

NATÁLIA MEDEIROS DE OLIVEIRA

**EFEITO DA ESTRUTURA NA COMPRESSIBILIDADE DE UM  
SOLO RESIDUAL MADURO NÃO SATURADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA - MG  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

Oliveira, Natália Medeiros de, 1986-  
O48e Efeito da estrutura na compressibilidade de um solo residual  
2018 maduro não saturado / Natália Medeiros de Oliveira. – Viçosa,  
MG, 2018.  
xi, 61 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 56-61.

1. Solos - Compactação. 2. Mecânica do solo.  
3. Deformações e tensões. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil. II. Título.

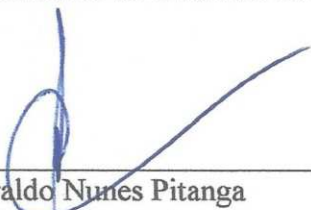
CDD 22. ed. 624.151363

NATÁLIA MEDEIROS DE OLIVEIRA

**EFEITO DA ESTRUTURA NA COMPRESSIBILIDADE DE UM  
SOLO RESIDUAL MADURO NÃO SATURADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2018.



---

Heraldo Nunes Pitanga  
(Coorientador)



---

Roberto Lopes Ferraz



---

Dario Cardoso de Lima  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que nunca tem me faltado quando necessito e me dá forças para jamais desistir dos meus objetivos.

Ao meu pai, Luiz Antônio, e minha mãe, Lourdes, pelo amor, paciência e apoio que sempre me dedicaram, nunca me negando ajuda quando precisei e sempre me incentivando.

Ao professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pela confiança no meu trabalho, paciência, dedicação, empenho, constante prontidão e boa vontade em fazer esta pesquisa ter sucesso e, acima de tudo, pela amizade.

Ao meu orientador, professor Dario Cardoso de Lima, pela oportunidade, confiança, sapiência e honestidade, qualidades que foram fundamentais para a minha formação acadêmica e pessoal na UFV.

Ao meu coorientador, professor Heraldo Nunes Pitanga, e ao professor Roberto Lopes Ferraz, pelo apoio, disposição e auxílio na condução dos trabalhos.

Aos técnicos do laboratório Jorge, Giovani e Leonício, pela excelente convivência e amizade e, sobretudo, ao Anderson e Marcelo, por todo o auxílio na reestruturação da Sala de Solos Não Saturados do LEC e pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao professor Raphael Bragança Alves Fernandes, do Departamento de Solos, por ter disponibilizado toda a infraestrutura de seu laboratório para esta pesquisa.

Ao sempre amigo Arlan, que me incentivou, apoiou e deu forças desde o início dessa jornada.

Aos que duvidaram que seria possível, por terem instigado ainda mais minha vontade de vencer.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fenômeno de Capilaridade.....	04
Figura 2 – Representação esquemática do Funil de Haines.....	09
Figura 3 – Representação esquemática câmara de pressão de Richards .....	11
Figura 4 – Curvas de Retenção Típicas.....	11
Figura 5 - Curva característica de um solo para o processo de umedecimento e secagem...	12
Figura 6 - Capilaridade produzindo pressão de contato entre as partículas.....	14
Figura 7 - a) Grãos de areia sendo agregados por partículas de argila. b) Forças de repulsão entre moléculas perturbando estrutura metaestável.....	14
Figura 8 - Tipos de microfábricas de solos colapsíveis e expansivos.....	15
Figura 9 - Desenho esquemático da célula (Vieira, 2006).....	19
Figura 10 - a) Caminhos de tensões para carregamento isotrópico (p) e sucção (s) constantes; b) Superfícies de escoamento SI e LC.....	20
Figura 11 – Relação entre tensões de escoamento $p_0$ e $p_0^*$ .....	21
Figura 12 – a) Solo com $\lambda(s)$ decrescente com o aumento da sucção, conforme modelo original de Alonso; b) Solo com $\lambda(s)$ crescente com o aumento da sucção.....	24
Figura 13 – (a) Caminho de tensões e (b) Curvas de compressibilidade (v,p) para definir a equação da superfície de escoamento LC.....	25
Figura 14 – Parâmetros $N_f$ e $p_f$ no espaço (v, p).....	27
Figura 15 – Parâmetros $N_f$ e $p_f$ para $\lambda(s)$ crescente.....	28
Figura 16 – Parâmetros $N_f$ e $p_f$ para $\lambda(s)$ decrescente.....	29
Figura 17 – Solo depositado no molde de pvc.....	33
Figura 18 – Tudo de PVC erguido pelo suporte de madeira, com a membrana de latex presa ao top cap e ao disco por oringues.....	34
Figura 19 – Amostra sobre o berço de pvc.....	34
Figura 20 – Amostra dentro da câmara de compressão hidrostática com a base conectada ao topo por uma mangueira permitindo a drenagem.....	35
Figura 21 – Aproveitamento da parte central da Amostra 1.....	35
Figura 22 – Moldagem de um corpo de prova da Amostra 1.....	36
Figura 23 – Esquema para preparação das amostras.....	36
Figura 24 – Corte do molde de pvc.....	37

Figura 25 – Amostra reconstituída edometricamente.....	37
Figura 26 – Equipamentos de determinação da curva característica de retenção de água no solo.....	38
Figura 27 – Aparato montado para saturação dos corpos de prova.....	36
Figura 28 – Organização e reestruturação do laboratório.....	42
Figura 29 – Detalhe dos novos painéis de fibra de vidro para controle de pressão, medidores de volume e circulação de água.....	42
Figura 30 – Curva granulométrica do solo estudado.....	43
Figura 31 – Curva de compactação na energia Proctor normal e curva obtida por semelhança geométrica a partir do ponto ( $\gamma_d$ ; $w_{ot} - 2$ ).....	44
Figura 32 – Curvas de retenção obtidas para as Amostras 1 e 2.....	45
Figura 33 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional.....	47
Figura 34 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 1 (Método A).....	47
Figura 35 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 1 (Método A) para sucção de 100 kPa.....	48
Figura 36 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 1 (Método B).....	49
Figura 37 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 2.....	50
Figura 38 – Resultados da Amostra 1 (Método A) com Amostra 2 (Método B).....	51
Figura 39 – Resultados da Amostra 1 (Método B) com Amostras 2 (Método B).....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de medida de sucção .....	07
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo.....	43
Tabela 3 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio de adensamento unidimensional.....	46
Tabela 4 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método A).....	47
Tabela 5 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método A) para sucção de 100 kPa.....	48
Tabela 6 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método B).....	49
Tabela 7 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 2.....	49
Tabela 8 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada das Amostras 1 (Método A) e 2 (Método B).....	50
Tabela 9 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada das Amostras 1 (Método B) e 2 (Método B).....	51
Tabela 10 – Valores de $\sigma'_{vm}$ , e das Amostras 1 e 2 com sucção imposta em trajetória de secagem.....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\Delta P$  – diferença de pressões atuantes no contato das fases líquida e gasosa
- $T_s$  - tensão de superfície
- $R_s$  - raio de curvatura da membrana contráctil
- $h_c$  - altura de equilíbrio
- $r$  - raio do tubo de vidro
- $\rho_w$  - massa específica da água
- $g$  - aceleração da gravidade
- $\alpha$  – ângulo entre a membrana contráctil e a parede do tubo
- $S_t$  - sucção total
- $s$  - sucção matricial
- $S_o$  - sucção osmótica
- $u_a$  - Pressão do ar
- $u_w$  - Pressão da água
- $c_v$  - Coeficiente de adensamento
- $N(s)$  - volume específico para  $p = p^c$
- $N_f$  - volume específico para a qual convergem as curvas ( $v, p$ )
- $\lambda(s)$  - parâmetro elastoplástico de compressão do solo em função da sucção  $s$
- $p^c$  - tensão de referência para a qual  $v = N(s)$
- $p_0$  - tensão isotrópica de pré-adensamento do solo não saturado com sucção  $s$
- $p_0^*$  - tensão isotrópica de pré-adensamento do solo saturado
- $P_{atm}$  - pressão atmosférica
- $\lambda(0)$  - inclinação da reta virgem para condição saturada
- $\lambda(s)$  - inclinação da reta virgem para um determinado valor de sucção  $s$
- $\lambda(\infty)$  – inclinação da reta virgem para sucção tendendo ao infinito
- $\kappa$  – parâmetro de compressão elástica
- $r$  - parâmetro de máxima rigidez do solo
- $\beta$  - parâmetro positivo que controla a taxa de variação da rigidez com a sucção
- $\alpha$  – parâmetro adimensional que comanda a forma da LC

LC – curva de escoamento definida pela tensão de escoamento isotrópica em diferentes valores de sucção – “Load Colapse”

SI – curva de escoamento definida pela máxima sucção experimentada pelo solo – “Suction Increase”

$\chi$  - parâmetro que controla a rigidez com a sucção para condição elástica.

