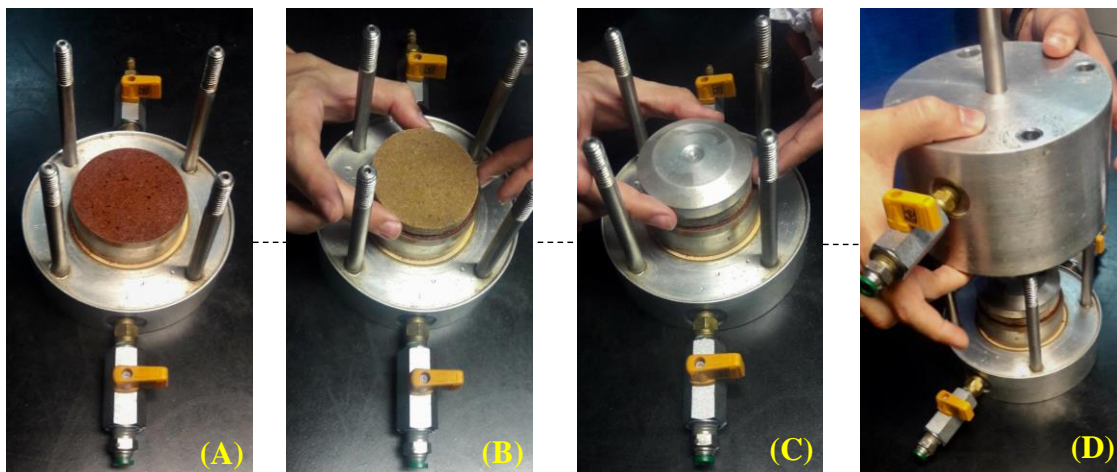


Figura 14. Esquema de montagem dos corpos de prova na câmara edométrica: (A) corpo de prova é posicionado sobre a HAEV; (B) pedra porosa comum no topo; (C) cabeçote de distribuição de carga; (D) fechamento da câmara edométrica.

A câmara é então posicionada na prensa edométrica e o ensaio prossegue com o carregamento. Todos os estágios de carregamento obedeceram ao período de 24 horas, a fim de que as deformações estabilizassem corretamente. Tal como feito com o ensaio edométrico convencional, os estágios de carregamento foram realizados por meio da colocação de anilhas de ferro na alavanca do sistema e a tensão foi uniformemente distribuída ao corpo de prova, estas variando de 10 a 800 kPa.

Ao atingir as tensões de inundação de interesse (50, 100, 200, 400 e 800 kPa), a sucção atuante no corpo de prova foi reduzida a zero sem variação da sobrecarga atuante. A redução da sucção permite a entrada de água na câmara edométrica, e consequente, inundação do corpo de prova. Este procedimento caracteriza o ensaio como edométrico simples, cujo colapso é induzido pela redução da sucção atuante no solo e avaliado a partir da deformação sem aumento da tensão.

Passado o período suficiente para que as deformações por colapso se processem, o ensaio prosseguiu com os carregamentos e posterior descarregamento.

#### 4.4. TÉCNICA DO PAPEL FILTRO

A fim de incorporar o efeito da sucção na análise dos resultados dos ensaios edométricos convencionais, donde não se tem controle ou conhecimento desta, a sucção foi determinada por meio da técnica do papel filtro usando corpos de prova

compactados nas mesmas condições iniciais daqueles utilizados nos ensaios convencionais.

A técnica de papel filtro consiste em colocar papéis de características de retenção conhecidas em um ambiente hermético em contato o solo. Dado o contato entre o solo e o papel, que é capaz de reter umidade, determinou-se a sucção matricial no solo mediante a calibração do papel, após o equilíbrio de potencial. Foi utilizado o papel filtro *Whatman n° 42* e o valor da sucção foi calculado por meio da equação de Chandler; Harwood; Skinner (1992). O ensaio foi realizado conforme recomendações da ASTM D5298 (2016).

A Figura 15 ilustra os procedimentos realizados para determinação da sucção por meio do papel filtro. Inicialmente, o papel *Whatman n°42* foi colocado em contato com o solo, no topo e na base. Em seguida, os corpos de prova foram embrulhados juntamente com discos de PVC, garantindo-se o contato do papel filtro com o solo. A pesagem dos papéis para o cálculo da sucção atuante foi feita 7 a 15 dias após a data de embrulho, após o equilíbrio da sucção ser alcançado.

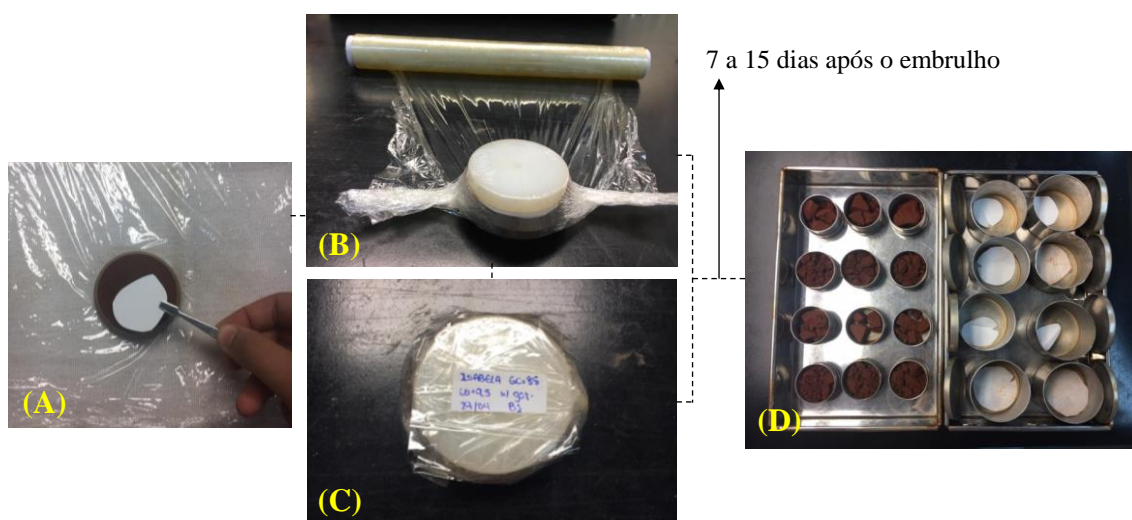


Figura 15. Técnica do papel filtro: (A) colocação do papel filtro em contato com o solo; (B) embrulho do corpo de prova juntamente com discos de PVC; (C) corpo de prova embrulhado; (D) pesagem dos papéis filtro para determinação da sucção e pesagem do solo

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios conduzidos a fim de avaliar a colapsibilidade do solo compactado.

As curvas edométricas obtidas tanto para o ensaio edométrico convencional quanto para o ensaio com controle de sucção tem o índice de vazios normalizados como eixo da ordenada, a fim de uniformizar os resultados e viabilizar as análises comparativas, sem interferência de pequenas variações dos vazios iniciais.

Como os ensaios edométricos foram realizados de forma simples, a descontinuidade vertical na curva edométrica representa o colapso sofrido pelo solo, isto é, variação dos índices de vazios por meio de inundação sob carga constante. As setas indicam a tensão na qual o solo foi induzido ao colapso.

#### **5.1. ENSAIO EDMÉTRICO CONVENCIONAL SIMPLES**

Os resultados aqui apresentados referem-se àqueles obtidos por meio do ensaio edométrico convencional simples. A Figura 16 traz a inserção das massas específicas secas e das umidades de moldagem dos 20 corpos de prova utilizados no ensaio de compressão edométrica convencional na curva de compactação de Proctor.

As umidades de moldagem dos corpos de prova foram 11,4% (umidade ótima) e 9,5% (umidade correspondente ao grau de compactação de 90% sobre a curva de Proctor no ramo seco). As massas específicas secas alvo foram 1,768 g/cm<sup>3</sup> (GC=90%) e 1,670 g/cm<sup>3</sup> (GC=85%). No geral, foi obtida acurácia na moldagem dos corpos de provas. As sobrecargas sob os quais os corpos de prova foram inundados foram de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Conforme já dito, as variáveis foram escolhidas de forma a considerar condições de deficiência de compactação, casos estes recorrentes na prática.

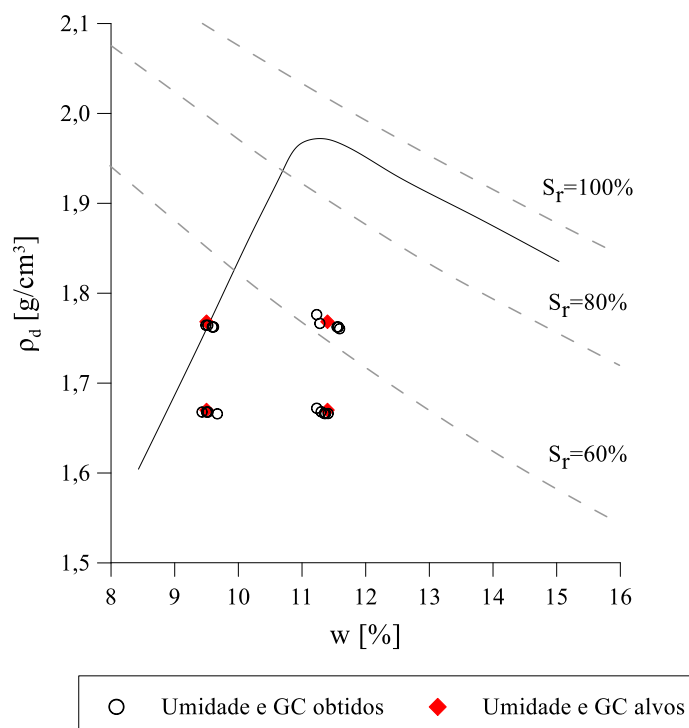


Figura 16. Grau de compactação e umidade de moldagem dos corpos de prova utilizados no ensaio edométrico convencional simples

A Figura 17 traz resultados de ensaios edométricos convencionais com corpos de prova preparados com 11,4% de umidade ( $\Delta w = 0\%$ ) e massa específica seca de 1,768  $\text{g/cm}^3$  (GC= 90%). Na Figura 18 são apresentadas as curvas de compressão edométrica para o solo preparado com 11,4% de umidade ( $\Delta w = 0\%$ ) e massa específica seca de 1,670  $\text{g/cm}^3$  (GC= 85%).

Ambos os ensaios com a umidade ótima, mas com grau de compactação distinto, apresentaram baixa compressibilidade em condição não saturada até a tensão de cerca de 400 kPa (Figuras 17 e 18). Ao ser solicitado à compressão, o solo compactado com GC=90% apresentou redução dos índices de vazios inferior àquele compactado com GC= 85%. Este comportamento confirma a premissa da técnica de compactação quanto à melhoria da compressibilidade do solo.

De forma geral, a variação do índice de vazios devido à inundação foi pequena para os dois graus de compactação, sendo mais pronunciada para as tensões de inundação mais elevadas, na ordem de 400 e 800 kPa.

