



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 

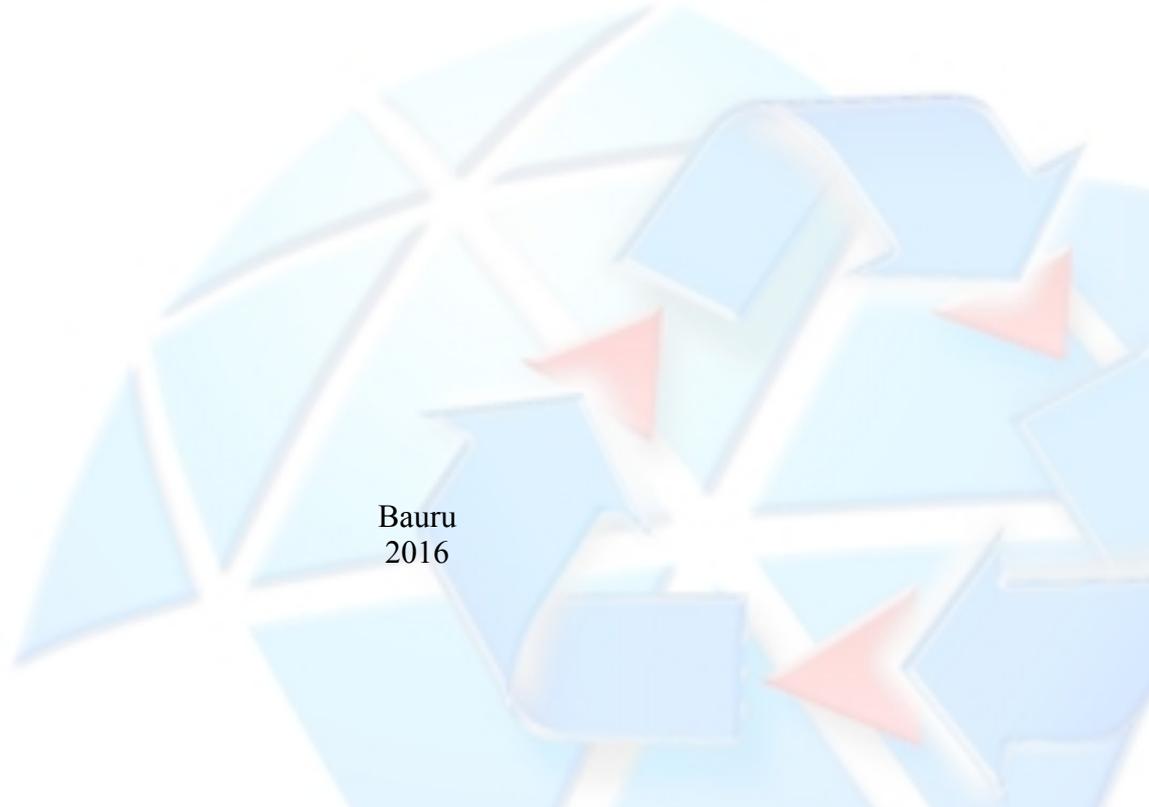
Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

ALFREDO LOPES SAAB

**INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NOS PARÂMETROS DE
COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO NÃO SATURADO**

Bauru
2016



ALFREDO LOPES SAAB

**INFLUÊNCIA DA SUÇÃO NOS PARÂMETROS DE
COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO 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
2016



Saab, Alfredo Lopes.

Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado / Alfredo Lopes Saab, 2016

125 f.

Orientador: Roger Augusto Rodrigues

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Solo não saturado. 2. Ensaio edométrico. 3. Sucção. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALFREDO LOPES SAAB, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/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, Prof. Dr. ORENCIO MONJE VILAR do(a) Departamento de Geotecnia / Universidade de São Paulo/São Carlos, Prof. Dr. PAULO CESAR LODI 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 ALFREDO LOPES SAAB, intitulada **ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO POR MEIO DE ENSAIOS COM SUÇÃO CONTROLADA..** Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovado. 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



Prof. Dr. ORENCIO MONJE VILAR



Prof. Dr. PAULO CESAR LODI



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

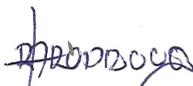
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
Alfredo Lopes Saab

DE: "ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO POR MEIO DE
ENSAIOS COM SUCCÃO CONTROLADA".

PARA:

Influência da sucção nos parâmetros de
compressibilidade de um solo não saturado

Bauru, 16 de dezembro de 2016.



Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues
Orientador

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo incentivo e capacidade de confiar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues, pela oportunidade, paciência, dedicação e acima de tudo, pela amizade construída concomitantemente à orientação desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti, pela postura de constante prontidão e boa vontade em fazer esta pesquisa ter sucesso.

Aos professores da pós-graduação, em especial à Prof.^a Dr.^a Anna Silvia Peixoto, ao Prof. Dr. Paulo César Lodi e ao Prof. Dr. George de Paula de Bernardes, pelas sugestões e colaborações dadas ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar, pelas sugestões dadas na defesa.

Aos amigos e colegas de mestrado, Jeferson Brito Fernandes, Fábio Visnardi Prado Soares e Henrique Svizzero Boni, pelo altruísmo, confiança, convivência e parceria conferida durante todo o curso de mestrado.

Ao aluno de doutorado do programa de pós-graduação da EESC-USP, Breno Padovezi Rocha, por compartilhar do seu conhecimento, boa vontade e amizade.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP-Bauru, Gustavo Pinheiro e Sérgio Gimenez, por todo o auxílio e ensinamentos prestados durante os ensaios laboratoriais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

À toda minha família, amigos e aqueles que colaboraram e incentivaram na execução desta pesquisa.

RESUMO

SAAB, A. L. **Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado**. 2016. 125p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2016.

Nos solos não saturados mudanças sazonais de umidade ocorrem devido a ciclos de umedecimento e secagem. Tais mudanças dependem das características do solo e das condições climáticas da região, o que afeta a sucção no solo. Por esta razão, as propriedades dos solos não saturados dependem não apenas da história geológica e do ambiente de formação, mas também da variabilidade sazonal, fato que muitas vezes é negligenciado na prática da engenharia. Esta dissertação apresenta um estudo da influência da sucção na compressibilidade de um perfil de solo não saturado por meio de ensaios edométricos realizados em câmaras comuns e em câmaras que permitem o controle de sucção pela técnica de translação de eixos. Os ensaios foram realizados submetendo as amostras a trajetórias de carregamento-descarregamento com sucção constante. Parâmetros constitutivos mecânicos são apresentados e correlacionados ao longo da profundidade de acordo com as condições de campo. Os resultados indicam que a colapsibilidade e a variabilidade dos parâmetros são maiores na superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera e, tende a decrescer com a profundidade e com a redução da sucção inicial no solo. O estudo realizado permite uma avaliação mais detalhada da colapsibilidade do solo e auxilia a interpretação de perfis de solos colapsíveis similares e de suas propriedades e parâmetros constitutivos.

Palavras-chave: solo não saturado, ensaio edométrico, sucção, curva de retenção.

ABSTRACT

SAAB, A. L. **Influence of suction on the compressibility parameters of an unsaturated soil**. 2016. 125p. Dissertation (Master Degree) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2016.

Seasonal moisture content changes take place in the unsaturated soils as a result of wetting and drying cycles. These changes depend of soil characteristics and climatic conditions of the region, which affects the soil suction. Therefore, the properties of unsaturated soils depend not only on geological history and environment formation, but also the seasonal variability, a fact that is oftentimes neglected in engineering practice. This research presents an study of the influence of suction on compressibility of a collapsible unsaturated soil profile using conventional and suction controlled oedometer tests by the axis translation technique. The tests were performed submitting the specimen to loading-unloading paths under constant suction. Mechanical constitutive parameters are presented and correlated with the depth according to the *in situ* conditions. The results indicate that the soil collapsibility and the variability of constitutive parameters are greather on the ground surface, where the soil interacts with the atmosphere, and tends to decrease with depth and with the reduction of the initial soil suction. The study allow a more detailed evaluation of soil collapsibility and assist the interpretation of collapsible soils profiles and their properties and constitutive parameters.

keywords: unsaturated soil, oedometer test, suction, soil water curve retention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil (modificado de FERREIRA et al., 1989).	4
Figura 2 - Distribuição da pressão na água em um perfil de solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).	6
Figura 3 - Esquema para determinação de potenciais do solo (VILAR, 1996).	7
Figura 4 - Sucção total no solo (HILLEL, 1971).	9
Figura 5 - Curvas de retenção típicas (FREDLUND; XING, 1994).	11
Figura 6 - Trajetórias de secagem/umedecimento (RODRIGUES, 2007).	12
Figura 7 - Curvas com formato em "S" (LEONG; RAHARDJO, 1997).	13
Figura 8 - Curvas sem formato em "S" (LEONG; RAHARDJO, 1997).	13
Figura 9 - Esquema da placa de sucção (LIBARDI, 2012).	15
Figura 10 - Câmara de pressão (LIBARDI, 2012).	16
Figura 11 - Figura esquemática de tensiômetro com duas opções de sistema de leitura acoplados (modificado de BRITO et al., 2009).	17
Figura 12 - Capilaridade produzindo pressão de contato entre as partículas (DUDLEY, 1970).	20
Figura 13 - a) Grãos de areia sendo agregados por partículas de argila. b) Forças de repulsão entre moléculas perturbando estrutura metaestável (DUDLEY, 1970).	21
Figura 14 - Resultados típicos da variabilidade de umidade, resistência de ponta e atrito lateral entre período úmido (Jan/2012) e período seco (Ago/2012) (ROCHA, 2017).	24
Figura 15 - Ensaio edométrico simples e duplos.	25
Figura 16 - Câmara edométrica com sucção controlada (modificado de MACHADO, 1995).	26
Figura 17 - Resultados de ensaios edométricos com sucção (RODRIGUES, 2007).	27
Figura 18 - Esquema do edômetro osmótico (SOTO, 2004).	28
Figura 19 - Esquema de edômetro com sucção controlada por equilíbrio de vapor d'água (OLDECOP; ALONSO, 2001).	30
Figura 20 - (a) curvas de compressão isotrópica para corpos de prova saturado e não saturado; (b) trajetória de tensões e curva de plastificação (ALONSO et al., 1990).	33
Figura 21- a) Solo com $\lambda(s)$ decrescente com o aumento da sucção, conforme modelo original do BBM; b) Solo com $\lambda(s)$ crescente com o aumento da sucção (WHEELER et al., 2002).	34

Figura 22 - Curvas de plastificação no espaço (p, q, s) (Alonso et al. 1990).....	36
Figura 23 - Vista tridimensional das curvas de plastificação (Alonso et al. 1990).....	37
Figura 24 - Foto aérea do local da área de estudo (GOOGLE, 2016).....	39
Figura 25 - Início da escavação do poço de amostragem.....	39
Figura 26 - Retirada de amostra indeformada.....	40
Figura 27 - Amostra indeformada parafinada e etiquetada.....	41
Figura 28 - Montagem do ensaio edométrico, etapas de "A" a "E".....	46
Figura 29 - Montagem do ensaio edométrico, etapas de "F" a "I".....	46
Figura 30 - Gráfico da imposição da sucção.....	48
Figura 31 - Fluxograma do ensaio edométrico com sucção controlada.....	49
Figura 32 - Materiais usados no ensaio de papel filtro, materiais de "A" a "H".....	51
Figura 33 - Materiais usados no ensaio de papel filtro, materiais de "I" a "R".....	52
Figura 34 - Fluxograma do ensaio de papel filtro.....	53
Figura 35 - Equipamento de placa de sucção.....	54
Figura 36 - Fluxograma do ensaio de placa de sucção.....	55
Figura 37 - Tensiômetros instalados em campo.....	56
Figura 38 - Detalhes dos tensiômetros instalados.....	57
Figura 39 - Massa específica seca, massa específica <i>in situ</i> , massa específica dos sólidos, índice de vazios, umidade de campo e grau de saturação de campo, limite de liquidez e granulometria das amostra ao longo da profundidade.....	60
Figura 40 - Ensaio de granulometria para as amostras coletadas a 1, 3 e 5 m de profundidade.....	61
Figura 41 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 1,0 m de profundidade.....	62
Figura 42 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 3,0 m de profundidade.....	63
Figura 43 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 5,0 m de profundidade.....	63
Figura 44 - Pontos experimentais e curva modelada para 1,0 m de profundidade.....	65
Figura 45 - Pontos experimentais e curva modelada para 3,0 m de profundidade.....	66
Figura 46 - Pontos experimentais e curva modelada para 5,0 m de profundidade.....	66
Figura 47 - Curvas de retenção de água sobrepostas, determinadas após modelagem.....	67

Figura 48 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 1,0 m de profundidade em função da sucção.	68
Figura 49 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 2,0 m de profundidade em função da sucção.	69
Figura 50 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 3,0 m de profundidade em função da sucção.	69
Figura 51 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 4,0 m de profundidade em função da sucção.	70
Figura 52 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 5,0 m de profundidade em função da sucção.	70
Figura 53 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 0 kPa (saturado) para diferentes profundidades.	71
Figura 54 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 50 kPa para diferentes profundidades.	72
Figura 55 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 100 kPa para diferentes profundidades.	72
Figura 56 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 200 kPa para diferentes profundidades.	73
Figura 57 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 400 kPa para diferentes profundidades.	73
Figura 58 - Tensões de pré-adensamento e índices de compressão em função da sucção.	74
Figura 59 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 1,0 m de profundidade.	76
Figura 60 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 2,0 m de profundidade.	76
Figura 61 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 3,0 m de profundidade.	77
Figura 62 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 4,0 m de profundidade.	77
Figura 63 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 5,0 m de profundidade.	78
Figura 64 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 1,0 m de profundidade.	80
Figura 65 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 2,0 m de profundidade.	80

Figura 66 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 3,0 m de profundidade.....	81
Figura 67 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 4,0 m de profundidade.....	81
Figura 68 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 5,0 m profundidade.....	82
Figura 69 - Tensões de pré-adensamento para as amostras coletadas a 1, 2, 3, 4 e 5 m e ajustes do BBM das curvas de escoamento LC.....	86
Figura 70 - Parâmetro de compressão elastoplástico do solo a 1, 2, 3, 4 e 5 m e ajustes do BBM.....	87
Figura 71 - Dados experimentais dos ensaios edométricos e simulações das curvas de compressão obtidas pelo BBM.....	88
Figura 72 - Perfil da variação das tensões de pré-adensamento e dos parâmetros de compressão elastoplástico λ (s) em função da sucção.....	89
Figura 73 - Sucção em campo (0,4 e 0,9 m de profundidade) e pluviometria (Fev/2016 até Nov/2016).....	91
Figura 74 - Sucção em campo ao longo do perfil obtidos por sensores de resistência elétrica e pluviometria (Fev/2016 até Nov/2016).....	92
Figura 75 - Perfis de sucção no solo ao longo do período de março-16 a novembro-16.....	93
Figura 76 - Perfis da variação das tensões de pré-adensamento e do parâmetro de compressão elastoplástico do solo com a sucção: valores mínimo, médio e máximo de ocorrência em campo no período monitorado (Fev/2016 até Nov/2016).....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos equipamentos de medida de sucção (modificado de GOMES, 2007) .	19
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de imposição e controle da sucção acoplados em câmaras edométricas (SOTO, 2004).....	31
Tabela 3 - Índices Físicos para as amostras coletadas.	59
Tabela 4 - Limites de consistência e porcentagem granulométrica do solo.....	61
Tabela 5 - Parâmetro de ajustes de van Genuchten (1980) para as curvas de 1, 3 e 5 m.....	64
Tabela 6 - Coeficiente de colapso do solo estudado nas sucções de 50, 100, 200 e 400 kPa ao longo da profundidade.....	79
Tabela 7 - Valores de resistência à compressão triaxial (FAGUNDES, 2014; FERNANDES, 2016).....	83
Tabela 8 - Parâmetros obtidos dos resultados de resistência à compressão triaxial.	84
Tabela 9 - Parâmetro obtidos dos resultados dos ensaios edométricos.....	85
Tabela 10 - Parâmetros constitutivos obtidos.	86
Tabela 11 - Valores de sucção mínimo, médio, máximo e desvio padrão ao longo do perfil.	92

LISTA DE SÍMBOLOS

C :	coeficiente de colapso
C_c :	índice de compressão
C_r :	índice de recompressão
e :	índice de vazios
e_0 :	índice de vazios inicial
g :	aceleração da gravidade
H :	altura do corpo de prova
h :	diferença de cota de posição
K_0 :	coeficiente de empuxo em repouso do solo
LL :	limite de liquidez
LP :	limite de plasticidade
M :	inclinação da linha de estados críticos
M :	massa molar
m :	parâmetro de curvatura do ajuste (van GENUCHTEN, 1980)
m_a :	massa de água
M_d :	módulo edométrico
m_s :	massa de sólidos
n :	parâmetro de curvatura do ajuste (van GENUCHTEN, 1980)
$N(s)$:	volume específico para $p = p^c$
P :	pressão
p :	tensão octaédrica
p_0 :	tensão isotrópica de pré-adensamento do solo não saturado
p_0^* :	tensão isotrópica de pré-adensamento do solo saturado
P_{atm} :	pressão atmosférica
PC :	potencial de colapso
p^c :	tensão de referência para $v = N(s)$
p_{K_0} :	tensão octaédrica referente a trajetória K_0

- P_s : pressão de saturação de vapor de água sobre uma superfície plana de água pura sob a mesma temperatura
- p_s : tensão que descreve o aumento da coesão do solo
- q : tensão cisalhante
- q_{K_0} : tensão cisalhante referente a trajetória K_0
- R : constante universal do gás
- r : parâmetro de máxima rigidez do solo
- R^2 : coeficiente de determinação
- s : sucção total
- s_m : sucção matricial
- s_o : sucção osmótica
- S_r : grau de saturação
- t : temperatura
- u_a : pressão no ar do solo
- u_B : pressão de ar interna na água do solo no ponto B
- u_w : pressão na água do solo
- v : volume específico
- w : umidade gravimétrica
- w_p : umidade do papel filtro
- w_r : umidade residual
- w_s : umidade de saturação
- α : parâmetro de curvatura do ajuste (van GENUCHTEN, 1980)
- β : parâmetro que controla a taxa de aumento da rigidez do solo
- ε_{vp}^e : deformação volumétrica plástica associada à curva LC
- ε_{vs}^e : deformação volumétrica plástica associada à curva SI
- κ : parâmetro elástico de compressão do solo para variação de tensão
- κ_s : parâmetro elástico de compressão do solo para variação de sucção
- $\lambda(0)$: parâmetro de compressão elastoplástico do solo saturado
- $\lambda(s)$: parâmetro de compressão elastoplástico do solo em função da sucção

ρ :	massa específica
ρ_d :	massa específica aparente seca
ρ_s :	massa específica dos sólidos
$\sigma - u_a$:	tensão líquida
σ_1 :	tensão principal
σ_2 :	tensão principal
σ_3 :	tensão principal
$\sigma_{\bar{m}}$:	tensão de pré-adensamento para o solo sob sucção constante
$\sigma_{\bar{\beta}}$:	tensão de pré-adensamento para o solo saturado
σ_{pa} :	tensão de pré-adensamento
σ_v :	tensão vertical geostática
τ :	tensão cisalhante
Ψ :	potencial total
Ψ_g :	potencial gravitacional
Ψ_m :	potencial matricial
Ψ_{os} :	potencial osmótico
Ψ_{pn} :	potencial pneumático

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ASPECTOS GERAIS DOS SOLOS NÃO SATURADOS	5
3.2 POTENCIAIS DE ENERGIA.....	6
3.3 RELAÇÃO SUCCÃO/UMIDADE.....	10
3.4 TÉCNICAS PARA MEDIDA, IMPOSIÇÃO E CONTROLE DA SUCCÃO	13
3.5 SOLOS COLAPSÍVEIS.....	19
3.6 VARIABILIDADE SAZONAL.....	22
3.7 ENSAIOS EDOMÉTRICOS	24
3.8 PREVISÃO DE COMPORTAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 AMOSTRAGEM.....	38
4.2 CARACTERIZAÇÃO.....	41
4.3 ENSAIOS EDOMÉTRICOS CONVENCIONAIS	41
4.4 ENSAIOS EDOMÉTRICOS COM SUCCÃO CONTROLADA.....	42
4.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	49
4.6 INSTALAÇÃO DOS TENSÍÔMETROS EM CAMPO	56
4.7 DADOS PLUVIOMÉTRICOS	57
4.8 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO BÁSICO DE BARCELONA (BBM).....	57
5. RESULTADOS E ANÁLISES.....	59
5.1 ÍNDICES FÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO	59

5.2	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	62
5.3	ENSAIOS EDOMÉTRICOS	68
5.4	MODELAGEM (BBM).....	82
5.5	MEDIDAS DA SUCÇÃO EM CAMPO.....	90
6.	CONCLUSÃO.....	96
	REFERÊNCIAS	98

1. Introdução

A Mecânica dos Solos tradicional, essa criada basicamente para os países de clima temperado do hemisfério norte, se mostra representativa para os solos daquelas regiões, porém, não descreve corretamente o comportamento dos solos não saturados colapsíveis, bastante comuns em países de clima tropical, como o Brasil. Entende-se por solos colapsíveis materiais com estrutura porosa e não saturada, que ao sofrer um aumento na sua umidade tem uma redução do seu volume, sem aumento importante de sobrecarga (VILAR; RODRIGUES, 2011). Os solos colapsíveis são encontrados em grande parte do território brasileiro, bem como em diversas outras regiões do mundo. Seu surgimento se dá sob diferentes tipos de formação, tanto sedimentar como residual (PEREIRA; FREDLUND, 2000; ROMAGNOLI et al., 2009; VILAR et al., 1981).

Os estudos acerca da colapsibilidade dos solos em sua grande maioria são realizados por meio dos ensaios edométricos simples e duplos, propostos por Jennings & Knight (1975). Os ensaios simples são realizados com umidade de campo e em determinado estágio de carregamento é realizada a inundação, já os ensaios duplos são ensaios gêmeos sendo um realizado com umidade de campo e o outro previamente inundado, para posterior comparação entre os resultados.

Atualmente técnicas mais apuradas como a técnica de translação de eixos (MACHADO, 1995) e o método osmótico (SOTO, 2004), têm sido empregadas em laboratório, possibilitando o controle de sucção, o que tem permitido um maior avanço no entendimento do comportamento dos solos colapsíveis.

Apesar dos avanços recentes, estes solos são ainda considerados como um tipo de solo problemático para a construção de uma obra, pois neles ocorrem mudanças sazonais de umidade devido a ciclos de umedecimento (chuva) e secagem (estiagem). Tal mudança depende das características do solo e das condições atmosféricas da região, o que afeta a sucção no solo. Portanto, as propriedades dos solos colapsíveis dependem não apenas da

história geológica e do ambiente de formação, mas também da variabilidade sazonal, pois a sucção varia ao longo do tempo, fato que muitas vezes é negligenciado na prática da engenharia e nas etapas de investigação do solo.

Na Geotecnia as incertezas sobre os parâmetros do solo ocorrem devido à variabilidade das propriedades dos materiais geotécnicos de um lugar para outro. Assim, alguns solos apresentam uma variabilidade espacial em diversas de suas características, como por exemplo, na geometria de camadas e nas propriedades físicas e mecânicas. Se no caso dos solos saturados muitas vezes ocorre este tipo de variabilidade, nos solos não saturados, além desta, ocorre ainda a variabilidade sazonal dos parâmetros do solo. Especificamente nos solos colapsíveis, a variabilidade sazonal é ainda mais significativa, uma vez que estes solos são mais sensíveis às variações de umidade.

Contudo, os estudos acerca da colapsibilidade estão concentrados nas camadas mais superficiais do terreno, não levando em conta uma possível variação do potencial de colapso ao longo do perfil de solo. Um estudo que avalie o comportamento mecânico do solo em diferentes profundidades permite análises mais detalhadas do perfil de solo, que podem auxiliar na concepção de projetos, principalmente em engenharia de fundações, com o intuito de se evitar fundações diretas apoiadas nas camadas mais colapsíveis do solo.

Portanto, este trabalho tem como finalidade estudar a influência da sucção na compressibilidade de um perfil de solo não saturado colapsível. Para isso, ensaios edométricos convencionais e ensaio edométricos com controle de sucção, bem como monitoramento da sucção *in situ* e ensaios de curva de retenção de água formam a base experimental da pesquisa. Parâmetros constitutivos e suas variações no espaço e no tempo são apresentados, contribuindo para o melhor entendimento do comportamento da camada do solo colapsível estudado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

- Analisar a compressibilidade ao longo de um perfil de solo arenoso não saturado considerando a variabilidade sazonal.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar o efeito da sucção na compressibilidade do solo a cada metro por meio de ensaios edométricos convencionais e com sucção controlada.
- Analisar a aplicabilidade do modelo de Barcelona em reproduzir o comportamento mecânico do solo ao longo da profundidade.
- Estudar a variação dos parâmetros constitutivos mecânicos com a profundidade.
- Relacionar as sucções obtidas em monitoramento de campo com a variação dos parâmetros constitutivos mecânicos com a profundidade.

3. Revisão Bibliográfica

Os solos não saturados apresentam características particulares provenientes da presença da fase gasosa nos seus poros. Das interações das fases líquida, gasosa e sólida surge a sucção que confere aos solos não saturados uma certa avidez pela água. A compreensão da existência da sucção nos poros do solo se mostra importante, uma vez que trata-se de uma variável de estado que governa o comportamento dos solos não saturados.

Em países de clima tropical com solos de comportamento laterítico a sazonalidade pode acarretar problemas específicos como a manifestação do colapso do solo. Na Figura 1 são ilustrados os solos colapsíveis estudados ao longo de uma grande faixa territorial do Brasil.

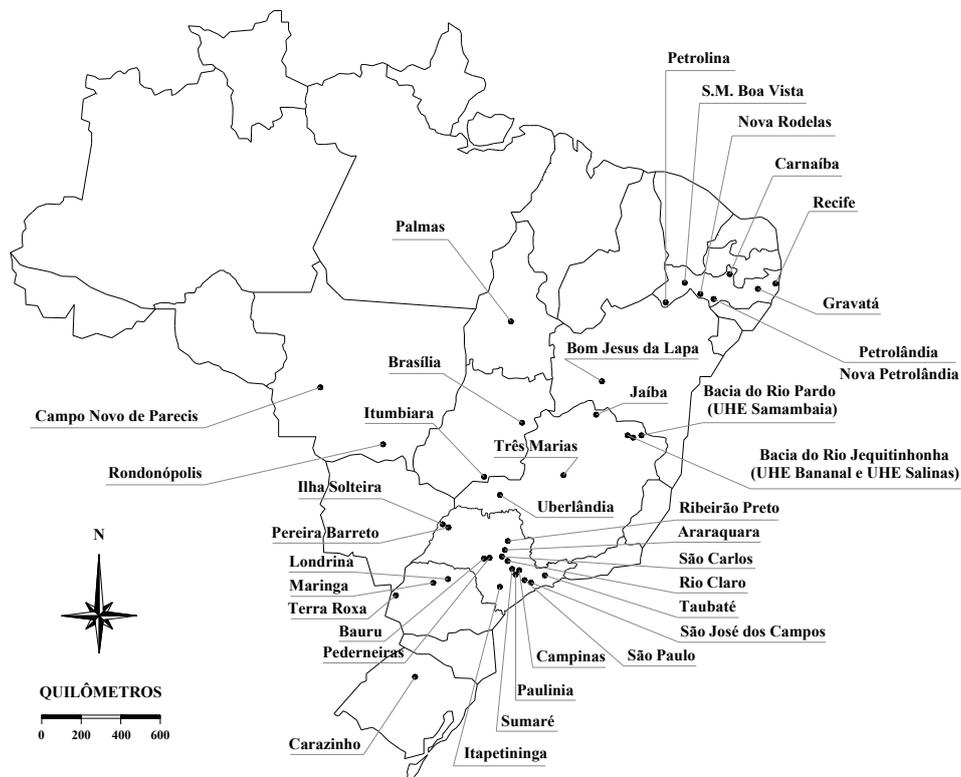


Figura 1 - Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil (modificado de FERREIRA et al., 1989).

O estudo dos solos não saturados e da colapsibilidade tem tido grande visibilidade na Geotecnia devido ao desenvolvimento recente de técnicas modernas que permitem a medida, imposição e controle da sucção. Com o propósito de apresentar uma melhor compreensão quanto a tais conceitos, o presente capítulo apresenta aspectos gerais dos solos não saturados, bem como as definições de potenciais de energia e sucção. Na sequência, apresenta-se a relação sucção/umidade e algumas técnicas para medida, imposição e controle da sucção, bem como definições de solos colapsíveis, sazonalidade, ensaios que reproduzem o comportamento do solo quando sofrem o fenômeno do colapso e, por fim, previsões de comportamento de solos não saturados.

3.1 Aspectos Gerais dos Solos Não Saturados

Nos perfis de solo das regiões de clima árido, semiárido e tropical, muitas vezes nos horizontes mais superficiais os vazios não estão completamente preenchidos por água e isto ocorre até as proximidades do nível freático.

Esses horizontes formam a camada não saturada do solo, podendo alcançar grandes profundidades, sobretudo em regiões de climas mais secos e em regiões onde os períodos chuvosos e mais secos são bem definidos. As camadas mais superficiais destes solos interagem de maneira mais direta com a atmosfera, podendo alternar a umidade de forma significativa em períodos de evaporação da água (de fluxo ascendente) nas estações secas, e em períodos de infiltração (de fluxo descendente) nas estações chuvosas.

Nas camadas não saturadas dos solos as pressões na água intersticial são negativas e têm sua magnitude variando de acordo com o tipo de fluxo, infiltração ou evaporação. A dinâmica da água, assim como a condutividade hidráulica nessa região do solo apresentam características particulares, sendo objetos de estudo e de modelagem, podendo-se citar Fuentes et al. (2005), Reichardt et al. (1993). Na região entre a camada não saturada e o nível freático, ainda se encontra uma região saturada, conhecida como franja capilar, que tem sua saturação promovida pela capilaridade dos poros do solo. Na Figura 2 é ilustrado um perfil de solo com as camadas de solo saturado e não saturado.

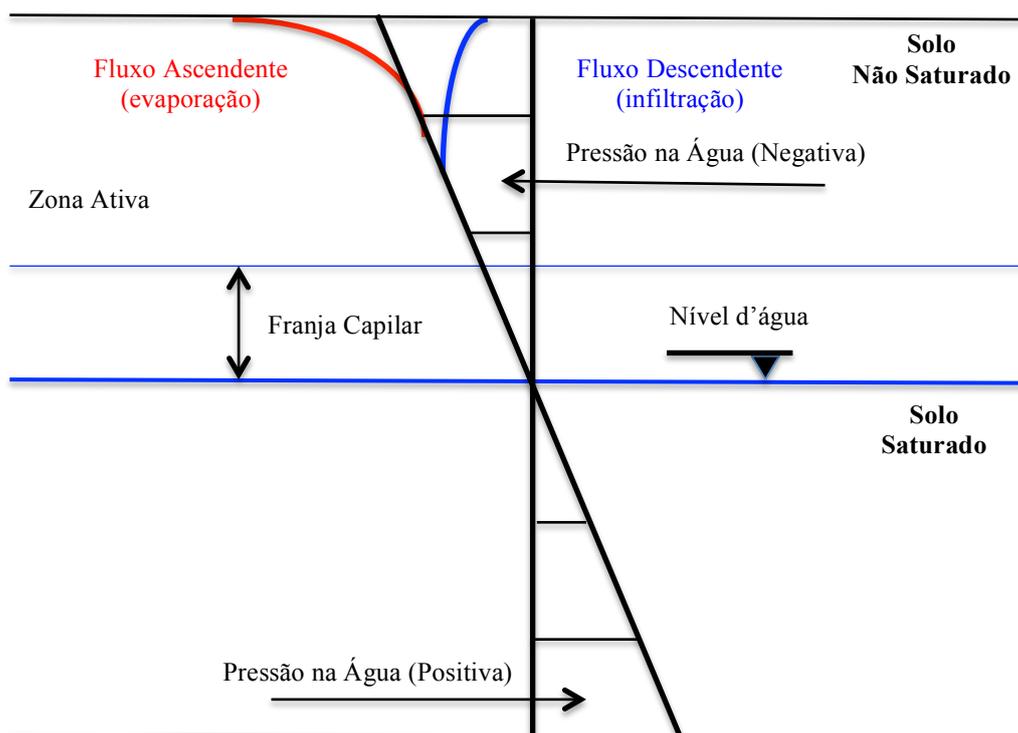


Figura 2 - Distribuição da pressão na água em um perfil de solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

As teorias e as formulações mais comuns na Mecânica dos Solos foram desenvolvidas para os solos saturados ou totalmente secos. Tais teorias, desenvolvidas em países do hemisfério norte em sua maioria, não traduzem o comportamento dos extensos perfis de solos não saturados dos solos tropicais. Alternativas para análises mais confiáveis acerca do comportamento desses solos podem ser realizadas utilizando-se a curva de retenção de água e os conceitos básicos inerentes à Mecânica dos Solos Não Saturados, o que permite generalizar a Mecânica dos Solos e prever uma série de situações de laboratório e de campo (FREDLUND, 1996).

3.2 Potenciais de Energia

A energia total é composta pela soma da energia cinética com a energia potencial. Considerando que a energia cinética na água do solo, devido ao regime de velocidades extremamente baixa, tem valor desprezível, o estado de energia da água do solo é composto apenas pela energia potencial.

Para definição dos diferentes tipos de potenciais da água no solo, tem-se como base a Figura 3. Entende-se por energia potencial total da água no solo, o trabalho responsável pelo

transporte de uma partícula infinitesimal de água de um reservatório de água pura (ponto A) sob pressão atmosférica, até uma condição de interesse (ponto B) caracterizada por: uma cota de interesse, pressão u_B , solutos. De maneira que o transporte ocorra de maneira reversível e isotérmica (BAVER et al., 1972; HILLEL, 1971; MARSHALL et al., 1996).

O potencial total (ψ) é composto por parcelas referentes ao potencial gravitacional (ψ_g), potencial osmótico (ψ_{os}), potencial pneumático (ψ_{pn}), potencial matricial (ψ_m), entre outros, e sua equação é dada por:

$$\psi = \psi_g + \psi_{os} + \psi_{pn} + \psi_m \dots \quad (1)$$

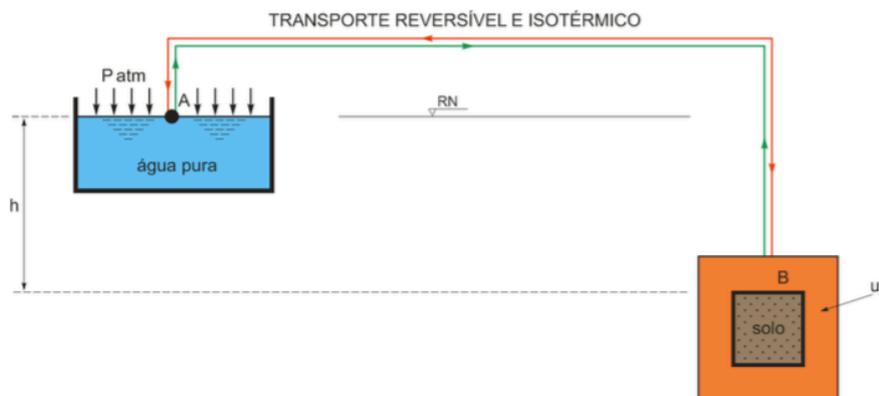


Figura 3 - Esquema para determinação de potenciais do solo (VILAR, 1996).