$\rho$  - massa específica

$\gamma_d$  - massa específica aparente seca

$\rho_s$  - massa específica dos sólidos

$p$  - tensão média líquida

$\sigma_1$  - tensão principal maior

$\sigma_2$  - tensão principal intermediária

$\sigma_3$  - tensão principal menor

$\sigma_m$  - tensão total média

$v$  - volume específico

$S_r$  - grau de saturação

LL - limite de liquidez

LP - limite de plasticidade

$w$  – teor de umidade

$d\varepsilon_{vp}$  - incremento de deformação volumétrica total devido ao carregamento da tensão isotrópica

$d\varepsilon_{vp}^e$  - incremento de deformação volumétrica elástica devido ao carregamento da tensão isotrópica

$d\varepsilon_{vp}^p$  - incremento de deformação volumétrica plástica devido ao carregamento da tensão isotrópica

$d\varepsilon_{vs}$  – incremento de deformação volumétrica total devido ao carregamento da sucção

$d\varepsilon_{vs}^e$  – incremento de deformação volumétrica elástica devido ao carregamento da sucção

$d\varepsilon_{vs}^p$  – incremento de deformação volumétrica plástica devido ao carregamento da sucção

$dp$  – incremento da tensão isotrópica

$dp_0$  – incremento da tensão de pré adensamento isotrópica para uma sucção  $s$

$dp_0^*$  – incremento da tensão de pré adensamento isotrópica para condição saturada

$ds_0$  – incremento da sucção máxima

## RESUMO

OLIVEIRA, Natália Medeiros, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Efeito da estrutura na compressibilidade de um solo residual maduro não saturado**. Orientador: Dario Cardoso de Lima. Coorientador: Heraldo Nunes Pitanga.

O principal objetivo deste trabalho foi verificar o efeito combinado da estrutura e da sucção sobre a compressibilidade de um solo residual maduro predominantemente argiloso no estado não saturado. Para criação de estruturas diferentes neste solo, as amostras foram reconstituídas estaticamente com mesmo peso específico aparente seco, mas em diferentes teores de umidade, por reconstituição hidrostática (no ramo seco da curva de compactação) e por reconstituição edométrica (no ramo úmido da curva de compactação). Visando a identificação da existência dessas diferentes estruturas, preliminarmente, foram realizados ensaios de adensamento unidimensional sobre as amostras preparadas nos ramos seco e úmido. Destes ensaios, a ocorrência de colapso com a inundação dos corpos de prova e a diferença nos valores da tensão de pré-adensamento evidenciaram a formação de estruturas diferentes entre as amostras (ramo seco, com colapso, e ramo úmido, sem colapso). Adicionalmente, com o objetivo de corroborar a existência de estruturas diferentes nas amostras reconstituídas hidrostaticamente e edométricamente, determinaram-se as curvas de retenção de água no solo em estudo, utilizando-se as técnicas da mesa de tensão e câmara de pressão. Os diferentes comportamentos apresentados nas curvas características obtidas comprovam que as amostras apresentavam estruturas diferentes. Buscou-se avaliar, para estas amostras, a adequação de um modelo constitutivo elastoplástico, com base nos modelos de Alonso et al., Wheeler e Sivakumar e Futai, capaz de simular o comportamento tensão-deformação deste solo compactado através de ensaios edométricos com sucção controlada. Verificou-se que os modelos de Wheeler e Sivakumar e Futai, em geral, ajustaram-se melhor aos resultados experimentais das duas amostras.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Natália Medeiros, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Effect of structure on the compressibility of an unsaturated mature residual soil.** Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisor: Heraldo Nunes Pitanga.

The main objective of this research was to verify the combined effect of the structure and suction on the compressibility of a clayey unsaturated mature residual soil. The soil samples were statically compacted with the same apparent dry specific weight, but at different values of water content, by hydrostatic compression (in the dry branch of the soil compaction curve) and oedometric compression (in the wet branch of the soil compaction curve) to create different structures. One-dimensional consolidation tests performed on both samples allowed to ensure the existence of different structures. The occurrence of collapse with the flood of specimens prepared from both samples and the difference in values of pre-consolidation stresses showed the formation of different structures in the soil samples (sample at the dry side of optimum moisture content showing collapse and sample at the wet side of optimum moisture content without collapse). It was also determined the samples water retention curves using the techniques of the tension table and pressure chamber to corroborate the existence of different structures. The different behaviors displayed in these curves also supported that both soil samples presented different structures. Finally, it was evaluated the adequacy of a plastic constitutive model, as the models of Alonso et al., Wheeler and Sivakumar and Futai, to simulate the stress-strain behavior of these soil samples through suction controlled oedometer tests. The conclusion was that the models of Wheeler and Sivakumar and Futai, in general, better adjusted to the experimental results of the two analyzed samples.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. JUSTIFICATIVA.....	01
1.2. OBJETIVOS.....	02
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1. FASES CONSTITUINTES DE SOLOS NÃO SATURADOS.....	03
2.2. SUCCÃO.....	05
2.3. MÉTODOS DE MEDIDA DA SUCCÃO.....	06
2.3.1. TÉCNICA DA MESA DE TENSÃO.....	08
2.3.2. TÉCNICA DATRANSLAÇÃO DE EIXO.....	09
2.3.3. TÉCNICA DA CÂMERA DE PRESSÃO OU CÂMARA DE RICHARD	10
2.4. CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO.....	11
2.5. SOLOS COLAPSÍVEIS.....	13
2.6. ENSAIOS DE COMPRESSÃO EDOMÉTRICOS.....	16
2.6.1. ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAIS.....	16
2.6.2. ENSAIO EDOMÉTRICOS COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA.....	17
2.6.3. ENSAIOS EDOMÉTRICOS COM SUCCÃO CONTROLADA.....	18
2.7. MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SOLOS NÃO SATURADOS.....	19
2.7.1. INTRODUÇÃO.....	19
2.7.2. MODELO DE ALONSO, et al. (1990).....	20
2.7.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	20
2.7.2.2 DEFORMAÇÕES E LEIS DO ENDURECIMENTO.....	23
2.7.3. MODELO DE WHEELER E SIVAKUMAR (1995).....	24
2.7.4. MODELO DE FUTAI (1997).....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1. MATERIAIS.....	31
3.2. MÉTODOS.....	31
3.2.1. ORGANIZAÇÃO E REESTRUTURAÇÃO DO LABORATÓRIO.....	31
3.2.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO NA AMOSTRA COLETADA.....	31

3.2.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	32
3.2.4. DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	38
3.2.5. ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL.....	39
3.2.6. ENSAIO EDOMÉTRICO COM SUCCÃO CONTROLADA.....	40
4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	42
4.1. ORGANIZAÇÃO E REESTRUTURAÇÃO DO LABORATÓRIO.....	42
4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DE COMPACTAÇÃO...	43
4.3. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	44
4.4. ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAIS.....	46
4.5. ENSAIOS EDOMÉTRICOS COM SUCCÃO CONTROLADA.....	47
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	53
5.1. CONCLUSÕES.....	53
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

## **1. INTRODUÇÃO**

Considerando a compressibilidade e a análise das relações tensão-deformação de solos não saturados, autores como Fredlund e Morgenstern (1977), Alonso et. al. (1990) e Leroueil e Barbosa (2000), dentre outros, se propuseram a estudar a influência da parcela correspondente à sucção controlada em laboratório nas relações tensão-deformação e na compressibilidade de diversos tipos de solo.