As curvas de compressão edométrica permitiram observar a influência da tensão de inundação no potencial de colapso. De acordo com Booth (1975), o grau de compactação e a umidade são os fatores de maior influência na colapsibilidade. De fato,

os resultados concordam com o proposto pelo autor, porém, não se pode negligenciar o papel da tensão de inundação no colapso.

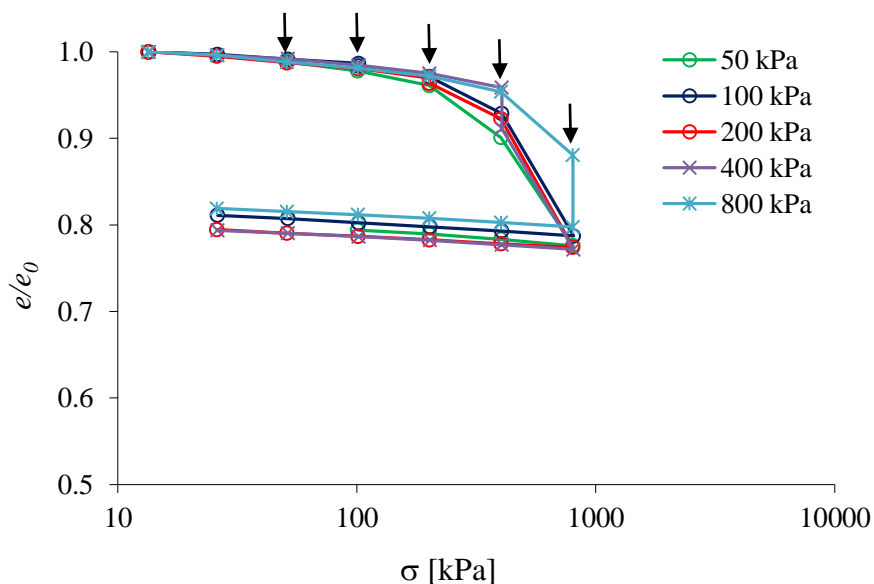


Figura 17. Ensaios edométricos normalizados com  $GC=90\%$  e  $\Delta w=0\%$ . Tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

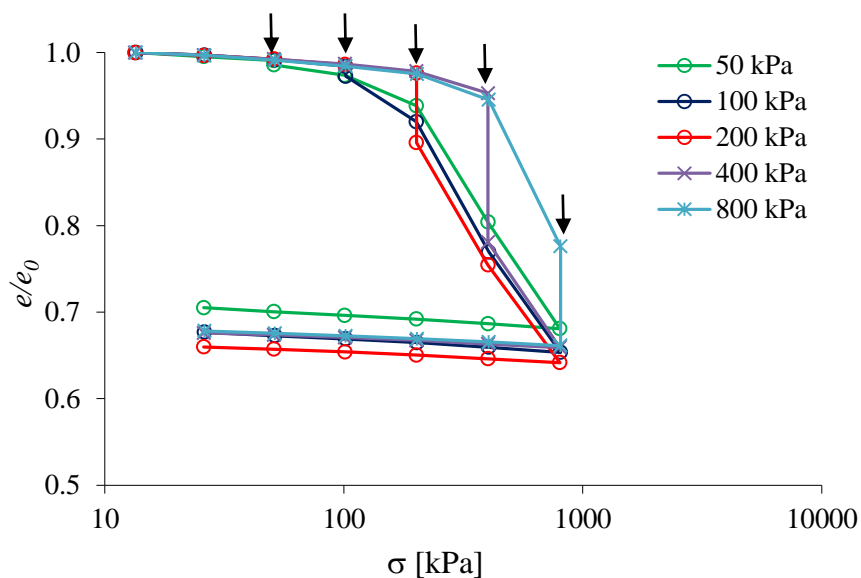


Figura 18. Ensaios edométricos normalizados com  $GC=85\%$  e  $\Delta w=0\%$ . Tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

As Figuras 19 e 20 reúnem os resultados das curvas de compressão confinada para o solo compactado com massa específica seca de  $1,768 \text{ g/cm}^3$  ( $GC=90\%$ ) e

umidade de 9,5% ( $\Delta w = -1,9\%$ ), e massa específica seca de  $1,670 \text{ g/cm}^3$  ( $GC = 85\%$ ) e umidade de 9,5% ( $\Delta w = -1,9\%$ ), respectivamente. Para este conjunto de ensaio, foram mantidos os graus de compactação analisados nos dois primeiros grupos, porém, alterando as umidades alvo.

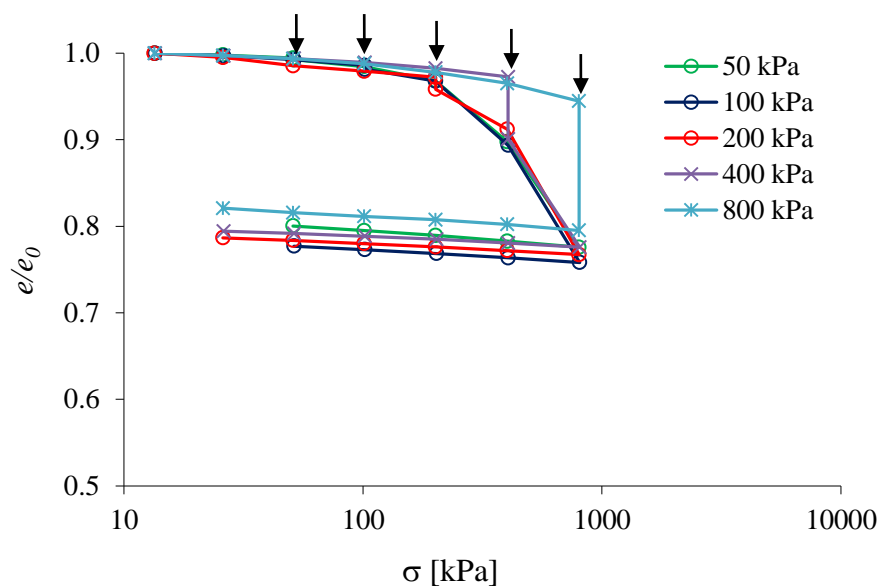


Figura 19. Ensaio edométrico normalizado com  $GC=90\%$  e  $\Delta w = -1,9\%$ . Tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

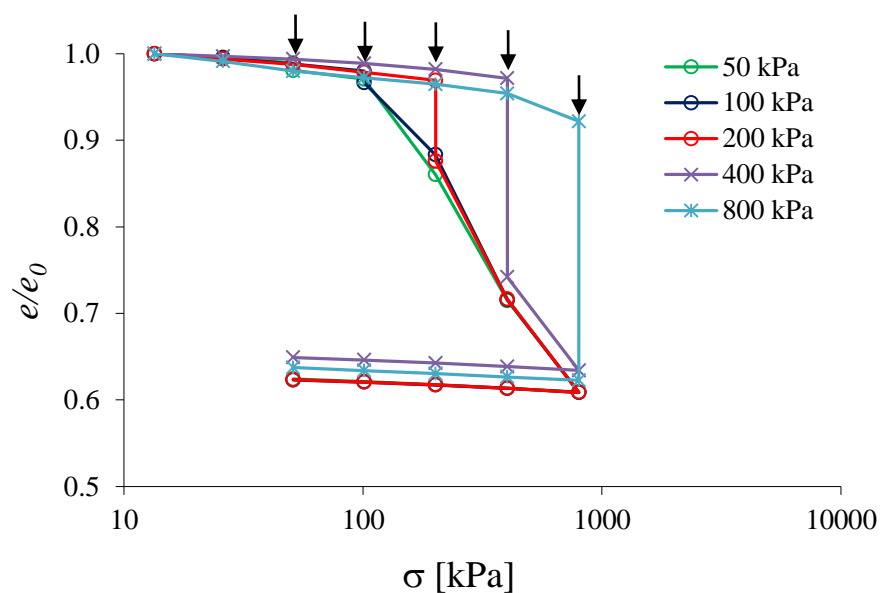


Figura 20. Ensaio edométrico normalizado com  $GC=85\%$  e  $\Delta w = -1,9\%$ . Tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa.

Bem como verificado para a umidade ótima (Figuras 17 e 18), as curvas de compressão edométrica demonstraram a influência do grau de compactação na compressibilidade. E, como no grupo anterior, o solo apresentou pouca deformação em condição não saturada quando solicitado apenas pelo carregamento, sem a inundação, até a tensão de cerca de 400 kPa.

Com relação aos potenciais de colapso, estes também foram mais significativos para as tensões de inundação mais elevadas.

Para fins de comparação, foram reunidas as curvas obtidas para uma mesma tensão de inundação dos quatro grupos ensaiados. Assim, nas Figuras 21 a 25 estão dispostos os resultados para os corpos de prova induzidos ao colapso nas tensões de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, respectivamente.

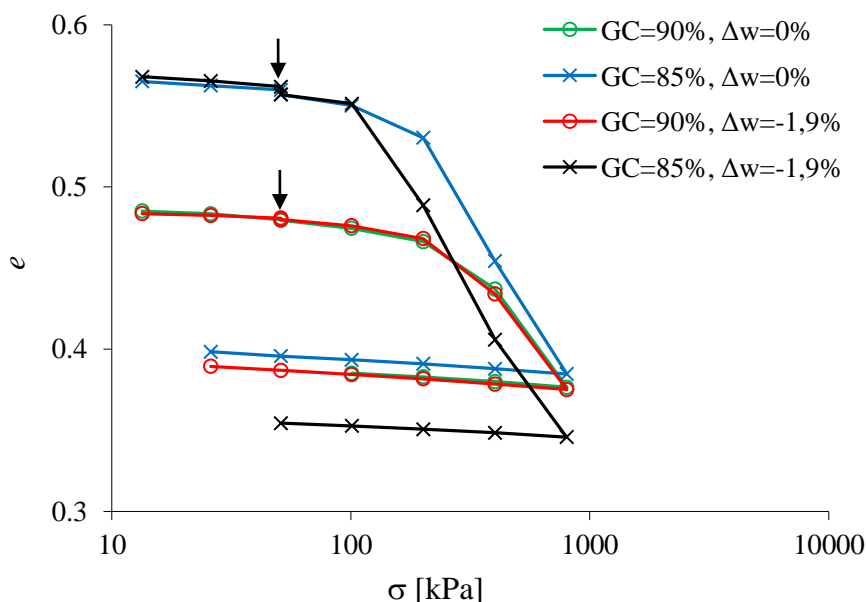


Figura 21. Comparação entre os resultados dos ensaios edométricos com tensões de inundação de 50 kPa