3.2.1 Potencial Gravitacional

O potencial gravitacional da água do solo aparece quando ocorre diferença de cota de posição entre o ponto A, do reservatório de água pura, e o ponto B. Ocorre por meio de forças gravitacionais, e quanto maior a diferença de cota, ou seja, maior o valor de h na Figura 3, maior é a sua magnitude.

3.2.2 Potencial Osmótico

O potencial osmótico se dá pela influência da concentração de solutos da água do solo, cujos solutos dissolvidos tendem a incorporar água do reservatório. Este potencial tem influência maior quando se tem uma elevada concentração de solutos na água intersticial (REICHARDT, 1985).

3.2.3 Potencial Pneumático

O potencial pneumático é resultante da diferença de pressão entre a pressão de ar externa e pressão interna (u_B) presente na água do solo (Figura 3). Tal potencial torna-se mais significativo no potencial total quando se utiliza de técnicas que envolvem a aplicação de pressões de ar, como a técnica de translação de eixos (LIBARDI, 2012).

3.2.4 Potencial Matricial

O potencial matricial da água do solo é composto pela combinação de dois tipos de forças de interação entre o ar e a água do solo e a fração sólida, isto é, forças provenientes da capilaridade presente nos vazios do solo, e as forças de adsorção. As forças capilares aparecem devido as diferenças de tensões superficiais entre água, solo e ar e as forças de adsorção são provenientes da interação entre solutos dissolvidos na água intersticial e as matrizes constituintes do solo (LIBARDI, 2012).

3.2.5 Sucção

Entende-se por sucção total do solo a grandeza expressa em termos de tensão que indica a característica que um solo não saturado tem de incorporar e reter água nos seus vazios. É proveniente das condições físico-químicas da estrutura do sistema solo-água-ar, e é responsável pelo aumento ou decréscimo do grau de saturação do solo, dependendo das condições ambientais ao seu redor (MARINHO, 2005).

A sucção total do solo é composta pela soma da sucção matricial, composta pela capilaridade (principalmente em solos arenosos) e adsorção (principalmente em solos argilosos), e da sucção osmótica, que provém das características químicas, presença de solutos na água intersticial. Porém, os problemas ocasionados na engenharia relacionados à sucção, geralmente são decorrentes de mudanças sazonais que ocorrem em um período relativamente curto para prover grandes diferenças na composição química da água do solo. Em laboratório, para que a parcela da sucção osmótica seja atuante é necessária a presença de uma membrana semipermeável. Portanto, nestes casos, tanto em laboratório quanto em campo, a sucção osmótica pode ser desprezada. Sendo assim, na maioria dos problemas geotécnicos a sucção

matricial tem sido assumida como a mais importante fonte de sucção a interferir no comportamento do solo (ALONSO et al., 1987; FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Hillel (1971) ilustra na Figura 4, por meio de uma representação esquemática, as parcelas de sucção matricial, sucção osmótica e sucção total.

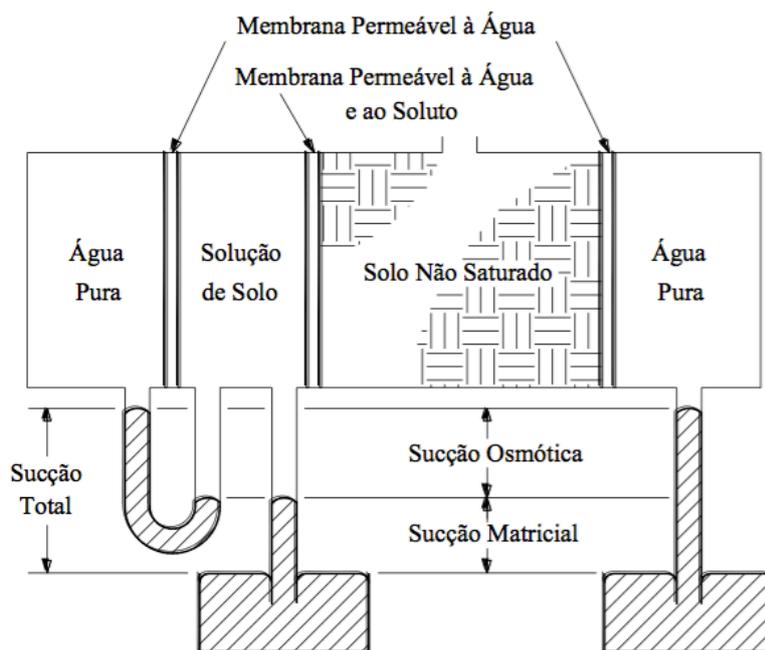


Figura 4 - Sucção total no solo (HILLEL, 1971).

Portanto, da Figura 4 tem-se:

$$s = s_m + s_o \quad (2)$$

Em que,

s : sucção total;

s_m : sucção matricial;

s_o : sucção osmótica.

- Sucção Matricial:

É a pressão negativa aplicada na água do solo composta pela capilaridade e adsorção. A capilaridade é dominante quando o solo apresenta uma estrutura com poros relativamente grandes e conectados, arranjo típico em solos arenosos, já as forças de adsorção são dominantes em solos com poros menores e pouco conectados e com alta capacidade de troca

catiônica, arranjo típico em solos argilosos, sendo dada pela diferença de pressão atuante no ar e na água do solo:

$$s_m = (u_a - u_w) \quad (3)$$

Em que,

u_a : pressão no ar do solo;

u_w : pressão na água do solo.

- **Sucção Osmótica:**

É proveniente de força osmótica motivada pela diferença de concentração de solutos entre a água externa e a água intersticial. Representa a sucção total quando o solo se encontra saturado, e será nula se a água externa tiver a mesma concentração da interna.

3.3 Relação Sucção/Umidade

A principal forma de relacionar a sucção com o conteúdo de água dos solos não saturados é por meio da curva de retenção de água no solo (SWRC), também conhecida como curva de retenção de água ou ainda curva característica. Não existe um padrão definido na bibliografia de apresentação dessa curva, que pode ter a umidade gravimétrica, a umidade volumétrica ou ainda o grau de saturação, em escala linear, tanto na abscissa como na ordenada. A sucção pode ser apresentada como sucção total ou matricial e em escala linear ou logarítmica.

Em trabalhos experimentais, é mais comum na apresentação da curva de retenção de água no solo ter o conteúdo de água expresso em umidade gravimétrica, pois para aferições precisas da umidade volumétrica é necessário computar as variações de volume do corpo de prova, que pode ser realizado usando-se mercúrio, metal nocivo à saúde o que não é recomendado.

Na Figura 5 é mostrada trajetórias típicas da curva de acordo com o tipo de solo (argiloso, siltoso ou arenoso).

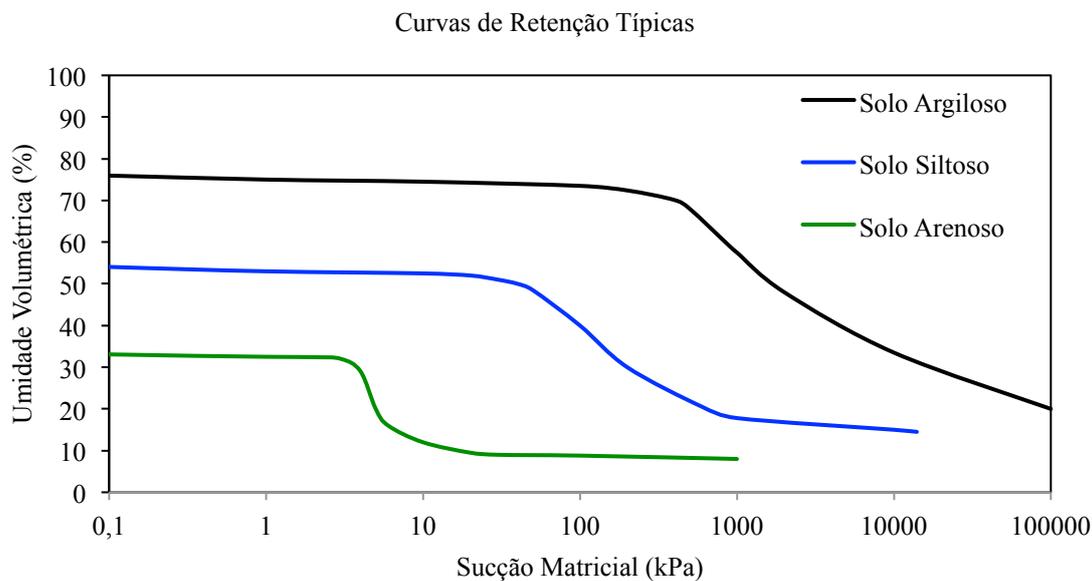


Figura 5 - Curvas de retenção típicas (FREDLUND; XING, 1994).

Fredlund & Xing (1994) relatam que um mesmo solo pode apresentar duas curvas de retenção de água, e essa diferença entre as curvas ocorre devido a uma histerese que pode ser identificada por meio do método utilizado para obtenção dessas curvas. Tal diferença pode ocorrer devido à trajetória de secagem, onde a amostra é previamente inundada e então os corpos de prova têm o seu grau de saturação diminuído (aumento da sucção) ou pela trajetória de umedecimento, onde os corpos de prova são secos ao ar e depois tem o seu grau de saturação aumentado (diminuição da sucção).

Na Figura 6, diferenças entre curvas obtidas com trajetórias de secagem e de umedecimento são ilustradas para um solo argiloso e para um solo arenoso.

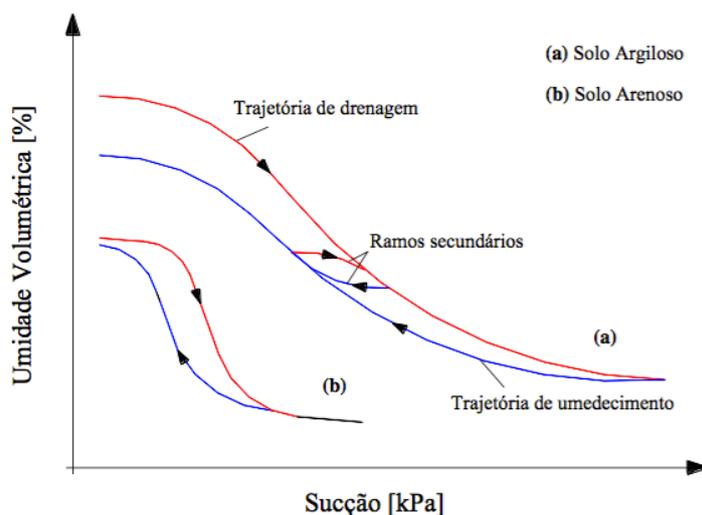


Figura 6 - Trajetórias de secagem/umedecimento (RODRIGUES, 2007).

O formato da curva de retenção de água é afetado por diversos fatores e pelas combinações desses fatores, como textura do solo, densidade dos sólidos, composição química e material orgânico (DEXTER, 2004; RAWLS et al., 2003).

O uso da curva de retenção de água é bastante difundido tanto na engenharia quanto na agronomia. Em função da dificuldade de se medir experimentalmente a condutividade hidráulica dos solos não saturados, o uso da curva de retenção é bastante frequente para correlacionar parâmetros de permeabilidade dos solos para obtenção da função condutividade hidráulica com a sucção. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados, sobretudo para solos heterogêneos, pois pequenas variações no solo, como na região próxima à umidade de saturação ou diferenças de porosidades, podem resultar em valores não representativos destas correlações (DURNER, 1994; VOGEL et al., 2000).

Diversos modelos desenvolvidos empiricamente baseados na forma da curva são encontrados na bibliografia, e podem ser encontrados nos trabalhos de Gardner (1958), Brooks & Corey (1964), Farrell & Larson (1972), van Genuchten (1980), Williams et al. (1983), McKee & Bumb (1984), McKee & Bumb (1987) e Fredlund & Xing (1994).

Leong & Rahardjo (1997) classificam as curvas de retenção e os modelos desenvolvidos quanto à forma da curva. Os autores consideram curvas com formato de sigmoide, em S, (Figura 7) e curvas que não possuem este formato (Figura 8).

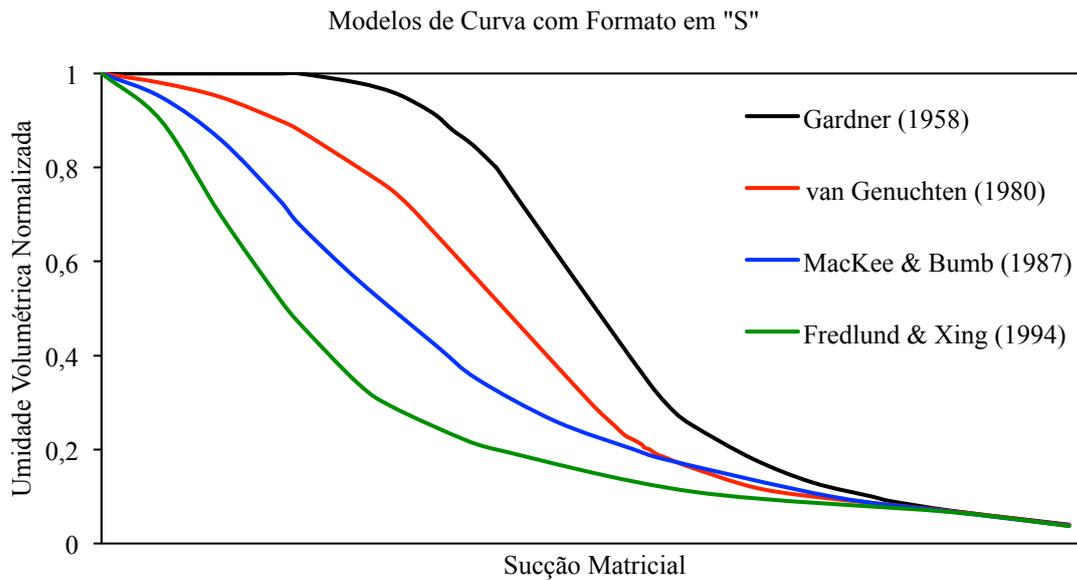


Figura 7 - Curvas com formato em "S" (LEONG; RAHARDJO, 1997).

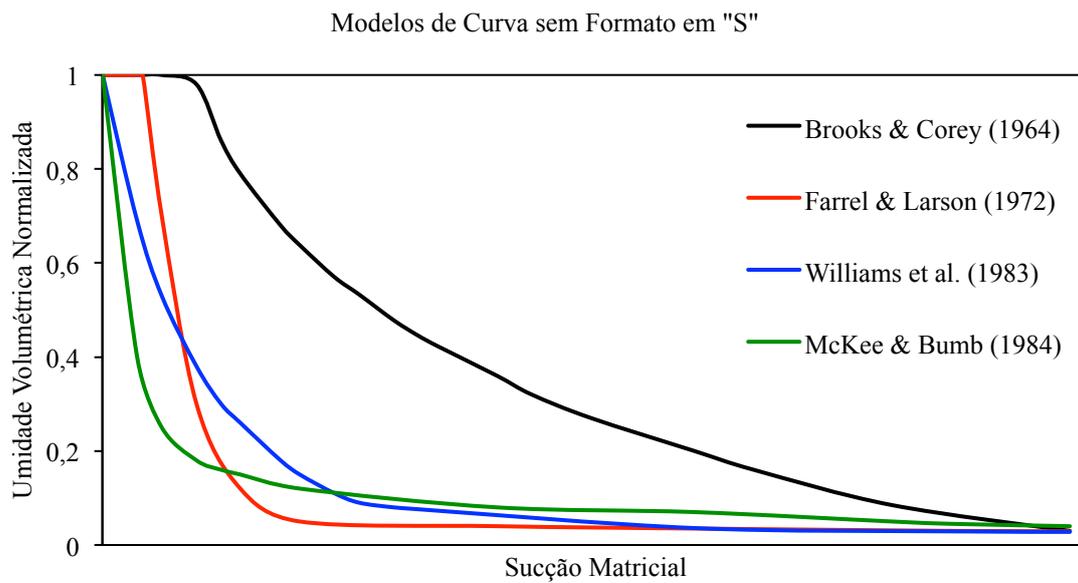


Figura 8 - Curvas sem formato em "S" (LEONG; RAHARDJO, 1997).

3.4 Técnicas para medida, imposição e controle da sucção

3.4.1 Papel Filtro

A técnica conhecida com Papel Filtro (*filter-paper*) é uma técnica indireta para a medição da sucção de uma amostra de solo a partir do equilíbrio das sucções do solo e do papel.

Segundo Bulut & Leong (2008) entre todos os métodos conhecidos para a medição de sucção, a técnica do papel filtro é a única capaz de medir tanto a sucção total quanto a sucção matricial. A sucção total é medida quando o equilíbrio das sucções do papel e do solo acontece sem contato direto, situação a qual só ocorrerá troca de vapor d'água entre solo e papel, e não solutos. Para medir a sucção matricial, o equilíbrio ocorre por meio do contato direto entre o papel e o solo.

Para a determinação da sucção é necessário usar um papel filtro padrão e uma respectiva calibração do papel filtro. O papel mais comum usado nesse método é o *Whatman n°42*, e correlações para a sucção do solo e a umidade do papel são encontradas nos trabalhos de Fawcett & Collis-George (1967), Hamblin (1981), Chandler & Gutierrez (1986), Chandler et al. (1992) e ASTM (2010).

A calibração desenvolvida por Chandler et al. (1992), tem ampla utilização, onde a umidade gravimétrica do papel filtro é fornecida em porcentagem e a sucção é obtida em kPa (Equações 4 e 5).

$$s = 10^{6,05-2,48\log(w_p)}; w_p \geq 47\% \quad (4)$$

$$s = 10^{4,48-0,0622w_p}; w_p < 47\% \quad (5)$$

Em que,

s : sucção em kPa

w_p : umidade do papel filtro *Whatman n°42* em %.

3.4.2 Placa de Sucção (Funil de Haines)

A placa de sucção, ou funil de placa porosa ou ainda Funil de Haines, é um equipamento de uso simples que conta com uma placa porosa de alta pressão de entrada de ar, porém, permeável à água. Como o gradiente hidráulico é imposto por uma altura h de coluna d'água, geralmente as sucções impostas nesse tipo de equipamento não ultrapassam 20kPa, o que equivale a 2,0 m de coluna d'água. A sucção matricial é o próprio gradiente hidráulico. Na Figura 9 segue um esquema ilustrativo do sistema (REICHARDT, 1985).

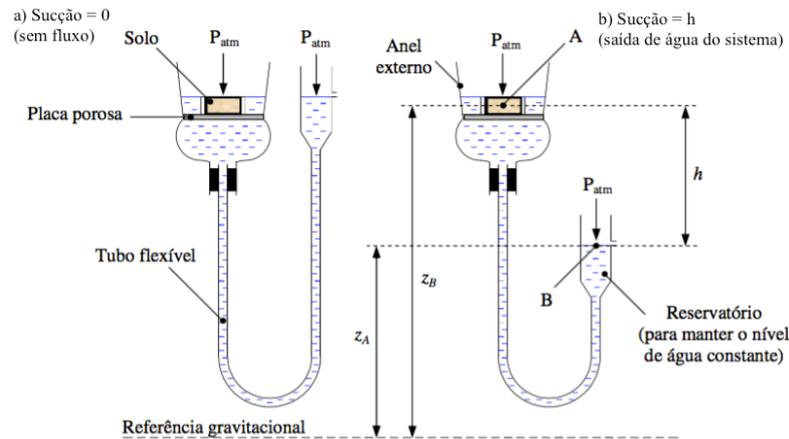


Figura 9 - Esquema da placa de sucção (LIBARDI, 2012).

3.4.3 Câmara de Pressão

Esse equipamento funciona baseado na técnica de translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956). A sucção (s) é a diferença entre a pressão no ar e a pressão na água do solo:

$$s = (u_a - u_w) \quad (6)$$

Existe a dificuldade de se controlar a pressão na água (u_w), que é negativa na zona não saturada. Por isso, este método estabelece uma mudança no referencial de pressão, aumentando a pressão no ar (u_a), chegando-se assim na sucção desejada.

Um modelo ilustrativo de uma câmara de pressão que usa a técnica de translação de eixos é mostrada na Figura 10.

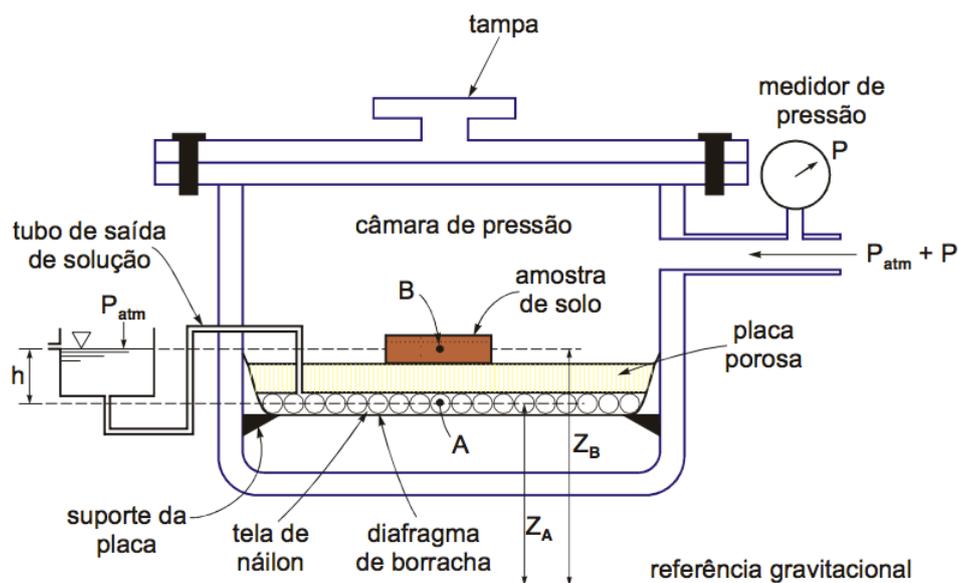


Figura 10 - Câmara de pressão (LIBARDI, 2012).

Na câmara, existe uma placa porosa de alta pressão de entrada de ar que permite que a câmara seja pressurizada impedindo a passagem do ar pela placa, mas possibilitando o fluxo de água. A pressão no ar do solo aumenta com a aplicação da pressão de ar no interior da câmara e a medida que a água vai sendo expulsa dos vazios do solo, a sucção (s) da amostra de solo tende a ser equilibrada.

3.4.4 Tensiômetro

É um instrumento de medida, em campo, do potencial matricial ou da sucção no solo, amplamente utilizado na agricultura comercial. Seu intervalo de sucção mensurável é de 0 a 85 kPa na prática, o que limita sua utilização em regiões de clima seco. Porém, como na agricultura a faixa de sucção de interesse vai até 100kPa, o tensiômetro é um instrumento muito útil para o monitoramento da sucção (BRITO et al., 2009).

A aferição da sucção no solo pode ser realizada por meio de vacuômetros, tensímetros ou ainda por meio de manômetro de mercúrio. A desvantagem do uso do mercúrio está no possível risco de contaminação desse metal ao meio ambiente, fato que exige certo cuidado no correto manuseio do aparelho.

O tensiômetro tornou-se um importante aparelho para medida e controle de sucção no campo, uma vez que a técnica de translação de eixos aplicada em laboratório não pode ser

facilmente aplicada *in situ*. Medidas feitas em campo com um tensiômetro calibrado pode preencher lacunas deixadas pelos ensaios em laboratório (TARANTINO & MONGIOVÌ, 2003). Na Figura 11 é apresentado um diagrama esquemático de um tensiômetro, construído em um tubo de PVC, com duas opções diferentes de sistema de leitura de sucção (BRITO et al., 2009).



Figura 11 - Figura esquemática de tensiômetro com duas opções de sistema de leitura acoplados (modificado de BRITO et al., 2009).

3.4.5 Blocos de Resistência Elétrica

Esse método de aferição da sucção em campo se baseia em variações de resistência elétrica. Por meio da adaptação de eletrodos elétricos em blocos de diferentes materiais (gesso, fibra de vidro, fios de nylon, cerâmica, entre outros), pode-se medir a sucção baseada na resistência elétrica (BOUYOUCOS; MICK, 1940; COLMAN; HENDRIX, 1949; IRMAK et al., 2014).

Bouyoucos & Mick (1940) adaptaram dois eletrodos dentro de um bloco de gesso, e instalaram o bloco no solo de modo que a umidade do bloco interagisse com a do solo, entrando em equilíbrio. As mudanças da umidade do solo são refletidas na resistência elétrica do bloco e as relações de resistência e sucção podem ser estabelecidas. Porém, propriedades do gesso conferem à esse blocos baixa durabilidade, pois são solúveis.

Irmak et al. (2014) propõem um sistema que se mostra uma boa alternativa para monitoramento de sucção em campo. A vantagem do método é a possibilidade da instalação em profundidade de blocos cerâmicos de resistência elétrica, envoltos por uma membrana sintética anticorrosiva, ligados a uma central *data-logger* capaz monitorar a sucção e a temperatura do solo ao longo do tempo.

3.4.6 Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC)

Ridley & Burland (1993) criaram um tensiômetro capaz de aumentar o intervalo de sucção mensurável dos tensiômetros comuns. Trata-se do tensiômetro de alta capacidade, mais conhecido como TAC, onde se utiliza como técnica a pressurização da água em um reservatório de pequenas dimensões acoplado ao tensiômetro, para que não ocorra cavitação, aumentando o intervalo de sucção.

Com o TAC medidas de sucção maiores que 85 kPa são possíveis, podendo alcançar medidas bem maiores, chegando até 1500 kPa. O aparelho se mostra bastante versátil e eficiente para medidas de sucção matricial direta do solo, tendo resultados insatisfatórios apenas para sucções baixa, abaixo de 10kPa (SOTO; VILAR, 2006).

A versatilidade do método se dá pela possibilidade de medidas *in situ*, ou ainda podendo ser adaptado para o uso em laboratório em ensaios de compressão triaxial ou adensamento (DIENE; MAHLER, 2007).

Gomes (2007) enumera algumas vantagens e desvantagens, bem como o intervalo de sucção mensurável, de alguns métodos já listados nesse trabalho (Tabela 1).

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos equipamentos de medida de sucção (modificado de GOMES, 2007)

Equipamento	Intervalo de Sucção Mensurável	Vantagens	Desvantagens
Papel Filtro	0 - 30 MPa	Simple aplicação	Tempo de equilíbrio alto (mínimo 7 dias)
		Cobre um amplo intervalo de sucção	Pode apresentar imprecisões para saturações mais altas, pois o solo úmido se agrega ao papel filtro
		Sucção matricial ou total	Exige cuidados especiais de isolamento e no tempo de equilíbrio para evitar microrganismos (como fungos ou bactérias)
Placa de Sucção	0 - 70 kPa*	Simple operação	Limitações de intervalo
		Leitura fácil e direta	
Câmara de Pressão	0 - 1,5 MPa	Permite impor/controlar sucção	Risco de se obter valores superestimados de sucção em CPs com Saturação > 80%
		Pode ser acoplado em outros equipamentos	Possíveis problemas com bolhas de ar
		Medição direta da sucção	Possibilidade de difusão de ar pela pedra porosa com valores subestimados
Tensiômetro	0 - 85 kPa	Simple aplicação	Limitações de intervalo
		Tempo de equilíbrio rápido (minutos)	
		Baixo custo de implantação	
		Versátil (pode ser usado em campo ou em laboratório)	
T.A.C.	0 - 1,5 MPa	Intervalo mensurável bem maior que o tensiômetro comum	Resultados insatisfatórios para sucções abaixo de 10 kPa
		Tempo de equilíbrio rápido (minutos)	
		Versátil (pode ser usado em campo ou em laboratório)	

*Embora a técnica permita a obtenção de sucções até 70 kPa, comumente são aferidas sucções apenas até 15 kPa, por conta da limitação física existente (a sucção imposta depende da altura do aparelho - gradiente hidráulico).

3.5 Solos Colapsíveis

Uma característica corriqueira dos solos tropicais não saturados porosos é a colapsibilidade. Os solos colapsíveis são solos que podem apresentar uma diminuição significativa do seu volume devido ao aumento do grau de saturação, sem que haja um aumento importante das sobrecargas externas aplicadas (VILAR; RODRIGUES, 2011).

Em geral, o solo colapsível apresenta uma resistência temporária, gerada pela sucção e, em alguns casos, também por elementos cimentantes solúveis à água. Em outras palavras, estes solos possuem uma estrutura metaestável que se mantém devido às forças geradas na interface ar-água-sólidos e, em alguns casos, devido também a vínculos de cimentação.

Com o umedecimento do solo a sucção diminui devido à redução das forças de capilaridade e de adsorção e o colapso ocorre. Dudley (1970) foi um dos pioneiros a apresentar modelos representativos da estrutura básica dos solos colapsíveis. Na Figura 12 e na Figura 13 são ilustrados os modelos estruturais de Dudley (1970).

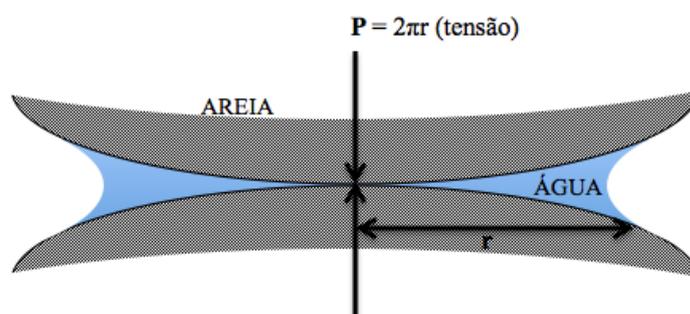


Figura 12 - Capilaridade produzindo pressão de contato entre as partículas (DUDLEY, 1970).

De acordo com Dudley (1970), a metaestabilidade do solo pode ser mantida devido às forças de atração (ligações iônicas), onde grãos maiores (grãos de areia) são interconectados por grãos menores que os envolvem (grãos de argila ou silte). Quando o arranjo está mais seco, as ligações entre as moléculas os mantêm presos, situação da Figura 13a. Quando a umidade aumenta as concentrações iônicas diminuem e forças repulsivas entre as partículas perturbam o arranjo metaestável (Figura 13b), reduzindo a resistência temporária e resultando no fenômeno do colapso.

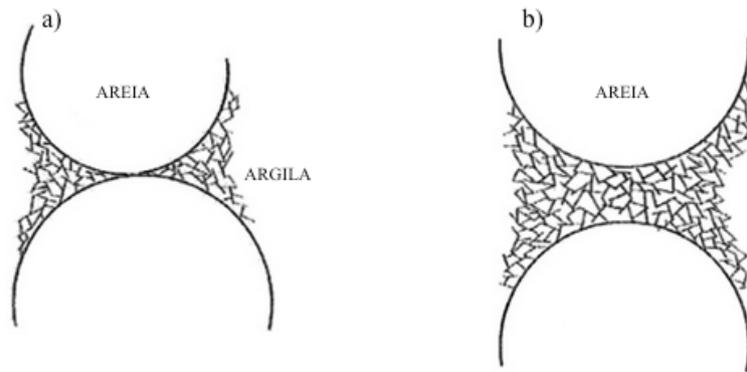


Figura 13 - a) Grãos de areia sendo agregados por partículas de argila. b) Forças de repulsão entre moléculas perturbando estrutura metaestável (DUDLEY, 1970).

A resistência temporária ainda pode aparecer devido a alguns agentes cimentantes, que envolvem os grãos maiores gerando a estrutura metaestável. De acordo com a solubilidade dos agentes cimentantes e o aumento do grau de saturação do solo, esses agentes podem ser dissolvidos na água, gerando o colapso.

Evidentemente, Dudley (1970) se refere a alguns solos colapsíveis encontrados no hemisfério Norte, que é diferente dos solos formados em climas tropicais do hemisfério Sul. Além disso, apesar do autor reconhecer a existência da sucção, nesta época, a sua importância ainda não estava devidamente consolidada como uma das mais importantes variáveis de estado a interferir no comportamento dos solos não saturados.

3.5.1 Solos Lateríticos

Em regiões com clima tropical ocorre um processo bem característico de intemperismo, uma vez que os períodos de chuva e de seca são bem definidos e alternados, associados quase sempre a elevadas temperaturas. Tal processo provoca a formação de um solo que tem características específicas e muitas vezes distintas do ponto de vista mineralógico (basicamente cálcio, caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio), formando espessas camadas de solos com cores geralmente amarelada ou avermelhada (TEIXEIRA et al., 2000).

Segundo Teixeira et al. (2000), no Brasil, os solos foram originados basicamente por processos químicos.

Os solos tropicais maduros e bem drenados, por passarem por extensos processos de lixiviação ao longo do seu tempo de formação, apresentam uma espécie de "lavagem" dos

minerais mais ativos ocasionada pelas águas pluviais nos períodos de chuva. Por tal motivo as camadas mais superficiais são constituídas por minerais mais estáveis como o quartzo, mais frequentes nas areias e pedregulhos. Outros tipos de minerais podem ser encontrados nas frações mais finas, de siltes e argilas, como caulinita, que podem gerar uma agregação das partículas finas, resultando em um comportamento não condizente com sua textura (FABBRI, 1994; NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Esses solos, geralmente, apresentam características flagrantes de solos colapsíveis. Espessas camadas bem drenadas, com alta porosidade principalmente nas camadas mais superficiais. Portanto, exigem cuidados especiais, principalmente na identificação de colapso para se evitar problemas frequentes como, por exemplo, recalques diferenciais em fundações diretamente apoiadas em solos colapsíveis.

3.6 Variabilidade Sazonal

Na Geotecnia, é comum a obtenção de parâmetros do solo com base em um número limitado de ensaios *in situ*, ou ainda por meio de ensaios laboratoriais realizados em amostras obtidas de locais discretos que não representam de forma genérica o local de interesse. Comumente, os parâmetros do solo são obtidos adotando valores conservadores a partir desses ensaios, sem qualquer consideração da variabilidade do parâmetro, ou outras incertezas envolvidas na interpretação, principalmente envolvendo o comportamento não saturado do solo (DYMINSKI et al., 2006).