Os modelos constitutivos têm sido desenvolvidos com o intuito de representar as diferentes características apresentadas pela grande variedade dos tipos de solos. Não há um único modelo que consiga ser aplicado a todos os tipos de solos. No caso específico dos solos não saturados, é preciso que o modelo matemático consiga representar a variação da deformabilidade e da resistência com a sucção (SILVA FILHO; FUTAI, 2015).

Na grande maioria, os modelos constitutivos foram validados por dados práticos, sendo que algumas vezes apresentaram comportamentos antagônicos. As causas dessas diferenças ainda não foram explicadas por nenhuma das teorias. Uma das possíveis razões seria o arranjo espacial das partículas (estrutura).

Nesta linha de pesquisa, o presente trabalho direciona-se à análise da influência combinada da estrutura e da sucção na compressibilidade de um solo residual maduro da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, caracterizado granulometricamente como uma argila areno-siltosa.

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

A Mecânica dos Solos tradicional, 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 comuns em países de clima tropical, como o Brasil (TEIXEIRA et al., 2000), o que reflete a importância do tema abordado na presente pesquisa.

No Brasil, a grande maioria dos casos reais de obras de engenharia ocorre em solos não saturados, sendo que o não reconhecimento das particularidades do comportamento destes materiais pode gerar elevação no custo das obras geotécnicas. Nesse contexto, a presente pesquisa busca contribuir para o avanço da Mecânica dos Solos Não Saturados.

A determinação das propriedades de sucção torna-se fundamental para o conhecimento e soluções de problemas relativos ao comportamento hidráulico ou mecânico dos solos não saturados. Apresentam-se na literatura diferentes proposições de modelos de comportamento

tensão-deformação, embora baseados em dados experimentais não se tem o conhecimento do motivo pelo qual os solos apresentaram comportamentos completamente opostos, ora aumento, ora diminuição da rigidez com o aumento da sucção. Dentre as possíveis causas, e que ainda não foi estudada, destaca-se o arranjo espacial das partículas (estrutura). Sendo assim, é desejável que pesquisas sejam feitas no sentido de permitir a compreensão deste comportamento.

Complementarmente, busca-se com esta pesquisa aumentar o banco de dados relativos ao comportamento de solos não saturados da Zona da Mata Norte de Minas Gerais.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente estudo foi analisar a influência da estrutura na compressibilidade de um solo tropical não saturado, caracterizado geotecnicamente como uma argila areno-siltosa.

Para cumprir o objetivo principal, relacionam-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ produzir amostras com pesos específicos aparentes secos iguais e estruturas diferentes, utilizando-se procedimentos reconstituição hidrostática e reconstituição edométrica;
- ✓ analisar as curvas características de retenção de água e adensamento unidimensional a fim de certificar a obtenção de amostras com estruturas diferentes;
- ✓ investigar o efeito da histerese sobre o comportamento de compressibilidade de um solo com sucção controlada;
- ✓ analisar a compressibilidade das amostras reconstruídas do solo em estudo a partir de resultados de ensaios edométricos com sucção controlada;
- ✓ averiguar se as diferenças produzidas na estrutura do solo interferem no comportamento da curva de compressão com sucção controlada, conferindo qual dos modelos elastoplásticos [(Alonso et al. (1990), Wheeler e Sivakumar (1995) e Futai (1997)] melhor representam cada amostra.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na sequência, apresentam-se assuntos relevantes sobre solos não saturados de interesse para o presente estudo.

### 2.1 FASES CONSTITUINTES DE SOLOS NÃO SATURADOS

Teoricamente, definem-se solos não saturados como aqueles que têm um grau de saturação menor que um. Nestas condições, os solos não saturados são constituídos de um sistema trifásico (partículas de solo, água e ar), sendo o ar o responsável pela variação do comportamento destes materiais quando comparados aos solos ditos saturados. Fredlund e Morgenstern (1977) sugeriram ainda uma quarta fase independente, interface ar-água, denominada membrana contrátil. Contudo, quando os solos não saturados são analisados em termos da relação massa-volume, esta última fase pode ser desprezada, já que o volume da membrana contrátil é considerado desprezível, quando comparado ao volume das demais fases, e sua massa pode ser incorporada à massa da água.

A formação da membrana contrátil se dá pela diferença de pressões atuantes nessa interface. Para equilibrar essas forças, as moléculas de água superficiais são atraídas para o interior da massa líquida, fazendo com que a interface tenha uma concavidade para o ar (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Segundo esses autores, a tensão superficial faz com que a interface água-ar comporte-se como uma membrana elástica, que exerce uma força de tração que interage com as partículas sólidas presentes no solo. Essa força de tração surge devido às interações intermoleculares que atuam dentro da membrana contrátil, o que influencia no comportamento mecânico do solo.

A diferença de pressões atuantes no contato das fases líquida e gasosa é função da tensão de superfície e do raio de curvatura da membrana contrátil, como mostra a Equação 1.

$$\Delta P = \frac{2T_s}{R_s} \quad (1)$$

Em que:

$\Delta P$  – diferença de pressões atuantes no contato das fases líquida e gasosa;

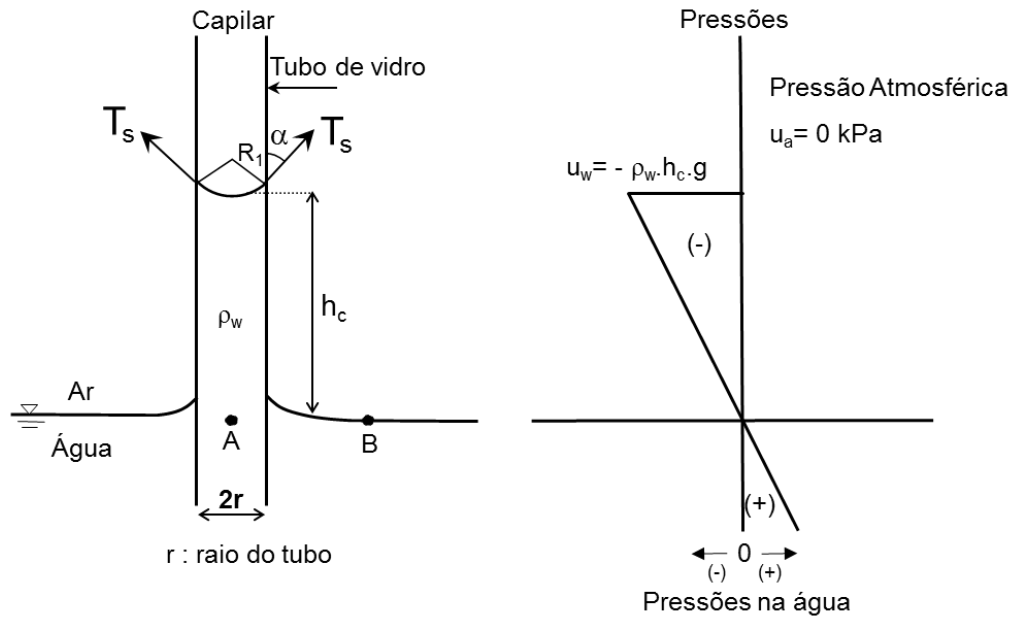
$T_s$  – tensão de superfície;

$R_s$  – raio de curvatura da membrana contrátil.