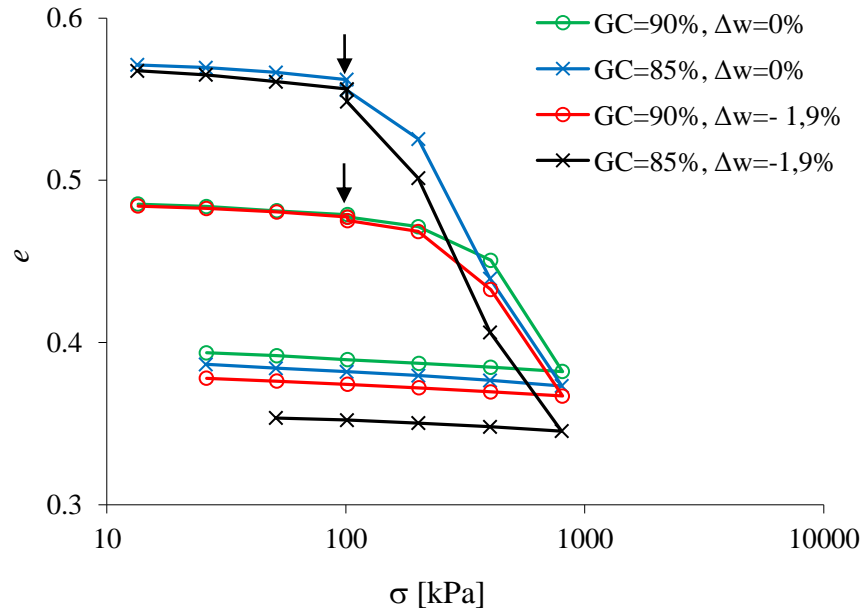


Figura 22. Comparação entre os resultados dos ensaios edométricos com tensões de inundação de 100 kPa

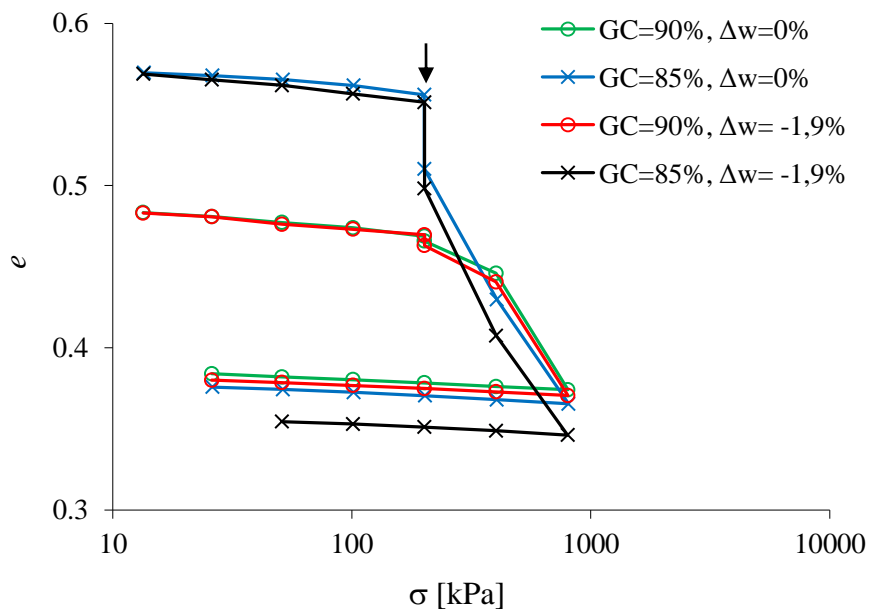


Figura 23. Comparação entre os resultados dos ensaios edométricos com tensões de inundação de 200 kPa

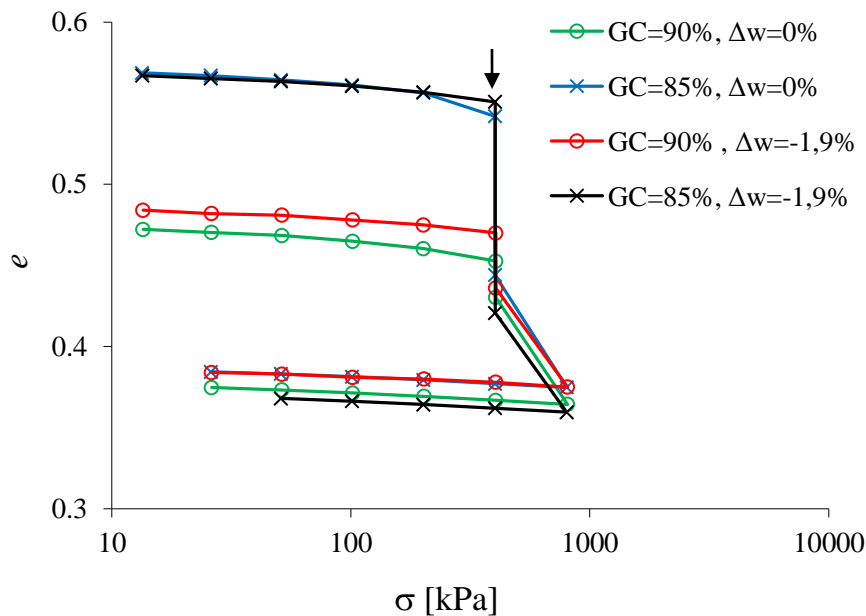


Figura 24. Comparação entre os resultados dos ensaios edométricos com tensões de inundação de 400 kPa

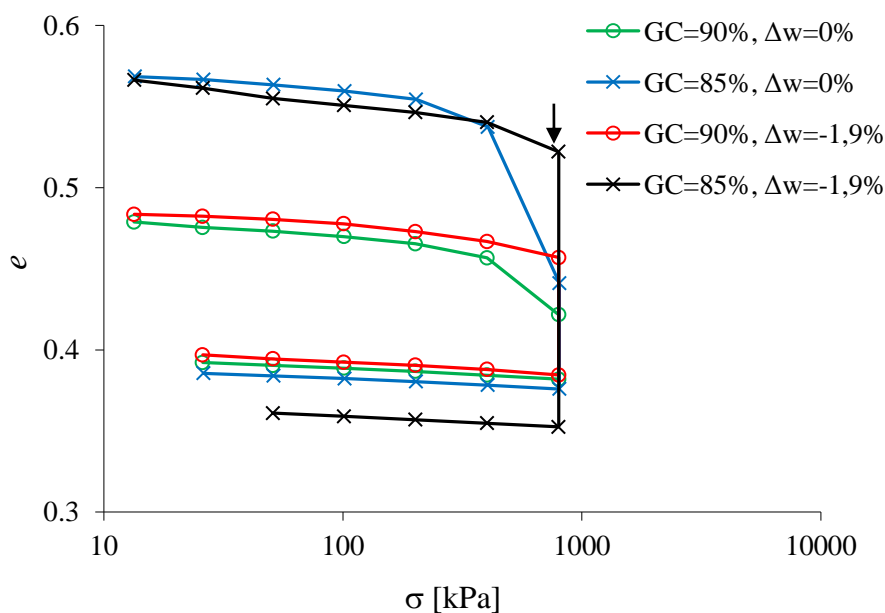


Figura 25. Comparação entre os resultados dos ensaios edométricos com tensões de inundação de 800 kPa

Das figuras 21 a 25, verifica-se que ambos os graus de compactação ensaiados conduziram a um índice de vazio final semelhante e igual trajetória de descompressão. Tal comportamento concorda com o observado por Lambe (1958) a respeito do efeito da compressão confinada na estrutura do solo. Elevados níveis de tensões podem ser suficientes para tornar a estrutura do tipo floculada em dispersa, conduzindo à igual

comportamento. Shao, Zhang e Tan (2018) também verificaram que, independente da densidade inicial do solo, o índice de vazios final do solo após a deformação por colapso foi próximo.

Além disso, como o solo guarda vestígios das tensões aplicadas no processo de compactação, é usual que solos compactados apresentem tensão de cedência elevada. Desta forma, tensões de inundação mais baixas, como 50 e 100 kPa, não conduziram o solo ao colapso por estarem no trecho de carregamento elástico para ambas as condições de compactação, isto é, anterior à tensão de cedência do solo saturado.

Na Figura 26 são apresentados os potenciais de colapso para as diferentes tensões de inundação.

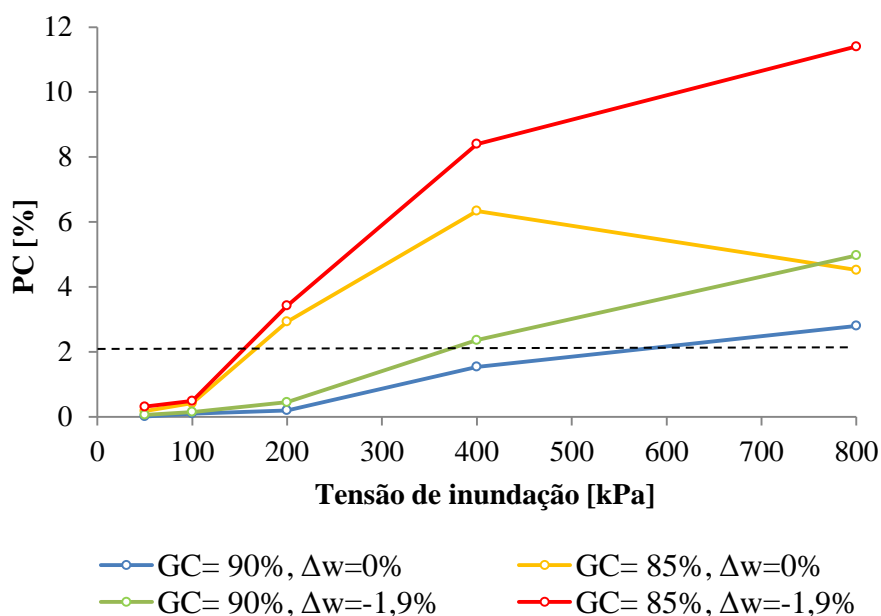


Figura 26. Variação do potencial de colapso com a tensão de inundação para o ensaio edométrico convencional

Para os corpos de prova compactados com GC=90%, as deformações por umedecimento (colapso) mostraram-se crescentes com a sobrecarga, isto contrasta o comportamento de solos lateríticos em estado natural, que apresentam colapso crescente até determinada tensão e após tende a decrescer (RODRIGUES, 2003; SAAB, 2016; SOARES, 2018). Porém, este comportamento condiz com as observações feitas por Basma e Tuncer (1992), de que solos arenosos compactados tendem a apresentar potencial de colapso crescente com o aumento da tensão de inundação.

Para os corpos de prova com grau de compactação de 85% não foi verificado o mesmo comportamento. Quando compactado na umidade ótima, o potencial de colapso

foi crescente até a tensão de inundação de 400 kPa e posteriormente, o valor do colapso decresceu com o aumento da tensão. Ao ser compactado com desvio da umidade ótima de -1,9%, o potencial de colapso foi crescente para todas as tensões de inundação analisadas.

Pode-se supor, no entanto, que as deformações por umedecimento não sejam crescentes indefinidamente, visto que sob altas tensões, o solo tende a um estado mais denso, e por consequência, menos propenso a sofrer colapso. Embora os resultados apresentem tendência de potenciais de colapsos crescentes com a sobrecarga para três dos quatro grupos ensaiados, estes se referem à faixa de tensão atingida no ensaio.