A variabilidade espacial das propriedades de engenharia nos estratos do solo é inerente à natureza do solo, e é controlada principalmente pelo ambiente onde os materiais se depositam, sendo que ambientes com alto intemperismo resultam em solos com alta variabilidade espacial (por exemplo, cascalhos aluviais) e locais com intemperismo moderado resultam em depósitos de solos com baixa variabilidade espacial (por exemplo, argilas lacustres). Em solos lateríticos os processos de lixiviação e cimentação resultam geralmente em solos com elevada variabilidade, tanto lateral quanto em profundidade (MOSS et al., 2010; NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

No tocante à condição não saturada do solo, além da variabilidade espacial, também ocorre a variabilidade sazonal, pois a sucção varia ao longo do tempo, fato que muitas vezes é negligenciado na prática da engenharia e nas etapas de investigação do solo. As variações de sucção são decorrentes da sazonalidade das estações (chuvosa e seca) também acarretam variação dos parâmetros geotécnicos em campo (DOS SANTOS, 2003; LESSA, 2005; MOTA, 2003; ROCHA, 2017). Deste modo, para se obter projetos geotécnicos com desempenho satisfatório, deve-se levar em consideração a variabilidade sazonal do local, buscando associar tal variabilidade aos dados de investigação do perfil de umidade, pluviometria e curva de retenção de água no solo.

Na Figura 14 é apresentada a variabilidade de parâmetros geotécnicos em decorrência da variabilidade sazonal. A mudança da estação úmida (Jan/12) para a seca (Ago/12), ocasionou em um aumento considerável da resistência de ponta e de atrito lateral. Tal fato evidencia a influência da sucção nos parâmetros geotécnicos do solo não saturado. Nesta figura, é possível constatar maior variação na camada superficial do perfil, onde o solo interage com a atmosfera.

Em geral, os solos colapsíveis são considerados solos problemáticos, principalmente em projetos de fundações residenciais, que raramente contam com um projeto mais elaborado e uma sondagem prévia realizada no local. Quando a opção por fundações diretas é realizada, problemas de recalques diferenciais das fundações são frequentes e quase sempre onerosos no tocante aos trabalhos de reparação (KALANTARI, 2013; RODRIGUES, 2007; VILAR; RODRIGUES, 2011).

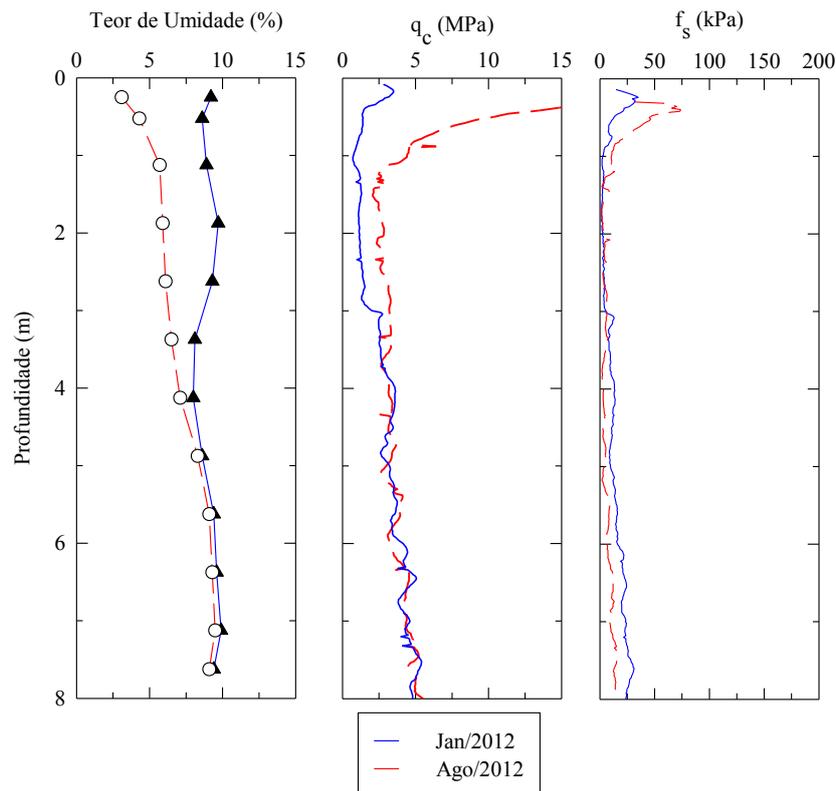


Figura 14 - Resultados típicos da variabilidade de umidade, resistência de ponta e atrito lateral entre período úmido (Jan/2012) e período seco (Ago/2012) (ROCHA, 2017).

3.7 Ensaios Edométricos

Existem diferentes técnicas para identificar a colapsibilidade e mensurar ou quantificar o colapso dos solos. A medida do colapso pode ser realizada em ensaios edométricos de laboratório. Devido às características das deformações ocorridas no colapso, o ensaio edométrico representa uma importante ferramenta para avaliar esse fenômeno, pois pode reproduzir o comportamento do solo quando inundado. Podendo ser usado para identificação e quantificação do colapso.

3.7.1 Ensaios Edométricos Convencionais

Em grande parte dos estudos laboratoriais já realizados acerca do colapso dos solos em câmaras edométricas, ensaios edométricos convencionais, simples e duplos, propostos por Jennings & Knight (1975), são amplamente realizados.

Nos ensaios simples (Figura 15) o corpo de prova do ensaio é inundado em um determinado carregamento de interesse, e após 24 horas de estabilização das deformações, os estágios de carregamento continuam com o solo inundado.

Outro método de realização do ensaio refere-se aos ensaios edométricos duplos. Nesse método dois ensaios gêmeos são realizados simultaneamente, sendo que em um ensaio a umidade de campo da amostra é mantida até o fim do ensaio, e no outro a amostra é saturada antes do início dos carregamentos, e é mantido saturado até o fim do ensaio. Ao término dos carregamentos duas curvas de tensão por deformação são obtidas, sendo uma referente ao corpo de prova com umidade de campo e outra ao corpo de prova saturado. Na Figura 15 são ilustrados as curvas edométricas de um ensaio simples e duplo.

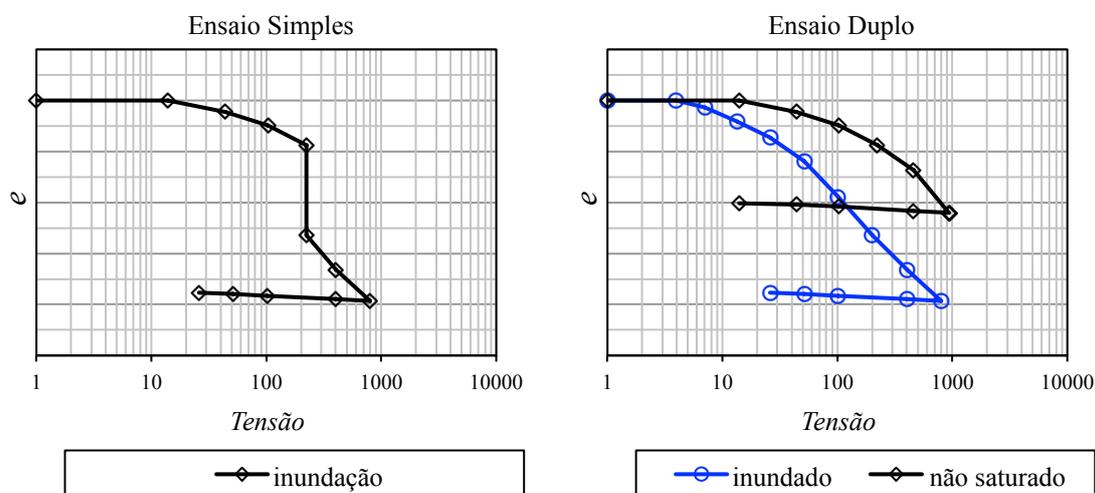


Figura 15 - Ensaios edométricos simples e duplos.

Os ensaios simples e duplos sempre foram muito utilizados para analisar a colapsibilidade dos solos, porém, atualmente existem opções mais modernas que possibilitam a imposição e o controle da sucção do solo têm sido amplamente utilizados.

3.7.2 Ensaios Edométricos com Sucção Controlada

O uso de opções mais modernas como os ensaios com o controle da sucção permitem um melhor e mais detalhado entendimento do comportamento dos solos colapsíveis, já que nesses ensaios diversas trajetórias de tensão e de sucção podem ser reproduzidas.

Escario & Saez (1973) desenvolveram uma câmara que permite a realização de ensaios de compressibilidade do solo com sucção controlada. O equipamento é uma câmara edométrica adaptada de forma que a imposição e o controle da sucção do solo na câmara

segue a técnica de translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956) de maneira análoga à câmara de pressão. É composta por uma pedra porosa de alta pressão de entrada de ar na parte inferior, e na parte superior por uma pedra porosa grossa. A compressão do corpo de prova é feita pela aplicação de uma carga, e a sucção é controlada de acordo com a pressão de ar dentro da câmara.

Antes da imposição da sucção tanto a pedra porosa de alta pressão de entrada de ar do edômetro quanto o corpo de prova de solo devem estar saturados. Ao impor a pressão de ar dentro da câmara edométrica, que por meio da técnica de translação de eixos é equivalente a sucção, parte da água é transferida do corpo de prova de solo para a bureta e, assim a quantidade de água retirada do corpo de prova pode ser medida diretamente na bureta.

Nessa técnica a medida direta da sucção, equivalente a pressão de ar, é relativamente prática e confiável. Uma desvantagem do método é a limitação no valor da sucção imposta pela técnica, uma vez que as pedras porosas não ultrapassam 1500 kPa de pressão de entrada de ar.

Um modelo de edômetro baseado na câmara de Escario & Saez (1973) foi construída por Machado (1995), conforme ilustrado na Figura 16.

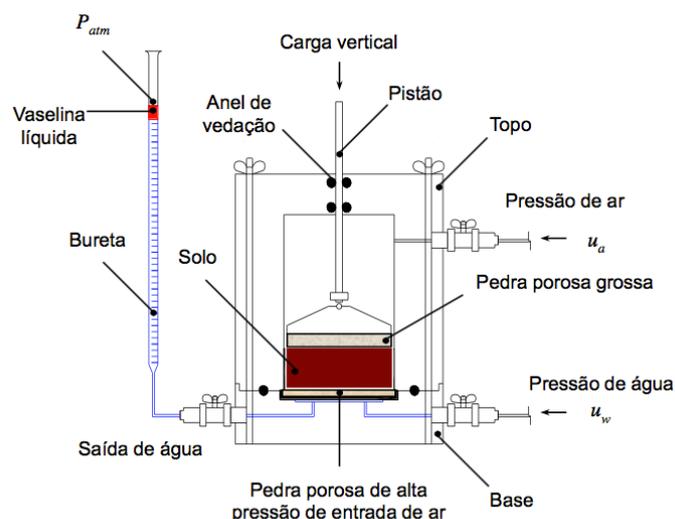


Figura 16 - Câmara edométrica com sucção controlada (modificado de MACHADO, 1995).

Rodrigues (2007) ao estudar o solo da cidade de Pereira Barreto-SP, realizou ensaios edométricos com diferentes sucções, com e sem colapso, para amostras de diferentes profundidades afim de analisar a relação entre a elevação induzida do lençol freático na região devido à construção da UHE de Três Irmãos e os recalques observados em algumas residências. Resultados típicos obtidos pelo autor são apresentados na Figura 17.

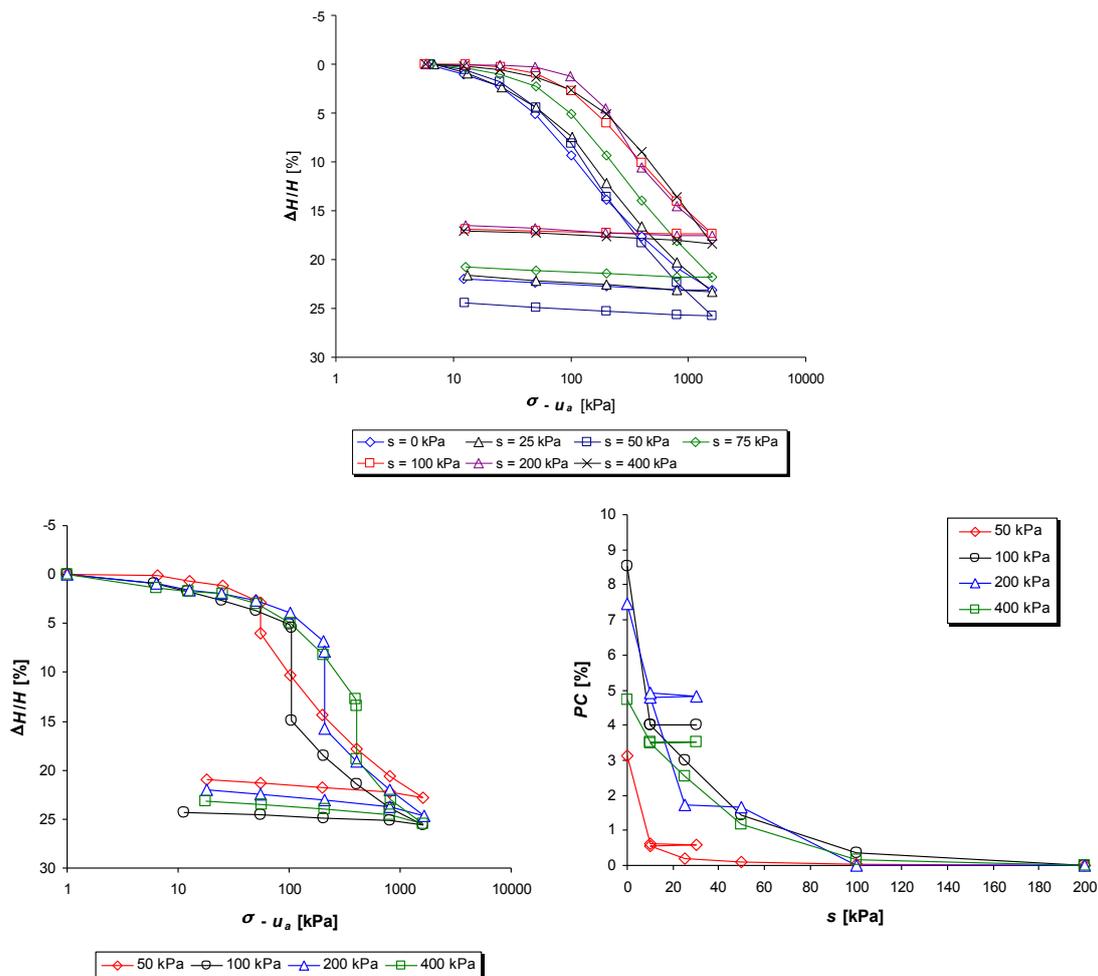


Figura 17 - Resultados de ensaios edométricos com sucção (RODRIGUES, 2007).

Os resultados obtidos por Rodrigues (2007) mostram a influência da sucção na compressibilidade e no potencial de colapso do solo, com o aumento da sucção o solo estudado se mostra menos compressível e com maior potencial de colapso.

Outra técnica para a imposição e controle da sucção em câmaras edométricas é a do princípio osmótico, embora não seja muito difundida em estudos geotécnicos, se mostra interessante por oferecer algumas vantagens como a possibilidade de realização de ensaios

com sucção de até 10.000 kPa e a não perturbação das características naturais do solo pela influência da pressão de ar como na técnica de translação de eixos (SOTO, 2004).

A imposição e o controle da sucção se dá pelo equilíbrio osmótico entre o solo e uma solução de polietileno de glicol (PEG), onde a diferença do potencial total entre solo e solução faz com que a água se movimente na direção de menor potencial até que se atinja o equilíbrio. Um esquema do edômetro osmótico está ilustrado na Figura 18.

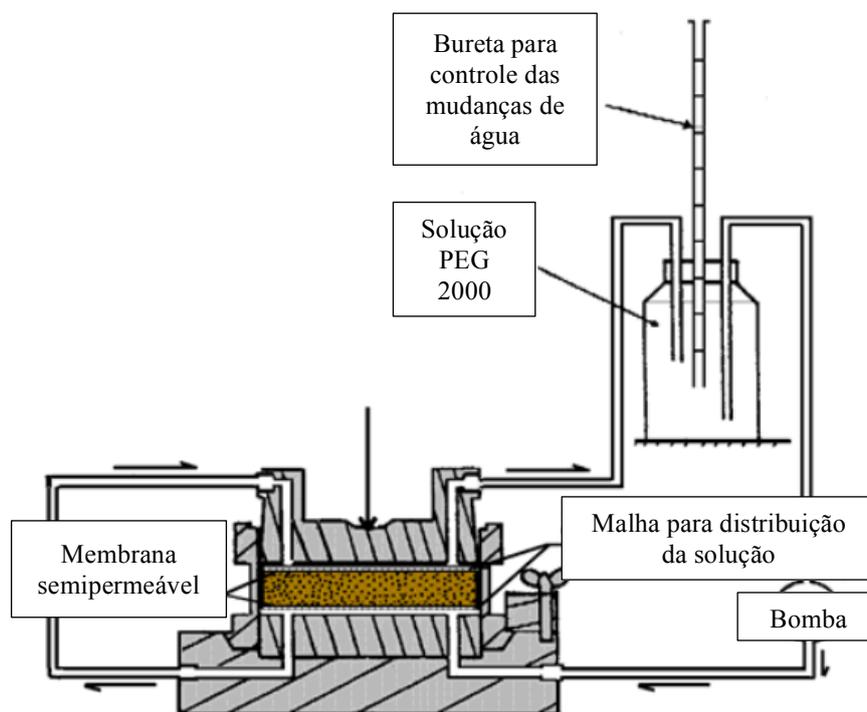


Figura 18 - Esquema do edômetro osmótico (SOTO, 2004).

Já uma alternativa utilizada para a imposição e controle da sucção total em ensaios edométricos pode ser feita pela técnica de equilíbrio de vapor ou umidade relativa, que é amplamente utilizada para o estudo de argilas expansivas que possuem alta capacidade de retenção de água no solo. Nessa técnica, por meio de relações da sucção com a umidade relativa, umidade do material, concentração de solutos, temperatura, entre outras propriedades, permite-se a determinação indireta da sucção, que é medida por meio de relações termodinâmicas entre a energia livre da água no solo e a pressão parcial de vapor da água nos poros de solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

A equação a seguir descreve a relação:

$$s = -\frac{R.(273,16 + t)}{M.g} \cdot \ln\left(\frac{P}{P_s}\right) \quad (7)$$

Em que,

s : sucção total (kPa);

R : constante universal do gás [$8,314462 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$];

t : temperatura ($^{\circ}C$);

M : massa molar do vapor de água ($18,016 kg \cdot mol^{-1}$);

g : aceleração da gravidade [$9,81 m \cdot s^{-2}$];

P : pressão parcial de vapor de água nos poros de solo (kPa);

P_s : pressão de saturação de vapor de água sobre uma superfície plana de água pura sob a mesma temperatura (kPa).

A equação anterior é descrita para um recipiente de água pura. Com a alteração da concentração da água, com sal ou ácido, é possível atingir o equilíbrio em pequenos reservatórios fechados, e a umidade relativa é medida pela concentração da solução. Calibrações para diferentes soluções e diferentes temperaturas podem ser feitas, e uma faixa ampla de sucção pode ser obtida até 70 MPa.

O método pode ser adaptado em uma câmara edométrica, e por meio do controle da umidade relativa no fluxo de ar da câmara, a sucção é controlada. Um modelo esquemático de Oldecop & Alonso (2001) de uma câmara edométrica adaptada ao método pode ser identificada na Figura 19.

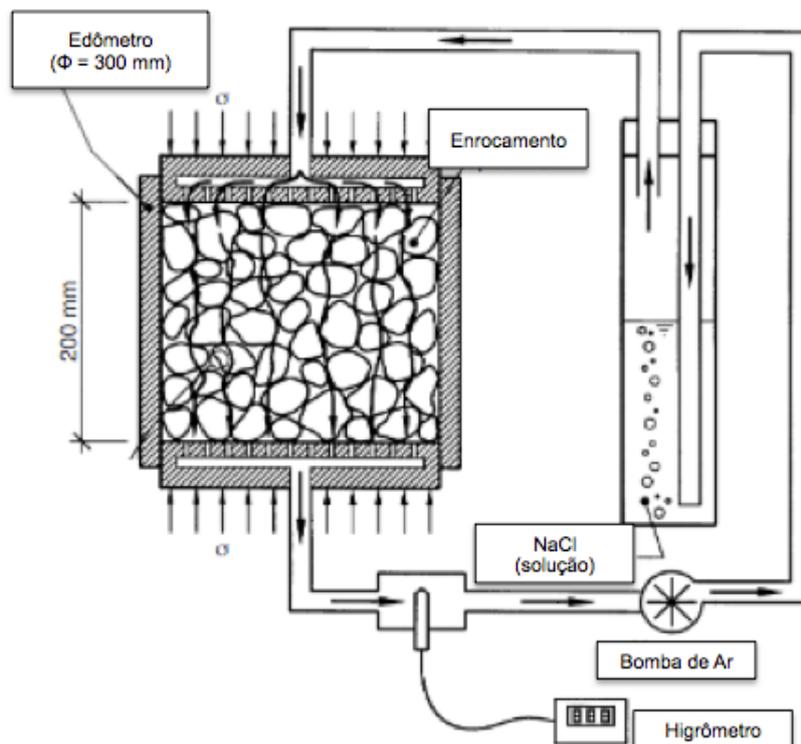


Figura 19 - Esquema de edômetro com sucção controlada por equilíbrio de vapor d'água (OLDECOP; ALONSO, 2001).

No geral, a imposição e o controle da sucção nos ensaios edométricos possibilitou um grande avanço nos estudos em solos colapsíveis, uma vez que na realização deste tipo de ensaio é possível impor diversas trajetórias de sucção e de tensão com ciclos de umedecimento e secagem e indução de colapso com redução gradual da sucção. A realização de tais etapas permitem analisar o desenvolvimento incremental da deformação por colapso com o umedecimento do solo.

Soto (2004) lista algumas vantagens e desvantagens de cada método utilizado para imposição e controle da sucção em câmaras edométricas (Tabela 2).

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de imposição e controle da sucção acoplados em câmaras edométricas (SOTO, 2004).

Técnica	Intervalo de Sucção Mensurável	Vantagens	Desvantagens
T.T.E.	0 - 1,5 MPa	Medição direta da sucção	Erro na medida de sucção caso tenha ar ocluído
		Possibilita medir sucções maiores que 100 kPa	Não recomendado para sucções menores que 10 kPa
		Disponível comercialmente	Não recomendado para solos com granulação fina
		Técnica simples e de fácil operação	Equipamento caro
Osmótica	0 - 10 MPa	Solo não perturbado pela pressão de ar como na T.T.E.	Membranas sensíveis a bactérias e microrganismos
		Permite sucções de até 10.000 kPa	Membranas deve ser adequadas ao PEG quanto ao peso molecular
		Medidas confiáveis mesmo que o solo apresente ar ocluído	Período de vida da membrana curto (30 dias)
		Técnica simples e de fácil operação	Necessita de um controle adequado da temperatura ($20,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$)
Vapor d'água	0 - 70 MPa	Permite sucções bem mais elevadas que os outros métodos	Limitações para sucções menores que 10.000 kPa
		Solo não perturbado pela pressão de ar como na T.T.E.	Necessita de um controle adequado da temperatura ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$)
		Mede a sucção total do solo.	Tempo de equilíbrio alto (podendo chegar a 250 dias)

3.8 Previsão de Comportamento de Solos Não Saturados

Para um melhor entendimento de problemas geotécnicos relativos aos solos não saturados, em especial, aos solos colapsíveis, é necessário o uso de formulações matemáticas relacionadas ao comportamento tensão/deformação que sejam capazes de prever, interpretar ou ainda reproduzir o comportamento desses solos.

Nos últimos anos com o crescente interesse no entendimento do comportamento não saturados dos solos, o desenvolvimento dessas formulações matemáticas resultaram na elaboração de modelos constitutivos que visam reproduzir o comportamento desses solos, como modelos elásticos, elastoplásticos ou de superfície de estado (ALONSO et al., 1990; FREDLUND, 1979).

3.8.1 Modelo Básico de Barcelona (BBM)

Com o propósito de analisar a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento de forma acoplada, e também de reproduzir fenômenos como colapso e expansão sob diferentes trajetórias de tensão e sucção, Alonso et al. (1990) desenvolveram um modelo elastoplástico, conhecido como Modelo Básico de Barcelona (BBM - *Barcelona Basic Model*).

O BBM é um modelo constitutivo mecânico, baseado na teoria dos estados críticos. Trata-se de uma extensão do modelo *Cam-Clay* modificado, em que o efeito da sucção no solo é considerado. O modelo foi elaborado para estado triaxial de tensões (de compressão hidrostática), onde p é a tensão octaédrica (Equação 8), e tem as tensões e sucção como variáveis de estado.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (8)$$

A concepção teórica do modelo baseia-se em dois ensaios em corpos de prova idênticos, sendo o primeiro saturado e o segundo não saturado sob sucção constante s (Figura 20). O ensaio não saturado com sucção constante é carregado e tem suas deformações até o ponto 1 (p_0) sob regime elástico (κ), e após esse ponto sob regime elastoplástico (reta virgem), a partir desse momento o ensaio é descarregado sob sucção constante até o ponto 2 (p_0^*), e ao realizar o umedecimento do corpo de prova ocorre a expansão até o ponto 3, de mesma tensão. O corpo de prova saturado tem suas deformações também até o ponto 3 (p_0^*), sob regime elástico (κ), e após esse ponto, sob o regime elastoplástico (reta virgem).

Considerando acréscimos de tensões ao longo de seu estado virgem de solicitações, em um ensaio a uma determinada sucção, temos que o volume específico v será:

$$v = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln \frac{p}{p^c} \quad (9)$$

Em que,

$N(s)$: volume específico para $p = p^c$;

$\lambda(s)$: parâmetro elastoplástico de compressão do solo em função da sucção s ;

p : tensão;

p^c : tensão de referência para $v = N(s)$;

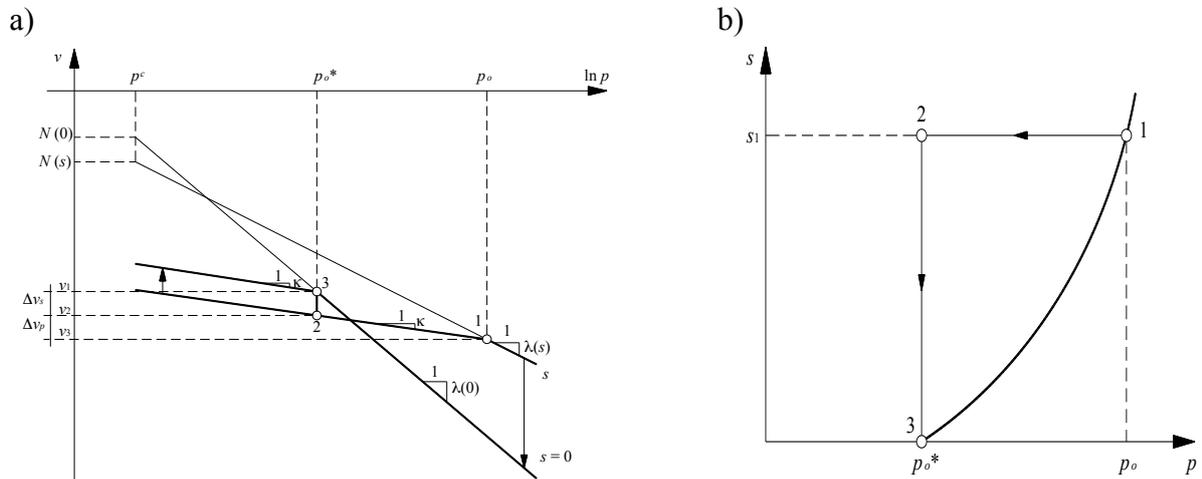


Figura 20 - (a) curvas de compressão isotrópica para corpos de prova saturado e não saturado; (b) trajetória de tensões e curva de plastificação (ALONSO et al., 1990).

Na Figura 20 (b) é possível identificar uma curva (do ponto 1 ao 3) definindo a fronteira entre domínio elástico (região à esquerda da curva) e plástico (região à direita da curva), que descreve a variação das tensões de pré-adensamento do solo em função da sucção. A curva em questão é chamada de LC (*loading-collapse*) e a sua extrapolação no plano $p \times s$ causa deformações irreversíveis, seja por carregamento ou por colapso. A curva LC é definida pela equação:

$$\frac{p_o}{p^c} = \left(\frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \quad (10)$$

Em que,

p_o : tensão isotrópica de pré-adensamento do solo não saturado com sucção s ;

p_o^* : tensão isotrópica de pré-adensamento do solo saturado;

p^c : tensão de referência para $v = N(s)$;

$\lambda(0)$: parâmetro de compressão elastoplástico do solo saturado;

$\lambda(s)$: parâmetro de compressão elastoplástico do solo em função da sucção s ;

κ : parâmetro de compressão elástico.

O parâmetro elastoplástico do solo $\lambda(s)$ (ligado à rigidez) varia em função da sucção, matematicamente consiste na inclusão de uma equação que descreve uma rigidez máxima assintótica:

$$\lambda(s) = \lambda(0) \cdot [(1 - r) \cdot e^{-\beta \cdot s} + r] \quad (11)$$

Em que,

β : é um parâmetro que controla a taxa de aumento da rigidez do solo com a sucção;

r : relação entre $\lambda(s)$ com s tendendo ao infinito e $\lambda(0)$.

Importante notar que o modelo original prevê valores de $\lambda(s)$ decrescentes com o aumento da sucção, ou seja, que as retas virgens de compressão divergem com o aumento da tensão (valores de colapso sempre crescentes com o aumento da tensão) e valores de r menores do que 1. Contudo, existem solos que não apresentam tal comportamento (Figura 21), podendo apresentar, por exemplo, convergência da reta virgem de compressão após um colapso máximo (WHEELER et al., 2002).

Wheeler et al. (2002) adaptaram o modelo original do BBM para também ser usado em solos que apresentam convergência da reta de compressão com o aumento da tensão (Figura 21b), utilizando-se valores convenientes dos parâmetros r e p^c .

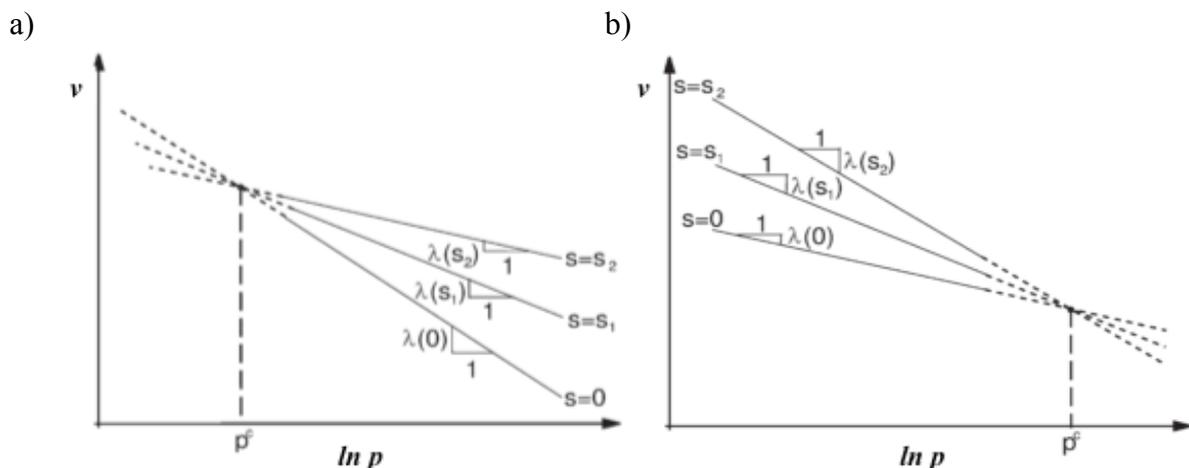


Figura 21- a) Solo com $\lambda(s)$ decrescente com o aumento da sucção, conforme modelo original do BBM; b) Solo com $\lambda(s)$ crescente com o aumento da sucção (WHEELER et al., 2002).

O modelo permite a previsão das deformações volumétricas a partir das seguintes leis de endurecimento:

Deformação volumétrica compressiva devido ao carregamento p na região elástica:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa}{v} \cdot \frac{dp}{p} \quad (12)$$

Deformação volumétrica compressiva caso o carregamento p atinja o valor de escoamento p_0 na curva LC:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s)}{v} \cdot \frac{dp_0}{p_0} \quad (13)$$

Componente plástica da deformação volumétrica é dada por:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s) - \kappa}{v} \cdot \frac{dp_0}{p_0} \quad (14)$$

Considerando a Equação 10, da curva de escoamento LC, a deformação volumétrica plástica também é dada por:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \cdot \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (15)$$

Deformação volumétrica compressiva devido o aumento da sucção na região elástica:

$$d\varepsilon_{vs}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa_s}{v} \cdot \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (16)$$

Na formulação do modelo, no estado de tensões triaxiais, têm-se também considerados os efeitos das tensões cisalhantes:

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (17)$$

A sucção produz um aumento da coesão, mantendo constante a inclinação da linha de estados críticos M . O acréscimo devido a coesão é dado por:

$$p = -p_s = -k \cdot s \quad (18)$$

Em que,

k : constante que descreve o acréscimo de coesão com a sucção.

Logo, a curva de escoamento descreve um elipse (Figura 22) no plano $p \times q$, que passa pelos pontos $-p_s$ e p_o , e é dada por:

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_o - p) = 0 \quad (19)$$

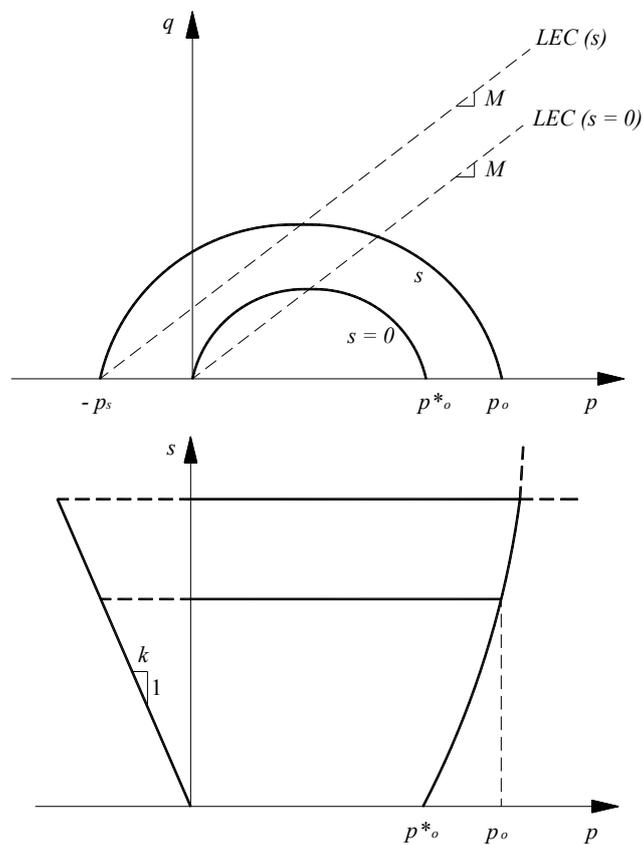


Figura 22 - Curvas de plastificação no espaço (p, q, s) (Alonso et al. 1990).

A curva de escoamento SI se estende à região $(q < 0)$ em um plano paralelo ao eixo q . Na Figura 23 é apresentada uma vista tridimensional das superfícies de escoamento.