O solo não saturado sofre efeito de capilaridade, o que pode ser visualizado quando um tubo de vidro de pequeno diâmetro é colocado em contato com uma superfície livre da água.

Devido ao contato vidro-água-ar e à tensão superficial, a água sobe até atingir uma altura  $h_c$  (altura de equilíbrio). Essa altura pode ser determinada, sabendo-se que o peso da água contida no tubo é igual à tensão superficial que mantém a água nessa posição. A Figura 1 ilustra o fenômeno de capilaridade, sendo  $\alpha$  o ângulo entre a membrana contrátil e a parede do tubo,  $\rho_w$  a massa específica da água e  $r$  o raio do tubo de vidro.

Figura 1 – Fenômeno de Capilaridade.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993).

A partir da condição de equilíbrio da coluna de água mostrada na Figura 1, tem-se:

$$\pi \cdot r^2 \cdot h_c \cdot \rho_w \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot T_s \cdot \cos\alpha \rightarrow h_c = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos\alpha}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (2)$$

Em que:

$h_c$  – altura de equilíbrio;

$r$  – raio do tubo de vidro;

$T_s$  – tensão de superfície;

$\rho_w$  – massa específica da água;

$g$  – aceleração da gravidade;

$\alpha$  – ângulo entre a membrana contrátil e a parede do tubo.

## 2.2 SUCCÃO

Entende-se por sucção 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. Quando ocorre fluxo da água livre para dentro de um solo, ela poderá ser retida ou adsorvida por ele. Para desprender essa água adsorvida, é necessária a aplicação de uma força externa que vai de encontro às forças de retenção do solo. Esta energia aplicada por unidade de volume de água é a sucção (VILAR; GAIOTO, 1994).

A distribuição e a geometria dos vazios do solo preenchidos por água, bem como a sucção gerada, são parâmetros importantes para entender o comportamento do solo não saturado. Há aumento da coesão como aumento da poropressão negativa da água existente nos vazios, com consequente aumento da resistência ao cisalhamento do solo. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a poropressão negativa da água que age nos solos não saturados é a principal diferença entre estes e os solos saturados, o que ocorre na porção acima do nível d'água. Logo, o estudo de solos não saturados está ligado a fenômenos de capilaridade e sucção, sendo que as forças de sucção que retêm a água no solo são denominadas potenciais. Neste contexto, o potencial total é a soma das parcelas de potencial de pressão, matricial osmótico e gravitacional (BAVER et al. ,1972).

O potencial de pressão (trabalho resultante da pressão manométrica do ar dos vazios do solo) e o potencial gravitacional (função da aceleração da gravidade, massa específica e altura da água) são desconsiderados por muitos autores, por representarem uma parcela pequena em relação aos dois outros potenciais citados. Assim, o potencial ou sucção total associa-se, predominantemente, às sucções osmótica e matricial.

A sucção matricial relaciona-se com as propriedades físicas da matriz de poros do material sólido ao arranjo estrutural do solo, e a sucção osmótica, com a concentração de íons, onde a água se desloca de regiões com soluções menos concentradas para as mais concentradas. Assim, a sucção total de um solo pode ser determinada com o emprego da Equação 3.

$$S_t = s + S_o \quad (3)$$

Em que:

$S_t$  – sucção total;

$s$  – sucção matricial;

$S_o$  – sucção osmótica.

Para Marinho (2005), as variações da sucção osmótica são, em geral, menos significativas do que as da sucção matricial, embora sejam de grande valia, por exemplo, em estudos de contaminação de solos. No contexto da sucção matricial, Edil et al. (1981) verificaram que o

comportamento mecânico do solo não saturado é afetado, basicamente, por esta componente, com base em resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada.

Segundo a Equação 4, a sucção matricial é a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção, sendo expressa como a diferença entre a pressão do ar e pressão da água.

$$s = u_a - u_w \quad (4)$$

Em que:

s – Sucção matricial;

$u_a$  – Pressão do ar;

$u_w$  – Pressão da água.

Fredlund e Xing (1994) concluíram que a sucção matricial e a total podem ser consideradas equivalentes, para valores de sucção acima de 1500kPa.

### **2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA SUCCÃO**

A determinação do potencial matricial ou sucção (em termos de pressão) geralmente envolve a obtenção da relação sucção versus teor de umidade (curva de retenção de água no solo) realizada em amostras de laboratório, assim como a medição de sucção numa dada situação em campo ou em amostras no laboratório (SOTO, 2004). Segundo este autor, as medidas de sucção, tanto em laboratório como em campo, esbarram numa série de dificuldades experimentais e, comumente, deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio com o intuito de conhecer o potencial dentro de uma faixa ampla, que seja suficiente para utilização prática.

Vilar (2000) e Soto (2004) sintetizam, comparam e reúnem as principais características dos métodos de medida e controle de sucção, adicionando algumas referências básicas acerca deles, como se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos de medida de sucção

Método	Tipo	Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
Funil de Pedra Porosa	Laboratorial	Matricial	0 a 70	- Para baixas sucções, onde a precisão das panelas é limitada. - Sucção aplicada diretamente à amostra.
Câmara de Pressão	Laboratorial	Matricial	0 a 1500	- Emprega a técnica de translação de eixos. - A capacidade depende da pedra porosa (pressão de entrada de ar). - Continuidade da fase ar.
Membrana de Pressão	Laboratorial	Matricial/ Total	Até 10000	- Emprega a técnica de translação de eixos. - Emprega membrana de celulose (seletividade).
Tensiômetro	Laboratorial <i>/In situ</i>	Matricial	0 a 70	- Tempos de resposta em função da condutância da pedra porosa. - Tensiômetros Osmóticos. - Tensiômetros de alta capacidade (medem pressões abaixo de -1 atm), tirando partido da elevada resistência à tração da água.
Papel Filtro	Laboratorial	Matricial/ Total	Todos os valores	- Necessita precisão máxima na pesagem. - A determinação da sucção depende do contato com o solo (garantir o contato parece problemático). - Calibração, fungos.
Blocos Porosos	Laboratorial <i>/In situ</i>	Matricial	10 a 1000	- Condutividade elétrica de materiais porosos (gesso, fibra de vidro, etc). - Histerese pronunciada; mais sensível às altas sucções. - Longo tempo de resposta. - Fácil deterioração do material;
Psicrômetros	Laboratorial <i>/In situ</i>	Osmótica	100 a 8000	- Mais recomendado para laboratório. - Depende de rigoroso controle da temperatura, principalmente nas baixas sucções. - Sucção osmótica: mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária).

Tabela 1. Métodos de medida de sucção – Continuação

Sensores de Condutividade Térmica	Laboratorial	Matricial	0 a 400	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cápsula cerâmica contendo sensor de temperatura e mini-aquecedor.</li> <li>- Condutividade térmica do bloco varia com a sua umidade.</li> <li>- Equilíbrio solo – cápsula (bloco) &gt; sucção matricial medida a partir da condutividade</li> </ul>
Extrato de Solução do Solo	Laboratorial	Osmótica	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condutividade do extrato.</li> <li>- Concentração de solutos.</li> <li>- Extrato e psicrômetro (resolução não satisfatória).</li> </ul>
Equilíbrio da Fase Vapor	Laboratorial	Total	Toda a faixa > 400	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solução com concentração e umidade relativa conhecida.</li> <li>- Amostra de solo em dessecador sem contato com a solução; Equilíbrio demorado.</li> </ul>
Princípios Osmóticos	Laboratorial	Matricial	200 a 1600	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membrana de celulose para diálise.</li> <li>- Solução com concentração conhecida e umidade relativa conhecida.</li> <li>- Solução de PoliEtileno Glicol (PEG), peso molecular 20.000;</li> <li>- Útil para instalar e controlar sucção em ensaios.</li> </ul>