Ainda em relação à Figura 26, a linha tracejada indica o limite máximo no qual o solo não é considerado colapsível, ou seja, para potenciais de colapso menores ou iguais a 2% (VARGAS, 1978). Para os corpos de prova compactados com  $GC=90\%$  e  $\Delta w=0\%$  e àqueles com  $GC=90\%$  e  $\Delta w=-1,9\%$ , as tensões de inundação equivalentes ao  $PC=2\%$  foram de 570 e 370 kPa, respectivamente. Em relação ao grupo compactado com  $GC=85\%$ , para os desvios de umidade ótima de  $\Delta w=0\%$  e  $\Delta w=-1,9\%$ , as tensões foram de 170 e 150 kPa, respectivamente.

Obras de pequeno porte, onde se pode utilizar fundações rasas em solo compactado, em geral não ultrapassam tensões na ordem de 100 kPa. Pode-se averiguar que o grau de compactação de 90%, para ambos os desvios de umidade ótima analisados, levaram a um resultado aceitável, pois somente tensões de inundação elevadas provocaram o colapso do solo. Porém, para o grau de compactação de 85%, potenciais de colapso superiores a 2% foram verificados para tensões relativamente baixas. Evidentemente, os resultados quanto ao potencial de colapso com a tensão são provenientes de ensaios de laboratório e para análises mais realísticas de situações em campo é necessário considerar o fator de escala.

Em suma, os resultados dos ensaios edométricos convencionais permitiram avaliar a influência do grau de compactação, da umidade e da tensão de inundação no comportamento colapsível de um solo compactado.

## 5.2. PAPEL FILTRO

O método do papel filtro foi empregado com o intuito de se determinar a sucção atuante nos corpos de prova compactados utilizados no ensaio edométrico convencional. Por conta de limitações na técnica quanto à perda de umidade, optou-se por medir a

sucção dos corpos de prova imediatamente após a compactação e de corpos de prova umedecidos por gotejamento após a compactação, elevando-se a umidade para um valor de 1 a 2% a mais que a umidade de compactação alvo.

As sucções referentes à umidade ótima ( $w=11,4\%$ ) e ao desvio da umidade de - 1,9% em relação à ótima ( $w= 9,5\%$ ), para ambos os graus de compactação estudados, foram calculadas por meio de ajuste logarítmico dos resultados do papel filtro. Isto foi possível visto que, do conceito de curva de retenção de água no solo, a sucção varia de forma logarítmica com a umidade e ainda, as sucções obtidas pelo papel filtro encontraram-se no patamar da zona de transição da SWRC, permitindo um ajuste logarítmico aceitável.

Os pares sucção-umidade obtidos por meio do papel filtro, bem como aqueles calculados pelo ajuste, estão apresentados na Figura 27. Estes foram plotados junto com as curvas de retenção de água no solo de Ilha Solteira nas condições natural e compactada com  $GC= 94\%$  e  $\Delta w= 3\%$  (SOARES, 2018), para fins de comparação.

Ressalta-se que os pontos obtidos por meio do papel filtro não caracterizam uma curva de retenção de água no solo, visto que estes se encontram em estado de compactação inicial distintos.

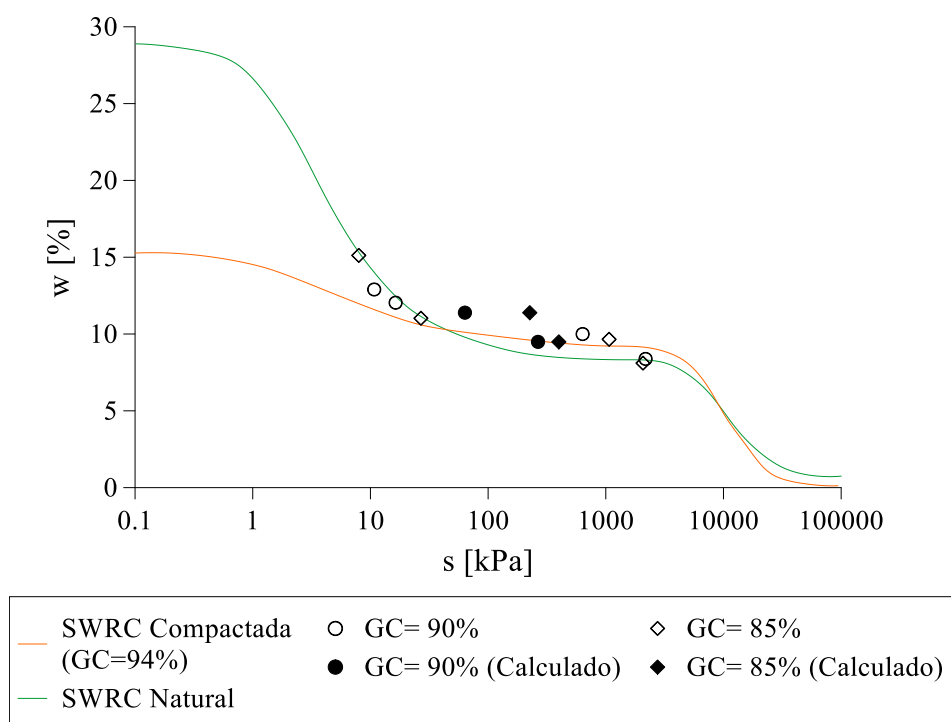


Figura 27. Sucções obtidas por meio da técnica de papel filtro para as diferentes condições inicial de compactação

As sucções obtidas por meio do método de papel filtro e as sucções calculadas por meio de ajuste logarítmico estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2. Sucções obtidas no papel filtro e sucções calculadas por meio de ajuste logarítmico

GC (%)	w (%)	s (kPa)	Determinação da sucção
85	9,7	1067,0	Papel Filtro
	15,1	8,0	
	8,1	2071,5	
	12,0	26,8	
	11,4	226,0	Ajuste logarítmico
	9,5	399,2	
90	10,0	635,2	Papel Filtro
	12,9	10,8	
	8,4	2175,9	
	12,0	16,4	
	11,4	63,5	Ajuste logarítmico
	9,5	265,2	

### 5.3. ENSAIOS EDMÉTRICOS COM SUCCÃO CONTROLADA

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada. Os corpos de prova foram compactados com umidade de 11,4% ( $\Delta w = 0\%$ ) e massa específica seca alvo de  $1,768 \text{ g/cm}^3$  (GC=90%), bem como um conjunto de ensaios também na umidade de 11,4% ( $\Delta w = 0\%$ ), mas com massa específica seca alvo de  $1,670 \text{ g/cm}^3$  (GC=85%). A sucção inicial dos corpos de prova foi de 100 kPa e esta foi mantida constante até as tensões de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, para então ser reduzida a sucção de 0 kPa (saturação), induzindo o solo ao colapso.

Na Figura 28 estão plotadas as massas específicas secas e as umidades atingidas na moldagem dos 10 corpos de prova utilizados no ensaio de compressão edométrica com sucção controlada em relação à curva de compactação de Proctor.

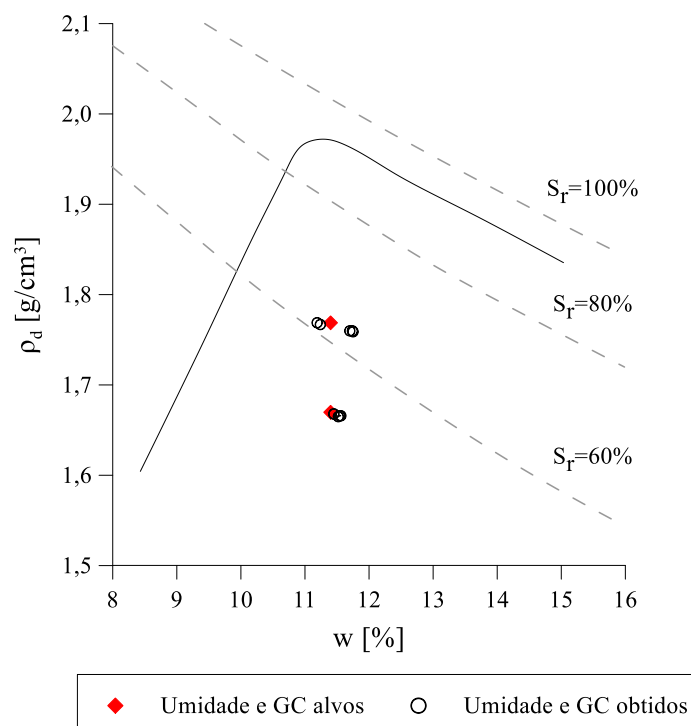


Figura 28. Grau de compactação e umidade de moldagem dos corpos de prova utilizados no ensaio edométrico com sucção inicial controlada e posterior redução da sucção

Os resultados dos ensaios com sucção controlada para os corpos de prova compactados com umidade de 11,4% ( $\Delta w = 0\%$ ) e massa específica seca alvo de 1,768 g/cm<sup>3</sup> (GC=90%), são apresentados na Figura 29. Observa-se que as inundações conduziram a valores baixos, porém, crescentes de potencial de colapso para as tensões de inundação avaliadas, sendo todos os potenciais de colapso inferiores a 2%.

Os resultados dos ensaios com controle de sucção conduzidos para os corpos de prova com massa específica seca de 1,670 g/cm<sup>3</sup> (GC=85%) e umidade de 11,4% ( $\Delta w = 0\%$ ) estão apresentados na Figura 30. Para as maiores tensões de inundação, neste caso, o colapso foi mais expressivo do que nos ensaios com GC=90%, atingindo valores já elevados de potenciais de colapso.