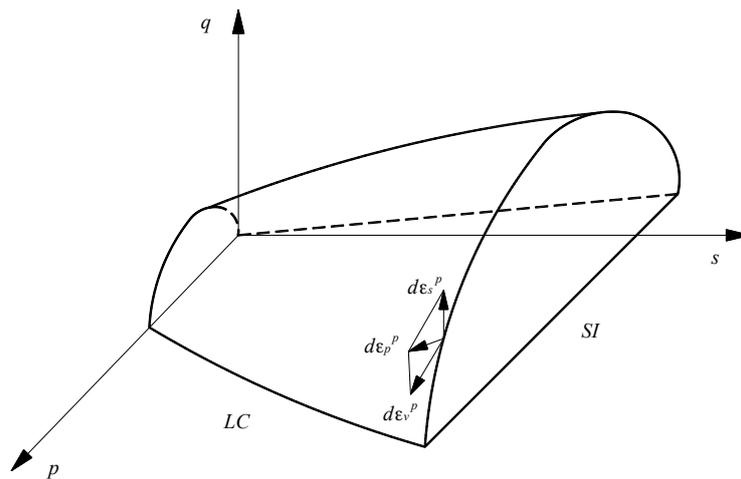


Figura 23 - Vista tridimensional das curvas de plastificação (Alonso et al. 1990).

4. Materiais e Métodos

Neste Capítulo estão descritas as etapas necessárias para a realização do programa metodológico da presente dissertação. Primeiramente são apresentados o local de estudo e as etapas de coleta e armazenamento de amostras. Na sequência, estão descritas as etapas dos ensaios de caracterização, ensaios edométricos e ensaios para determinação da curva de retenção de água no solo. Em seguida estão descritos os métodos de monitoramento de sucção em campo e de pluviometria e, por fim, são apresentados alguns aspectos da calibração do Modelo Básico de Barcelona.

4.1 Amostragem

4.1.1 Local

O estudo foi realizado no campo experimental da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru. As coordenadas do local onde foram coletadas as amostras são 22°21'05.9"S; 49°01'56.0"O.

A escolha do local de amostragem relaciona-se com estudos anteriores, que indicam que o solo de ocorrência no local pode ser classificado como areia fina a média pouco argilosa, marrom avermelhado, porosa, colapsível, com compactidade aumentando em profundidade e com boa homogeneidade textural. O comportamento desse solo é comum a outros solos, presentes em outras regiões do Estado de São Paulo. Uma foto aérea do local está ilustrada na Figura 24.



Figura 24 - Foto aérea do local da área de estudo (GOOGLE, 2016).

4.1.2 Escavação do Poço de Amostragem

No local foi escavado um poço principal com aproximadamente 0,8 m de diâmetro, junto com outros 3 poços auxiliares tangentes ao principal com aproximadamente 0,5 m de diâmetro, de modo que fosse possível coletar amostras indeformadas desses poços auxiliares, assim que fossem atingidas as profundidades desejadas.

A escavação foi realizada com cavadeira manual articulada (Figura 25) até a profundidade de 5,5 m em 5 etapas, interrompendo-se o procedimento nas profundidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m para a coleta das amostras.



Figura 25 - Início da escavação do poço de amostragem.

4.1.2 Amostras Deformadas

Para realização dos ensaios de caracterização, foram retiradas em sacos plásticos amostras deformadas nas cotas de 1, 3 e 5 m de profundidade, e acondicionadas em sacos plásticos para serem levadas ao laboratório.

4.1.3 Amostras Indeformadas

A retirada das amostras indeformadas foi realizada por meio da cravação de uma caixa metálica em forma de cubo com 0,25 m de lado. As caixas foram cravadas na vertical, estaticamente retirando os excessos das bordas de maneira a gerar a menor perturbação possível na amostra. Foram retiradas 3 amostras para cada profundidade desejada: 1, 2, 3, 4 e 5 m. A Figura 26 ilustra a moldagem de uma das amostras indeformadas retiradas do local.



Figura 26 - Retirada de amostra indeformada.

4.1.4 Armazenamento

As amostras indeformadas foram imediatamente parafinadas sobre uma base de madeira resinada logo após a sua coleta, etiquetadas e guardadas em uma câmara úmida no Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP-Bauru para preservar a estrutura e a umidade de campo.

Na Figura 27, ilustra-se uma das amostras indeformadas já parafinada. Quanto às amostras deformadas, os sacos plásticos com as amostras foram fechados e armazenados no depósito do Laboratório de Mecânica dos solos da UNESP-Bauru.



Figura 27 - Amostra indeformada parafinada e etiquetada.

4.2 Caracterização

Ensaio de caracterização foram realizados com as amostras deformadas nas profundidades desejadas: 1, 3 e 5 m.

- Granulometria: (NBR 7181/84).
- Limites de Atterberg: Limites de liquidez: (NBR 6459/84) e Limites de plasticidade: (NBR 7180/84).
- Massa específica dos sólidos: (NBR 6508/84).

4.3 Ensaio Edométrico Convencionais

Foram realizados ensaios edométricos em câmaras edométricas convencionais para realização dos ensaios com sucção nula (saturados). Após moldagem dos corpos de prova das amostras indeformadas de solo, estes foram saturados na própria câmara edométrica com água destilada e deaerada. Os carregamentos aconteceram após a saturação do corpo de prova, onde foram registradas medidas de deslocamento axial pela aplicação das cargas.

4.4 Ensaios Edométricos com Sucção Controlada

O programa experimental estabelecido para os ensaios edométricos com sucção controlada incluiu etapas prévias necessárias para a realização desses ensaios. Nos subitens subsequentes são descritas as etapas adotadas.

4.4.1 Calibração dos Edômetros

Foram utilizados no programa experimental duas câmaras edométricas que permitem a imposição e o controle da sucção por meio da técnica de translação de eixo de Hilf (1956). Nestes ensaios ao aplicar-se ar comprimido dentro da câmara edométrica, a pressão interna gera uma força que tende a impulsionar o pistão para fora do edômetro, na direção contrária à aplicação da força. É necessária, portanto, a correção desse empuxo gerado no pistão para o cálculo correto da força efetiva aplicada no corpo de prova. O cálculo desse empuxo depende de fatores como atrito entre pistão e câmara, pressão de ar interna e correta montagem da prensa do ensaio.

Pôde-se calcular uma curva de calibração para cada edômetro, montando-se as câmaras edométricas dentro de uma prensa eletrônica que mede valores de empuxos gerados para cada pressão de ar imposta internamente nas câmaras. Tal procedimento, foi realizado por meio de uma prensa triaxial, onde os edômetros foram montados (sem corpos de prova). Controlando-se os acréscimos de pressão de ar (u_a) dentro dos edômetros e medindo-se as forças de empuxo gerada pelo pistão, obteve-se a curva de calibração, em termos de pressão de ar e empuxo gerado. Por fim, a partir dessa curva, uma equação de calibração foi gerada e utilizada para correção do cálculo (desconto da parcela de empuxo) das cargas axiais aplicadas nos corpos de prova dos ensaios edométricos.

4.4.2 Saturação da Pedra Porosa

Para garantir que a sucção fosse imposta e controlada por meio da técnica de translação de eixos, foi necessário que a pedra porosa de alta pressão de entrada de ar (e permeável à água) estivesse totalmente saturada. Portanto, antes do início do ensaio a pedra porosa, na base do edômetro, e os capilares abaixo dela (sistema de drenagem) foram

saturados. Alguns passos foram seguidos para que essa saturação ocorresse corretamente, garantindo assim a imposição correta da sucção:

i) Primeiro, com o edômetro aberto, conectou-se uma mangueira de água na entrada de água do edômetro. O registro de entrada de água só foi aberto após a abertura do registro de saída de água, para evitar ascensão de água na pedra porosa. Após iniciado o fluxo, ocorreu percolação de água na base do edômetro por aproximadamente 1 minuto, até o fechamento dos registros, onde fechou-se primeiro o de entrada, em seguida o de saída de água.

ii) Em seguida, para a saturação da pedra porosa, percolou-se água destilada e deaerada nos edômetros fechados e sob pressão de ar. Colocou-se 200ml de água destilada e deaerada dentro do edômetro, até aproximadamente a marcação presente nele. Fechou-se de modo que a entrada de ar fique do lado oposto da saída de água (conector "macho") e prendeu-se as borboletas que o mantém fechado. Com os registros todos fechados, colocou-se o edômetro na prensa e então a saída de água e a entrada de ar do edômetro foram conectadas na bureta graduada e no sistema de pressurização (compressor de ar), respectivamente. Após a regulagem da pressão desejada por meio do manômetro do sistema, abriu-se o registro de entrada de ar do edômetro, e em seguida, o de saída de água.

iii) Ao circular água no sistema, por meio da pressão de ar interna do edômetro, a pedra porosa e os capilares abaixo dessa são preenchidos por água. Com o controle da vazão de água que sai do edômetro, pôde-se calcular a condutividade hidráulica da pedra porosa de alta pressão de entrada de ar. A condutividade hidráulica da pedra varia em função da saturação desta. Para o controle da saturação da pedra, foram aferidos sucessivos valores de condutividade hidráulica da pedra ao longo do tempo.

iv) Após a circulação de cerca de 400 ml de água destilada e deaerada no sistema, a condutividade hidráulica da pedra porosa calculada se tornava constante em função do tempo, o sistema era então considerado saturado e os ensaios foram montados.

4.4.3 *Montagem do Ensaio*

Os corpos de prova das amostras indeformadas foram moldados em um anel metálico de cerca de 70 mm de diâmetro e 25 mm de altura, sendo a parte inferior do anel biselada para facilitar a cravação na amostra. Após a abertura da amostra indeformada parafinada, a qual foi armazenada em uma câmara úmida, para manter a umidade de campo, o anel foi cravado, estaticamente, de modo a alcançar a mínima perturbação nas condições de campo da amostra.

Alguns passos foram realizados para o cálculo dos índices físicos do corpo de prova, como:

i) Aferição do anel: para o cálculo dos volumes iniciais dos corpos de prova foram realizadas aferições do diâmetro interno e da altura dos anéis metálicos por meio de paquímetro digital, três medidas de cada foram realizadas e a medida adotada foi a média das três. A aferição das massas dos anéis foi realizada por meio de balança digital com precisão de 0,01g.

ii) Determinação da umidade de campo da amostra indeformada: com o auxílio de 3 cápsulas metálicas com tara conhecida, foram retiradas três amostras de solo, uma em cada cápsula. Foram realizadas aferições das cápsulas com o solo em sua umidade de campo (solo + água + tara). Em seguida, as cápsulas foram abertas e colocadas em estufa para secagem; após 24 horas foram aferidas novas massas das cápsula, dessa vez com o solo seco (solo + tara). A umidade de campo foi conhecida por meio da relação de massa de água e massa de solo:

$$w = \frac{m_a}{m_s} \cdot 100\% \quad (20)$$

Em que,

w : umidade gravimétrica;

m_a : massa de água;

m_s : massa de sólidos.

iii) Massa do anel após a moldagem: Após a moldagem do corpo de prova, aferiu-se a massa (anel + corpo de prova). A massa específica de campo do solo foi obtida pela relação massa de solo pelo volume interno do anel.

A partir desses dados, e ainda com a massa específica dos sólidos já conhecida, os parâmetros desejados foram calculados: índice de vazios, massa específica seca e grau de saturação.

Antes de montar o edômetro com a amostra de solo, os anéis foram colocados sobre papel filtro comum e em seguida sobre uma pedra porosa comum mergulhada em água destilada até aproximadamente metade da altura da pedra por 24 horas, para que ocorresse a saturação do solo (por capilaridade), e a imposição da sucção fosse realizada sob trajetória de secagem.

Após a saturação do solo, os corpos de prova foram colocados sobre as pedras porosas de alta pressão de entrada de ar (saturada) dos edômetros. Em seguida uma pedra porosa comum foi colocada na base superior do corpo de prova. Por fim anéis metálicos maciços foram colocadas sobre a pedra porosa comum. Para que ocorresse a transferência da carga axial do pistão ao corpo de prova. O edômetro foi então fechado. Alguns cuidados foram tomados para a completa vedação do edômetro, como a lubrificação do anel de borracha e pistão com graxa de silicone.

Depois de realizados esses passos, os edômetros foram colocados nas prensas, que devem estar alinhadas com a horizontal e em equilíbrio quando o pistão do edômetro já estiver em contato com a prensa. Então as buretas graduadas foram conectadas às saídas de água dos edômetros e o sistema de ar comprimido foi ligado às entradas de ar dos edômetros.

Antes de abrir os registros da saída de água e da entrada de ar do edômetro foi necessário que uma certa carga fosse aplicada previamente ao pistão, mesmo com ele travado, para que quando a pressão de ar fosse aplicada no interior da câmara, o empuxo do pistão não levantasse o braço de alavanca da prensa. Após esses passos o ensaio estava montado e pronto para que as sucção fosse imposta.

Nas Figuras 28 e 29 são ilustrados alguns materiais e etapas do ensaio.

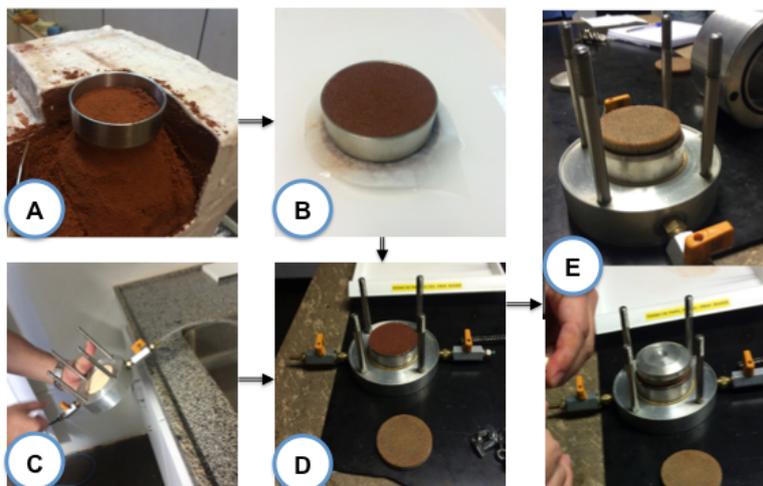


Figura 28 - Montagem do ensaio edométrico, etapas de "A" a "E".

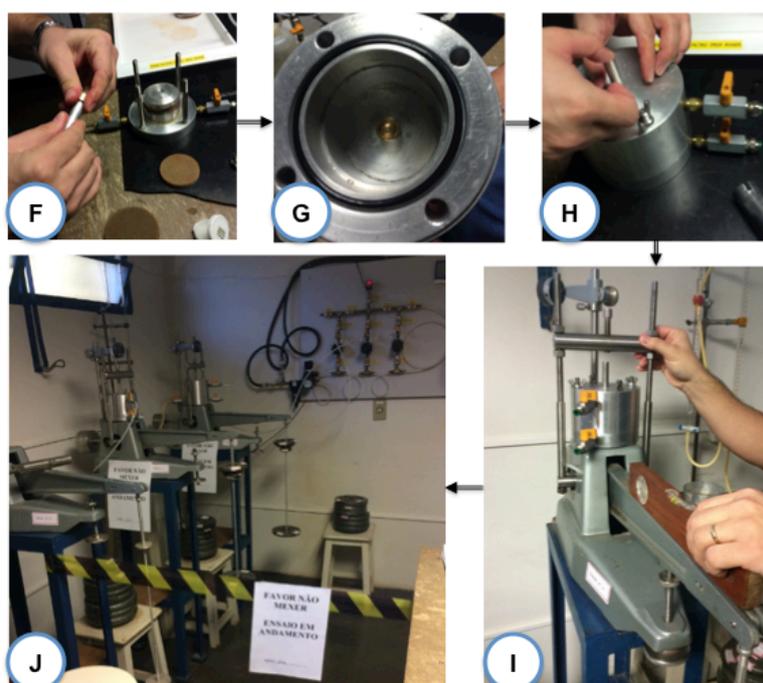


Figura 29 - Montagem do ensaio edométrico, etapas de "F" a "I".

Pode-se identificar nas Figuras 28 e 29, alguns materiais e processos utilizados:

- A: moldagem de corpo de prova em amostra indeformada;
- B: corpo de prova sendo saturado em bandeja com água destilada e deaerada sobre uma pedra porosa e um papel filtro comum;
- C: percolação de água nos capilares inferiores do edômetro para saturação;
- D: amostra saturada montada no edômetro sobre a pedra porosa de alta pressão de entrada de ar já saturada;

E: colocação de uma pedra porosa comum no topo da amostra e também de um anel metálico que servirá para transmissão de esforços do pistão metálico para a amostra;

F: pistão metálico recebendo uma pequena camada de graxa de silicone para garantir a vedação da câmara quando fechada;

G: anel de borracha também com graxa de silicone para vedação;

H: câmara já fechada com o pistão sendo apoiado no anel metálico para a montagem do ensaio;

I: equilíbrio do braço de alavanca para montagem do ensaio;

J: ensaio já montado e com pressão de ar na câmara para impor a sucção.

4.4.4 Imposição da Sucção

O programa experimental desenvolvido incluiu ensaios realizados com sucções de 50, 100, 200 e 400 kPa. Essas pressões foram controladas em um painel com manômetro eletrônico. Uma vez regulada a pressão desejada, as entradas de ar dos edômetros foram abertas e em seguida foram abertas as saídas de água. A partir desse momento, a imposição da sucção teve seu início. Com o auxílio de cronômetro foram realizadas leituras da variação de volume na bureta graduada ao longo do tempo. A variação da umidade do solo pode ser observada pelo aumento do volume de água na bureta pelo gráfico volume de água por tempo. No momento em que o volume para de variar, tem-se a imposição da sucção realizada, e a aplicação de cargas então é realizada.

Na Figura 30 é apresentado o gráfico da imposição da sucção em um dos ensaios do programa experimental, em termos de volume de água total eliminado do corpo de prova por tempo de equilíbrio.

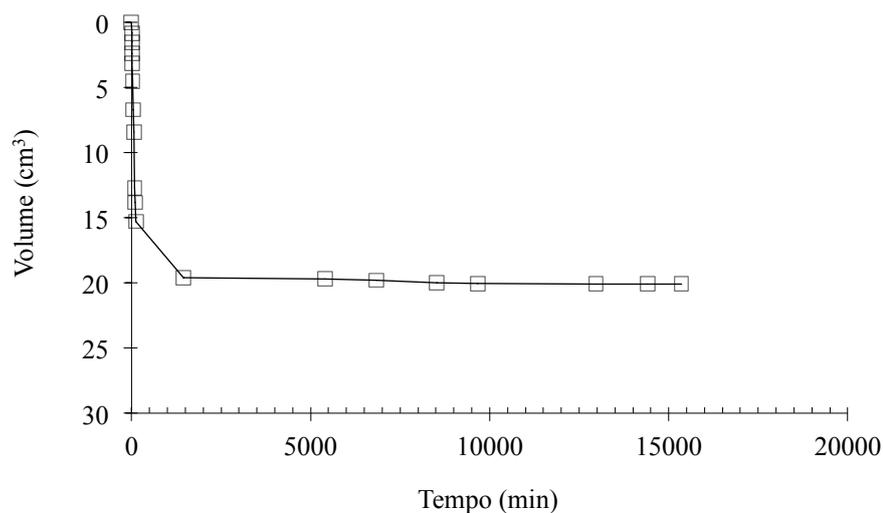


Figura 30 - Gráfico da imposição da sucção.

4.4.5 Aplicação das Cargas

Essa etapa consistiu na aplicação de cargas axiais sucessivas aos corpos de prova para a obtenção da variação volumétrica destes. As cargas foram aplicadas por meio de alavancas carregadas com anilhas de ferro com massa conhecida. As curvas foram obtidas sob trajetória de carregamento, cujos incrementos de tensão em cada estágio resultaram em tensões verticais líquidas ($\sigma - u_a$) de aproximadamente 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, e descarregamento, em estágios de 950, 500, 100, 60 e 30 kPa. Cada estágio foi aplicado a cada 24 horas, para que ocorresse a estabilização das deformações. As variações de volume foram medidas por meio de extensômetros digitais ligados aos pistões dos edômetros.

Em cada estágio de carregamento foram obtidas leituras dos extensômetros nos tempos de 0, 1, 2:15, 4, 9, 12:15, 16, 25, 36, 49, 64 minutos e depois de 24 horas. Os dados obtidos foram colocados em planilhas para obtenção das curvas dos ensaios edométricos em termos de índice de vazios (e), no eixo das ordenadas, e tensão vertical líquida ($\sigma - u_a$), no eixo das abscissas.

4.4.6 Fluxograma do Ensaio Edométrico com Sucção Controlada

A Figura 31 ilustra um fluxograma que resume as etapas do ensaio.

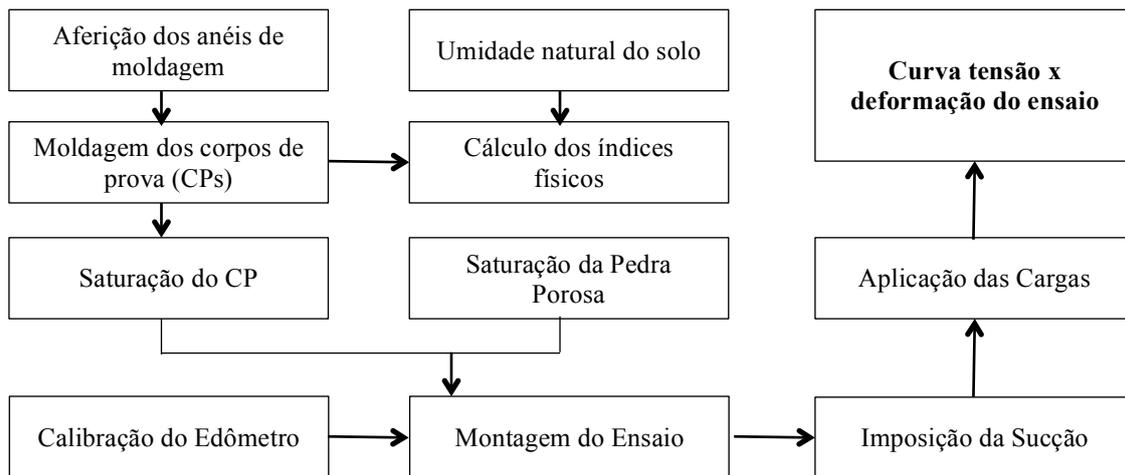


Figura 31 - Fluxograma do ensaio edométrico com sucção controlada.

4.5 Curva de Retenção de Água no Solo

As curvas de retenção de água foram obtidas sob trajetória de secagem conjuntamente por 2 diferentes métodos: papel filtro e placa de sucção, de modo que um método cubra as limitações do outro.

4.5.1 Papel Filtro

Os corpos de prova foram moldados em amostra indeformada por meio da cravação de anéis de PVC com aferição de massa e volume, previamente realizada para possibilitar o cálculo dos índices físicos. Após a moldagem dos corpos de prova, a massa foi aferida utilizando balança digital com precisão de 0,0001g. Índices físicos para cada corpo de prova foram calculados em planilha eletrônica.

Os corpos de prova, após a moldagem, foram saturados em uma bandeja com água destilada e deaerada sobre uma pedra porosa com lâmina d'água até metade de sua altura. Após a saturação, um corpo de prova foi usado para o cálculo da umidade saturada. Com o valor da umidade saturada conhecida, foram pré-estabelecidos valores de umidade desejados para o cálculo de sucção do método, dividindo-se o valor de umidade saturada pelo número de anéis moldados. O primeiro anel foi embrulhado na umidade saturada, o segundo com o valor da umidade saturada menos uma vez o valor pré-estabelecido, o segundo vezes 2, o terceiro vezes 3, e assim por diante, até o último anel.

Para a verificação da umidade padrão para embrulhar-se o anel moldado, de modo a obter-se a sucção pelo método, calculou-se a massa referente a essa umidade para cada anel, com posterior verificação em balança com precisão de 0,0001g. Uma vez atingida essa massa, os anéis então foram embrulhados.

Em uma mesa, sobre um pano limpo, foi esticado um rolo de papel filme de PVC. Duas amostras de papel filtro *Whatman* nº42 cortadas com diâmetros ligeiramente menor que o dos anéis foram colocados em contato com os corpos de prova, na base e no topo do anel. No topo do anel foi feito um pequeno corte no papel filtro (para identificação). Importante salientar que o papel filtro foi sempre manuseado com uma pinça. Então os anéis foram embrulhados com o filme de PVC, coloca-se discos plásticos para melhorar o contato e mais filme de PVC para embrulhar-se as amostras. Depois de embrulhada com filme de PVC, as amostras foram vedadas com fita adesiva e etiquetadas para facilitar a identificação ao desembulhá-las ao término do ensaio. O equilíbrio aconteceu dentro de um isopor lacrado, para isolamento das mudanças de temperatura e umidade externas.

Nas Figuras 32 e 33 são ilustrados os materiais utilizados no método do papel filtro, dos quais pode-se identificar:

- A: Anel biselado de PVC para moldagem das amostras indeformadas;
- B: "Descanso" de madeira para apoio dos corpos de prova;
- C: Bandeja plástica;
- D: Pedra porosa comum para evitar o contato direto dos corpos de prova com a água na saturação;
- E: Papel filtro comum para evitar perdas de solo na saturação;
- F: Água destilada e deaerada para a saturação dos corpos de prova;
- G: Apoio metálico para apoiar os corpos de prova na balança;
- H: Balança com precisão de 0,0001 g;
- I: Filme de PVC;
- J: Papel filtro *Whatman* nº42;
- K: Pinça metálica;

L: Pano limpo e seco para ser usado de base na etapa de embrulho;

M: Disco (bolacha) plástica para promover o contato do papel filtro *Whatman* nº42 e o corpo de prova;

N: Fita adesiva para vedar o corpo de prova embrulhado com filme de PVC;

O: Tesoura;

P: Etiqueta para identificação dos corpos de prova;

Q: Isopor para reservar as amostras até o equilíbrio de umidade entre solo e papel filtro;

R: Amostras embrulhadas.

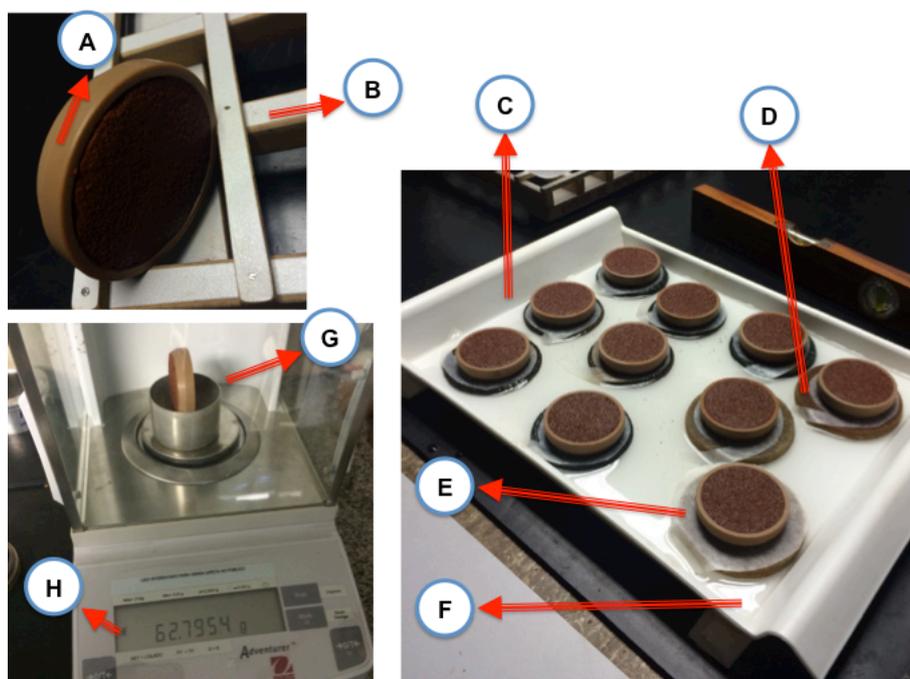


Figura 32 - Materiais usados no ensaio de papel filtro, materiais de "A" a "H".

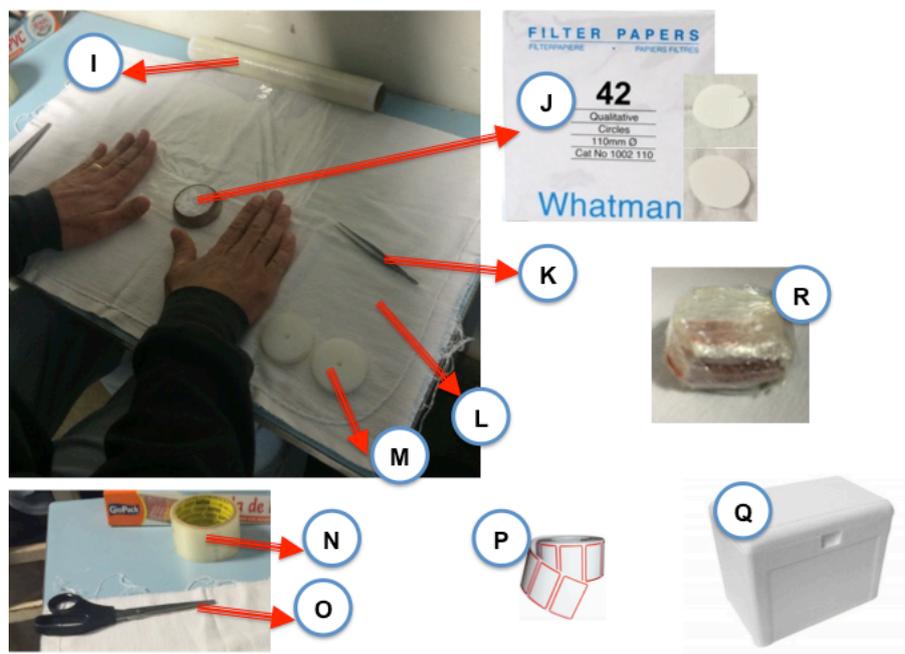


Figura 33 - Materiais usados no ensaio de papel filtro, materiais de "I" a "R".

O tempo necessário para se atingir o equilíbrio entre amostra de solo e papel filtro depende do grau de saturação do solo, ocorrendo um tempo menor para as amostras mais úmidas.

Uma vez atingido o tempo necessário, as amostras eram desembulhadas. As embalagens foram abertas, e rapidamente foram aferidas as massas do papel filtro do topo e da base. Então foi calculada a umidade do solo, com apoio de cápsulas metálicas e estufa. O papel filtro também foi colocado em estufa para a secagem. E após 24 horas, sua massa seca foi aferida para o cálculo da umidade do papel, do topo e da base. Cuidados básicos de proteção para que o papel filtro não absorvesse umidade do meio foram tomados, como no transporte dos papéis em um recipiente fechado entre a estufa e a balança.

Uma vez determinada as umidades do solo e do papel filtro, obteve-se a sucção do solo calculada pela relação de Chandler et al. (1992) (Equações 21 e 22).

$$s = 10^{6,05-2,48\log(w_p)}; w_p \geq 47\% \quad (21)$$

$$s = 10^{4,48-0,0622w_p}; w_p < 47\% \quad (22)$$

Em que,

s : sucção em kPa

w_p : umidade do papel filtro *Whatman n°42* em %.

Assim, foram obtidos pares ordenados umidade do solo e sucção para cada anel moldado.

Por esta técnica, as sucções mais baixas tendem a ser menos confiáveis, pois o solo úmido pode sujar o papel filtro, alterando os valores de massa e, conseqüentemente, de umidade. Na Figura 34 um fluxograma ilustra as etapas do método.

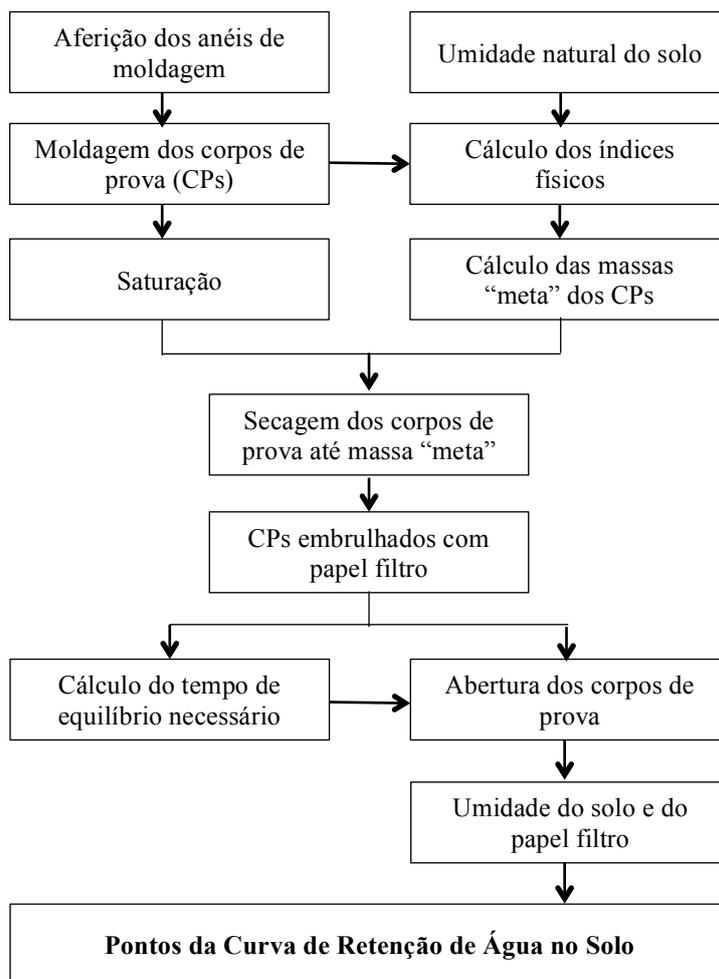


Figura 34 - Fluxograma do ensaio de papel filtro.

4.5.2 Placa de Sucção

Por este método os anéis são moldados e saturados de maneira análoga ao método do papel filtro descrito no item 4.5.1.

A placa de sucção permite regular o nível de sucção, a partir da abertura do registro de saída de água do sistema na altura desejada (gradiente hidráulico). Para realização do ensaio, previamente o sistema foi saturado com água destilada e deaerada.

Os anéis com amostras de solo saturado foram colocados em contato com a pedra porosa, saturada, do funil e, então, o registro de saída de água foi aberto de acordo com a sucção de interesse, e um fluxo de água foi iniciado. Após a interrupção do fluxo de água, as umidades dos solos foram aferidas. Tem-se então o par ordenado umidade do solo e sucção, gerando-se mais pontos para a obtenção da curva de retenção de água no solo.

A placa de sucção utilizada tem registros de 10 em 10 cm a partir do nível em que a amostra fica, possibilitando obtenção de sucções de 1 até 15 kPa (10 cm de coluna d'água até 150 cm de coluna d'água). Na Figura 35 é apresentado o equipamento utilizado, enquanto na Figura 36 é apresentado o fluxograma geral das etapas deste método.



Figura 35 - Equipamento de placa de sucção.