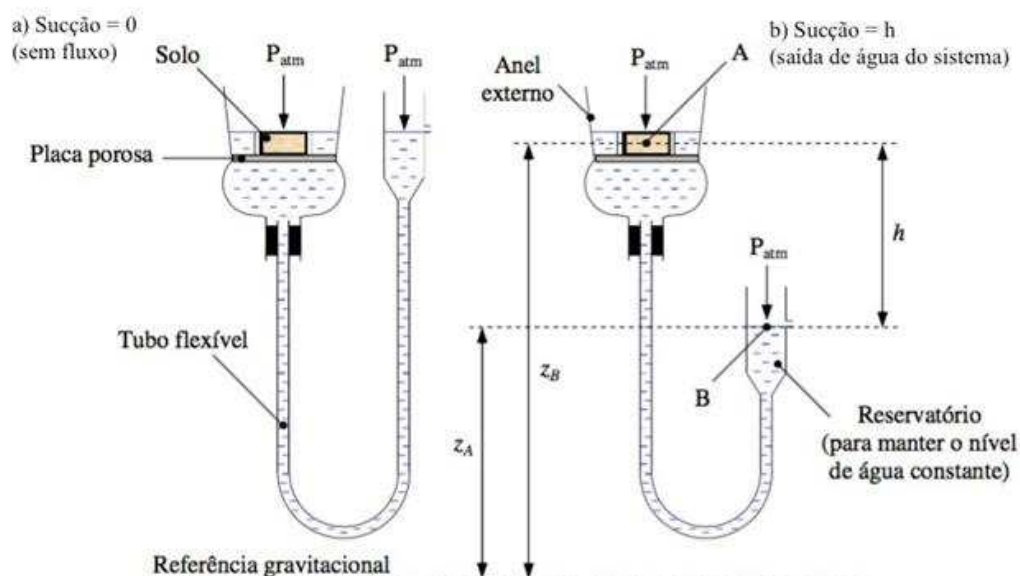
Fonte: Adaptado de Vilar (2000).

Serão apresentadas a seguir apenas as técnicas adotadas na pesquisa para a medição da sucção dos solos.

### 2.3.1 TÉCNICA DA MESA DE TENSÃO

Segundo Libardi (2012), um dos equipamentos empregados na determinação da retenção de água no solo em baixas tensões (até 10kPa) é a mesa de tensão (sucção). Oliveira (1968) propôs o uso da mesa onde a tensão é aplicada diretamente em camadas de areia muito finas, colocadas dentro de um recipiente. Este equipamento baseia-se no funil de Büchner, (Figura 2), adaptado por Haines (1930).

Figura 2 – Representação esquemática do Funil de Haines



Fonte: Libardi (2012)

A base desse método é o estabelecimento de um contato hidráulico entre o solo e um meio poroso, o qual possui poros tão pequenos que o solo permanece em estado de saturação até que uma sucção elevada (ou tensão) seja estabelecida (Townend et al., 2000).

A tensão pode ser aplicada por meio de uma coluna de água, de modo que o solo em contato com o meio poroso perde água de acordo com a tensão aplicada, ou seja, se a tensão for maior que o valor inicial da água presente no solo, ocorre a perda de água. O equilíbrio entre a amostra de solo e a tensão aplicada pode ser determinado pelo processo de pesagem, até que a amostra de solo atinja peso constante ou o fluxo da água cesse ou torne-se mínimo (Klute, 1986; Townend et al., 2000).

O tempo de equilíbrio de uma amostra de solo depende da natureza do solo, da altura da amostra e da tensão aplicada (Klute, 1986). Segundo Romano et al. (2002), se dois pesos consecutivos de uma amostra de solo não diferirem mais do que 0,1g, pode-se assumir que se atingiu o equilíbrio hidráulico.

### 2.3.2 TÉCNICA DE TRANSLAÇÃO DE EIXO

Ao executar ensaios de laboratórios em solos não saturados, medir e controlar a sucção são algumas das dificuldades encontradas. Neste contexto, a translação de eixos é uma das técnicas que possibilita a aplicação e o controle das poropressões negativas.

Sabendo que a pressão de água numa amostra de solo pode ser aumentada ao se aplicar uma pressão de ar na mesma (SCHOFIELD,1935) e que a sucção é a diferença entre a pressão de ar e a pressão da água dos poros do solo, Hilf (1956) desenvolveu a técnica de translação de eixos, que permite medir e controlar a sucção durante a execução de ensaios de laboratório. A técnica consiste na mudança do referencial de pressão (pressão atmosférica), ou seja, aumenta-se artificialmente a pressão do ar ( $u_a$ ) existente nos poros do solo. Admitindo-se que isto produz um aumento igual da pressão de água ( $u_w$ ), permanece a diferença ( $u_a - u_w$ ), ou seja, permanece a sucção e a pressão na água é aumentada, levando-a até valores mensuráveis (VILAR, 1997).

O emprego da técnica de translação de eixos exige que a fase gasosa seja contínua, para que não haja variação de volume ao se aplicar a pressão de ar. Outro fator importante é o tipo da pedra porosa utilizada. Para o emprego desta técnica, deve-se empregar placa porosa especial que permita o fluxo de água, porém não de ar, sendo que a sucção máxima a ser aplicada no ensaio depende da pressão de entrada de ar da placa porosa, que pode atingir até pressão de 1.500 kPa (SOTO, 2004).

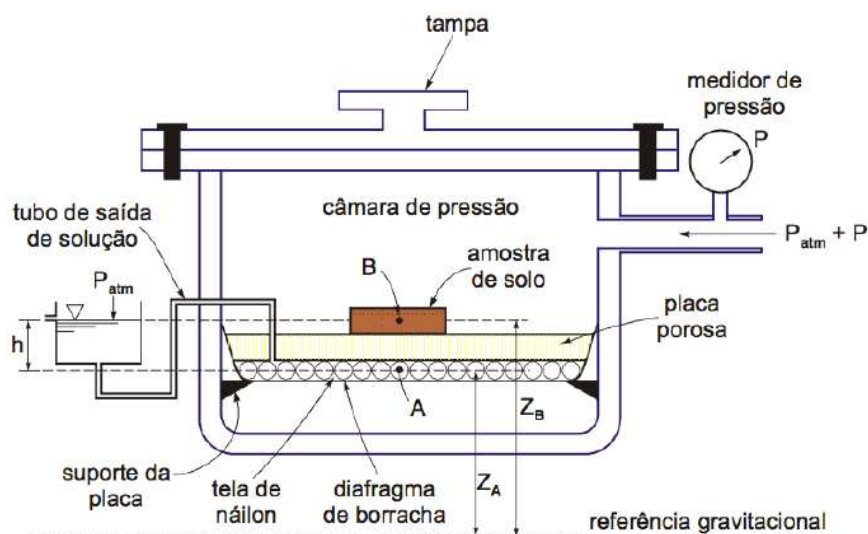
### **2.3.3. TÉCNICA DA CÂMARA DE PRESSÃO OU CÂMARA DE RICHARDS**

Segundo Libardi (2012), para valores de sucção entre 20 e 1500 kPa, pode-se completar a curva de retenção no laboratório utilizando-se a câmara de Richards. Esse equipamento funciona com base 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 ( $u_a - u_w$ ).

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 ( $u_a$ ) e atingindo, assim, a sucção desejada (VILAR, 1997). Na Figura 3, tem-se um modelo ilustrativo da câmara de Richards que usa a técnica de translação de eixos.

Em sua concepção, a câmara de Richards é um recipiente de paredes grossas, hermeticamente fechado e construído em ferro fundido, com uma placa porosa de alta pressão de entrada de ar que permite que a câmara seja pressurizada, impedindo-se a passagem de 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, à medida que a água vai sendo expulsa dos vazios do solo, a sucção ( $s$ ) da amostra tende a se equilibrar.