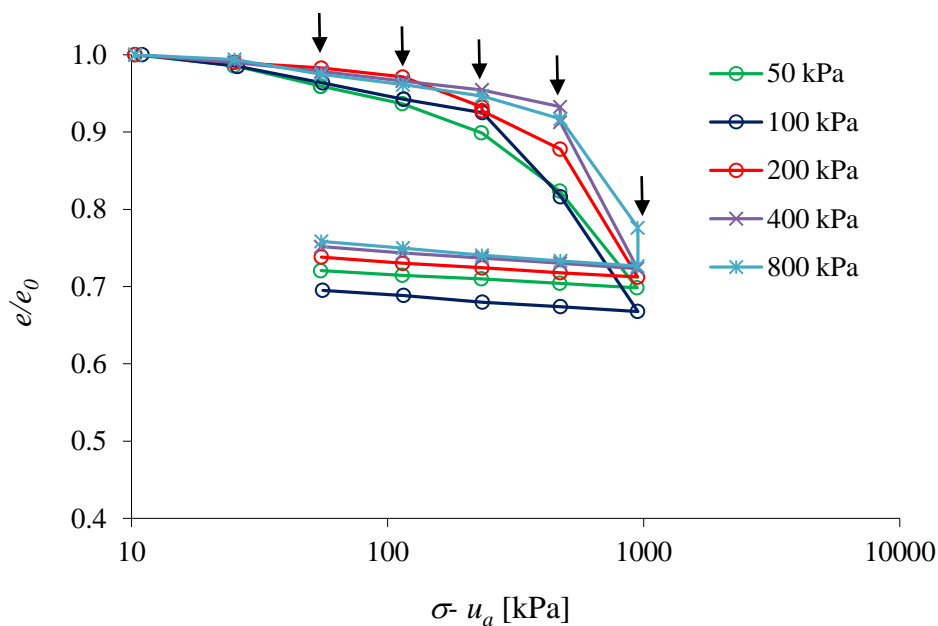


Figura 29. Ensaio edométrico com sucção controlada para os corpos de prova compactados com  $GC=90\%$  e  $\Delta w=0\%$ . Sucção inicial de 100 kPa e tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa

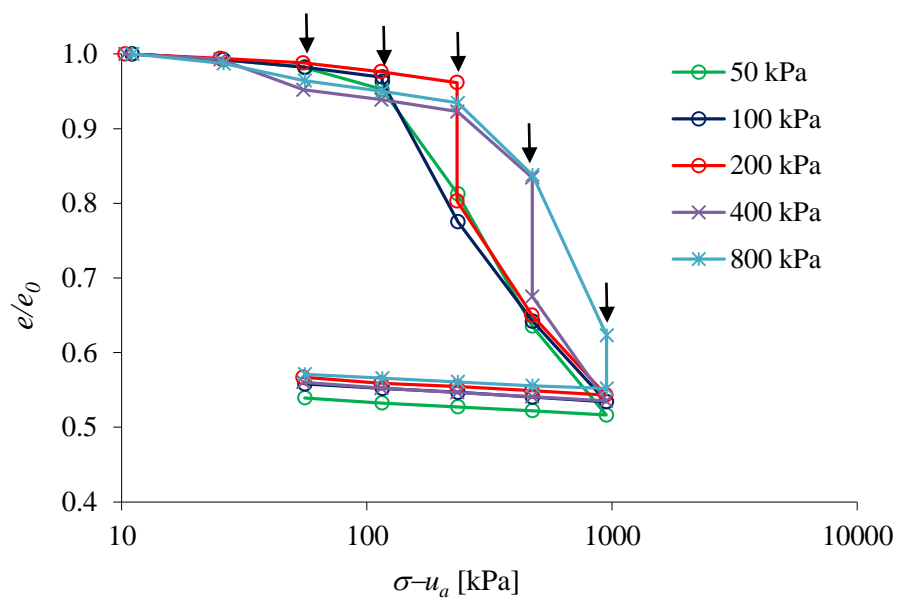


Figura 30. Ensaio edométrico com sucção controlada para os corpos de prova compactados com  $GC=85\%$  e  $\Delta w=0\%$ . Sucção inicial de 100 kPa e tensões de inundação de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa

A correlação de potencial de colapso com a tensão de inundação para ambas as condições de grau de compactação conduzidas no ensaio edométrico com sucção controlada é apresentada na Figura 31.

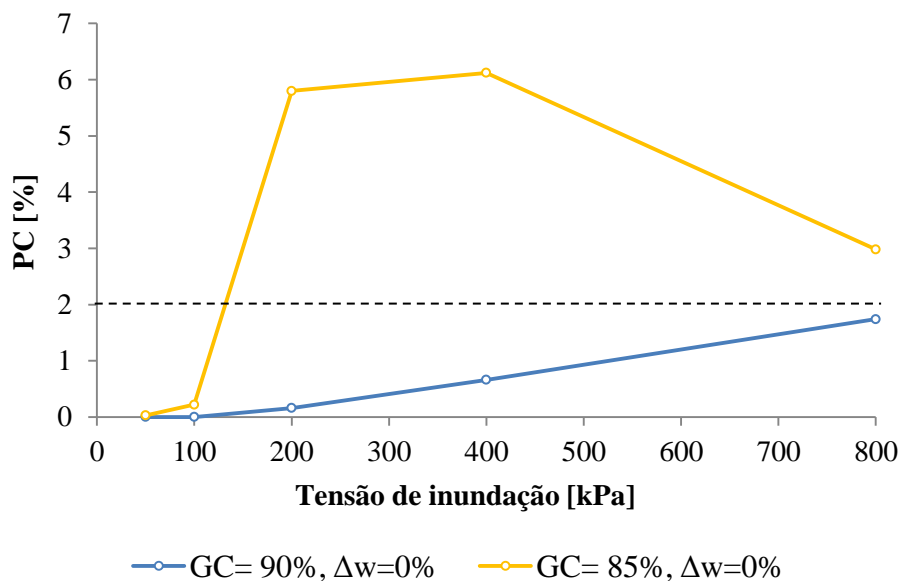


Figura 31. Variação do potencial de colapso com a tensão de inundação para o ensaio edométrico com sucção controlada

Os corpos de prova compactados com  $GC=90\%$  e umidade ótima apresentaram potenciais de colapso crescentes com a sobrecarga para o nível de tensão analisado. Enquanto os potenciais de colapso para os corpos de prova com  $GC=85\%$  e  $\Delta w=0\%$  foram crescente até um valor máximo de 400 kPa e posterior decréscimo. Resultados semelhantes foram observados a partir dos ensaios edométricos convencionais para os corpos de prova com igual condição de compactação (mesma massa específica seca e mesma umidade de moldagem), mas diferente sucção inicial.

O valor máximo no qual há inexistência do colapso é indicado pela linha tracejada (VARGAS, 1978), em que potenciais de colapso menores que 2% não causam danos estruturais significativos. Ao ser compactado com  $GC=90\%$  e sucção inicial de 100 kPa, o solo não apresentou deformação significativa em decorrência do colapso para a faixa de tensão analisada. Por outro lado, o solo compactado com 85% atingiu o potencial de colapso de 2% para a tensão de inundação de 130 kPa.

#### 5.4. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis investigadas: grau de compactação, umidade de moldagem, sucção inicial e tensão de inundação, influenciaram nas deformações por colapso do solo compactado. Apesar de os efeitos destas na colapsibilidade estarem relacionados, a influência de cada variável será aqui apresentada e discutida.

### *Grau de compactação e umidade de moldagem*

Com relação ao grau de compactação, os corpos de prova com menor massa específica seca inicial (GC=85%) foram mais afetados pelo umedecimento, apresentando potencial de colapso superior a 2% em tensões de inundação relativamente baixas (na ordem de 150 kPa). Tal observação está de acordo com a premissa básica de melhoria do solo por meio da compactação. A deficiência no grau de compactação conduz à menor domínio da região elástica e menor gama de tensões no qual não há ocorrência de deformações por colapso (SIVAKUMAR; WHEELER, 2000).

Quanto à umidade de compactação, os solos mais secos que à ótima mostraram colapsos crescentes para ambos os graus de compactação, dentro do nível de tensão estudado. Ao ser compactado na umidade ótima, o corpo de prova com GC=85% apresentou colapso crescente até 400 kPa de tensão, e em seguida, colapso decrescente. Para os corpos de prova compactados com GC=90% e umidade ótima, o potencial de colapso foi crescente para o nível de tensão avaliado. Tal comportamento foi observado tanto para o ensaio edométrico convencional quanto para o ensaio com sucção controlada.

Desta forma, a influência da umidade de compactação fica evidente quando analisada as curvas de compressão edométrica para o solo compactado com GC=85% (Figuras 18, 20 e 30). Para um mesmo grau de compactação, mas umidade distinta, o solo mais seco em relação à ótima apresentou colapso crescente com a tensão de inundação dentro de nível de tensão estudado, enquanto que ao ser compactado na umidade ótima, o colapso apresentou um valor máximo. Este comportamento deve-se ao fato de que a umidade influencia na inclinação da reta virgem, quanto menor a umidade do solo, menor a inclinação em relação ao solo saturado e conseqüentemente, os potenciais de colapso serão crescentes com a tensão de inundação.

### *Sucção inicial*

No ensaio edométrico convencional, os corpos de prova foram ensaiados na condição de compactação, ou seja, com a umidade e sucção inicial atingida ao ser compactado. Por outro lado, no ensaio edométrico com sucção controlada, após a compactação na umidade ótima ( $\Delta w = 0\%$ ), foi imposta uma sucção inicial de 100 kPa aos corpos de prova por meio da técnica de translação de eixos.

A fim de explorar o efeito da sucção inicial na colapsibilidade do solo compactado, a técnica do papel filtro foi utilizada para obter a sucção atuante nos corpos de prova usados nos ensaios edométricos convencionais.

Na Figura 32 são apresentadas as condições de compactação dos corpos de prova usados para realização dos ensaios edométricos. Os valores de grau de saturação ( $S_r$ ) médio dos corpos de prova, bem como as sucções iniciais de ensaio foram representados na curva de Proctor, locados na posição respectiva à massa específica seca e umidade de moldagem alvos.

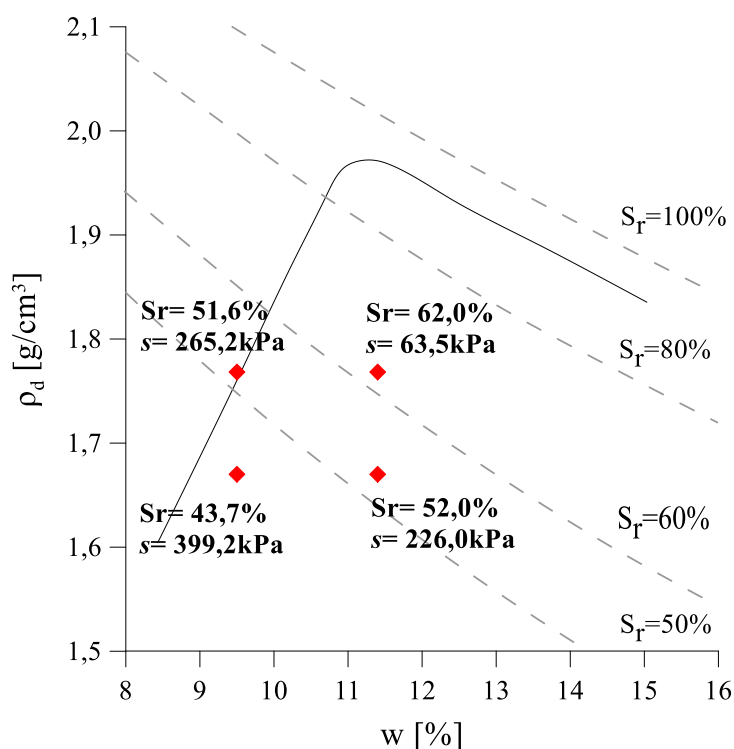


Figura 32. Grau de saturação e sucção para as quatro condições de compactação estudadas plotadas na curva de Proctor

Apesar de não se ter um conjunto de sucções suficientes para definir isolinhas de sucção, observa-se, dos dados disponíveis, que o solo quando compactado com  $GC=90\%$  e  $\Delta w=-1,9\%$  e com  $GC=85\%$  e  $\Delta w=0\%$  conduziram a sucções iniciais semelhantes, bem como grau de saturação semelhante. Este último já esperado, visto que ambas as condições de compactação estão na linha de mesmo grau de saturação.