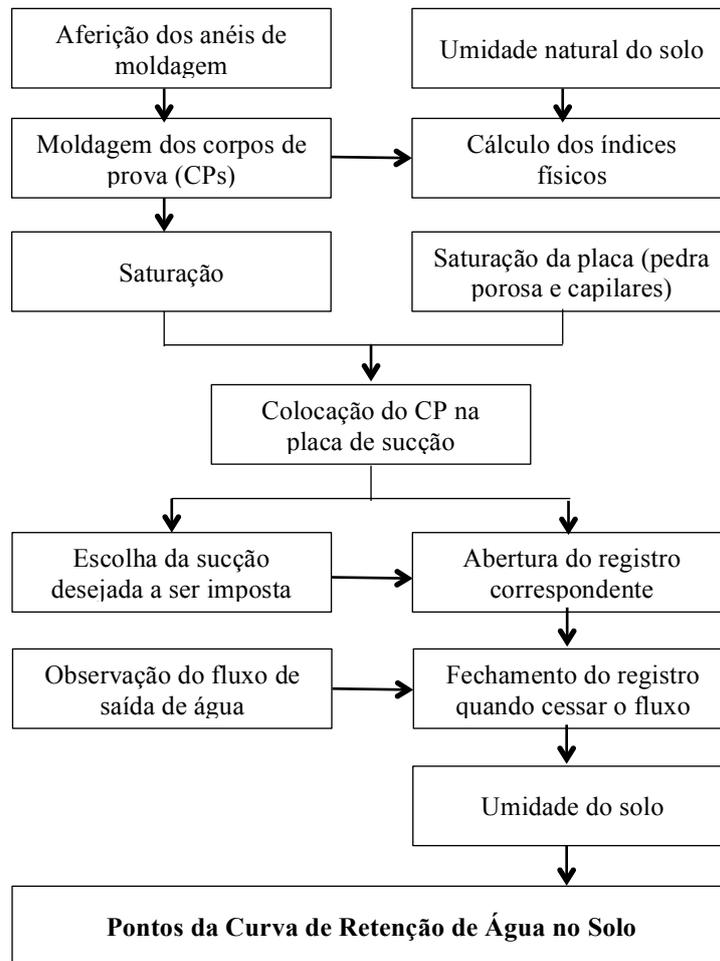


Figura 36 - Fluxograma do ensaio de placa de sucção.

4.5.3 Ajuste da Curva

Depois de obtidos pares ordenados com os dois métodos descritos, foi feito um ajuste da curva de retenção de água no solo por meio da equação de van Genuchten (1980):

$$w = w_r + (w_s - w_r) \left\{ \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^m} \right\} \quad (23)$$

Em que,

w : umidade;

w_r : umidade residual;

w_s : umidade de saturação;

α , m , n : parâmetros de curvatura do ajuste;

s : sucção.

O ajuste foi realizado com auxílio do software computacional desenvolvido por (DOURADO-NETO et al., 2000).

4.6 Instalação dos Tensiômetros em Campo

No local da pesquisa foram instalados quatro tensiômetros (denominados T1, T2, T3 e T4) para o monitoramento da sucção em campo. Eles foram instalados nas profundidades de 0,4 m (T1 e T4) e 0,9 m (T2 e T3). Na Figura 37 ilustra-se a disposição dos tensiômetros no campo.

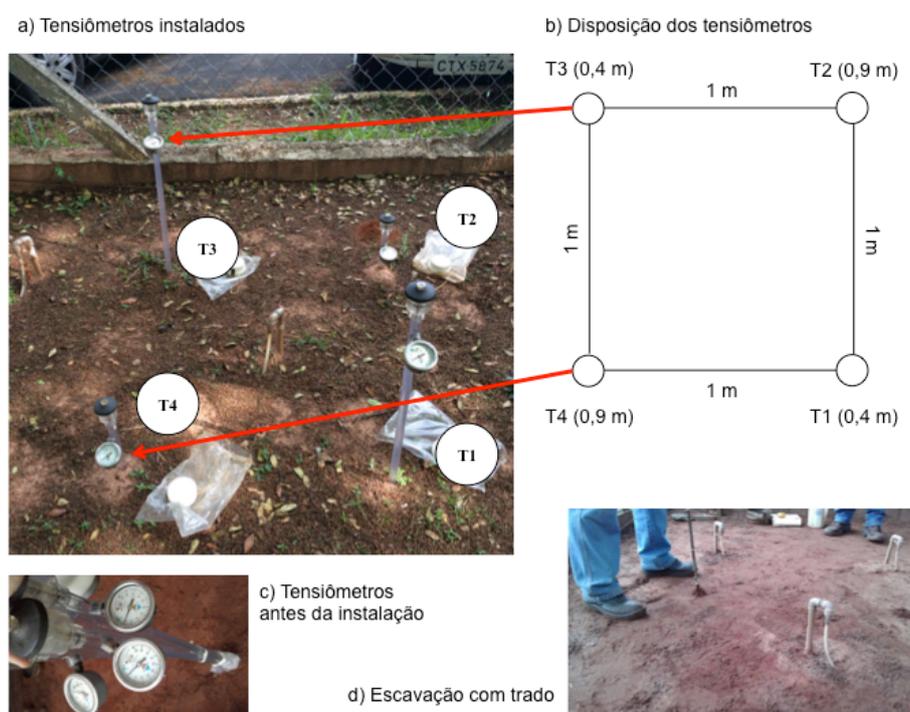


Figura 37 - Tensiômetros instalados em campo.

Esses tensiômetros são constituídos de um tubo, preenchido por água destilada e deaerada, que está ligado na sua parte superior a um vacuômetro e a uma tampa com um Jet Fill, e na parte inferior a uma pedra porosa com entrada de ar de 100 kPa. Quanto maior a sucção no solo, maior é a avidéz pela água. Deste modo, o solo tentará absorver a água presente no tubo do tensiômetro. A pressão exercida pelo solo para absorver a água do tensiômetro é sua própria sucção, e a sua medida é feita por meio de vacuômetro acoplado ao tensiômetro. Na Figura 38, ilustra-se detalhes do equipamento.

Para o bom funcionamento dos tensiômetros, foram tomados cuidados básicos como a saturação da pedra porosa, bem como a manutenção periódica para retirada de bolhas de ar no interior dos tubos.

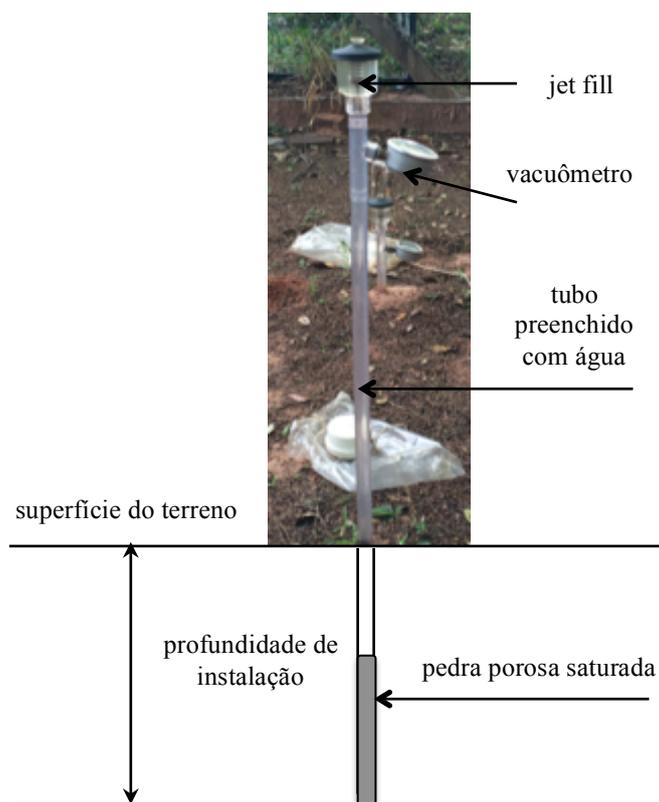


Figura 38 - Detalhes dos tensiômetros instalados.

4.7 Dados Pluviométricos

Para relacionar a sucção em campo com medidas de chuva da região, foram coletados dados de precipitação pluviométrica. Os dados foram fornecidos pelo Instituto de Pesquisa Meteorológica (IPMet) da UNESP- Bauru.

4.8 Determinação dos Parâmetros do Modelo Básico de Barcelona (BBM)

Para testar a capacidade do BBM na previsão de comportamento do solo estudado, o modelo foi calibrado para as profundidades de 1, 2, 3, 4 e 5 m. Para isto, determinou-se os parâmetros constitutivos provenientes dos ensaios edométricos (p^c , p_0^* , $\lambda(0)$, κ) e ensaios de compressão triaxial (M , K_θ) com controle de sucção.

Os parâmetros dos ensaios edométricos foram determinados a partir dos resultados dos ensaios com sucção controlada a 1, 2, 3, 4 e 5 m da presente dissertação. Os parâmetros dos ensaios de compressão triaxial foram determinados nas profundidades 1 e 2 m a partir dos resultados de Fagundes (2014) , que realizou ensaios a 1,5 m de profundidade. Nas profundidades de 3, 4 e 5 m os parâmetros foram obtidos a partir dos resultados de Fernandes (2016), que realizou ensaios a 3 e 5 m.

5. Resultados e Análises

Os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios descritos no Capítulo 4 estão apresentados nesse capítulo. Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e os índices físicos do solo. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de curva de retenção de água no solo e os resultados dos ensaios edométricos. Por fim, são apresentados e analisados resultados de monitoramento da sucção *in situ* e da pluviometria da região.

5.1 Índices Físicos e Caracterização

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios, mínimos e máximos da massa específica do sólidos (ρ_s), da massa específica do solo (ρ), da massa específica seca (ρ_d), do índice de vazios (e), da umidade (w) e do grau de saturação (S_r) das amostras indeformadas que foram coletadas a 1, 2, 3, 4 e 5 m. Os dados são referentes aos 25 corpos de prova moldados para a realização dos ensaios edométricos convencionais e com controle de sucção.

Tabela 3 - Índices Físicos para as amostras coletadas.

Prof. (m)	Valor	ρ_s (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	w (%)	S_r (%)
1	Média	2,696	1,580	1,464	0,842	8,0	25,5
	Mínimo	-	1,567	1,453	0,811	7,9	24,8
	Máximo	-	1,610	1,489	0,856	8,2	27,1
2	Média	2,690	1,564	1,427	0,890	9,5	28,9
	Mínimo	-	1,504	1,373	0,806	9,3	26,7
	Máximo	-	1,637	1,489	0,959	9,7	32,2
3	Média	2,683	1,662	1,528	0,758	8,8	31,4
	Mínimo	-	1,570	1,460	0,663	7,6	24,2
	Máximo	-	1,760	1,613	0,838	9,1	36,9
4	Média	2,690	1,617	1,484	0,812	9,0	29,7
	Mínimo	-	1,606	1,472	0,794	8,7	28,8
	Máximo	-	1,636	1,499	0,827	9,1	30,8
5	Média	2,690	1,712	1,555	0,731	10,1	37,3
	Mínimo	-	1,680	1,524	0,703	9,8	35,9
	Máximo	-	1,742	1,580	0,765	10,3	39,4

Na Figura 29, são apresentados perfis com os dados de caracterização e dos índices físicos do solo. Os dados de massa específica do solo, umidade e grau de saturação são referentes à data de coleta das amostras que ocorreu de 06 a 08/05/2016.

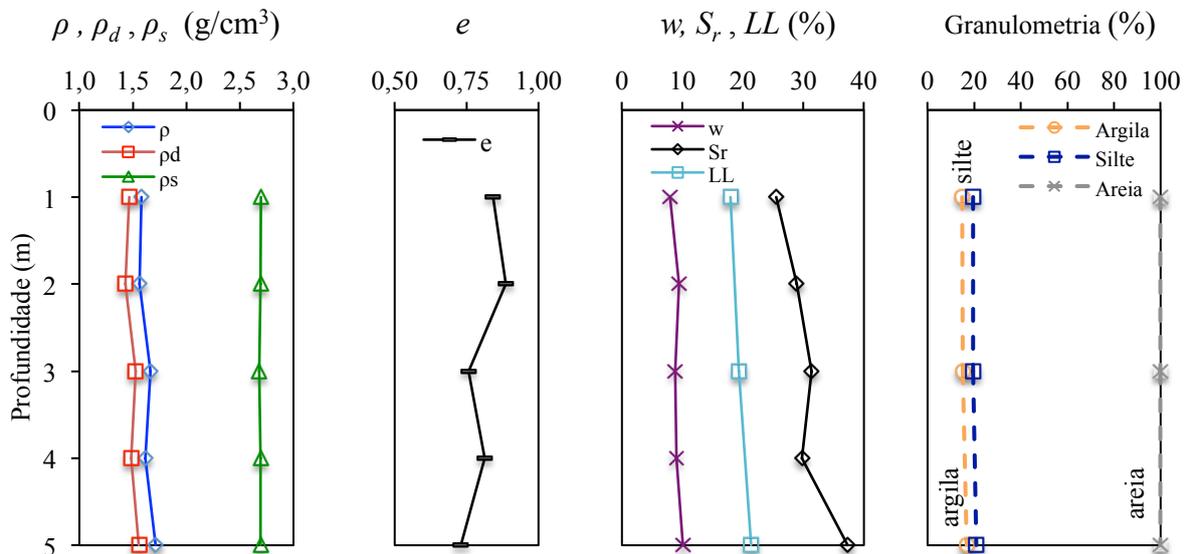
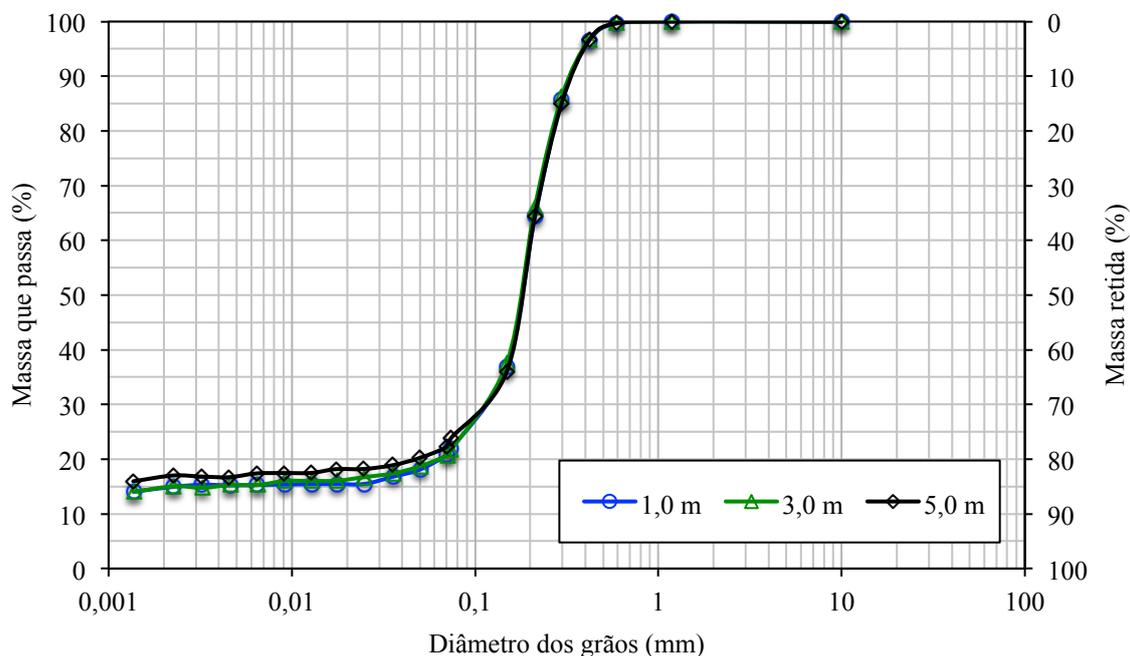


Figura 39 - Massa específica seca, massa específica *in situ*, massa específica dos sólidos, índice de vazios, umidade de campo e grau de saturação de campo, limite de liquidez e granulometria das amostra ao longo da profundidade.

Os resultados demonstram que o solo tem elevado índice de vazios (em geral maior que 0,700) e baixo grau de saturação (em geral inferior a 40%). A massa específica seca do solo aumenta levemente e o índice de vazios diminui com a profundidade. O aumento da massa específica seca e a diminuição do índice de vazios com a profundidade podem estar relacionados às tensões geostáticas resultantes do peso próprio do solo que o comprimem, tornando-o mais denso. A umidade é constante e o grau de saturação tende a aumentar com a profundidade. No entanto, estes dois índices físicos sofrem variação sazonal, sobretudo na superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera e, por esta razão, não são constantes.

Na Figura 40 são apresentadas as curvas granulométricas do solo a 1, 3 e 5 m de profundidade. Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios de limites de liquidez e de plasticidade e as porcentagens granulométricas dos ensaios de granulometria das amostras ensaiadas.



Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
0,002	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60

Escala ABNT - NBR 6502/95

Figura 40 - Ensaio de granulometria para as amostras coletadas a 1, 3 e 5 m de profundidade.

Tabela 4 - Limites de consistência e porcentagem granulométrica do solo.

	LL	LP	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
1 m	18	-	14,8	4,6	80,6
3 m	19	-	15,0	4,5	80,5
5 m	21	-	16,9	4,1	79,0
Média	20	-	15,6	4,4	80,0

Os resultados indicam um solo arenoso e não plástico, podendo ser classificado quanto à textura como uma areia fina a média pouco argilosa marrom avermelhada. Em relação aos ensaios de limite de plasticidade não foi possível realizá-los pela pequena porcentagem de finos (argilas e siltes) na composição do solo.

5.2 Curvas de Retenção de Água no Solo

Para melhor entendimento do comportamento hidráulico e da influência da sucção no solo, curvas de retenção de água no solo (SWRC) a 1, 3 e 5 m de profundidade são apresentadas nesse item.

As curvas de retenção foram determinadas seguindo a trajetória de secagem por meio das técnicas do papel filtro e da placa de sucção, exceto a curva do solo coletado a 1,0 m de profundidade que foi determinada também por meio da câmara de pressão. Os pontos obtidos são apresentados nas Figuras 41, 42 e 43.

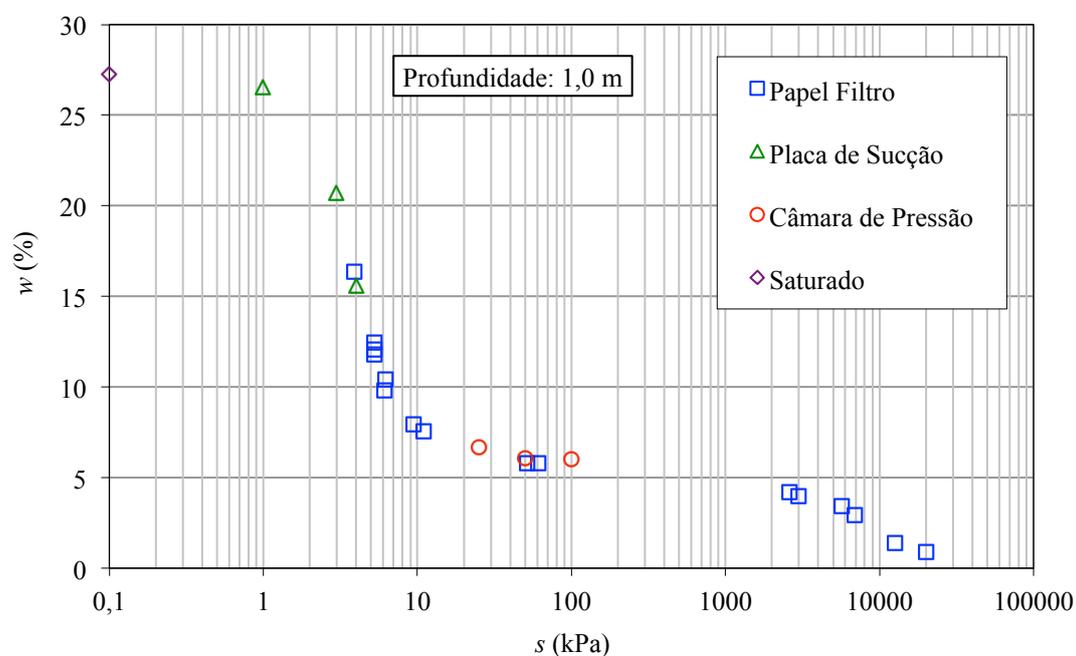


Figura 41 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 1,0 m de profundidade.

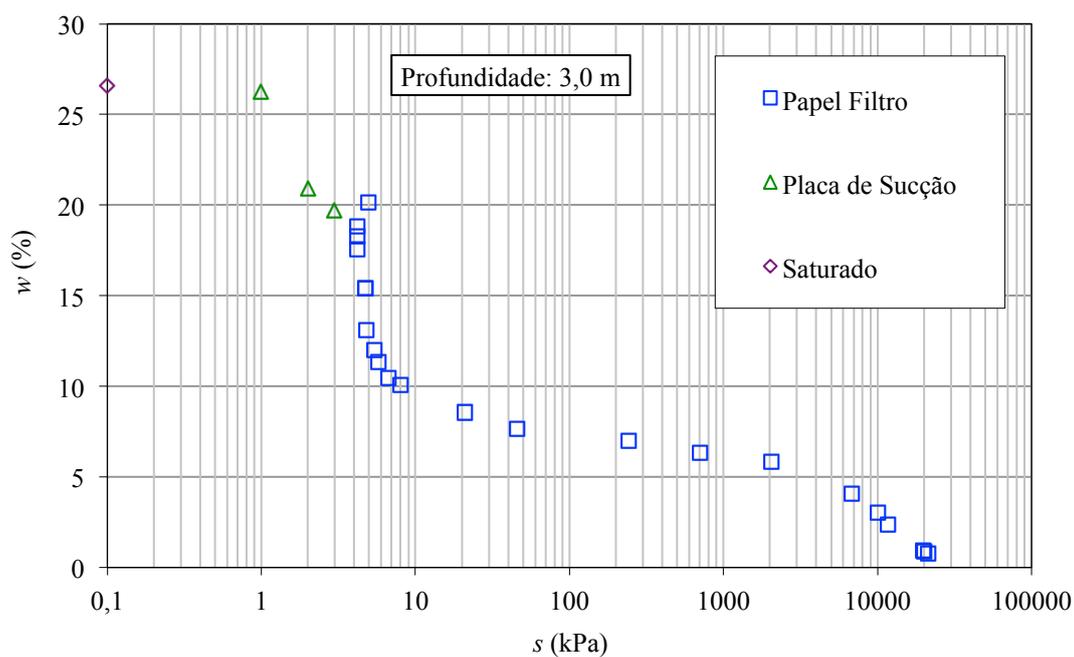


Figura 42 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 3,0 m de profundidade.

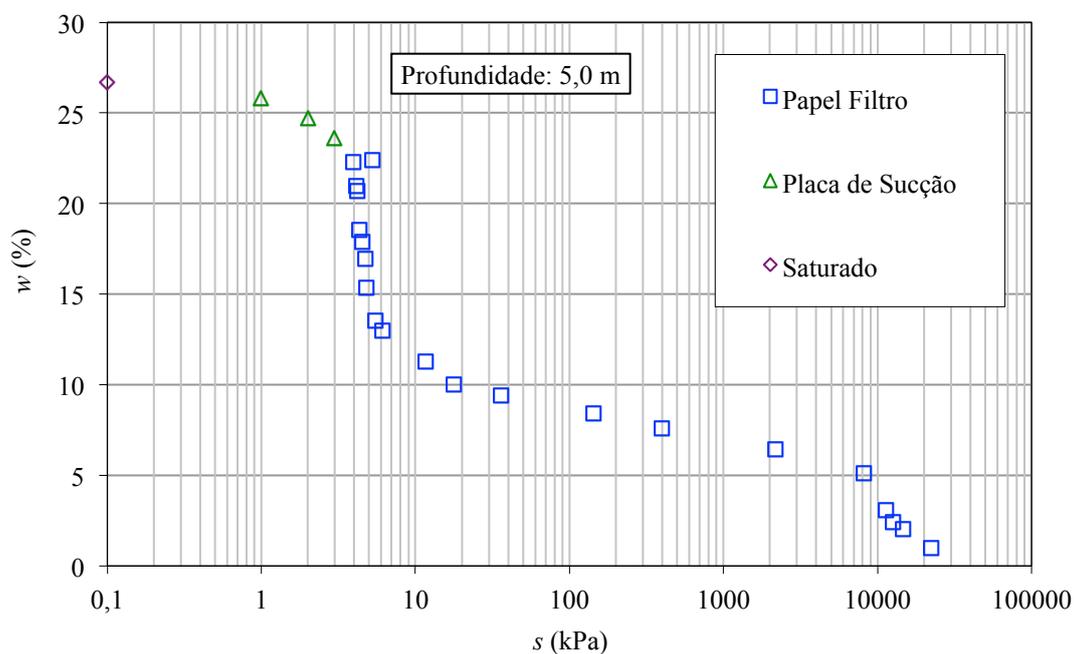


Figura 43 - Pontos experimentais da curva de retenção de água para amostra coletada a 5,0 m de profundidade.

Para se obter um ajuste matemático representativo da curva de retenção é necessário o uso combinado de diferentes técnicas de ensaio que permitem a obtenção de uma ampla faixa de sucção. O formato bimodal das curvas de solos arenosos de baixa capacidade de retenção é

um fato agravante da determinação dessas curvas, uma vez que para se alcançar uma curva satisfatória, neste caso, são necessários vários pares ordenados umidade-sucção.

O ponto de intersecção da curva com o eixo das ordenadas é obtida diretamente por meio da umidade gravimétrica de um corpo de prova saturado (sucção nula). Os primeiros pontos, desde a saturação até parte do trecho de dessaturação da curva foram obtidos por meio da placa de sucção, pois a técnica do papel filtro apresenta limitações para sucções mais baixas. As maiores umidades do solo promovem certo desprendimento de partículas que sujam os papéis filtros, provocando determinações imprecisas de umidade do papel.

A técnica do papel filtro permite a obtenção de pares umidade-sucção para um amplo trecho da curva, porém, no intervalo das maiores sucções até o valor de sucção referente à segunda pressão de entrada de ar, uma pequena variação de umidade gera uma grande variação de sucção. Neste caso, pode-se dar origem a uma lacuna sem medidas de sucção e umidade, semelhantemente como ocorreu com a curva do primeiro metro (Figura 41) em que não se tem medidas de sucção entre os valores de 100 kPa e 2 MPa.

Os ajustes das curvas de retenção foram realizados em dois trechos (denominados trechos 1 e 2) para cada curva, dado seu formato bimodal. A equação de van Genuchten (1980) utilizada no ajuste é indicada na Equação 23. Os parâmetros de ajuste das curvas estão apresentados na Tabela 5. Também são apresentados os fatores R^2 , que indicam a qualidade do ajuste.

Tabela 5 - Parâmetro de ajustes de van Genuchten (1980) para as curvas de 1, 3 e 5 m.

Prof. (m)	Trecho	α (kPa ⁻¹)	m	n	w_r (%)	w_s (%)	R^2
1,0	1	0,29970	0,7233	3,6134	6,0	27,3	0,99
	2	0,00040	0,4482	1,8122	0,0	6,0	
3,0	1	0,25920	0,8398	3,1438	7,0	26,6	0,96
	2	0,00010	2,0001	1,7723	0,8	7,0	
5,0	1	0,30420	0,3394	5,1039	8,0	26,9	0,95
	2	0,00005	3,9011	1,5165	1,0	8,0	

Nas Figuras 44, 45 e 46 são apresentados os resultados experimentais com os ajustes obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) das curvas a 1, 3 e 5 m de profundidade, respectivamente. Na Figura 47 são apresentados os ajustes sobrepostos.

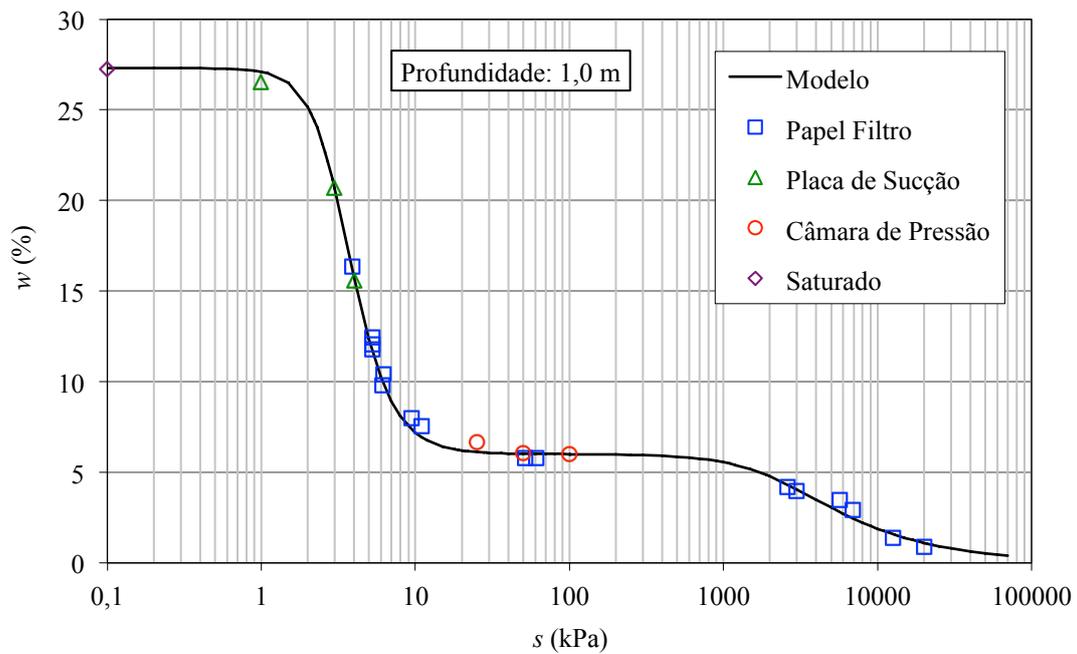


Figura 44 - Pontos experimentais e curva modelada para 1,0 m de profundidade.

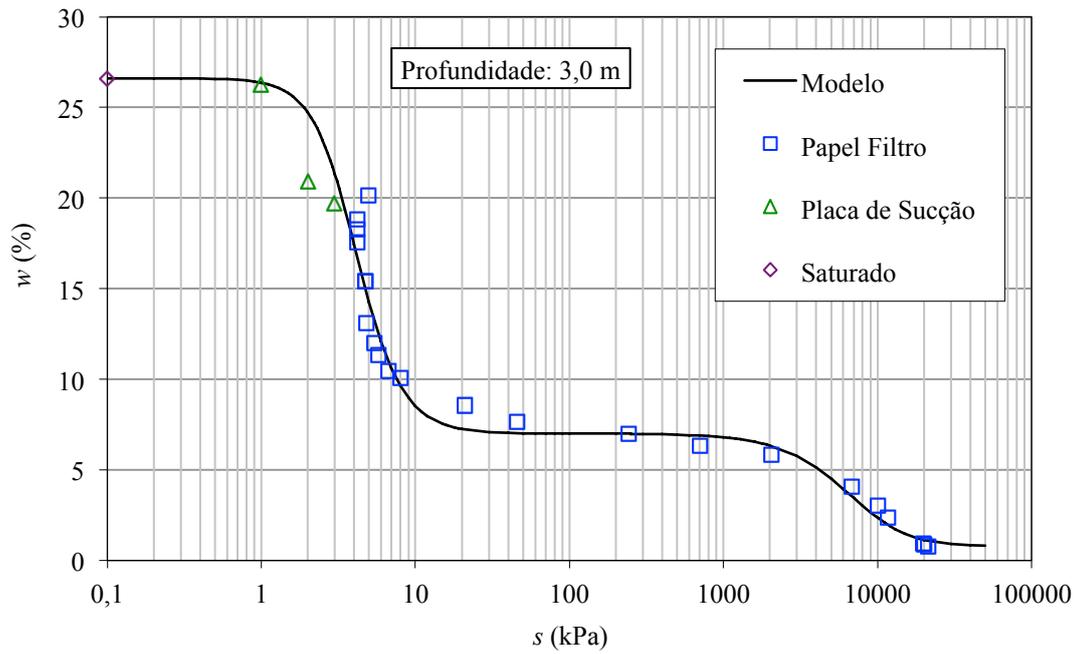


Figura 45 - Pontos experimentais e curva modelada para 3,0 m de profundidade.

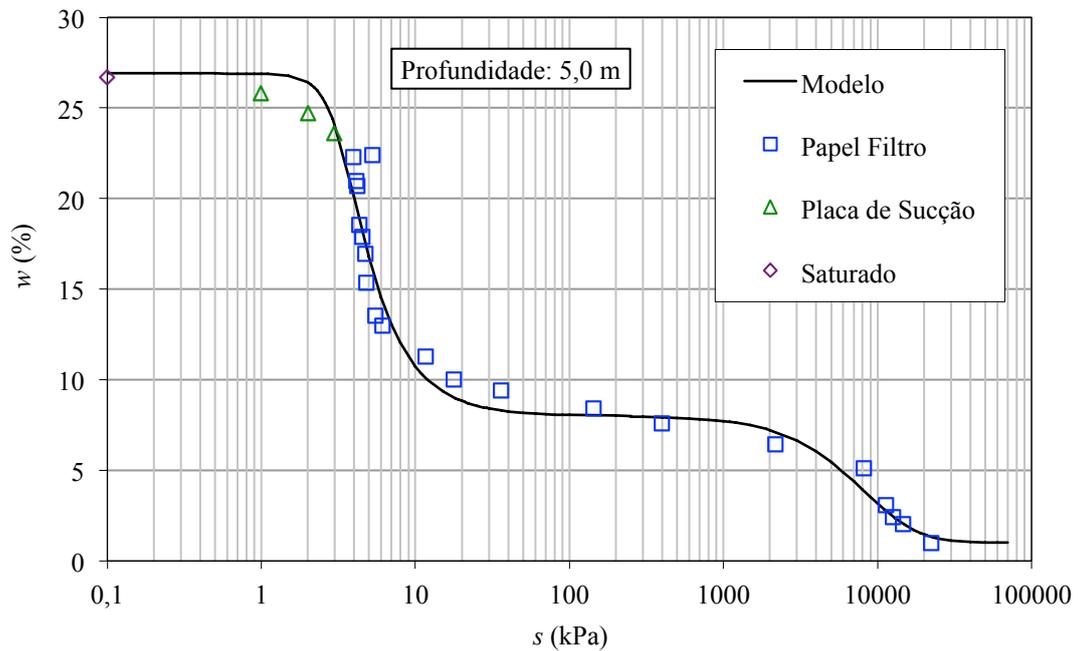


Figura 46 - Pontos experimentais e curva modelada para 5,0 m de profundidade.