Figura 3 – Representação esquemática da câmara de pressão de Richards.

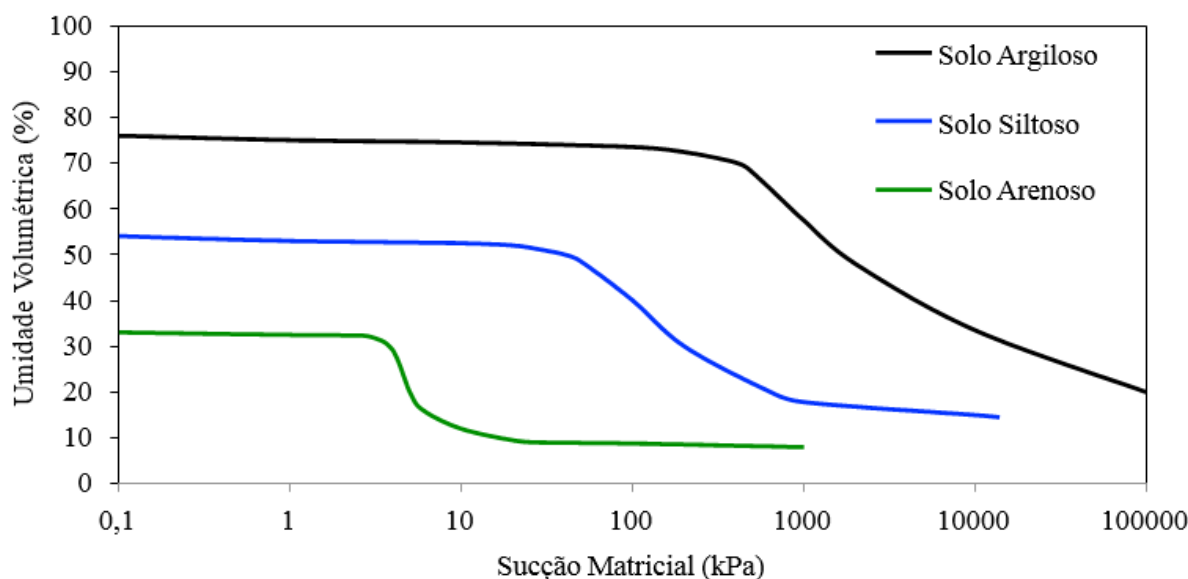


Fonte: Libardi (2012)

## 2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

A curva característica de retenção da água no solo, aqui denominada somente como curva característica, é uma relação entre o teor de umidade gravimétrico, o teor de umidade volumétrica ou o grau de saturação e a sucção matricial do solo em escala logarítmica (WILLIAMS, 1982). Na Figura 4, têm-se trajetórias típicas da curva de acordo com o tipo de solo: argiloso, silto e arenoso.

Figura 4 – Curvas de Retenção Típicas de Solos

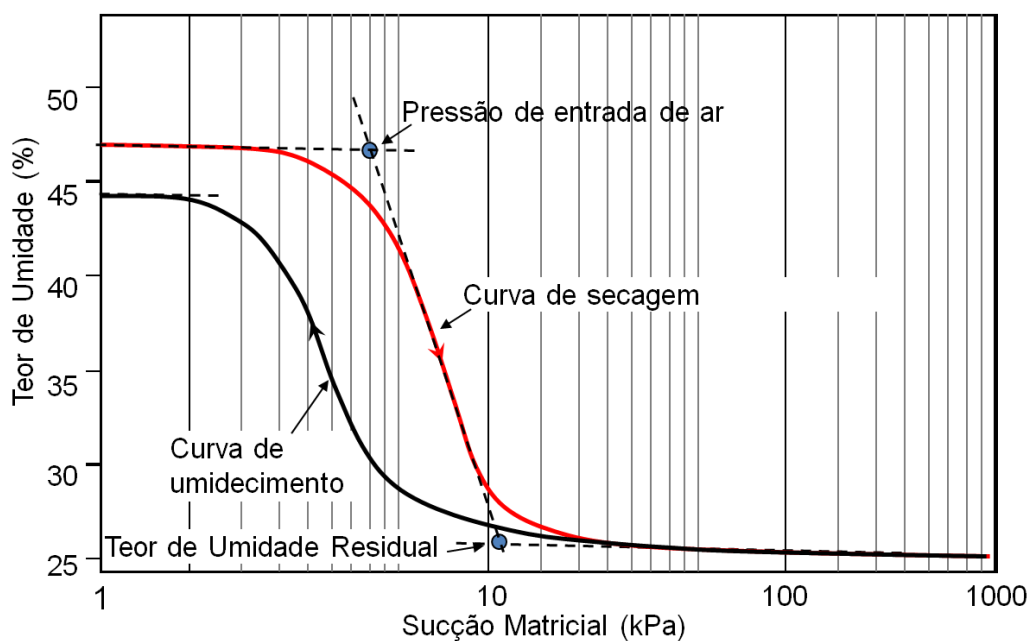


Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Na Figura 5, apresenta-se uma curva característica típica de solos siltosos (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Nessa figura, o valor da pressão de entrada de ar do solo é a sucção onde o ar começa a entrar nos seus poros; já o teor de umidade residual refere-se à pressão em que valores elevados de sucção são requeridos para remover alguma água adicional do solo. Nela, ilustra-se a forma usual de se determinar o teor de umidade residual, em que duas linhas tangentes são traçadas aos trechos intermediários aos pontos de inflexão na curva, determinando-se, na sua interseção, o teor de umidade residual.

Para um mesmo solo a curva de retenção pode descrever uma trajetória diferente em função do acréscimo ou decréscimo da sucção (processos de secagem e umedecimento). Assim, verifica-se que, num determinado solo, as trajetórias de secagem e umedecimento podem não coincidir para um mesmo valor de sucção, manifestando-se o fenômeno denominado de histerese (SOTO, 2004). A Figura 5 mostra a diferença das trajetórias por ambos processos.

Figura 5 - Curva característica de um solo para o processo de umedecimento e de secagem.



Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993).

Segundo Presa (1982), a histerese é causada pelos seguintes fatores: (i) geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais; (ii) influência do ângulo de contato solo-água que varia segundo o avanço ou recuo do menisco devido à rugosidade da superfície do grão; (iii) ocorrência de ar aprisionado nos poros, reduzindo o teor de umidade no processo de umedecimento; (iv) história de secagem e umedecimento do material; (v) liberação gradual do ar dissolvido na água.

Destaca-se que a curva característica pode ser usada para se estimar vários parâmetros descritos no comportamento dos solos não saturados, como, por exemplo, a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e o comportamento quanto à variação volumétrica (FREDLUND; RAHARDJO, 1993; VANAPALLI et al., 1999; LEONG; RAHARDJO, 1997; BARBOUR, 1998).

Segundo Vanapalli et al. (1999), as características do solo, tais como estrutura e histórico de tensões, influenciam na determinação da curva característica. Outros fatores, como agregações/cimentação, índices de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia e teor de umidade inicial (trajetória de umedecimento ou secagem), também as afetam.

Fredlund et al. (1993) evidenciam que a distribuição granulométrica do solo, também, é um fator que afeta a relação sucção-umidade. Normalmente, quanto maior a parcela da fração argila, maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção. Segundo Lopes (2006), isso se deve ao fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos, o que aumenta o efeito da capilaridade. Também, pode-se atribuir este efeito à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores do solo, o que implica num aumento das forças de adsorção.

A influência da mineralogia dos solos na retenção de água é significativa, principalmente, em solos argilosos. Isso porque os argilominerais presentes nesses solos apresentam forças de adsorção diferentes, que são afetadas pela natureza da superfície das partículas e pelos tipos de cátions trocáveis. Quanto menor o tamanho dos íons, maior é a camada de água adsorvida na superfície das partículas. Por isso, a esmectita retém mais água do que a caulinita, por exemplo. Também, atribui-se esse fato à maior superfície específica da esmectita (PRESA, 1982; JUCÁ, 1990; DE CAMPOS et al., 1992; LOPES, 2006).