Isolinhas de sucção para o solo compactado foram apresentados por Suriol, Gens e Alonso (2002), no qual foi observado que elas são praticamente verticais para baixas umidades e tendem a se tornar paralelas à linha de saturação conforme aumenta a

umidade. Marinho e Stuermer (2000) observaram que as isolinhas de sucção não são verticais, o que indica dependência da massa específica seca na sucção após a compactação.

O entendimento da influência das condições de compactação na sucção requer uma análise completa da característica de retenção do solo e, conseqüentemente, o conhecimento da curva de retenção de água. Como há fatores que alteram a singularidade da curva, como o estado inicial do solo, diferentes curvas para cada condição de compactação estudada seriam necessárias.

De fato, baixas umidades podem conduzir a sucções posicionadas no trecho residual da SWRC, donde se observa pouca influência do grau de compactação. Para este caso, mesma umidade e diferente grau de compactação conduzem à mesma sucção inicial do corpo de prova e isolinhas verticais na curva de Proctor. Para umidades mais elevadas, a densificação do solo conduz a características de retenção distintas, e, para uma mesma umidade, sucções diferentes são observadas a depender da densidade do solo. Neste caso, isolinhas não verticais são obtidas na curva de Proctor.

Assim sendo, a sucção inicial atuante no solo compactado depende tanto da umidade quanto do grau de compactação, visto que estas duas variáveis alteram a singularidade da curva de retenção de água no solo. Tais conclusões estão de acordo com os resultados apresentados na Figura 32.

Na Figura 33 é apresentada a relação entre o grau de saturação médio dos corpos de prova após a compactação e a sucção atingida para as diferentes condições estudadas. Conforme esperado, graus de saturação maiores conduziram a menores valores de sucções para ambas os graus de compactação.

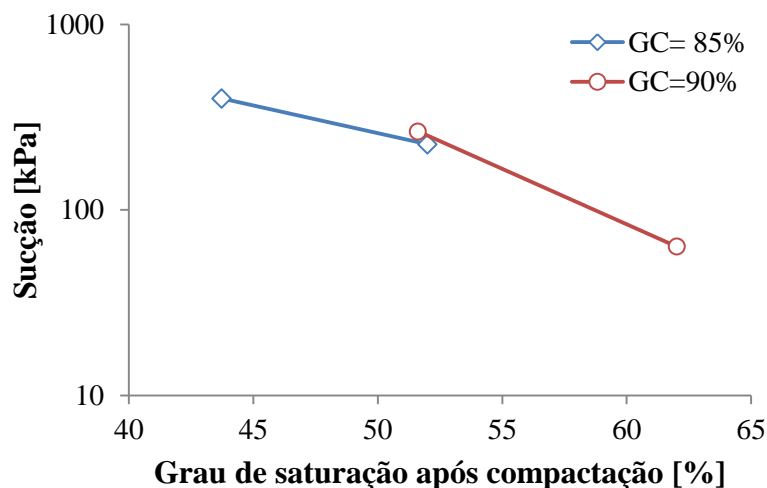


Figura 33. Relação do Grau de Saturação com a sucção para os corpos de prova compactados em diferentes graus de compactação

A correlação entre a sucção inicial (isto é, sucção dos corpos de prova antes da inundação) e o potencial de colapso do solo encontra-se nas Figuras 34 e 35, nas quais estão reunidos os resultados dos ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada para as tensões de inundação de 400 e 800 kPa, respectivamente. Tais tensões foram apresentadas, pois nelas o colapso foi mais expressivo.

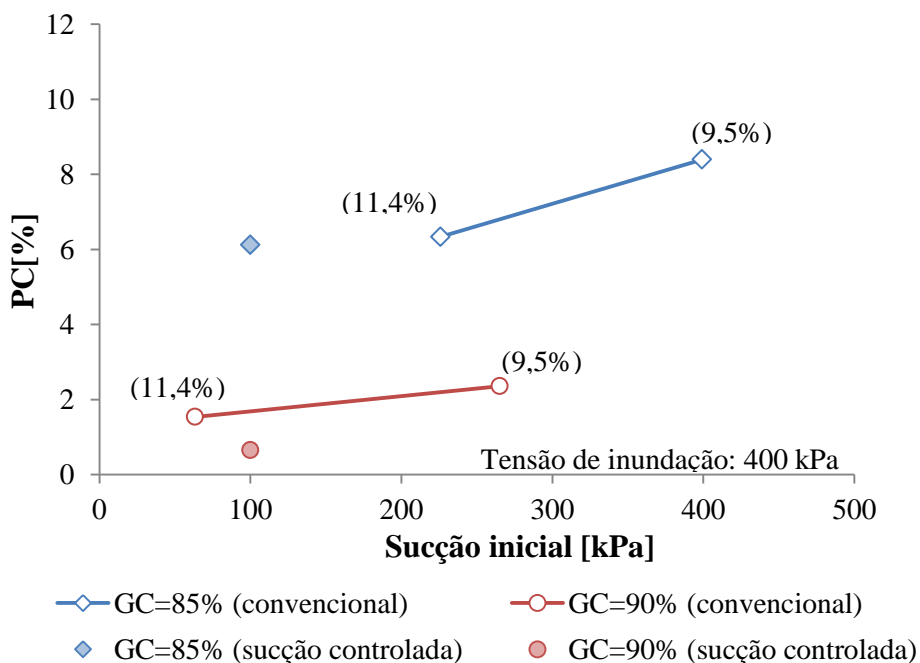


Figura 34. Influência da sucção inicial no potencial de colapso dos corpos de prova em diferentes condições de compactação e tensão de inundação de 400 kPa (os números em parênteses indicam a umidade de compactação)

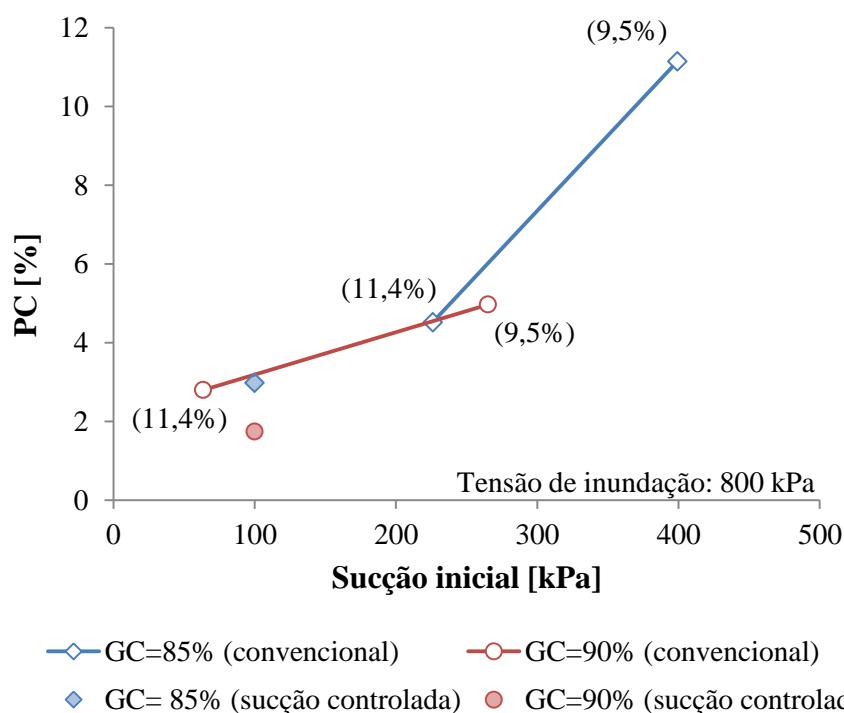


Figura 35. Influência da sucção inicial no potencial de colapso dos corpos de prova em diferentes condições de compactação e tensão de inundação de 800 kPa (os números em parênteses indicam a umidade de compactação)

Mesmo que sutilmente, em ambos os graus de compactação, o potencial de colapso do solo mais denso (maior GC) foi menos afetado por variações na sucção, ou seja, a variação da sucção inicial dos corpos de prova compactados com GC=90% conduziu à menor variação no potencial de colapso para uma mesma tensão de inundação, se comparado com o solo compactado com GC=85%. Resultado semelhante foi observado por Rao e Revanasiddappa (2000) ao ensaiar um solo argiloso residual.

Quanto aos corpos de prova compactados com GC=90% e submetidos à sucção inicial constante controlada até a saturação, estes apresentaram colapso inferior àqueles obtidos no ensaio edométrico convencional, tanto para a tensão de inundação de 400 kPa, quanto para 800 kPa. No entanto, os valores de potencial de colapso para estes casos foram sempre baixos (inferior a 2%), podendo-se considerar potencial colapso crescente com a sucção nas tensões analisadas.

Portanto, os resultados experimentais sugerem que a sucção inicial influencia no comportamento colapsível do solo estudado, e está relacionada com o grau de compactação atingido, bem como a tensão no qual o solo é submetido ao colapso.

### Tensão de inundação

Com relação à tensão de inundação, esta afeta distintamente os potenciais de colapso. O efeito da sobrecarga na colapsibilidade é apresentado nas Figuras 36 e 37, nas quais os resultados dos ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada foram reunidos de acordo com o grau de compactação dos corpos de prova, para GC=90 e 85%, respectivamente.

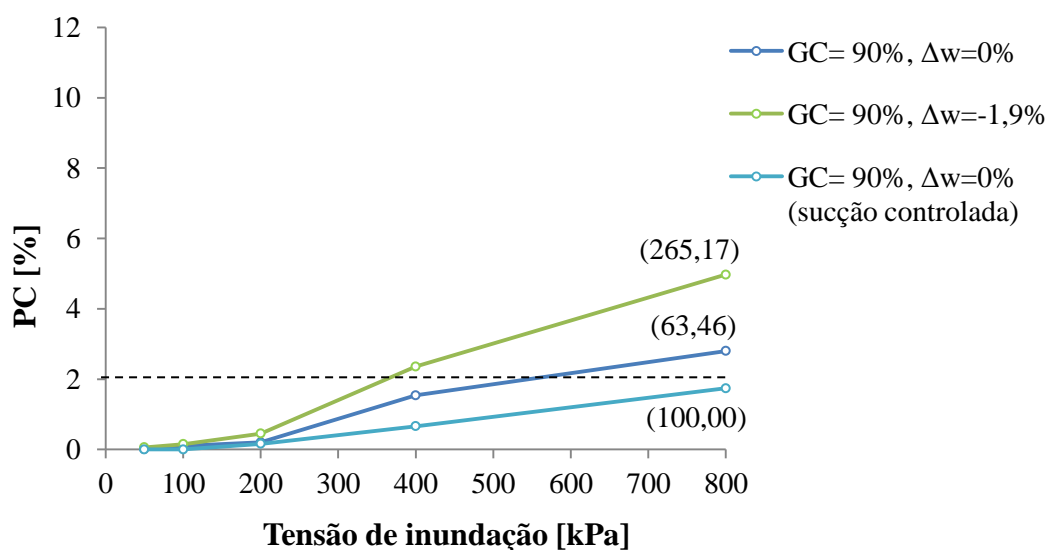


Figura 36. Variação do potencial de colapso com a tensão de inundação para os corpos de prova compactados com GC=90% (os números em parênteses indicam a sucção atuante)