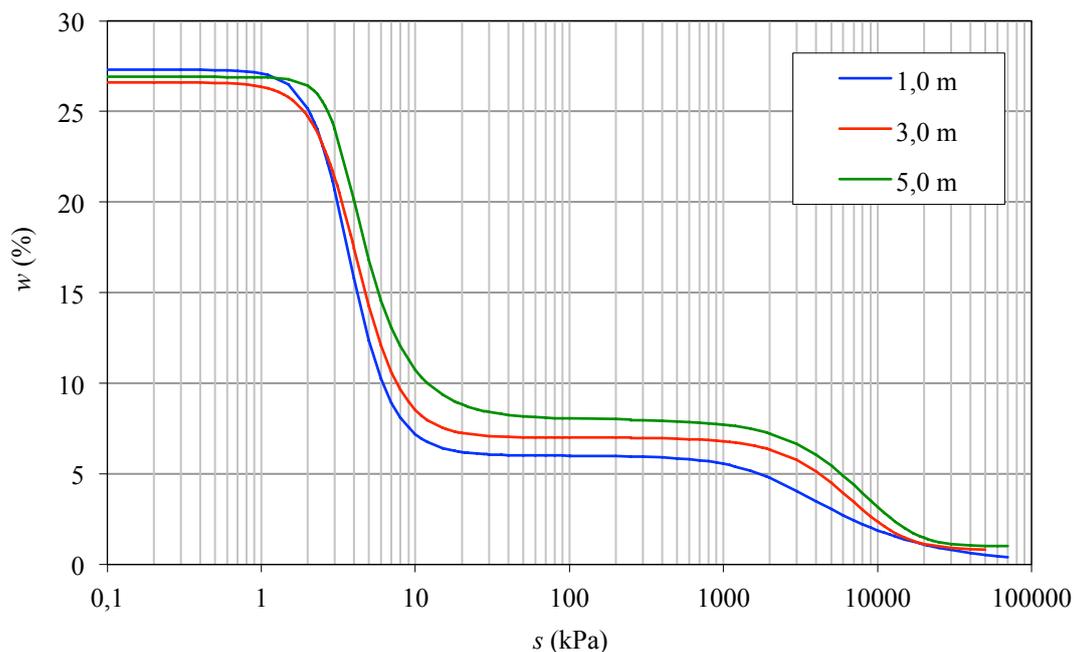


Figura 47 - Curvas de retenção de água sobrepostas, determinadas após modelagem.

Na Figura 47, a sobreposição dos resultados dos ajustes demonstra grande semelhança entre as curvas de retenção das três profundidades analisadas, o que indica tratar-se de solos com as mesmas características ao longo do perfil. O formato bimodal das curvas e a baixa capacidade de retenção de água dos solos arenosos têm sido reportado na literatura científica nacional. O trecho de dessaturação compreende um intervalo de sucção restrito e o primeiro valor de entrada de ar é bem definido, onde uma pequena variação de sucção (de 1 a 10 kPa), provoca uma grande variação de umidade. Em um segundo trecho das curvas, de cerca de 10 kPa até cerca de 2 MPa, a umidade tem variações muito pequenas. Na sequência, uma pressão de entrada de ar surge decorrente da dessaturação da umidade residual existente nos microporos da fração fina agregada do solo.

Uma pequena variação da capacidade de retenção de água com a profundidade pode ser observada no trecho horizontal das curvas de retenção com umidades que variam de 6 a 8% de umidade. Esta característica pode estar relacionada a diversos fatores, dentre eles: granulometria, massa específica do solo, composição mineralógica e distribuição dos poros.

5.3 Ensaios Edométricos

Para estudo do comportamento mecânico e análise da influência da sucção na compressibilidade do solo foram realizados ensaios edométricos. Os resultados dos ensaios foram plotados em termos dos índices de vazios normalizados (e/e_0) no eixo das ordenadas e logaritmo da tensão vertical líquida ($\sigma - u_a$) no eixo das abcissas. Para cada uma das cinco profundidades, obteve-se cinco curvas com trajetória de carregamento-descarregamento a sucção constante nos valores de 0, 50, 100, 200 e 400 kPa.

Nas Figuras 48, 49, 50, 51 e 52 são apresentadas as curvas de compressão confinada, separadas por profundidade, respectivamente para 1, 2, 3, 4 e 5 m. Com a finalidade de analisar o efeito da profundidade, as mesmas curvas são apresentadas nas Figuras 53, 54, 55, 56 e 57, porém, reunidas por sucção. Estes dois agrupamentos de resultados permitem uma avaliação da variabilidade sazonal (mudanças das curvas na mesma profundidade devido à sucção) e da variabilidade espacial (mudanças das curvas na mesma sucção devido à profundidade).

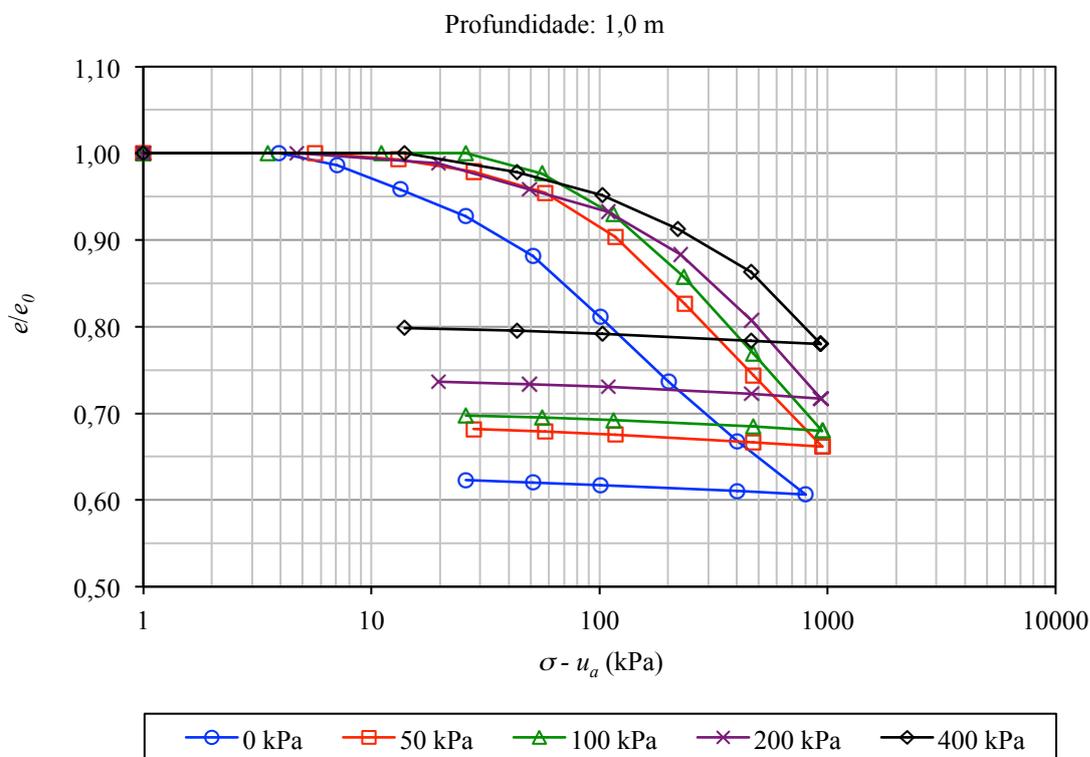


Figura 48 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 1,0 m de profundidade em função da sucção.

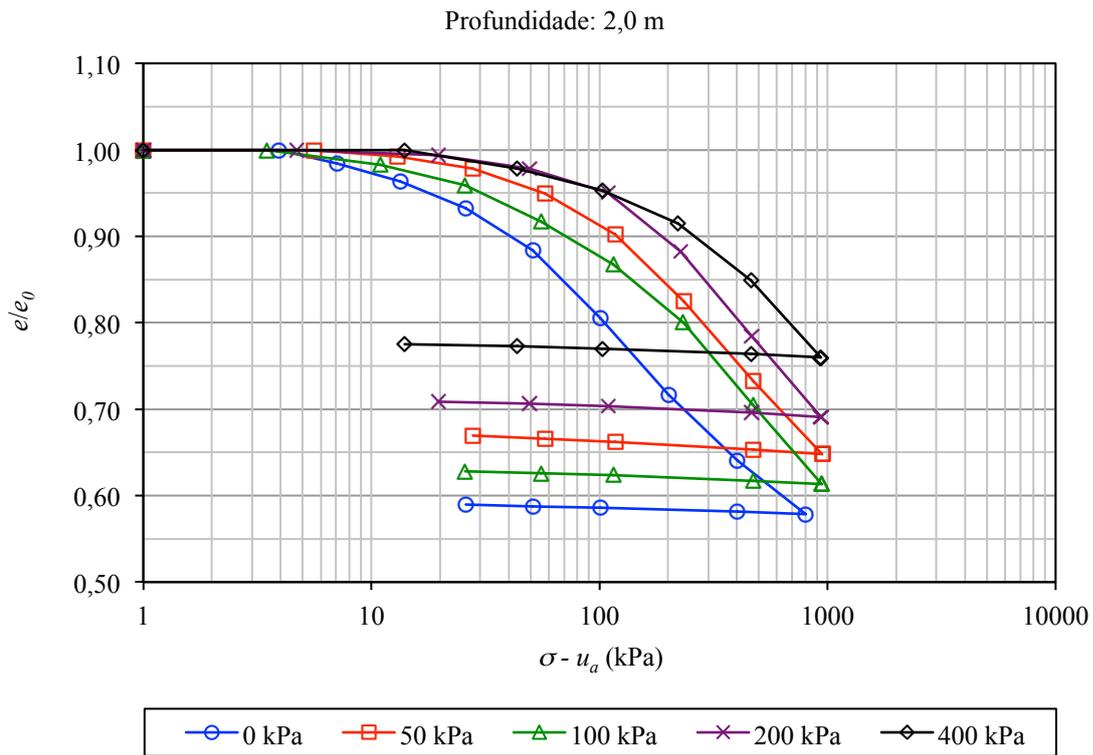


Figura 49 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 2,0 m de profundidade em função da sucção.

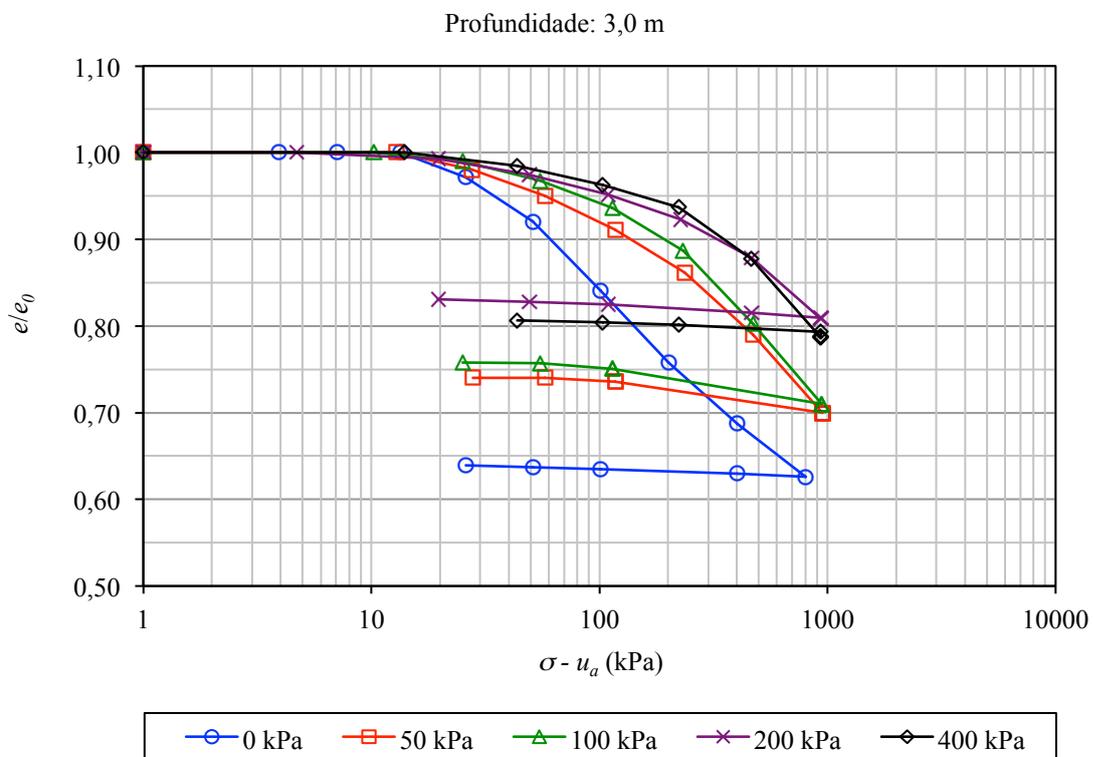


Figura 50 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 3,0 m de profundidade em função da sucção.

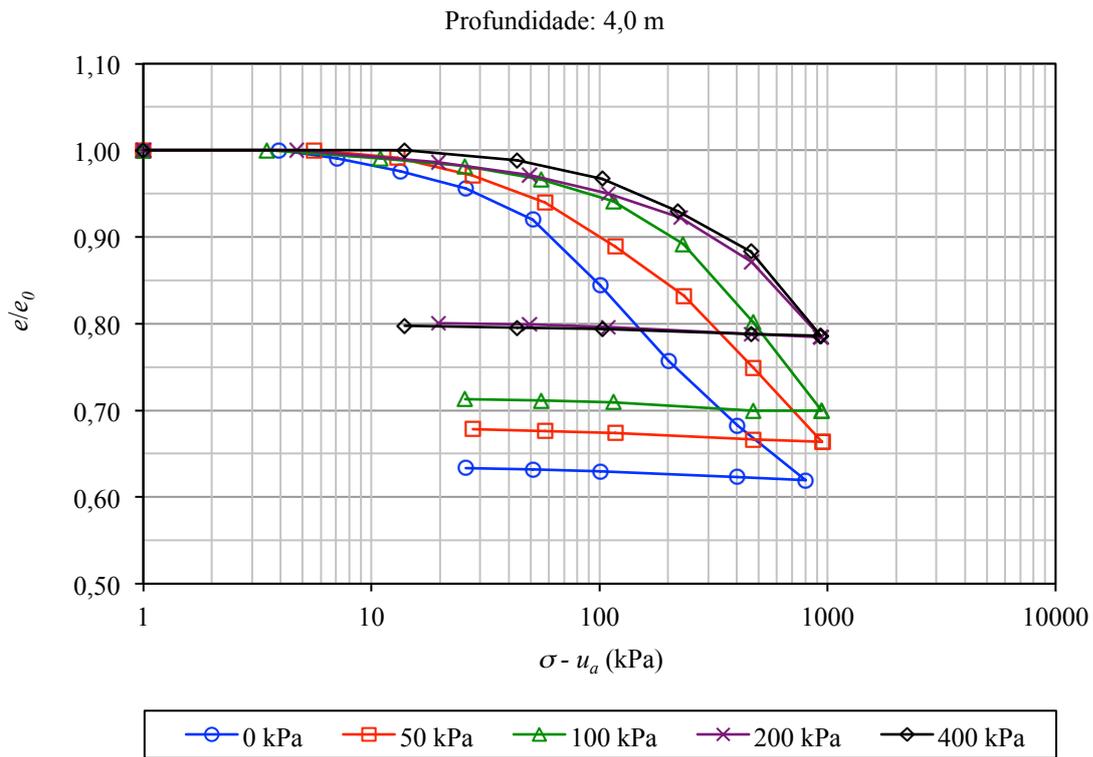


Figura 51 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 4,0 m de profundidade em função da sucção.

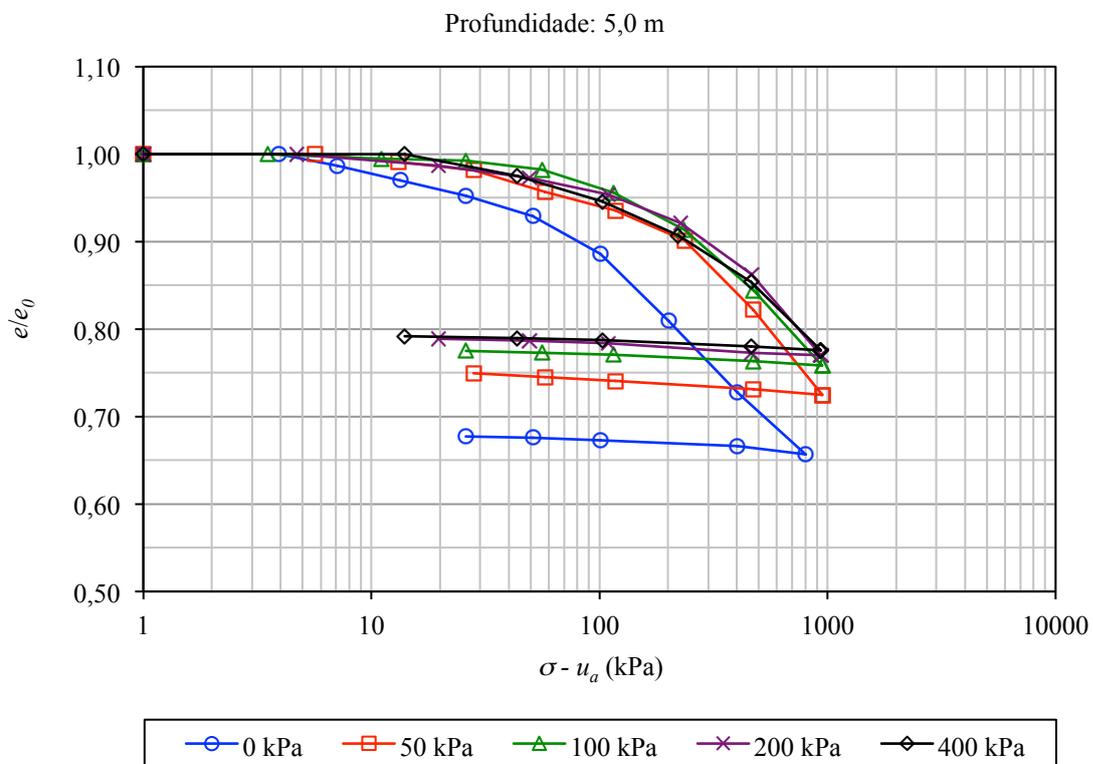


Figura 52 - Resultados dos ensaios edométricos para amostra coletada a 5,0 m de profundidade em função da sucção.

Os resultados demonstram a influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade do solo. O acréscimo da sucção provoca o aumento nas tensões de pré-adensamento e mudanças nos índices de compressão do solo (inclinação da reta virgem). Quanto maior a sucção, menor a deformação causada pelos carregamentos aplicados nos ensaios, isto é, quanto maior a sucção, mais rígido o solo se torna.

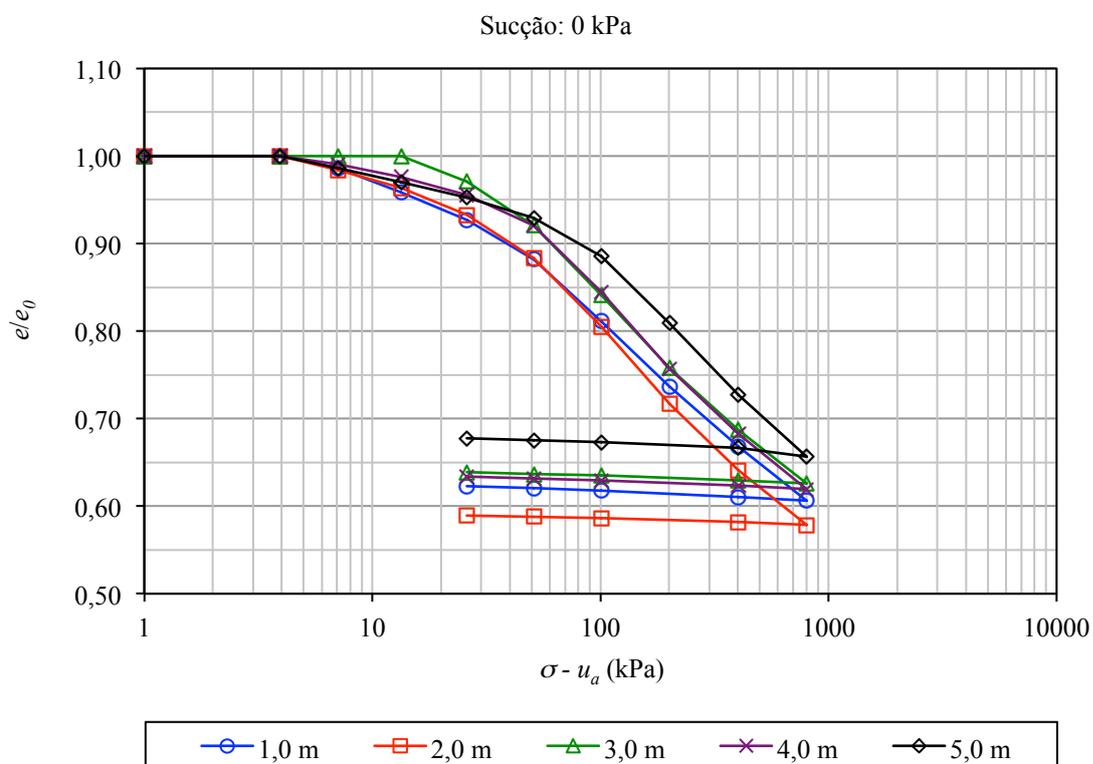


Figura 53 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 0 kPa (saturado) para diferentes profundidades.

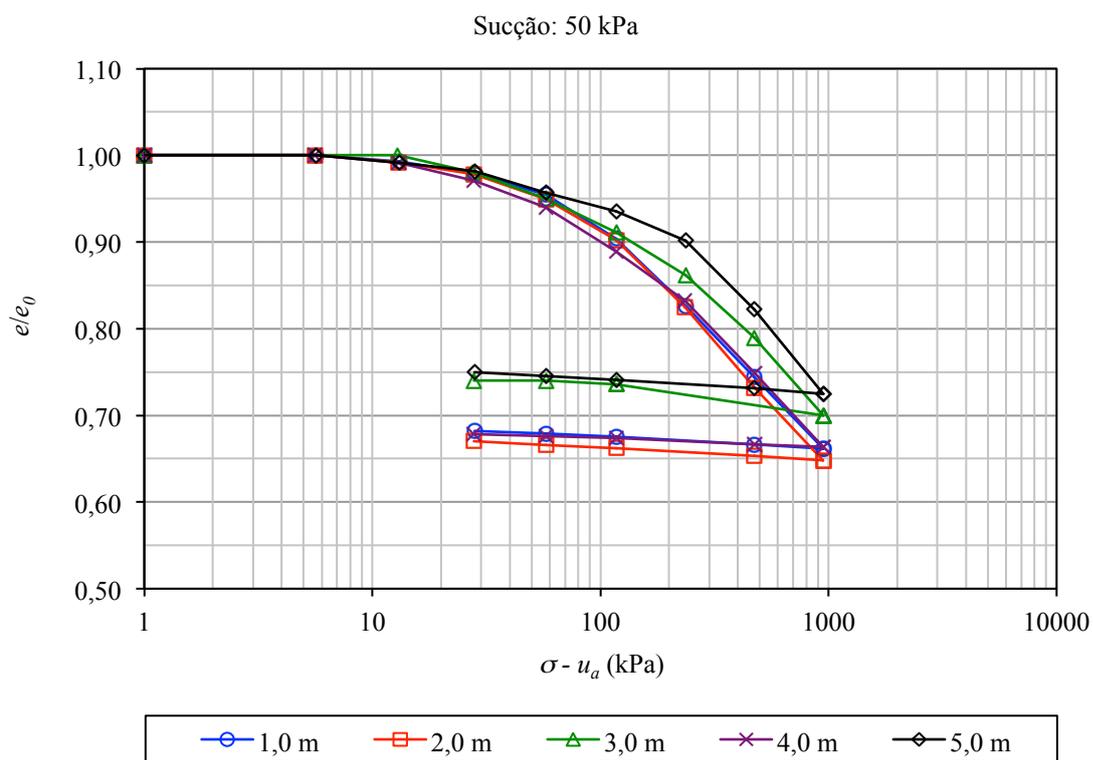


Figura 54 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 50 kPa para diferentes profundidades.

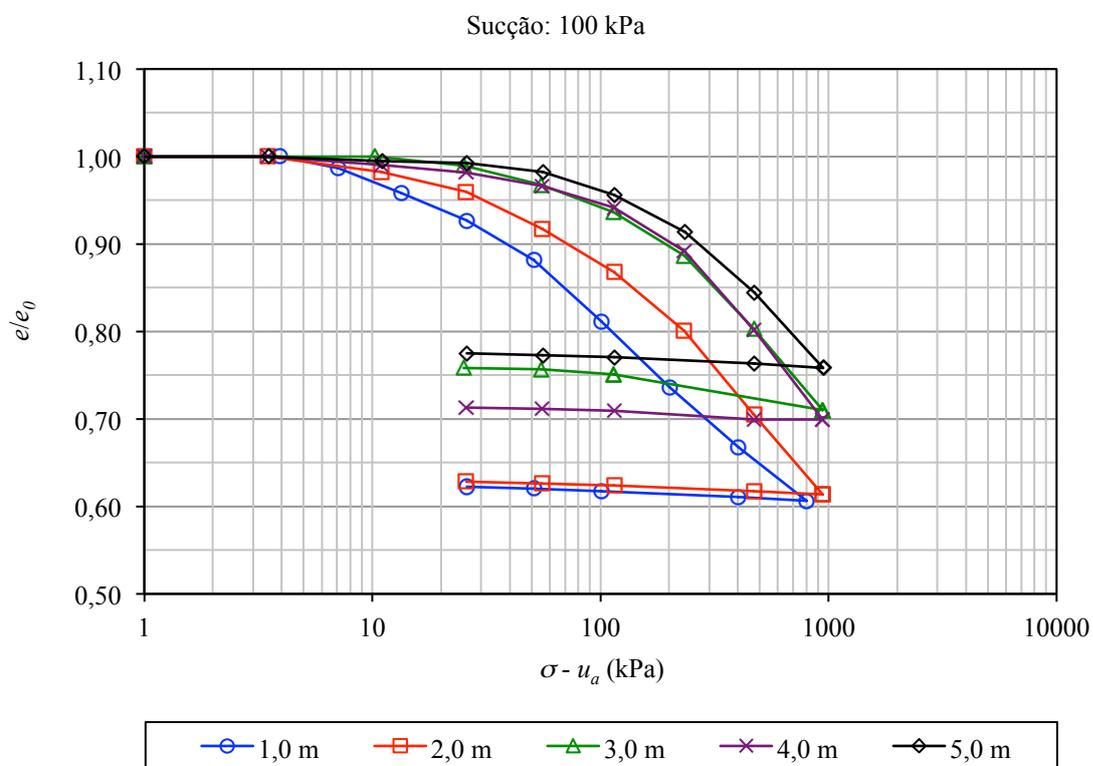


Figura 55 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 100 kPa para diferentes profundidades.

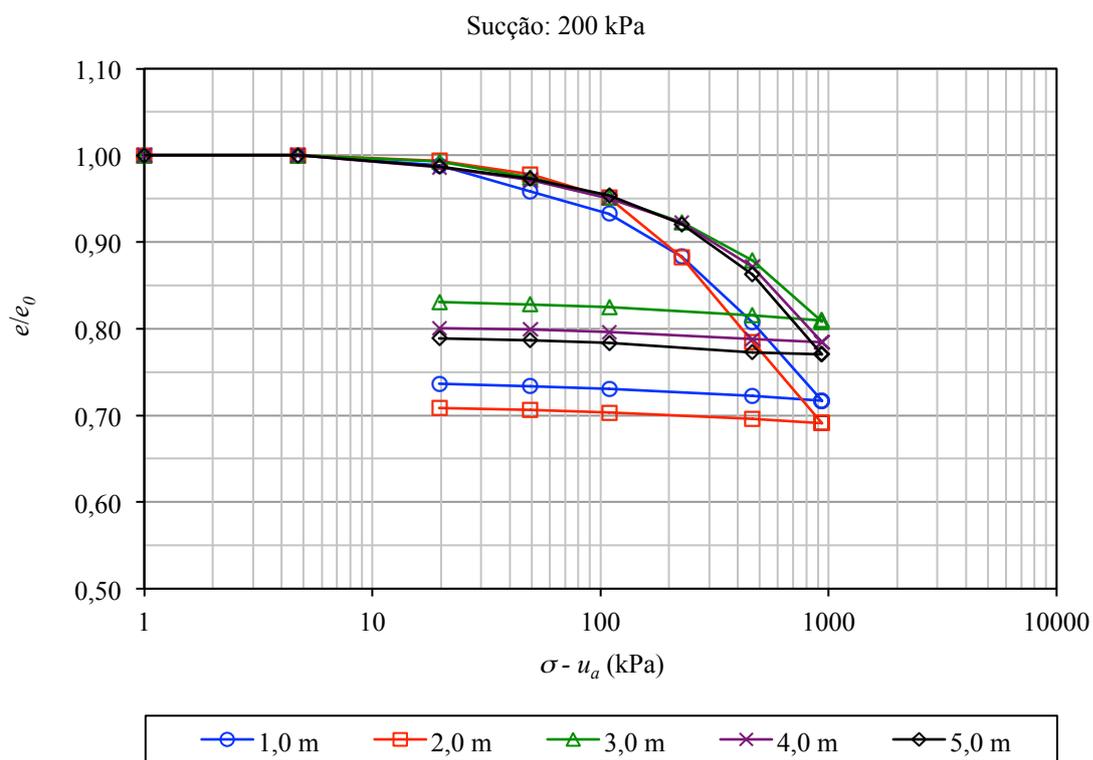


Figura 56 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 200 kPa para diferentes profundidades.

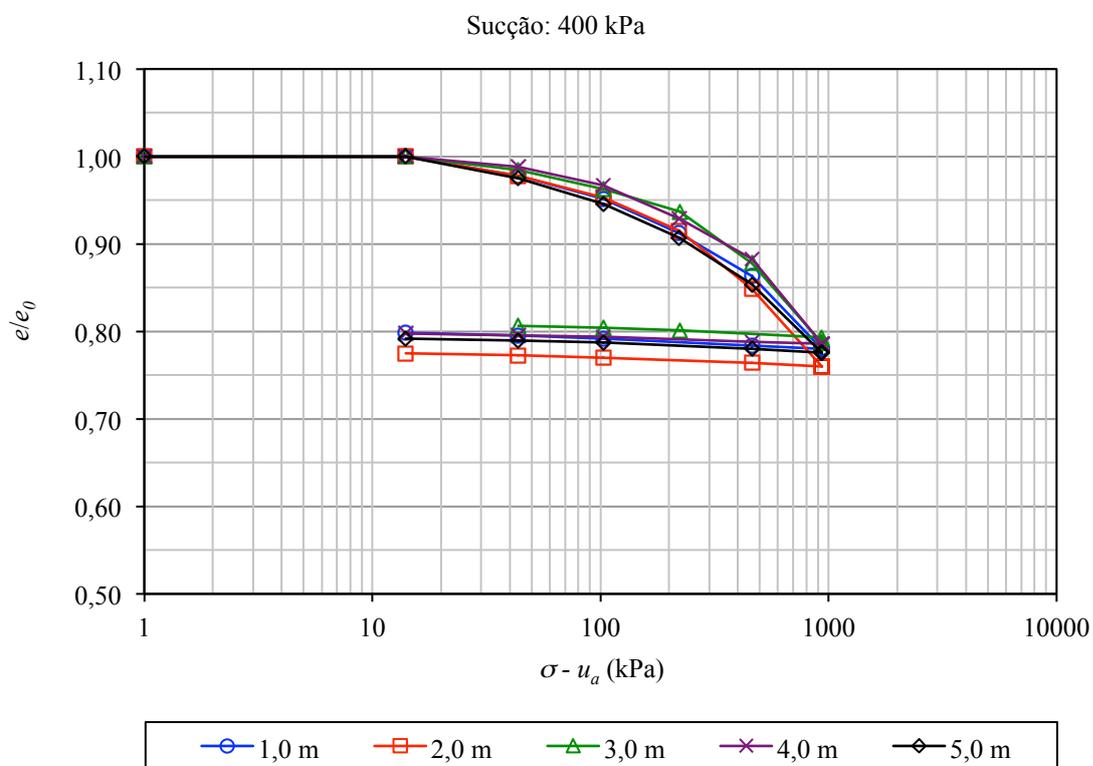


Figura 57 - Resultados dos ensaios edométricos sob sucção constante de 400 kPa para diferentes profundidades.

Os resultados demonstram a variação do comportamento do solo com a profundidade. As tensões de pré-adensamento, assim como os índices de compressão (inclinação da reta virgem) variam com a profundidade para um mesmo valor de sucção, exceto para a sucção de 400 kPa. Os históricos geológico, de tensão e de sucção das camadas mais superficiais do solo, podem explicar a maior compressibilidade e maior variabilidade dos resultados.

As tensões de pré-adensamento e os índice de compressão com a sucção e ao longo da profundidade, em conjunto com a tensão vertical geostática, são apresentados na Figura 58.

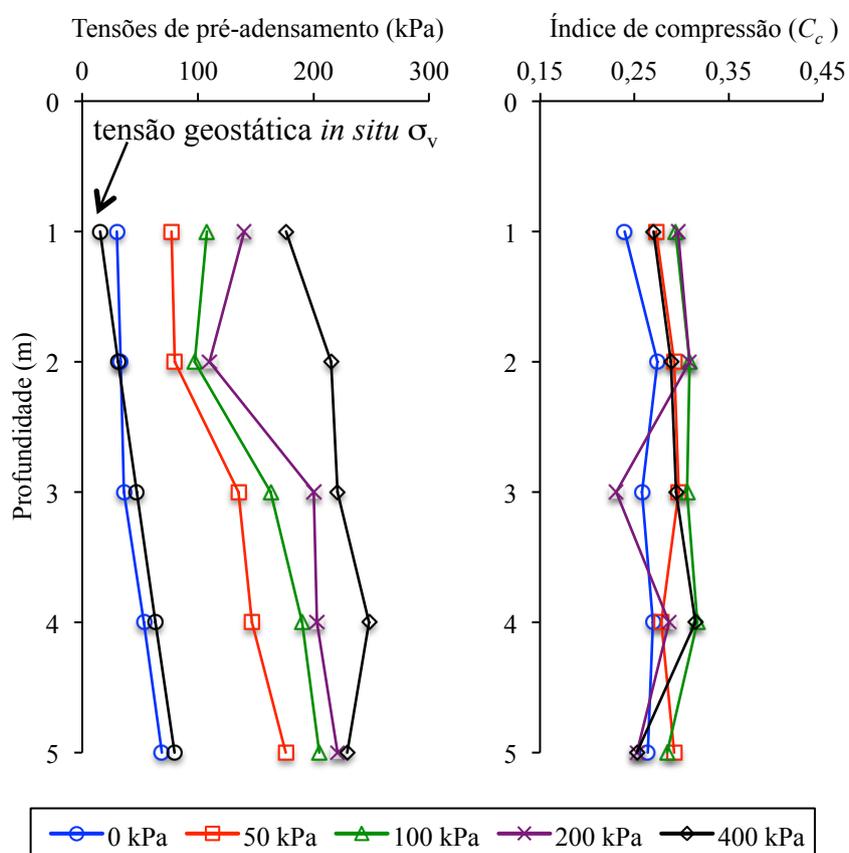


Figura 58 - Tensões de pré-adensamento e índices de compressão em função da sucção.