Barbour (1998) avaliou a influência do teor de umidade de compactação de um solo argiloso na determinação da sua curva característica de retenção da água. Nota-se um aumento do valor de entrada de ar nos corpos de prova compactados no ramo seco, quando comparados ao do ramo úmido da curva de compactação. Segundo Bocking e Fredlund (1980), a sucção pode ser superestimada quando existe a presença de ar ocluso, e que a difusão do ar através da pedra porosa de alto valor de entrada de ar pode levar a uma subestimativa da sucção.

## **2.5 SOLOS COLAPSÍVEIS**

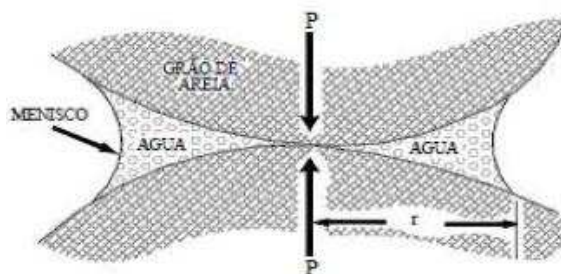
Uma característica dos solos tropicais porosos não saturados é a colapsibilidade. Os solos colapsíveis são aqueles que podem apresentar uma diminuição significativa de volume com o aumento do grau de saturação, sem que ocorra um aumento significativo das sobrecargas externas

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 em água. Em outras palavras, esses 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 (DUDLEY, 1970). Com o umedecimento do solo, a sucção diminui, devido à redução das forças de capilaridade e de adsorção, o que resulta no colapso.

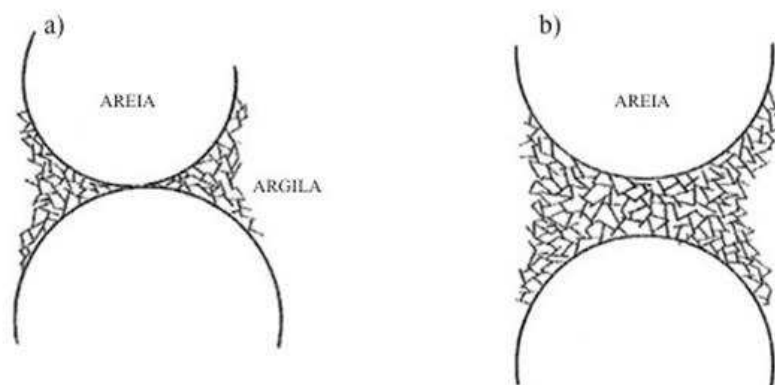
Dudley (1970) propôs alguns modelos representativos da estrutura metaestável dos solos colapsíveis, como se ilustram nas Figuras 6 e 7. De acordo com o autor, a metaestabilidade do solo pode ser mantida devido às forças de atração (ligações iônicas), onde, por exemplo, grãos maiores (grãos de areia) 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 7a, e quando a umidade aumenta, as concentrações iônicas diminuem e forças repulsivas entre as partículas perturbam o arranjo metaestável (Figura 7b), reduzindo a resistência temporária e resultando no fenômeno do colapso.

Figura 6 - Capilaridade produzindo pressão de contato entre as partículas.



Fonte: Dudley (1970).

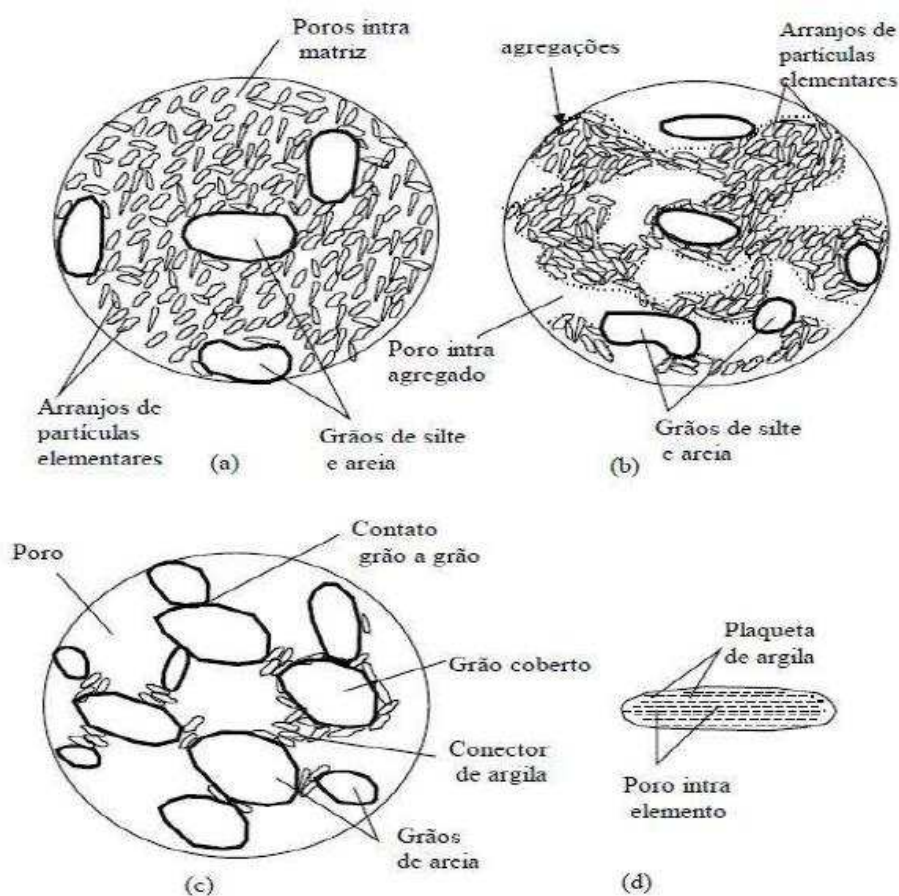
Figura 7- a) Grãos de areia sendo agregados por partículas de argila.  
b) Forças de repulsão entre moléculas perturbando estrutura metaestável.



Fonte: Dudley (1970).

Na Figura 8, Alonso et al. (1987) apresentam um sistema de classificação da microestrutura de solos colapsíveis e expansivos, com base nos arranjos de partículas elementares, aglomerações de partículas e espaços porosos.

Figura 8 – Tipos de microfábricas de solos colapsíveis e expansivos: (a) matriz argilosa integrada, predominantemente, por partículas elementares de argila e poucos grãos de silte ou areia; (b) microfábrica de uma argila composta predominantemente por agregações de arranjos de partículas elementares; (c) matriz arenosa ou siltosa com conectores argilosos entre grãos individualizados; e (d) arranjos de partículas elementares em configuração paralela.



Fonte: Alonso et al (1987).

O consenso geral é de que a tensão capilar é o principal fator que contribui para a resistência temporária de solos colapsíveis não saturados (DUDLEY, 1970). Entretanto, independentemente das ligações ou vínculos que mantêm essas estruturas, os solos susceptíveis ao colapso apresentam uma grande sensibilidade à ação da água, sendo o aumento do teor de umidade o mecanismo detonador ou o efeito gatilho no processo do colapso (CINTRA, 1998).

## **2.6 ENSAIOS DE COMPRESSÃO EDOMÉTRICOS**

Dentre as formas de realização dos ensaios edométricos, são descritos na literatura as seguintes:

- ✓ Ensaios onde o carregamento é aplicado no corpo de prova, por incrementos de carga, em estágios com duração geralmente de 24h (Ensaio de adensamento unidimensional);
- ✓ Ensaios onde o carregamento é aplicado de forma contínua no corpo de prova, respeitando-se determinados limites de velocidade para facilitar sua interpretação (Ensaio de compressão edométrica com velocidade de deformação controlada).