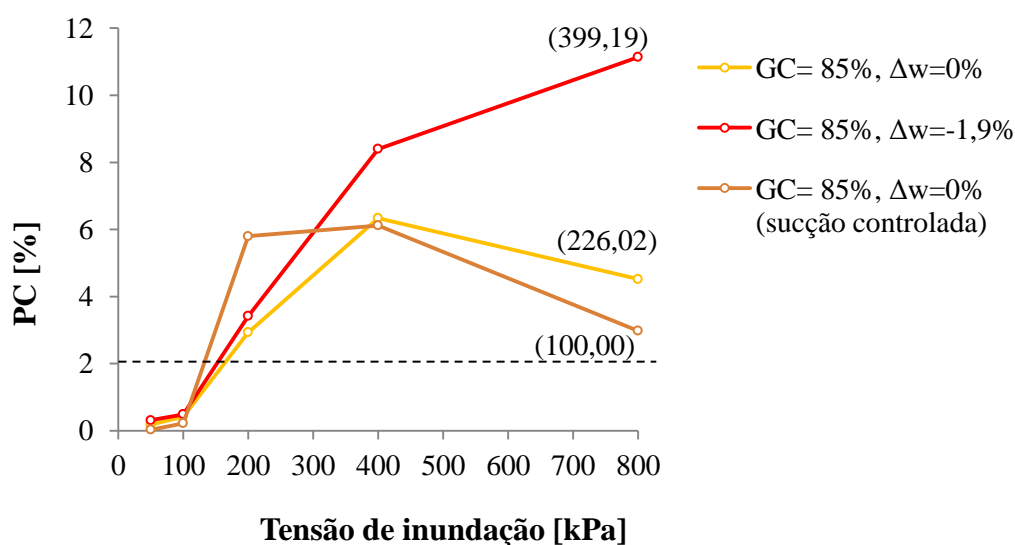


Figura 37. Variação do potencial de colapso com a tensão de inundação para os corpos de prova compactados com GC=85% (os números em parênteses indicam a sucção atuante)

Nas figuras, fica evidente que o efeito da sobrecarga no colapso se fez sentir de maneiras distintas. O potencial de colapso foi crescente com a tensão nas três condições de sucção inicial no caso de  $GC=90\%$ , e crescente apenas para o solo com deficiência de umidade em relação à ótima para  $GC=85\%$ .

Quando analisado os potenciais de colapso para os corpos de prova compactados com  $GC=90\%$ , os colapsos foram menores para o solo com sucção inicial de 100 kPa em relação os potenciais obtidos para o solo com as mesmas condições iniciais de compactação (mesmo  $GC$  e mesma umidade de moldagem) mas sucção inicial de 63,5 kPa. Este comportamento não é o esperado para solos colapsíveis, pois os potenciais de colapso devem ser maiores quanto maior a sucção inicial do solo antes da inundação.

No entanto, deve ser destacado que o solo compactado com  $GC=90\%$  apresenta colapsos quase que desprezíveis até a tensão de 400 kPa, de acordo com Vargas (1978), que não considera solos colapsíveis os que apresentam potencial de colapso menor ou igual de 2%.

De forma geral, os resultados apresentados nesta seção mostram a importância de considerar a condição de não saturação no estudo de solos compactados, bem como as variáveis que afetam o efeito do colapso.

Métodos empíricos, como os propostos por Vilar e Rodrigues (2015) e Gibbs (1961, *apud* USBR, 1998), têm como premissa a baixa densidade (ou baixo grau de compactação) e a umidade (ou o desvio de umidade) como os principais fatores que predisõem os solos ao colapso. Evidentemente, estes fatores são fundamentais, mas não são capazes de prever ou quantificar o colapso dos solos, recaindo sobre estes apenas um indicativo do comportamento colapsível dos solos. Apesar da importância destes modelos empíricos, principalmente nas etapas iniciais de projeto, fica evidente que não apenas o grau de compactação e a umidade são as variáveis necessárias para descrever o comportamento colapsível em um solo compactado.

Vilar e Rodrigues (2015), por exemplo, consideram que solos com  $GC = 90\%$  e umidade aproximadamente igual à umidade ótima não exibirão comportamento colapsível. Para baixas tensões de inundação este comportamento pôde ser constatado, no entanto, tensões elevadas conduziram a um potencial de colapso superior ao mínimo de 2% e tensões acima de 800 kPa poderão conduzir o solo a colapsos mais significativos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudou-se o comportamento colapsível do solo compactado de Ilha Solteira considerando-se os conceitos próprios da Mecânica dos Solos não Saturados. As variáveis de estudo foram: grau de compactação, umidade de moldagem, sucção inicial e tensão na qual o solo foi induzido ao colapso.

O grau de compactação e a umidade de moldagem foram definidos considerando situações de obras que não tem controle adequado da compactação e podem apresentar problemas relacionados ao colapso. Foi tomado como base o critério de classificação de solos colapsíveis proposto por Vilar e Rodrigues (2015).

Portanto, com base nos resultados desta pesquisa, as seguintes conclusões são apresentadas:

- A deficiência de compactação influenciou na compressibilidade do solo e no potencial de colapso. Os corpos de prova com menor grau de compactação (GC=85%) foram mais afetados pelo umedecimento, apresentando potencial de colapso superior a 2% em tensões de inundação relativamente baixas.
- Os solos mais secos em relação à ótima apresentaram colapsos crescentes dentro do nível de tensão estudado. Ao ser compactado na umidade ótima, o solo com GC=85% apresentou potencial de colapso máximo que depois desceu para tensões mais elevadas. Para os corpos de prova compactados com GC=90% e umidade ótima, o potencial de colapso foi crescente para o nível de tensão avaliado. Tal comportamento foi observado tanto no ensaio edométrico convencional quanto no ensaio com sucção controlada.
- Verificou-se que a sucção atuante no solo compactado depende tanto da umidade quanto do grau de compactação. Ainda, o potencial de colapso dos corpos de prova com maior massa específica seca (maior GC) compactados em diferentes umidades de moldagem foi menos afetado por variações na sucção inicial.

- O potencial de colapso foi crescente com a tensão de inundação para o solo compactado com  $GC=90\%$  nas três sucções iniciais analisadas. Quando compactado com  $GC=85\%$ , o potencial de colapso foi cresceu apenas para o solo mais seco em relação à ótima. Do método proposto por Vilar e Rodrigues (2015), solos colapsíveis apresentam grau de compactação menor que  $90\%$ . De fato, potenciais de colapso desprezíveis foram verificados para baixas tensões para o solo com  $GC=90\%$ , mas tensões elevadas conduziram à potencial de colapso superior à  $2\%$ , indicando que tensões maiores que  $800\text{ kPa}$  podem levar a maiores magnitudes de colapsos.
- Os resultados apresentados permitiram avaliar a influência das variáveis de estudo no potencial de colapso do solo compactado. Métodos expeditos clássicos para classificação do colapso, como o de Gibbs (1961, apud USBR, 1998), e propostas mais recentes, como a Vilar e Rodrigues (2015), não consideram a influência da tensão de inundação e da sucção no colapso do solo. Tendo em vista os avanços dos conceitos da Mecânica dos Solos não Saturados nas últimas décadas, é imprescindível a consideração do efeito da sucção no estudo do comportamento colapsível do solo compactado. Tais métodos de identificação de solos colapsíveis com base nas condições de compactação são úteis na fase preliminar de projeto, mas não devem substituir técnicas de investigação mais elaboradas que consideram a influência da tensão de inundação e da sucção no potencial de colapso do solo.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar as curvas de retenção de água no solo para as diferentes condições de compactação estudada, a fim de avaliar o efeito da compactação na sucção atuante do solo, bem como o efeito da compactação na singularidade da curva de retenção;
- Realizar ensaios edométricos com sucção controlada para sucções diferentes das estudadas nesta dissertação;
- Realizar ensaios edométricos com sucção controlada para o solo compactado com deficiência de umidade (mais seco que à umidade ótima). Realizar ensaios edométrico convencionais para o solo seco ao ar;
- Analisar o custo – benefício da utilização de fundações rasas apoiadas em solos colapsíveis compactados com as mesmas condições de compactação estudadas nesta dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6457. 6457. Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. . 2016.

AGNELLI, N. **Estudo da colapsividade do solo de Bauru através de provas de carga diretas**. Dissertação de mestrado—São Carlos: Universidade de São Paulo - EESC/USP, 1992.

AITCHISON, G. D. **Engineering concepts of moisture changes in soils - Statement of the review panel**. . In: MOISTURE EQUILIBRIA AND MOISTURE CHANGES IN THE SOILS BENEATH COVERED AREAS. Sydney, Butterwoths: 1965

ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. **Special Problem Soils. General Report**. Proceedings of the 9th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Anais...**Dublin, Rotterdam: 1987. Acesso em: 28 jan. 2019

ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. A constitutive model for partially saturated soils. **Géotechnique**, v. 40, n. 3, p. 405–430, 1 set. 1990.

ALONSO, E. E.; PINYOL, N. M.; GENS, A. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. **Géotechnique**, v. 63, n. 6, p. 463–478, 1 maio 2013.

ASTM D5298. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. . 2016, Sec. ASTM International, West Conshohocken, PA.

BARDEN, L.; MCGOWN, A.; COLLINS, K. The collapse mechanism in partly saturated soil. **Engineering Geology**, v. 7, n. 1, p. 49–60, 1 jun. 1973.

BASMA ADNAN A.; TUNCER ERDIL R. Evaluation and Control of Collapsible Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 10, p. 1491–1504, 1 out. 1992.

BENATTI, J. C. B.; MIGUEL, M. G. A proposal of structural models for colluvial and lateritic soil profile from southwestern Brazil on the basis of their collapsible behavior. **Engineering Geology**, v. 153, n. Supplement C, p. 1–11, 8 fev. 2013.

BICALHO, K. V. et al. **Evaluation of filter paper calibrations for indirect determination of soil suctions of an unsaturated compacted silty sand**. . In: PROCEEDINGS OF THE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING (VOLUMES 1, 2, 3 AND 4). Alexandria: 2009

BISHOP, A. W. **The principle of effective stress**. Teknisk Ukeblad: Norwegian Geotechnical Institute, [s.d.]. v. 106

BISHOP, A. W.; BLIGHT, G. E. Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils. **Géotechnique**, v. 13, n. 3, p. 177–197, 1 set. 1963.

BLATZ, J. A.; CUI, Y.-J.; OLDECOP, L. Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction Control. In: TARANTINO, A.; ROMERO, E.; CUI, Y.-J. (Eds.). . **Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 49–61.

BLATZ, J.; GRAHAM, J. A system for controlled suction in triaxial tests. **Géotechnique**, v. 50, n. 4, p. 465–469, 1 ago. 2000.