Observa-se que os valores das tensões de pré-adensamento são influenciados pela sucção e pela profundidade. Na Figura 58, nota-se um aumento da tensão de pré-adensamento para cada intervalo de sucção ao longo da profundidade. No caso da amostra representativa de 5 m de profundidade, por exemplo, a tensão de pré-adensamento varia de 70 kPa (sucção = 0 kPa) até cerca de 230 kPa (sucção = 400 kPa).

A tensão vertical geostática é aproximadamente igual ou ligeiramente inferior à tensão de pré-adensamento do solo em condição saturada (sucção = 0 kPa). Esta condição indica a possibilidade de ocorrência de deformações por colapso devido ao peso próprio, caso haja a saturação do solo, situação pouco provável de ocorrer devido às condições climáticas da região.

Nas Figuras 59, 60, 61, 62 e 63 são apresentados os potenciais de colapso (PC) calculados por meio da Equação 24 de Jennings & Knight (1975), respectivamente, para 1, 2, 3, 4 e 5 m de profundidade. Cabe ressaltar que os ensaios edométricos não foram realizados com inundação em uma determinada sobrecarga de interesse, mas sim com sucção constante ao longo de todo o ensaio. Desta forma, estes potenciais de colapso foram determinados indiretamente, alinhando-se as diferentes tensões com as respectivas deformações de cada trecho entre as curvas. A determinação e interpretação dos potenciais de colapso são realizados de maneira análoga aos ensaios duplos de Jennings & Knight (1975).

$$PC = \frac{\Delta e}{1+e_0} \cdot 100\% \quad (24)$$

Em que,

Δe : é a variação do índice de vazios;

e_0 : é o índice de vazios inicial do corpo de prova.

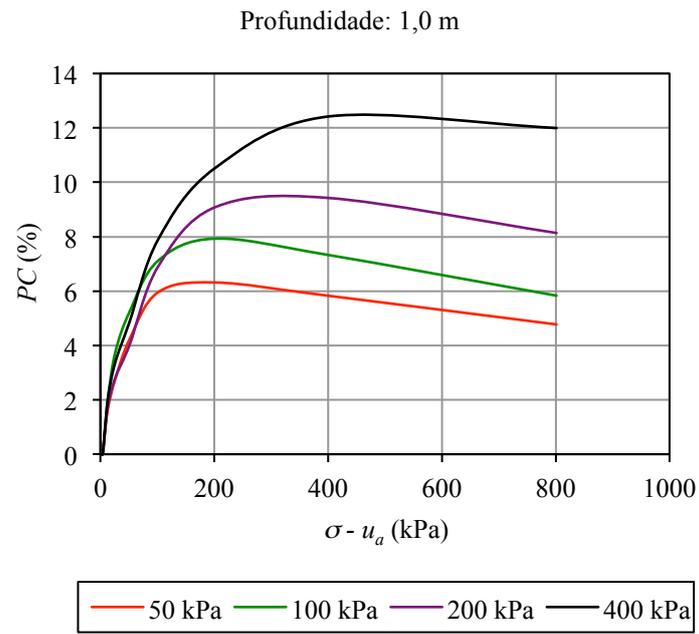


Figura 59 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 1,0 m de profundidade.

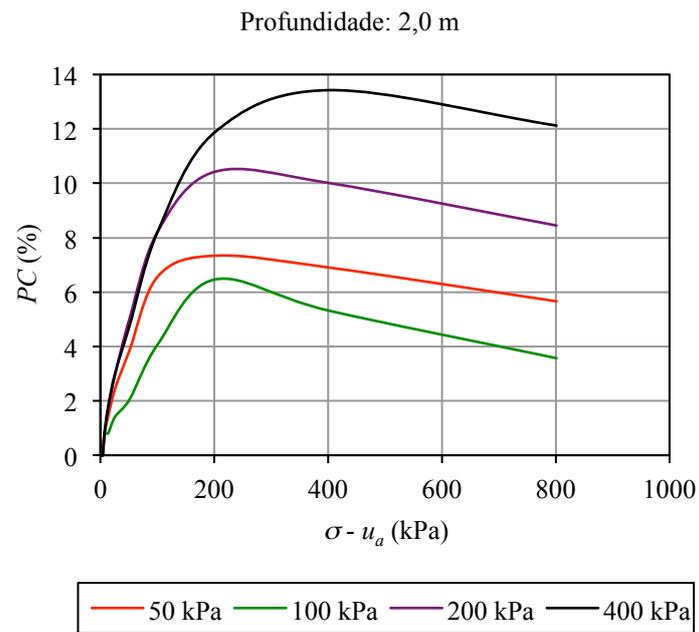


Figura 60 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 2,0 m de profundidade.

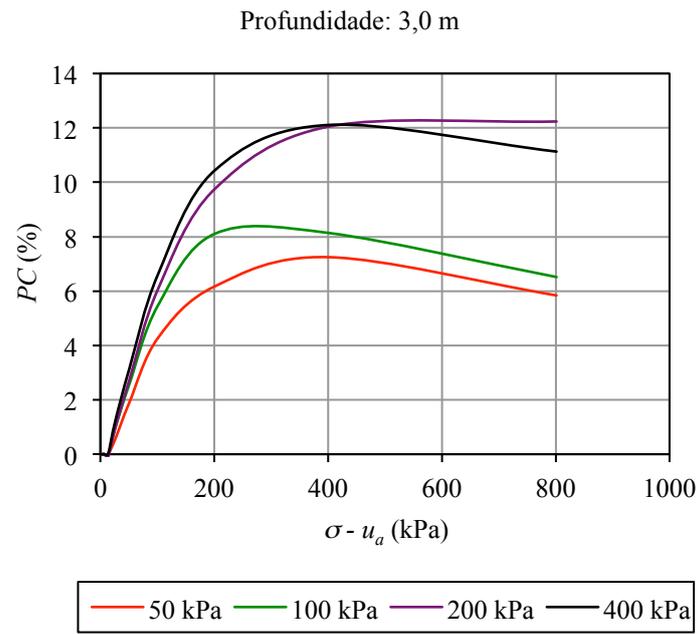


Figura 61 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 3,0 m de profundidade.

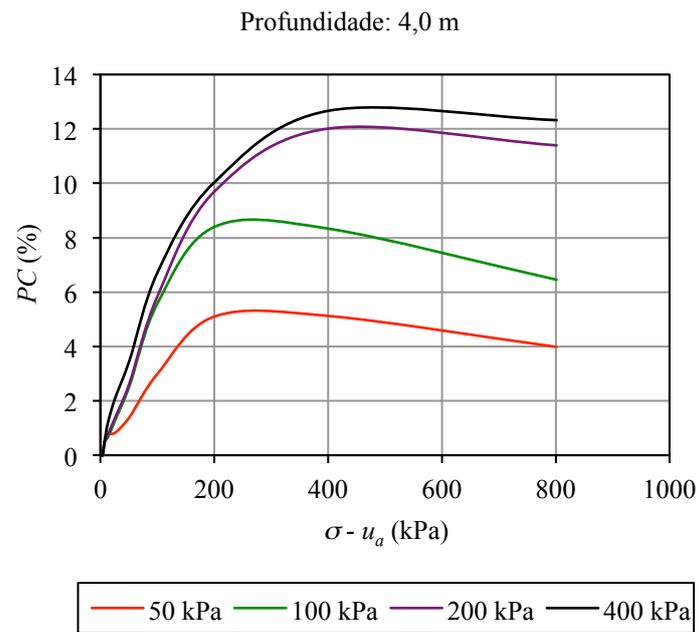


Figura 62 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 4,0 m de profundidade.

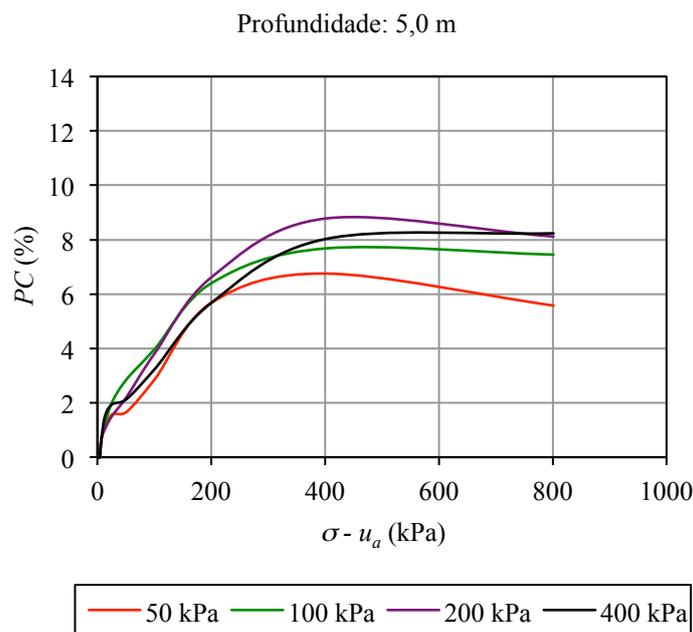


Figura 63 - Potenciais de colapso para as amostras coletadas a 5,0 m de profundidade.

De forma geral, os potenciais de colapso mostram-se crescentes em função da tensão vertical líquida, até um valor máximo, atingindo valores máximos entre 200 e 400 kPa com picos que variam de 5 a 14%, diminuindo posteriormente. Nas sucções mais elevadas, o solo encontra-se mais seco e, por esta razão, mais rígido e menos compressível. Assim, os potenciais de colapso são mais elevados quando as sucções iniciais no solo são maiores.

Em relação à profundidade, nota-se valores de potencial de colapso da mesma ordem de grandeza até 4 m de profundidade, diminuindo a 5 m. Quanto mais próximo da superfície do terreno, maiores são os potenciais de colapso do solo para o intervalo das sobrecargas utilizado nos ensaios. Isso se deve ao fato que na superfície do terreno os índices de vazios são ligeiramente maiores (Tabela 3). Além disso, o solo está em equilíbrio com seu peso próprio com tensões geostáticas relativamente baixas. Estes fatores favorecem a formação de solos mais colapsíveis na superfície do terreno, uma vez que o solo tende a aumentar a compacidade com a profundidade, diminuindo a sua metaestabilidade estrutural.

Outro método para avaliar o colapso do solo, de forma qualitativa, foi proposto por Reginatto & Ferrero (1973), levando em conta a tensão vertical geostática (σ_v), as tensões de pré-adensamento para o solo saturado (σ_{fs}) e para o solo não saturado (σ_{fn}). A classificação do solo é feita de acordo com a Equação 25.

$$C = \frac{\sigma_{fs} - \sigma_v}{\sigma_{fn} - \sigma_v} \quad (25)$$

Em que,

C : coeficiente de colapso;

σ_{fs} : tensão de pré-adensamento para o solo saturado;

σ_{fn} : tensão de pré-adensamento para o solo não saturado;

σ_v : tensão vertical geostática.

Para valores de C menores que 0, o solo é considerado verdadeiramente colapsível; para valores de C entre 0 e 1, o solo é considerado condicionalmente colapsível; e para valores de C igual a 1, o solo é considerado não colapsível.

Deste modo são apresentados na Tabela 6 os valores de coeficiente de colapso C obtidos para o solo estudado.

Tabela 6 - Coeficiente de colapso do solo estudado nas sucções de 50, 100, 200 e 400 kPa ao longo da profundidade.

Prof. (m)	C			
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
1	0,2	0,2	0,1	0,1
2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

Da Tabela 6, observa-se que o solo apresenta comportamento verdadeiramente colapsível ($C < 0$), abaixo de 2 m de profundidade, independente da sucção inicial do solo. Contudo para 1 e 2 m de profundidade o solo apresenta comportamento condicionalmente colapsível ($0 < C < 1$). Isso deve ao fato da tensão de pré-adensamento do solo saturado ser ligeiramente superior à tensão vertical geostática até 2 m de profundidade (Figura 58).

Como complemento dos aspectos referentes a compressibilidade do solo, são apresentados nas Figuras 64, 65, 66, 67 e 68 os módulos edométricos (ou módulo de deformabilidade em compressão confinada - M_d) ao longo da profundidade variando-se a sucção.

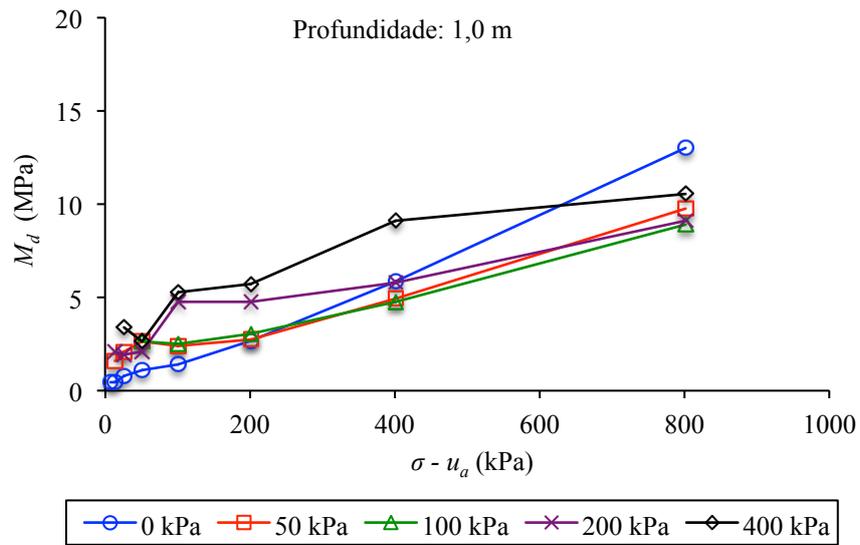


Figura 64 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 1,0 m de profundidade.

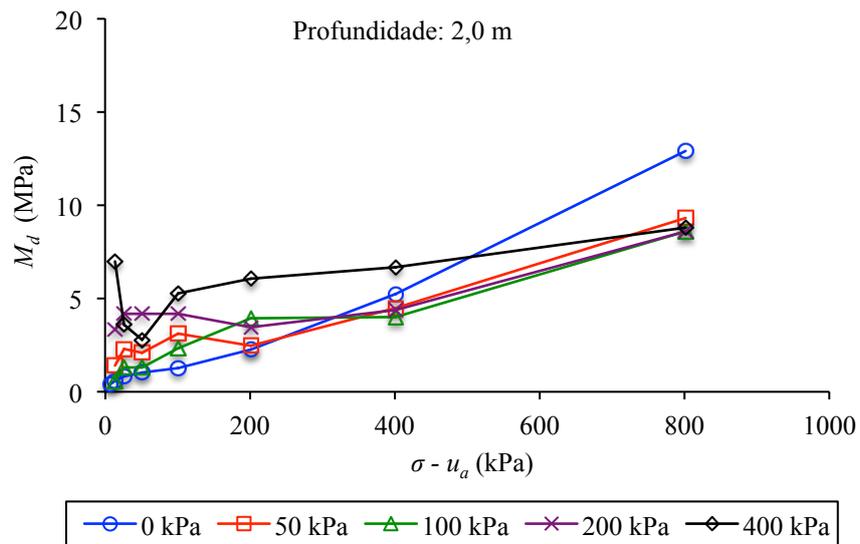


Figura 65 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 2,0 m de profundidade.

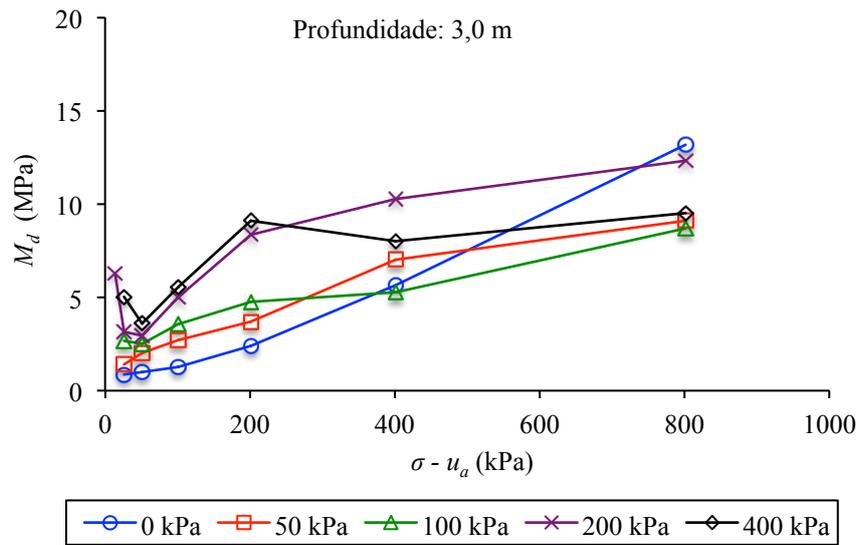


Figura 66 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 3,0 m de profundidade.

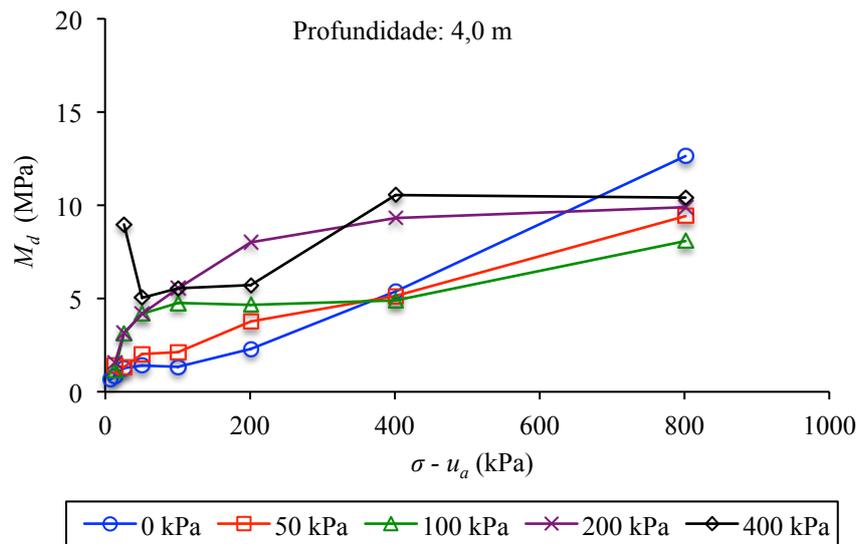


Figura 67 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 4,0 m de profundidade.

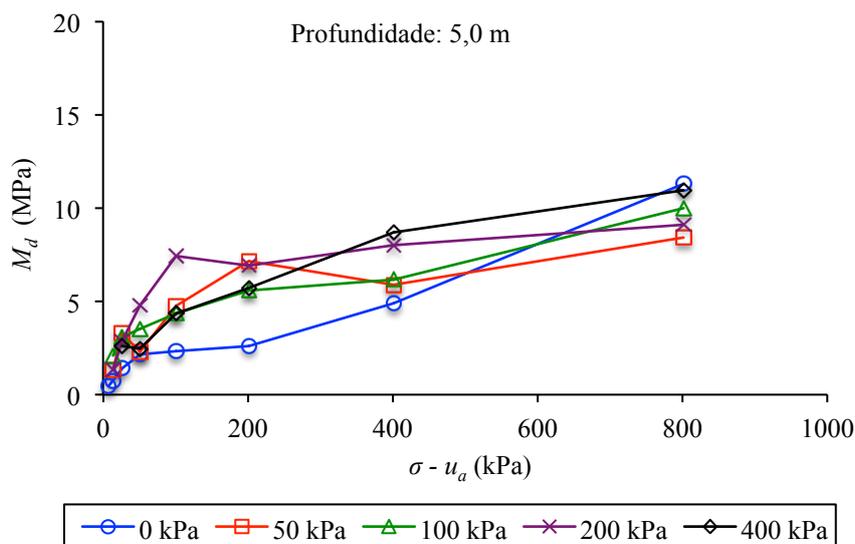


Figura 68 - Módulo edométrico em função da tensão vertical líquida para as amostras coletadas a 5,0 m profundidade.

Nas Figuras 64, 65, 66, 67 e 68, observa-se que para todas as cinco profundidades estudadas os valores de M_d do solo são relativamente baixos até cerca de 200 kPa de tensão. Os valores dos módulos aumentam após este valor. Esta particularidade indica que até a tensão de 200 kPa o solo deve experimentar maiores deformações por colapso, tornando-se mais denso, o que promove o aumento do módulo edométrico com a tensão vertical líquida.

Na faixa de carregamento utilizado nos ensaios, até cerca de 800 kPa, o aumento do módulo edométrico das amostras ensaiadas aconteceu, de maneira geral, para todas as sucções e profundidades, sendo esse aumento mais acentuado nas amostras mais úmidas e superficiais. As amostras submetidas a sucções mais elevadas e com maiores massas específicas secas (maior compactação) se mostram menos deformáveis, principalmente para tensões mais baixas. O solo a 1,0 m de profundidade saturado apresenta $M_d = 2676$ kPa à uma tensão líquida de 200 kPa, enquanto o solo na mesma profundidade e com a mesma tensão, mas com sucção de 400 kPa apresenta $M_d = 5723$ kPa.

5.4 Modelagem (BBM)

Certos problemas na Geotecnia, como a colapsibilidade dos solos, envolvem um tipo de relação tensão-deformação/fluxo, que requer em formulações específicas para análises mais elaboradas do comportamento desses solos. Neste contexto, buscou-se, nesta seção,

calibrar-se o Modelo Básico de Barcelona (BBM) de Alonso et al. (1990) como ferramenta de cálculo para avaliar a variabilidade sazonal e espacial vertical do solo estudado. O modelo, foi portanto, ajustado a partir dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa e por Fagundes (2014) e Fernandes (2016).

5.4.1 Parâmetros dos Ensaios de Compressão Triaxial

Os parâmetros provenientes dos ensaios de compressão triaxial com sucção controlada necessários para a calibração do modelo foram obtidos a partir dos resultados de Fagundes (2014), que realizou ensaios à 1,5 m de profundidade, e Fernandes (2016), que realizou ensaios a 3 e 5 m de profundidade, ambos no mesmo local estudado nessa pesquisa (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de resistência à compressão triaxial (FAGUNDES, 2014; FERNANDES, 2016).

Prof. (m)	1,5		3,0		5,0	
	$(\sigma_3 - u_a)$	$(\sigma_1 - u_a)$	$(\sigma_3 - u_a)$	$(\sigma_1 - u_a)$	$(\sigma_3 - u_a)$	$(\sigma_1 - u_a)$
0	50	118	53	186	53	192
	100	262	103	355	104	367
	200	532	204	689	204	694
50	50	149	49	187	53	224
	100	327	103	387	100	383
	200	602	200	712	200	736
200	50	161	50	224	52	277
	100	328	100	403	101	445
	200	578	201	753	203	811
400	50	175	52	264	50	282
	100	286	99	423	102	503
	200	537	200	782	200	836

A partir das envoltórias obtidas pelos autores no plano $\tau \times \sigma$ para cada sucção, procedeu-se a conversão dos dados experimentais para o plano $q \times p$. Das equações da reta de cada envoltória foram obtidos os valores de M , por meio da média dos coeficientes angulares, e os valores de p_s para cada sucção, que é o valor de intersecção da envoltória correspondente no eixo p . Os valores obtidos para cada profundidade estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos dos resultados de resistência à compressão triaxial.

Prof. (m)	1,5		3,0		5,0	
Sucção (kPa)	M	p_s	M	p_s	M	p_s
0	1,06	0	1,34	0	1,30	0
50	1,20	-5,23	1,35	-9,82	1,36	-15,55
200	1,10	-20,26	1,36	-19,83	1,38	-36,05
400	0,97	-34,73	1,36	-32,18	1,41	-41,01
média	1,08		1,35		1,40	

Ajustando-se uma reta com os valores p_s em um gráfico $p \times s$, obteve-se o parâmetro k , referente ao acréscimo de coesão com a sucção, multiplicando o inverso do coeficiente angular da reta ajustada por -1.

Os parâmetros provenientes dos resultados de Fagundes (2014) a 1,5 m foram utilizados para a calibração do solo nas profundidades de 1 e 2 m. Já os parâmetros provenientes dos resultados de Fernandes (2016) a 3 m foram utilizados nas calibrações do solo nas profundidades de 3 e 4 m. Por fim, os parâmetros obtidos dos resultados de Fernandes (2016) a 5 m foram utilizados para a calibração na profundidade de 5 m.

5.4.2 Parâmetros dos Ensaios Edométricos

A partir dos resultados dos ensaios edométricos apresentados nas Figuras 48, 49, 50, 51 e 52 foram obtidos os parâmetros λ e κ . O κ é o valor médio do índice de recompressão dos ensaios nas sucções de 0, 50, 100, 200 e 400 kPa, dividido por 2,3 (pois o eixo de p no modelo se apresenta em base de logaritmo neperiano), o $\lambda(s)$ é o índice de compressão virgem do solo, também dividido por 2,3, para cada sucção. Os valores do parâmetro p_o foram obtidos pela transformação das tensões verticais de pré-adensamento σ_{pa} (Figura 58) nas tensões isotrópicas de pré-adensamento no plano $p \times q$, por meio da Equação 19. Estes e os demais parâmetros obtidos pela calibração são apresentados na Tabela 9.

O modelo original de Alonso et al. (1990) prevê valores decrescentes de $\lambda(s)$ com o aumento da sucção, fato que não condiz com o solo em estudo (Tabela 9). Portanto, optou-se por calibrar-se o modelo seguindo-se as sugestões de Wheeler et al. (2002) que adapta o

modelo original para uso em situações de $\lambda(s)$ decrescentes com a sucção, prevendo valores de r maiores que 1 e valores de p^c elevados.

Tabela 9 - Parâmetro obtidos dos resultados dos ensaios edométricos.

Prof. (m)	Sucção (kPa)	$\lambda(s)$	p_0	κ
1,0	0	0,104	29	0,012
	50	0,119	75	
	100	0,128	106	
	200	0,129	140	
	400	0,118	181	
2,0	0	0,119	31	0,015
	50	0,127	78	
	100	0,134	96	
	200	0,134	112	
	400	0,126	218	
3,0	0	0,112	32	0,011
	50	0,129	123	
	100	0,133	150	
	200	0,100	186	
	400	0,128	213	
4,0	0	0,117	47	0,010
	50	0,121	133	
	100	0,138	174	
	200	0,125	189	
	400	0,137	237	
5,0	0	0,115	62	0,009
	50	0,127	160	
	100	0,124	188	
	200	0,132	208	
	400	0,110	226	

Portanto, para a calibração, foram estimados valores convenientes de p^c para cada profundidade, e a partir da Equação 10, foram obtidas 4 equações em função de r e β . As equações foram resolvidas duas a duas (6 sistemas), e os valores de r e β adotados foram as médias dos valores obtidos de cada sistema, com exceção da profundidade de 2,0 m, a qual o ajuste obtido pelos valores de r e β provenientes do sistema das equações de 50 e 100 kPa se

mostrou o mais adequado. Na Tabela 10 são apresentados os valores de p^c , β e r obtidos para cada profundidade.

Tabela 10 - Parâmetros constitutivos obtidos.

Prof. (m)	p^c (kPa)	β (kPa ⁻¹)	r
1,0	15000	0,0118	1,3472
2,0	20000	0,0177	1,2199
3,0	15000	0,0166	1,3757
4,0	10000	0,0167	1,3618
5,0	15000	0,0193	1,2714

5.4.3 Ajustes do Modelo

Na Figura 69, são apresentadas as curvas de escoamento LC (*loading-collapse*) obtidas pela calibração do BBM, bem como os valores experimentais das tensões de pré-adensamento com a sucção no solo, ao longo do perfil para cada profundidade estudada.

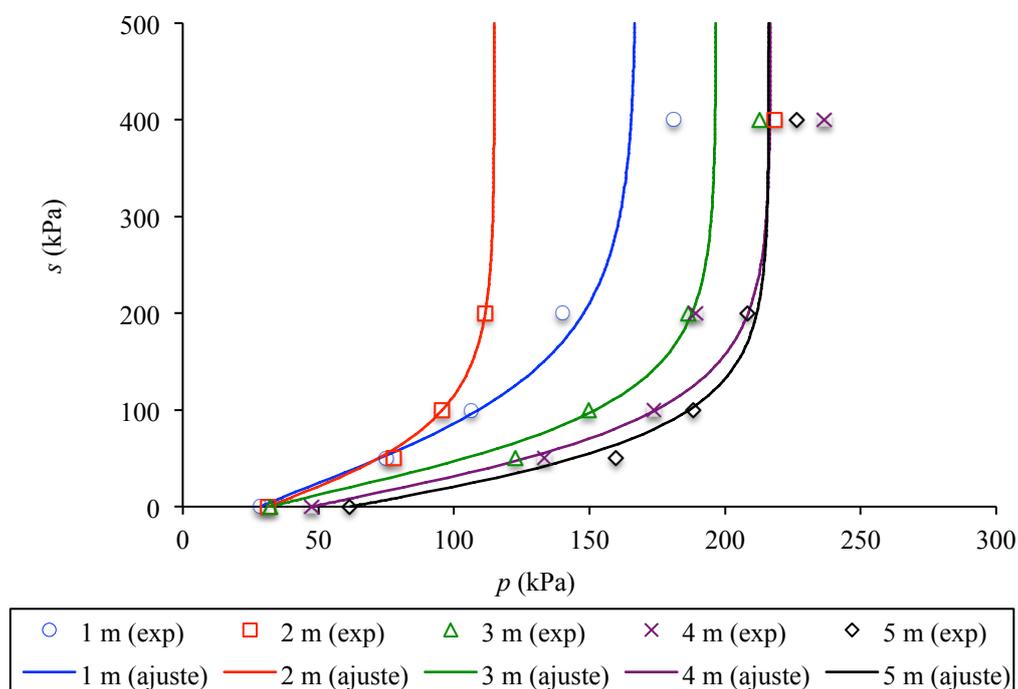


Figura 69 - Tensões de pré-adensamento para as amostras coletadas a 1, 2, 3, 4 e 5 m e ajustes do BBM das curvas de escoamento LC.

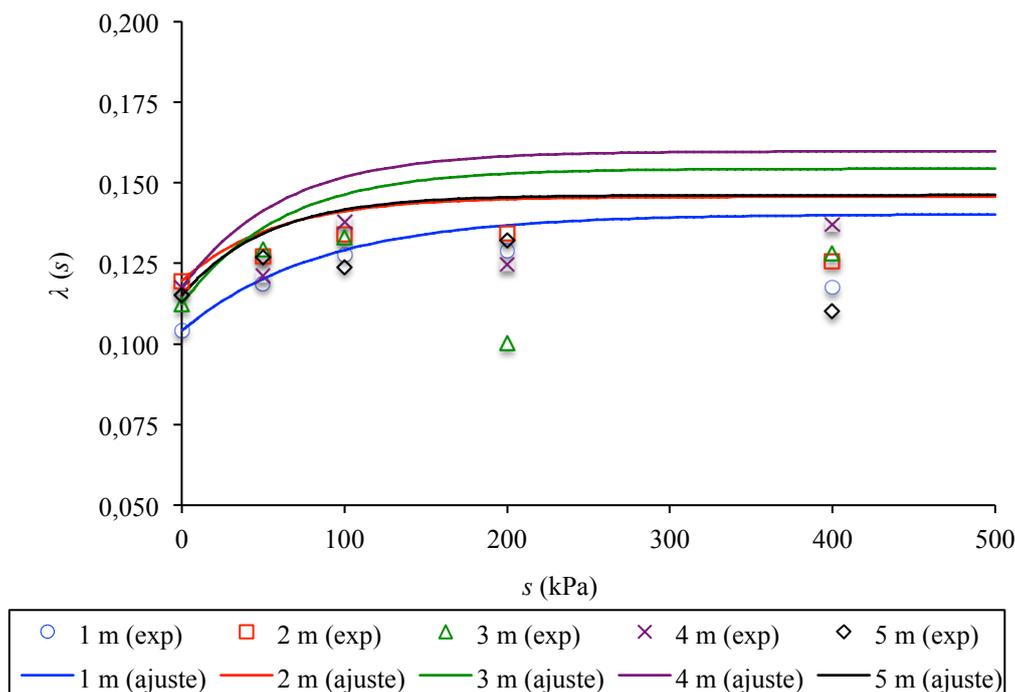


Figura 70 - Parâmetro de compressão elasto-plástico do solo a 1, 2, 3, 4 e 5 m e ajustes do BBM.

Dos resultados apresentados na Figura 69, observa-se que os ajustes obtidos mostram relativa concordância com os dados experimentais, com exceção ao ponto experimental da amostra coletada a 2 m de profundidade com sucção de 400 kPa, que divergiu da curva LC ajustada para essa profundidade. Em geral, as curvas LC possuem formatos similares entre si, pois cada curva apresenta pequenas variações de p_o para sucções acima de 200 kPa. Entretanto, as curvas obtidas tendem a um aumento da região do domínio elástico das deformações com a profundidade. Isto significa que as tensões de pré-adensamento do solo aumentam com a profundidade para qualquer valor de sucção no solo.

Os valores de $\lambda(s)$ ajustados de acordo com a sugestão de Wheeler et al. (2002) que estabelece valores decrescentes com a sucção são condizentes com os resultados experimentais. No entanto, certa dispersão dos resultados é observada sobretudo para as sucções mais elevadas, isto é, acima de 200 kPa.

Na Figura 71, como verificação da capacidade do modelo em reproduzir o comportamento do solo ao longo da profundidade, são apresentadas as simulações dos resultados dos ensaios edométricos realizados nessa pesquisa.

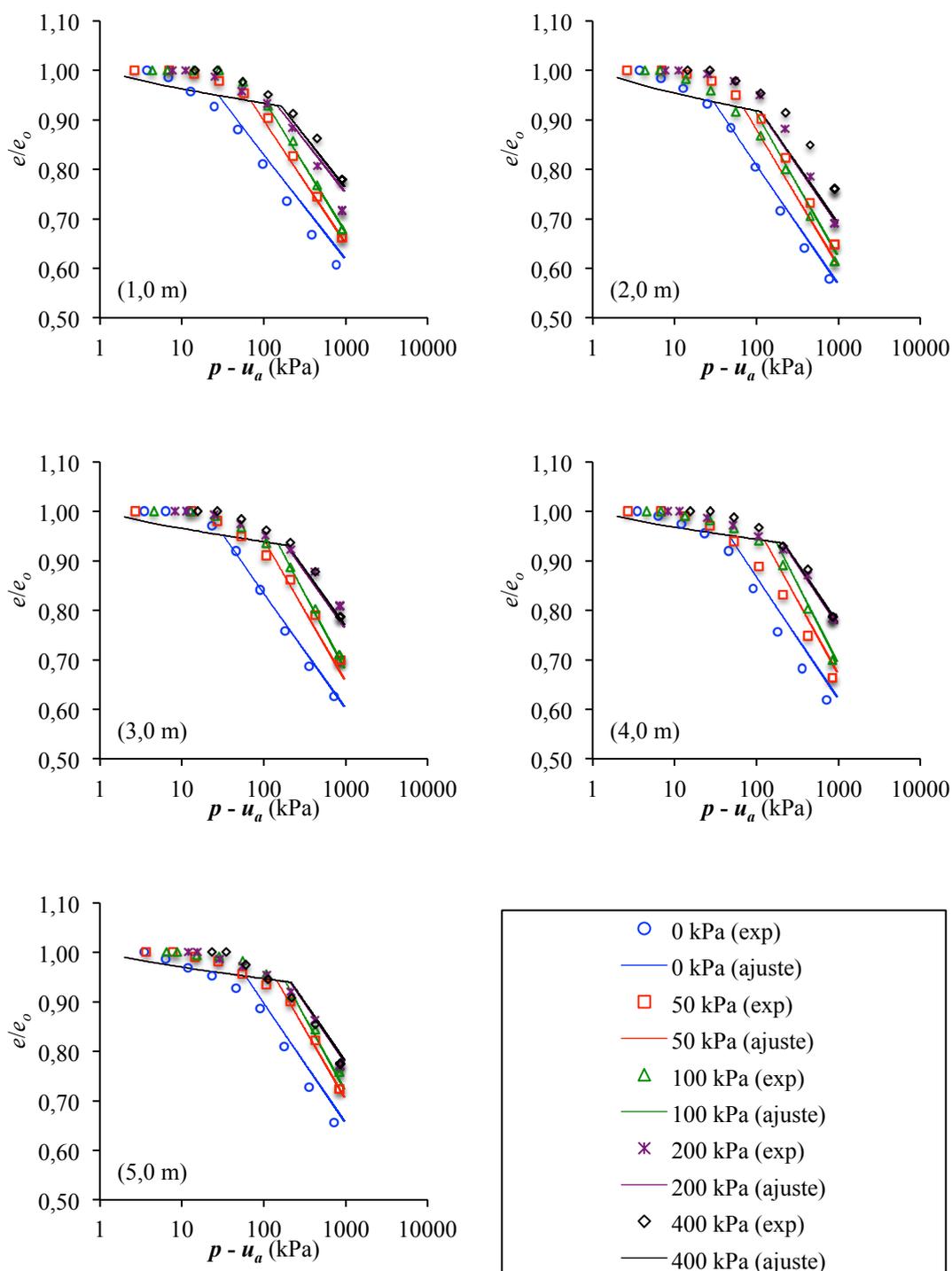


Figura 71 - Dados experimentais dos ensaios edométricos e simulações das curvas de compressão obtidas pelo BBM.

Na Figura 71, pode-se observar, em geral, um bom ajuste do modelo aos pontos experimentais. As curvas do solo a 2 m com sucção de 400 kPa e do solo a 4 m com sucções de 0 e 50 kPa apresentaram maior dispersão. Nota-se que os ajustes apresentam maior

dispersão para as menores tensões. Isso se deve ao fato do modelo usar para a determinação do parâmetro κ , o valor médio dos índices de recompressão (C_r), e não o valor do índice para cada sucção, como ocorre para a determinação de $\lambda(s)$.

A partir das Figuras 69, 70 e 71, verifica-se, portanto, que a aplicabilidade do BBM é satisfatória, levando em consideração a proposta de Wheeler et al. (2002). Portanto, para uma estimativa da variação dos parâmetros $\lambda(s)$ e das tensões de pré-adensamento com a mudança de sucção, são apresentados na Figura 72 perfis com esses parâmetros obtidos pelo ajuste do BBM.

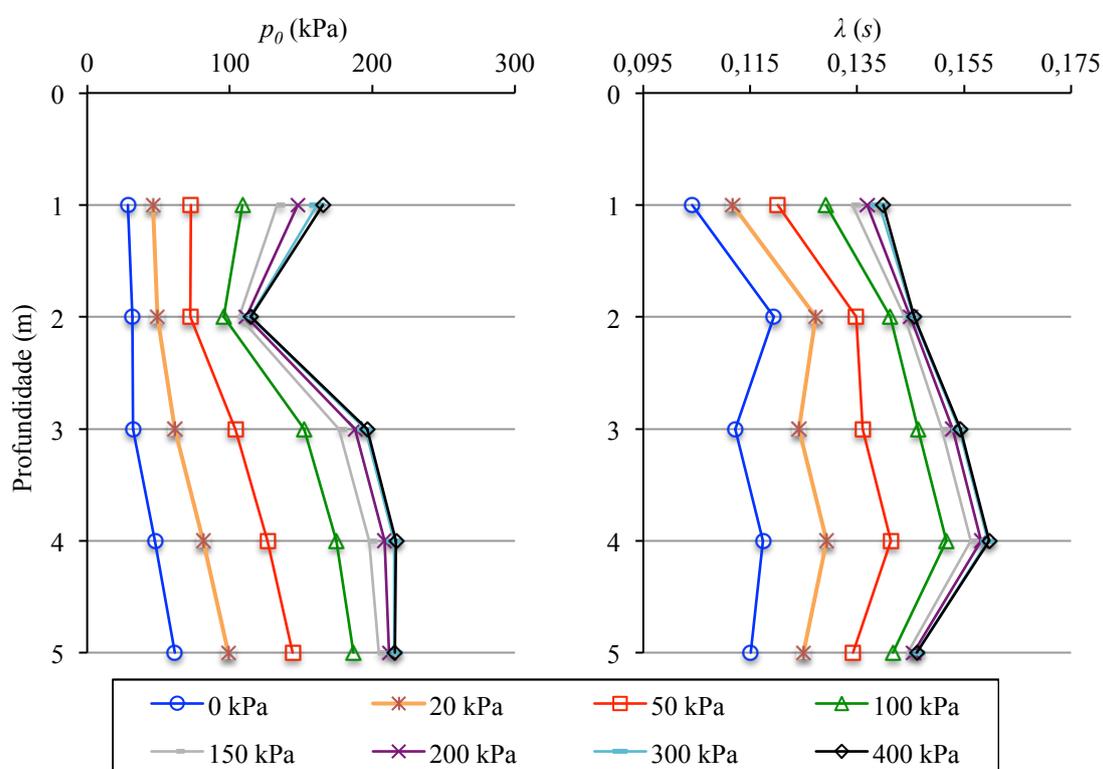


Figura 72 - Perfil da variação das tensões de pré-adensamento e dos parâmetros de compressão elastoplástico λ (s) em função da sucção.

As tensões de pré-adensamento são crescentes com a sucção e com a profundidade. As variações tendem a aumentar com a profundidade e diminuem a partir da sucção de 200 kPa que está em concordância com o formato da curva de escoamento LC. Os valores das tensões de pré-adensamento do solo saturado são baixos, cerca de 20% dos valores das tensões obtidas para a sucção de 400 kPa, o que demonstra a possibilidade de ocorrência de colapso caso haja o umedecimento do solo.

5.5 Medidas da Sucção em Campo

Para a verificação do intervalo de sucção do solo no campo foi realizado um monitoramento por meio de 4 tensiômetros convencionais providos com Jet Fill no período de fevereiro de 2016 a novembro de 2016. Os tensiômetros foram instalados próximos à superfície do terreno, porção de solo mais susceptível às variações sazonais. Os tensiômetros T1 e T4 foram instalados a 0,4 m de profundidade e os tensiômetros T2 e T3 a 0,9 m de profundidade.

Além dos tensiômetros convencionais, o monitoramento da sucção contou também com sensores de resistência elétrica do tipo “watermark” que foram instalados a 0,4, 0,9, 2, 3 e 5 m de profundidade. Os dados dos sensores foram obtidos a partir de um sistema de aquisição data logger instalado no local, conforme proposto por Irmack et al. (2014).

Paralelamente ao monitoramento da sucção, dados de pluviometria foram obtidos e fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet) da UNESP-Bauru.

Na Figura 73, são apresentados os resultados do monitoramento da sucção por meio dos tensiômetros e do sistema de sensores de resistividade elétrica a 0,4 e 0,9 m de profundidade. Dados de precipitação obtidos pelo IPMet são apresentados e correlacionados com a sucção de campo na mesma figura.

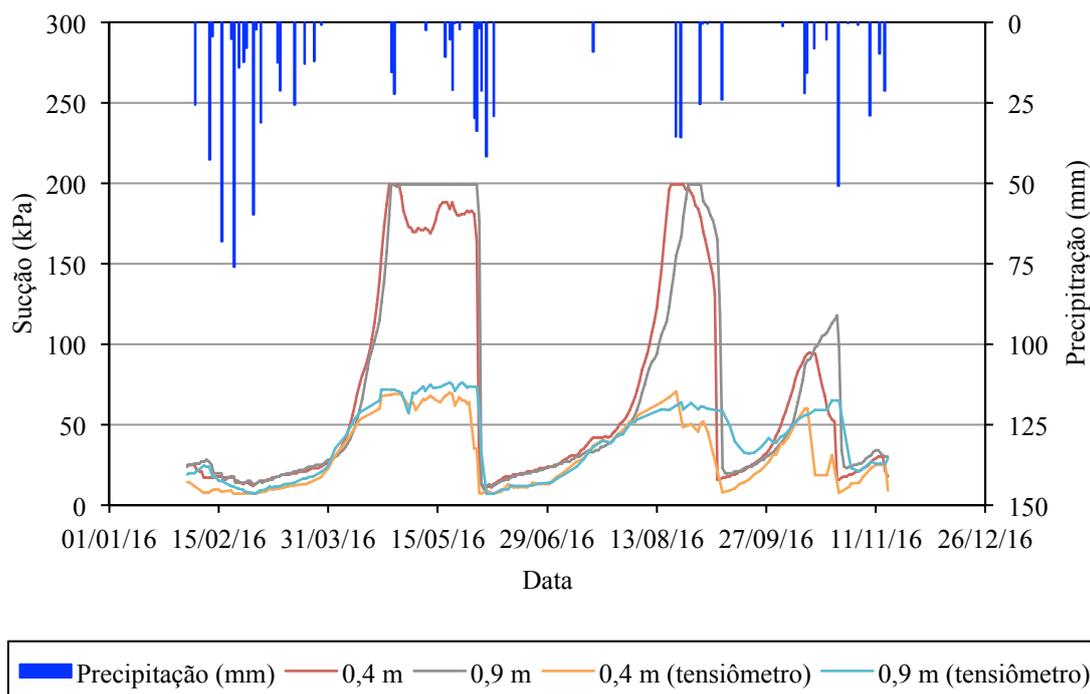


Figura 73 - Sucção em campo (0,4 e 0,9 m de profundidade) e pluvimetria (Fev/2016 até Nov/2016).

As medidas de sucção obtidas por meio do monitoramento mostram-se sensíveis à precipitação pluviométrica, como pode ser visto na Figura 73. A sucção diminui à medida que as precipitações aumentam, demonstrando a influência climática sobre a camada mais superficial do terreno. Na interface solo-atmosfera, os potenciais associados aos fluxos de água, de ar e de calor são mais intensos e, por isso, as medidas a 0,4 m são mais sensíveis a essas variações.

Nota-se ainda na Figura 73 que os resultados dos sensores de resistência elétrica possuem boa congruência com os resultados dos tensiômetros apenas para sucções abaixo de 85 kPa. Isso se deve ao fato dos tensiômetros possuírem um limite de sucção mensurável de cerca de 80 kPa, enquanto os sensores de resistência elétrica possuem um intervalo de sucção mensurável de 0 até cerca de 200 kPa (IRMAK et al., 2014).

Na Figura 74 são apresentados os dados obtidos por meio dos sensores de resistência elétrica nas profundidades de 0,4, 0,9, 2, 3 e 5 m. Em geral, nota-se que a sucção a 3 e 5 m de profundidade é menos afetada pela precipitação do que na superfície do terreno. Além disso, não apresenta picos ou quedas repentinas, mas apenas um aumento constante a partir do mês de junho de 2016, onde se inicia o período seco. Na profundidade de 2 m a sucção tem pico

máximo de cerca de 100 kPa, valor bem inferior aos picos registrados nas profundidade de 0,4 e 0,9 m que são de aproximadamente 200 kPa.

Na Tabela 11 são apresentados os valores mínimo, médio, máximo e desvio padrão ao longo do perfil das sucções registradas pelos sensores de resistência elétrica.

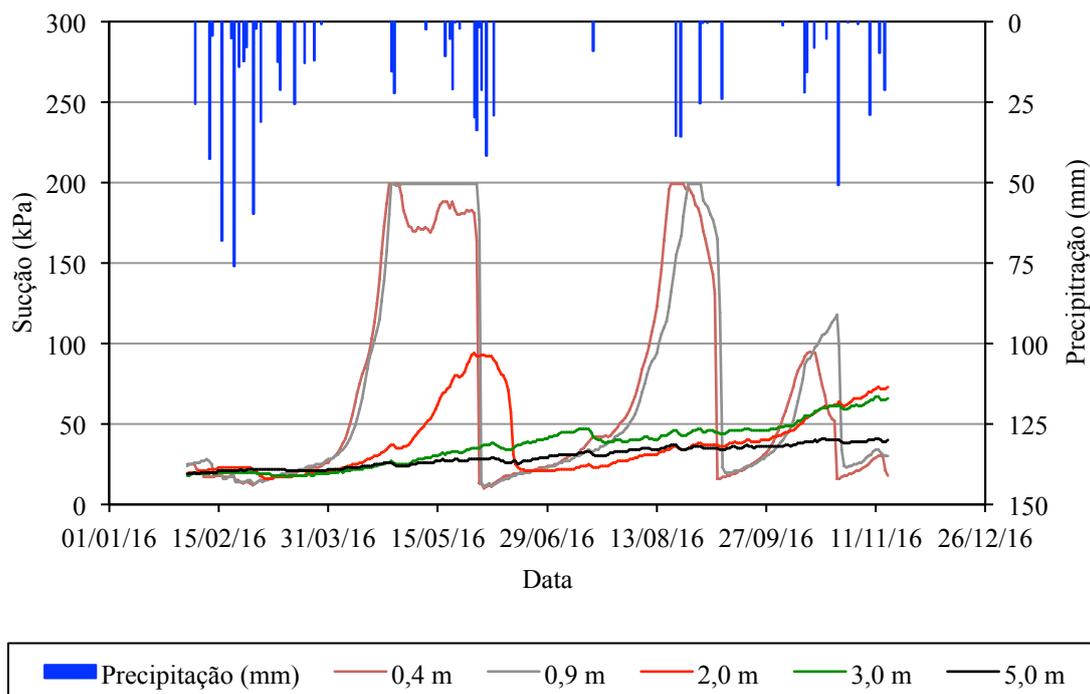


Figura 74 - Sucção em campo ao longo do perfil obtidos por sensores de resistência elétrica e pluviometria (Fev/2016 até Nov/2016).

Tabela 11 - Valores de sucção mínimo, médio, máximo e desvio padrão ao longo do perfil.

Prof. (m)	Sucção (kPa)			
	média	mínima	máxima	desvio
0,4	68	10	199	64
0,9	70	11	199	67
2,0	39	16	94	21
3,0	37	17	67	14
5,0	30	19	41	6

Na Figura 75 são apresentados perfis de sucção obtidos pelos sensores de resistividade elétrica no período de março de 2016 a novembro de 2016.

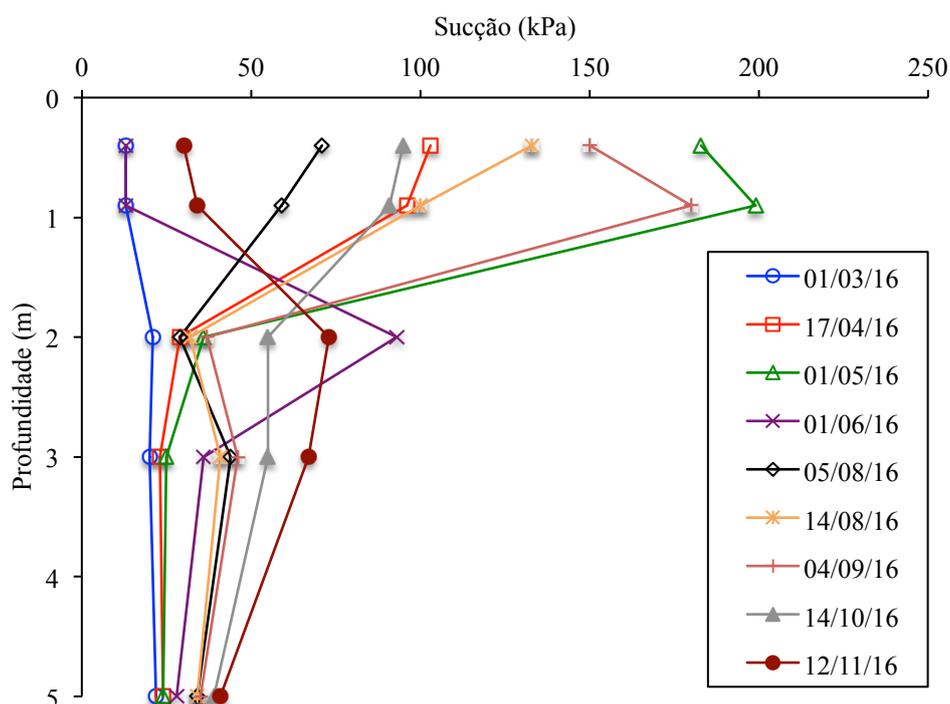


Figura 75 - Perfis de sucção no solo ao longo do período de março-16 a novembro-16.

Na Figura 75, pode ser visto que a maior variação de sucção ocorre até cerca de 2 m de profundidade, ou seja, próximo à superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera, e diminui com o aumento da profundidade.

A variação dos perfis de sucção, limita-se a um intervalo que mantém o solo em condição não saturada com sucções, em geral, superiores a 10 kPa. Os resultados observados na Tabela 11 mostram uma faixa de sucção em campo limitada pelos valores mínimo de 10 kPa e máximo de 199 kPa. Com base nas curvas de retenção da Figura 47, ao considerar as sucções mínimas registradas pelo sensores verifica-se que as umidades do perfil variam de cerca de 6 a 10%. Portanto, ao longo do período monitorado, o grau de saturação em campo máximo a 1 m normalmente não superou 35%.

Isso significa que mesmo em períodos chuvosos o solo não alcança a saturação, pois é necessário um grande volume de água para aumentar o grau de saturação até 100%. A cada 1 m³ de solo ainda seriam necessários cerca de 300 litros de água para a saturação do solo, ou seja, um acréscimo de 300 mm de chuva por m² de terreno. Durante o período monitorado, a máxima precipitação em um dia foi de 76 mm. Em outras palavras, seria necessário a

precipitação de cerca de 300 mm de chuva, sem que houvesse escoamento superficial, para saturar apenas o primeiro metro do terreno, situação pouco provável de ocorrer.

No tocante à redistribuição da sucção ao longo do perfil de solo, nota-se que nos perfis de sucção dos meses de maio e setembro a sucção mostrou-se elevada na superfície do terreno e, isto se deve ao fato de os meses de abril e agosto terem sido relativamente secos, não apresentando precipitações importantes, o que fez com que a sucção fosse afetada pela evaporação. Em março os valores de sucção são baixos ao longo de todo o perfil devidos às precipitações que ocorreram nos meses de fevereiro e março.

Com base nos valores de sucção estabelecidos na Tabela 11, valores da tensão de pré-adensamento, p_o , e do parâmetro de compressão elastoplástico, $\lambda(s)$, são apresentados na Figura 76. Assim sendo, para cada profundidade analisada os parâmetros foram calculados de acordo com o BBM., considerando as sucções médias, mínimas e máximas.

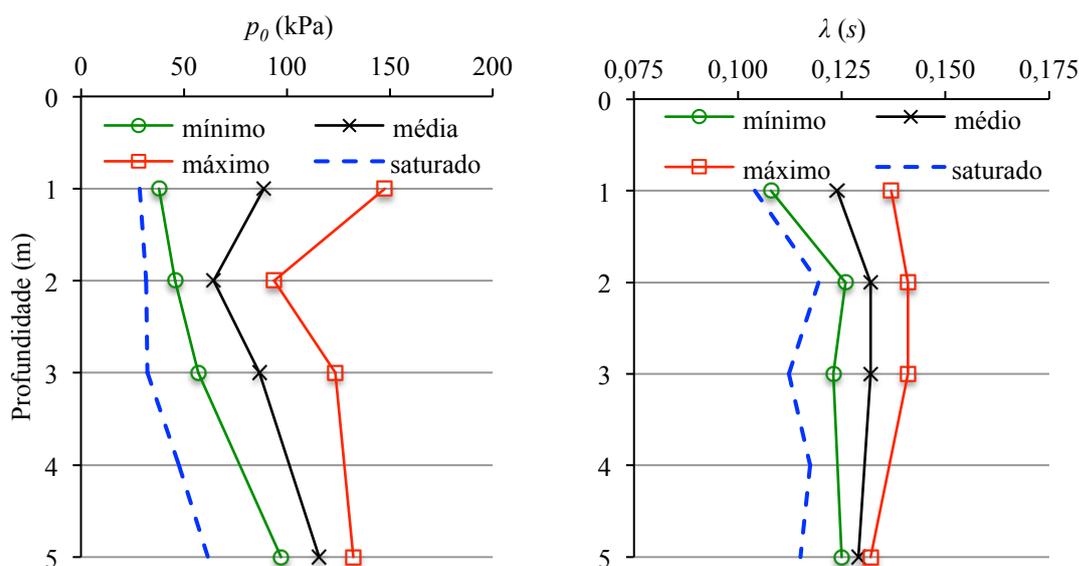


Figura 76 - Perfis da variação das tensões de pré-adensamento e do parâmetro de compressão elastoplástico do solo com a sucção: valores mínimo, médio e máximo de ocorrência em campo no período monitorado (Fev/2016 até Nov/2016).

Na Figura 76, é possível observar as variações de p_o e $\lambda(s)$ com a profundidade. Conforme esperado, as variações são maiores na superfície do terreno, onde o solo está mais exposto às variações sazonais, reduzindo ao longo da profundidade.

Ao considerar os valores mínimos de sucção (período chuvoso), p_o e $\lambda(s)$ aumentam, respectivamente, 32% e 2,9% em relação à p_o^* e $\lambda(0)$ a 1 m de profundidade. Já a 5 m de

profundidade os mesmos parâmetros aumentam, respectivamente, 57% e 8,7% em relação à p_o^* e $\lambda(0)$.

Os resultados evidenciam a variabilidade do solo estudado tanto sazonal ou temporal devido à ocorrência da sucção, como espacial devido à profundidade. Isto implica na necessidade do entendimento do comportamento do solo quando em condição não saturada, principalmente no que se refere a variação da sucção no tempo, para estimativa correta dos parâmetros e, por consequência, da concepção adequada de projetos geotécnicos nesses solos.

Em geral, as alterações de sucção ou de umidade decorrentes das mudanças sazonais podem causar problemas geotécnicos, principalmente em fundações quando estas estão diretamente apoiadas nas camadas mais superficiais do solo, pois na superfície a variabilidade é maior. O aumento da umidade, ou redução da sucção, mesmo que a saturação do solo não seja alcançada, já é suficiente para torná-lo mais deformável, com possibilidade de ocorrência de problemas como recalques.

Um melhor entendimento do comportamento não saturado do solo pode auxiliar na concepção de projetos geotécnicos mais econômicos. Os projetos são muitas vezes concebidos considerando o solo saturado, que é a situação mais desfavorável (à favor da segurança), porém, em determinadas regiões a saturação do solo pode não ocorrer ao longo da vida útil da obra em questão.

Dependendo da complexidade da obra, algumas alternativas levando em conta o comportamento não saturado podem ser tomadas. Um exemplo prático, para garantir uma maior rigidez do solo sob esforços, seria o monitoramento da sucção em campo com medidas preventivas para que o umedecimento do solo não ocorra, ou ainda usar técnicas menos onerosas que diminuem a compressibilidade do solo, como a compactação.

6. Conclusão

Nesta pesquisa avaliou-se os parâmetros de compressibilidade e a sucção de um solo não saturado ao longo de um perfil de 5 m de profundidade, baseado nos conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados. Com base nas informações obtidas, as seguintes conclusões são delineadas:

- As curvas de retenção de água obtidas com a profundidade são curvas típicas de solos arenosos e porosos com baixa pressão de entrada de ar e trechos de dessaturação compreendidos em um pequeno intervalo de sucção. As curvas apresentaram uma segunda pressão de entrada de ar que deve estar relacionada à drenagem dos microporos da fração agregada do solo.
- Os parâmetros de compressibilidade do solo variaram com a sucção ao longo da profundidade. O acréscimo de sucção, promoveu um aumento das tensões de pré-adensamento e mudanças nos índices de compressão do solo (inclinação da reta virgem). Quanto maior a sucção e a profundidade, menos compressível o solo se apresentou.
- Os potenciais de colapso são da mesma ordem de grandeza até 4 m de profundidade, diminuindo a 5 m, o que demonstra que a colapsibilidade é mais acentuada na superfície da camada.
- Os módulos edométricos mostraram-se dependentes da tensão aplicada e da sucção inicial no solo. Com o aumento da sucção o solo mostrou-se mais rígido.
- O Modelo Básico de Barcelona (BBM) mostrou-se capaz de reproduzir os resultados experimentais de acordo com a modificação proposta por Wheeler et al. (2002). As curvas de escoamento LC possuem formatos similares entre si, porém, as tensões de pré-adensamento tendem a aumentar com a profundidade tanto na condição saturada como na condição não saturada.

- A sucção no solo varia com a precipitação pluviométrica, diminuindo à medida que as precipitações aumentam, sobretudo na superfície, onde o solo interage com a atmosfera. As maiores variações de sucção ocorrem até 2 m de profundidade.
- A variação dos perfis de sucção, limita-se a um intervalo que mantém o solo não saturado com sucções, em geral, superiores a 10 kPa, o que demonstra que mesmo em períodos chuvosos o solo não alcançou a saturação.
- As maiores variações da tensão de pré-adensamento p_0 e do parâmetro de compressão elastoplástico $\lambda(s)$ do solo incidem na superfície do terreno, onde o solo está mais exposto às variações sazonais, reduzindo ao longo da profundidade.
- Os resultados experimentais e simulados numericamente evidenciam a influência da variabilidade sazonal devido à ocorrência da sucção e da variabilidade espacial vertical devido à profundidade, demonstrando a importância da Mecânica dos Solos Não Saturados no tocante à estimativa de parâmetros geotécnicos.

Referências

- ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. **Special problem soils. General report.** Proceedings of the 9th European conference on soil mechanics and foundation engineering. **Anais...**Dublin: 1987
- ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. A constitutive model for partially saturated soils. **Geotechnique**, v. 40, n. 3, p. 405–430, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298:** Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM International, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- BANNOUR, H.; STOLTZ, G.; DELAGE, P.; TOUZE-FOLZ, N. Effect of stress on water retention of needlepunched geosynthetic clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, n. 6, p. 629–640, 2014.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soils Physics**. 4th. ed. Wiley, 1972.
- BENATTI, J. C. B. **Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP**. 189p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP, 2010.
- BENATTI, J. C. B.; MIGUEL, M. G.; RODRIGUES, R. A.; VILAR, O. M. Collapsibility study for tropical soil profile using oedometric tests with controlled suction. **Unsaturated soils (eds E. Alonso and A. Gens)**, v. 1, p. 193–198, 2011.

- BOUYOUCOS, G. J.; MICK, A. H. An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. **Technical Bulletin. Michigan Agricultural Experiment Station**, v. 172, n. 1, p. 1–18, 1940.
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Tensiometer Performance with Different Reading Systems. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 33, n. 1, p. 17–24, 2009.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers, Colorado State University**, v. 3, n. March, p. 37 p., 1964.
- BULUT, R.; LEONG, E. C. Indirect measurement of suction. **Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils**, p. 21–32, 2008.
- CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. 156p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, 2000.
- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v. 36, n. 2, p. 265–268, 1986.
- CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. Sample disturbance in London clay. **Geotechnique**, v. 42, n. 4, p. 577–585, 1992.
- COLMAN, E. A.; HENDRIX, T. M. The fiberglass electrical soil-moisture instrument. **Soil Science**, v. 67, n. 6, p. 425–438, 1949.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. **Geoderma**, v. 120, n. 3–4, p. 201–214, 2004.
- DIENE, A. A.; MAHLER, C. F. Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1261–1270, 2007.
- DOS SANTOS, C. R. B. **Influência Da Modificação Do Estado De Tensões E Da Sazonalidade Nos Parâmetros Geotécnicos Oriundos De Ensaio De Campo Na**

- Argila Porosa De Brasília.** 118p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2003.
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, W.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, O. Software to model soil water retention curves (SWRC , version Nota. n. i, p. 4–7, 2000.
- DUDLEY, J. H. Review of collapsing soils. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div**, v. 96, n. SM3, p. 925–947, 1970.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211–223, 1994.
- DYMINSKI, A. S.; KORMANN, A. C. M.; HOWIE, J.; SHUTTLE, D. **Variability Analysis of SPT and CPT data for a Reliability- based Embankment Design of a Southern Brazilian Port Site.** XIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Anais...**2006
- ESCARIO, V.; SAEZ, J. **Gradual collapse of soils originated by a suction decrease.** the 8th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering. **Anais...**Moscow: 1973
- FABBRI, G. T. P. **Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno.** 176p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1994.
- FAGUNDES, L. S. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado.** 102p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2014.
- FARRELL, D. A.; LARSON, W. E. Modeling the pore structure of porous media. **Water Resour. Res**, v. 8, n. 3, p. 699–706, 1972.
- FAWCETT, R. G.; COLLIS-GEORGE, N. A filter paper method for determining the moisture characteristic of soil. **Australian Journal of Experimental Agriculture and**

Animal Husbandry, v. 7(25), p. 162–167, 1967.

FERNANDES, J. B. **Resistência e deformabilidade de um solo não saturado a partir de ensaios triaxiais**. 144p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016.

FERREIRA, R. C.; MONTEIRO, L. B.; PERES, J. E. E.; BENVENUTO, C. **Some aspects on the behaviour of brazilian collapsible soils**. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Anais...**Rio de Janeiro: 1989

FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 121–139, 1979.

FREDLUND, D. G. **The scope of unsaturated soil mechanics: An overview**. International Conference on Unsaturated Soils, 1, UNSAT'95. **Anais...**Paris: 1996

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

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

FUENTES, C.; ANTONINO, A. C. D.; NETTO, A. M.; LIRA, C. A. B. O.; CABRAL, J. J. S. P. Desenvolvimento de um modelo fractal para a estimativa da condutividade hidráulica de solos não saturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 51–60, 2005.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v. 85, n. 4, p. 228–232, 1958.

GOMES, J. E. DA S. **Estudo Sobre Fatores Que Influenciam a Acurácia Do Método Do Papel-Filtro**. 95p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

- GOOGLE. **Google Maps**. 2016. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: junho de 2016.
- HAMBLIN, A. P. Filter-paper method for routine measurement of field water potential. **Journal of Hydrology**, v. 53, n. 3–4, p. 355–360, 1981.
- HILF, J. W. **An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils**. 109p. Thesis (PhD) - University of Colorado, 1956.
- HILLEL, D. **Soil Water - Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971.
- HOYOS, L. R.; SUESCÚN-FLOREZ, E. A.; PUPPALA, A. J. Stiffness of intermediate unsaturated soil from simultaneous suction-controlled resonant column and bender element testing. **Engineering Geology**, v. 188, p. 10–28, 2015.
- IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; VANDEWALLE, B.; REES, J.; ZOUBEK, G. L. Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures. **Biological Systems Engineering: Papers and Publications. Paper 332.**, v. 783, n. February, p. 1–14, 2014.
- JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. **A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to “collapse” of grain structure**. VII REG. CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Anais...**Durban: 1975
- KALANTARI, B. Foundations on collapsible soils: a review. **Proceedings of the ICE-Civil Engineering**, v. 166, n. 2, p. 57–63, 2013.
- LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1106–1117, 1997.
- LESSA, M. A. DE S. **Influência De Índices Pluviométricos Na Umidade De Solos**

- Tropicais Como Indicador Da Sucção Aplicado À Fundações.** 213p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2005.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** 2. ed. Brasil: EDUSP, 2012.
- LUTENEGGER, A. J.; SABER, R. T. Determination of Collapse Potential of Soils. **ASTM Geotechnical Testing Journal**, v. 11, n. 3, p. 173–178, 1988.
- MACHADO, S. L. **Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro com sucção controlada.** 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.
- MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados.** 201p. - Tese (Livre-docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2005.
- MARSHALL, T. J.; HOLMES, J. W.; ROSE, C. W. **Soil Physics.** 3. ed. Cambridge, United Kingdom: The Press Syndicate of The University of Cambridge, 1996.
- MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site. In: Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, Tex. 1984. p. 12-14. **Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, Texas**, p. 12–14, 1984.
- MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. **SPE Formation Evaluation**, v. 2, n. 4, p. 599–608, 1987.
- MOSS, R. E. S.; HOLLENBACK, J. C.; NG, J. **Spatial Variability of Levees as Measured Using the CPT.** 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. **Anais...**Huntington Beach, CA, USA: 2010
- MOTA, N. M. B. **Ensaio avançados de campo na argila porosa não saturada de Brasília:**

- interpretação e aplicação em projetos de fundação.** 335p. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2003.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995.
- OLDECOP, L. A.; ALONSO, E. E. A model for rockfill compressibility. **Géotechnique**, v. 51, n. 2, p. 127–139, 2001.
- 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, 2000.
- RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 61–76, 2003.
- REGINATTO, A. R.; FERRERO, J. C. **Colapse Potential of soil and soil-water chemistry.** International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Anais...Moscow: v2.2, p 177-183, 1973.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985.
- REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; VILLAGRA, M. M. Estimativa De Fluxos de Água em Solos Não Saturados. **Bragantia, Campinas**, v. 52, n. 1, p. 83–87, 1993.
- RICHARDS, L. A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. **J. Agric. Res**, v. v. 36, n. n. 12, p. 719–742, 1928.
- RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Géotechnique**, n. 43, p. 321–324, 1993.
- ROCHA, B. P. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados através de**

- ensaios de campo**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017 (*em andamento*).
- RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. 262p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- ROMAGNOLI, C.; KOKELAAR, P.; CASALBORE, D.; CHIOCCI, F. L. Lateral collapses and active sedimentary processes on the northwestern flank of Stromboli volcano, Italy. **Marine Geology**, v. 265, n. 3–4, p. 101–119, 2009.
- SOTO, M. A. A. **Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos não Saturados**. 206p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.
- SOTO, M. A. A.; VILAR, O. M. **Desempenho de um tensiômetro de alta capacidade na medição da sucção de solos não saturados**. XIII COBRAMSEG. **Anais...Curitiba - PR**: 2006
- TARANTINO, A.; MONGIOVÌ, L. Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction. **Géotechnique**, v. 53, n. 1, p. 137–141, 2003.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. L.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.
- VILAR, O. M. **Aspectos do comportamento colapsível de solos compactados**. 110p. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996.
- VILAR, O. M.; RODRIGUES, J. E.; NOGUEIRA, J. B. **Solos colapsíveis: um problema para a engenharia de solos tropicais**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em

Engenharia. **Anais**...Rio de Janeiro: 1981

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, 2011.

VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M. T.; CISLEROVA, M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. **Advances in Water Resources**, v. 24, n. 2, p. 133–144, 2000.

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.

WILLIAMS, J; PREBBLE, R. E.; WILLIAMS, W. T.; HIGNETT, C. T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. **Soil Research**, v. 21, n. 1, p. 15–32, 1983.