BOOTH, A. R. **The factors influencing collapse settlement in compacted soils**. . In: SIXTH REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Durban, South Africa: 1975

CAICEDO, B. et al. Experimental and analytical framework for modelling soil compaction. **Engineering Geology**, v. 175, p. 22–34, 10 jun. 2014.

CAVALCANTE, E. H. et al. **Campos experimentais brasileiros**. . In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MACÂNICA DOS SOLOS - COBRAMSEG. Curitiba: 2006

CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. Sample disturbance in London Clay. **Géotechnique**, v. 42, n. 4, p. 577–585, 1 dez. 1992.

CHEN, W.-B. et al. Influence of matric suction on nonlinear time-dependent compression behavior of a granular fill material. **Acta Geotechnica**, 23 jan. 2019.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de fundações em Solos Colapsíveis**. São Carlos - SP: EESC-USP, 2009.

COLLARES, A. C. Z. B. **Influência de fatores estruturais e químicos no colapso e dispersão de dois solos**. text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 8 maio 2002.

COSTA, Y. D. J. **Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa**. Dissertação de mestrado—[s.l.] Universidade de São Paulo, 1999.

CRONEY, D.; COLEMAN, J. D.; BLACK, W. P. M. Movement and Distribution of Water in Soil in Relation to Highway Design and Performance. p. 27, 1958.

DAS, A. P.; THYAGARAJ, T. Collapse behaviour of compacted red soil. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 20–27, 2018.

DE FREITAS, M. C.; TSUHA, C. DE H. C.; VILAR, O. M. Briefing: Compacted soil columns for collapsible lateritic soil improvement. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 170, n. 4, p. 186–192, 9 ago. 2017.

DEL PINO JÚNIOR, A. **Análise do comportamento de estacas do tipo broca escavada com trado mecânico, solicitadas por esforços transversais**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEIS, 2003.

DUDLEY, J. H. Review of Collapsing Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 96, n. 3, p. 925–947, 1970.

FAGUNDES, L. P. et al. Improvement of collapsible soil behavior of a lateritic soil using rice husk ash. **Key engineering materials**, v. 668, p. 290–296, 2016.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress State Variables for Unsaturated Soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 103, n. 5, p. 447–466, 1977.

FREDLUND, D. G.; PHAM, H. Q. **A volume-mass constitutive model for unsaturated soils in terms of two independent stress state variables**. . In: 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. Arizona: 2006

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. Canadá: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1 ago. 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, v. 32, p. 159A-159A, 1 jun. 1995.

FUTAI, M. M. **Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsáveis**. Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - COPPE, 1997.

GALLIPOLI, D. et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. **Géotechnique**, v. 53, n. 1, p. 123–135, 1 fev. 2003.

GAO, Y. et al. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range. **Acta Geotechnica**, v. 14, n. 2, p. 417–428, 1 abr. 2019.

GARAKANI, A. A. et al. Effect of road salts on the hydro-mechanical behavior of unsaturated collapsible soils. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 77–90, 1 dez. 2018.

GENS, A.; ALONSO, E. E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 29, n. 6, p. 1013–1032, 1 dez. 1992.

GIBBS, H. J.; BARA, J. P. Stability problems of collapsing soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 93, n. 4, p. 577–594, 1967.

GONZÁLEZ, N. A.; COLMENARES, J. E. **Influence of matric suction on the volume change behaviour of a compacted clayey soil**. . In: GEOTECHNICAL SPECIAL PUBLICATION. 2006

GUTIERREZ, N. H. M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná.** text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 19 ago. 2005.

GUTIERREZ, N. H. M.; NÓBREGA, M. T. DE; VILAR, O. M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 68, n. 1, p. 107–116, 1 fev. 2009.

HOUSTON, S. L. et al. Geotechnical engineering practice for collapsible soils. In: TOLL, D. G. (Ed.). **Unsaturated Soil Concepts and Their Application in Geotechnical Practice.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p. 333–355.

J. WHEELER, S.; SIVAKUMAR, V. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 2: Shearing and constitutive modelling. **Geotechnique**, v. 50, p. 369–376, 8 jan. 2000.

JENNINGS, J. E. B.; BURLAND, J. B. Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils. **Géotechnique**, v. 12, n. 2, p. 125–144, 1 jun. 1962.

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. **A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure.** . In: PROCEEDINGS OF THE 6TH REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 1975

KAMPALA, A.; HORPIBULSUK, S. Engineering properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 5, p. 632–644, 2013.

KIM, J.; HWANG, W.; KIM, Y. Effects of hysteresis on hydro-mechanical behavior of unsaturated soil. **Engineering Geology**, v. 245, p. 1–9, 2018.

KODIKARA, J. New framework for volumetric constitutive behaviour of compacted unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 11, p. 1227–1243, nov. 2012.

LAMBE, T. W. The Structure of Compacted Clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 84, n. 2, p. 1–34, 1958.

LAWTON EVERT C.; FRAGASZY RICHARD J.; HETHERINGTON MARK D. Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 9, p. 1376–1394, 1 set. 1992.

LI, P.; VANAPALLI, S.; LI, T. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 256–274, 1 abr. 2016.

MACHADO, S. L. **Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados.** Tese de doutorado—São Carlos: Universidade de São Paulo, 1998.

MALAYA, C.; SREEDEEP, S. Critical review on the parameters influencing soil-water characteristic curve. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 1, p. 55–62, 2011.

MARINHO, F. A. M.; STUERMER, M. M. The Influence of the Compaction Energy on the SWCC of a Residual Soil. **GEOTECH SPEC PUBL**, Proceedings. n. 99, p. 125–141, 2000.

MATYAS, E. L.; RADHAKRISHNA, H. S. Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils. **Géotechnique**, v. 18, n. 4, p. 432–448, 1 dez. 1968.

MELLIOS, G. A. **Provas de carga em solos porosos**. . In: SEMINÁRIO DE ENG. DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS. São Paulo: 1985

MONTEIRO, L. B. **Alguns aspectos da capacidade de carga de solos colapsíveis**. . In: SEMINÁRIOS DE ENG. DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS. São Paulo: 1985

NG, C. W. W. et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 8, p. 1258–1269, 22 mar. 2016.

OLIVEIRA, C. M. G. **Carta de risco de colapso de solos para a área urbana do município de Ilha Solteira-SP**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEIS, 2002.

PASHA, A. Y.; KHOSHGHALB, A.; KHALILI, N. Can degree of saturation decrease during constant suction compression of an unsaturated soil? **Computers and Geotechnics**, v. 106, p. 199–204, 2019.

PEREIRA, J. H. F.; FREDLUND, D. G. Volume Change Behavior of Collapsible Compacted Gneiss Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 10, p. 907–916, 1 out. 2000.

PUPPALA, A.; PUNTHUTAECHA, K.; VANAPALLI, S. Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG**, v. 132, 1 jun. 2006.

RAO, S. M.; REVANASIDDAPPA, K. Role of Matric Suction in Collapse of Compacted Clay Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 1, p. 85–90, 1 jan. 2000.

ROCHA, B. P. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. Tese de doutorado—[s.l.] Universidade de São Paulo, 17 ago. 2018.

RODRIGUES, R. A. **A influência do esgoto doméstico como fluido de saturação no colapso de um solo arenoso**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEIS, 2003.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 7 dez. 2007.

ROJAS, E. et al. **A fully coupled simple model for unsaturated soils**. 2019. Scopus.

ROLLINS, K. M.; KIM, J. Dynamic Compaction of Collapsible Soils Based on U.S. Case Histories. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 9, p. 1178–1186, 1 set. 2010.

ROLLINS K. M.; ROGERS G. W. Mitigation Measures for Small Structures on Collapsible Alluvial Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 9, p. 1533–1553, 1 set. 1994.

ROTISCIANI, G. M. et al. Hydromechanical behavior of an embankment during inundation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, n. 3, p. 348–358, 13 out. 2016.

SAAB, A. L. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado**. Dissertação de Mestrado—Bauru: Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEB, 2016.

SHAHNOORY, A. M.; SUGIYAMA, M. **Collapse settlement and strength characteristics of unsaturated soils with different degrees of compaction**. . In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERISATION, ISC 2016. 2016

SHAO, X.; ZHANG, H.; TAN, Y. Collapse behavior and microstructural alteration of remolded loess under graded wetting tests. **Engineering Geology**, v. 233, p. 11–22, 31 jan. 2018.

SIVAKUMAR, V.; WHEELER, S. J. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1: Wetting and isotropic compression. **Géotechnique**, v. 50, n. 4, p. 359–368, 1 ago. 2000.

SOARES, F. V. P. **Previsão de recalques por colapso de sapatas assentes em solo natural e compactado**. Dissertação de mestrado—Bauru: Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEB, 2018.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. São Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2004.

SOUZA, A. **Utilização de fundações rasas no solo colapsível de Ilha Solteira (SP)**. Dissertação de Mestrado—São Carlos: Universidade de São Paulo - EESC/USP, 1993.

SUN, D.; SHENG, D.; XU, Y. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 44, n. 6, p. 673–686, 1 jun. 2007.

SURIOL, J.; GENS, A.; ALONSO, E. E. **Volumetric behaviour of a compacted soil upon wetting**. . In: PROC. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. Recife (Brasil): 2002

THOMPSON, R. W.; HOUSTON, S. L. A Case Study of a Housing Development on Collapsible Alluvium. **Geo-China 2016**, Proceedings. p. 38–46, 2016.

USBR. **Earth Manual, Part 1**. 3<sup>a</sup> ed. Denver: Bureau of Reclamation, 1998.

VANAPALLI, S.; FREDLUND, D.; PUFAHL, D. The Relationship Between the Soil-Water Characteristic Curve and the Unsaturated Shear Strength of a Compacted Glacial Till. **Geotechnical Testing Journal**, v. 19, p. 259–268, 1 set. 1996.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil–water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, v. 49, n. 2, p. 143–159, 1 abr. 1999.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. 2<sup>a</sup> edição ed. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1978.

VILAR, O. M. **Prefácio**. . In: 5<sup>o</sup> SIMPÓSIO DE SOLOS NÃO SATURADOS. São Carlos-SP: 2004

VILAR, O. M.; GAIOTO, N. **Comportamento colapsível de um solo laterítico compactado**. . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. Recife: 1994

VILAR, O. M.; RODRIGUES, R. A. Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 2, p. 226–233, 26 jan. 2011.

VILAR, O. M.; RODRIGUES, R. A. Revisiting Classical Methods to Identify Collapsible Soils. **São Paulo**, p. 14, 2015.

WHEELER, S. J.; GALLIPOLI, D.; KARSTUNEN, M. Comments on use of the Barcelona Basic Model for unsaturated soils. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 26, n. 15, p. 1561–1571, 2002.

WIJAYA, M.; LEONG, E. C. Equation for unimodal and bimodal soil–water characteristic curves. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 2, p. 291–300, 1 abr. 2016.

ZHOU, A.; SHENG, D. An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities. **Computers and Geotechnics**, v. 63, p. 46–66, 1 jan. 2015.