Quando se trata do estudo de solos parcialmente saturados, podem ser feitas adaptações nos equipamentos de forma a ter o controle da sucção durante a realização do ensaio. Com isso, pode-se acrescentar às duas modalidades de ensaios descrita, o ensaio de compressão edométrica com sucção controlada. Nas próximas seções será feita breve descrição das mesmas.

### **2.6.1 ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAIS**

O ensaio de adensamento unidimensional (ABNT-NBR 12007/90) prescreve o método de determinação das propriedades de adensamento do solo, caracterizadas pela velocidade e magnitude das deformações, quando o mesmo é lateralmente confinado e axialmente carregado.

O método requer que um elemento de solo, mantido lateralmente confinado, seja axialmente carregado em incrementos, com pressão mantida constante em cada incremento, até que todo o excesso de pressão na água dos poros tenha sido dissipado. Durante o processo de compressão, medidas de variação da altura da amostra são feitas e estes dados são usados no cálculo dos parâmetros que descrevem a relação entre a pressão efetiva e o índice de vazios, e a evolução das deformações em função do tempo.

A aparelhagem é constituída de um sistema de aplicação de carga (prensa de adensamento ou oedômetro) e da célula de adensamento. A prensa permite a aplicação e manutenção das cargas verticais especificadas, ao longo do período necessário de tempo.

O procedimento para execução do ensaio é iniciado com a colocação da célula de adensamento no sistema de carga. Transmite-se cargas a célula de adensamento, em estágios, para obter pressões totais sobre o solo de aproximadamente 10, 20, 40, 80, 160, ... Kpa, mantendo-se cada pressão pelo período de tempo de 24 horas (dependendo do solo).

Os dados do ensaio de adensamento podem ser utilizados na estimativa da magnitude dos recalques totais e diferenciais de uma estrutura ou de um aterro e da velocidade desses recalques.

Além de identificar a colapsibilidade e mensurar ou quantificar o colapso dos solos. Devido às características das deformações ocorridas no colapso, este ensaio representa uma importante ferramenta para se avaliar esse fenômeno, pois pode reproduzir o comportamento do solo quando inundado, sendo usado para identificação e quantificação do colapso.

## **2.6.2 ENSAIOS EDMÉTRICOS COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA**

Segundo Moura (2004), visando superar as desvantagens apresentadas nos ensaios edométricos incrementais, principalmente no que diz respeito ao excesso de tempo que o ensaio exige na sua execução, pesquisadores buscaram técnicas mais apuradas e agilidade no processamento, com o desenvolvimento de ensaios de curta duração, os chamados ensaios contínuos.

Estes ensaios se caracterizam pela simplicidade, tanto da metodologia quanto do equipamento empregado. Nos ensaios de compressão com velocidade controlada, o mecanismo de transmissão de força ao corpo de prova é a prensa mecânica com controle de velocidade de carregamento, comumente empregada em ensaios triaxiais (CARVALHO et al., 1993).

Segundo Hamilton e Crawford (1959), o ensaio edométrico com velocidade de deformação controlada poderia ser utilizado com vantagens técnicas e econômicas em relação ao ensaio edométrico convencional, uma vez que o ensaio à velocidade de deformação constante permite empregar uma velocidade de carregamento mais próxima à condição *in situ* e, por outro lado, o tempo de duração do ensaio é muito menor do que aquela do ensaio incremental. Nesses ensaios, a amostra de solo é carregada continuamente sem provocar valores excessivamente elevados no gradiente de poro pressão.

A velocidade é um fator decisivo na qualidade dos resultados de ensaios. Segundo Carvalho et al. (1993), a velocidade tem o seu limite superior determinado pela condição de que não seja violada a suposta distribuição parabólica de tensões efetivas ao longo do corpo de prova, enquanto que o limite inferior relaciona-se à necessidade da existência de um valor mínimo de pressão hidrostática na base que permita o cálculo do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) e também pelo fato de que o ensaio não deve se estender por um período igual ou superior ao método convencional.

### **2.6.3 ENSAIOS EDMÉTRICO COM SUCCÃO CONTROLADA**

O uso de opções mais modernas, como os ensaios com o controle da sucção permitem um entendimento melhor e mais detalhado do comportamento dos solos colapsíveis, podendo-se reproduzir um conjunto de diversas trajetórias de tensão e de sucção nesses ensaios.

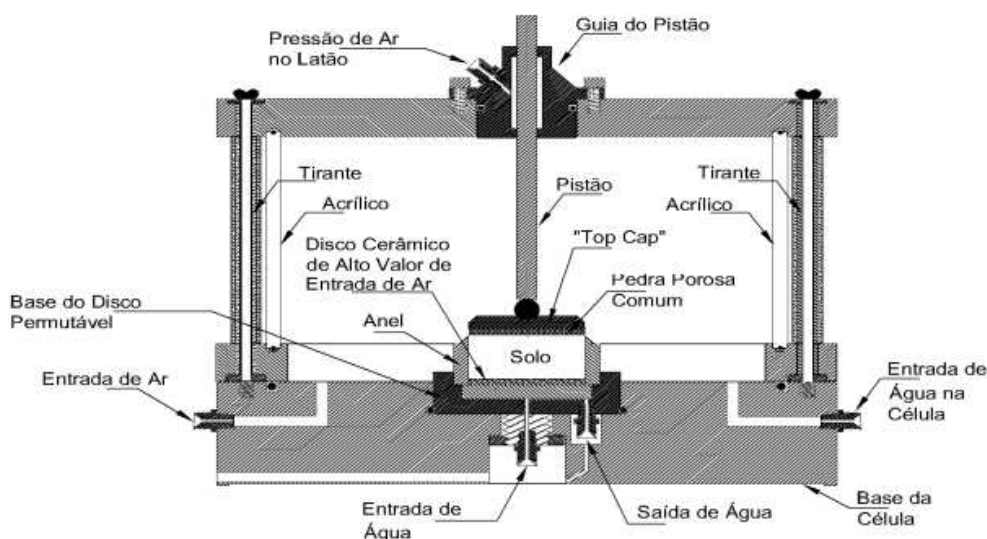
Escario e Saez (1973) desenvolveram uma câmara que permite a realização de ensaios de compressibilidade do solo com sucção controlada. O equipamento é uma câmara edométrica adaptada de forma que a imposição e o controle da sucção do solo na câmara segue a técnica de translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956), de maneira análoga à câmara de pressão.

Essa câmara é composta por uma pedra porosa de alta pressão de entrada de ar na parte inferior e por uma pedra porosa grossa na parte superior. 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. Ao se impor a pressão de ar dentro da câmara edométrica, que por meio da técnica de translação de eixos é equivalente à 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 à 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 1500kPa de pressão de entrada de ar.

Vieira (2006) construiu, no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, uma célula edométrica com sucção controlada, que se ilustra na Figura 9, na qual realizava a compressão dos corpos de prova a uma velocidade controlada, através do uso de uma prensa. Além da célula, Vieira (2006) desenvolveu também uma série de aparatos necessários para o funcionamento do ensaio, podendo-se citar: sistema de moldagem dos corpos de prova; medidor do volume de água extraído do corpo de prova; removedor do ar difuso; e circulador da água sob o disco cerâmico de alto valor de entrada de ar. Uma das vantagens dessa célula comparada às demais é a existência de uma base permutável, que possibilita a utilização de vários discos cerâmicos com diferentes valores de entrada de ar.

Figura 9 - Desenho esquemático da célula edométrica com sucção controlada.



Fonte: Vieira (2006).

## 2.7 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SOLOS NÃO SATURADOS

### 2.7.1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos solos não saturados é amplamente discutido entre pesquisadores da área, devido, principalmente, ao efeito da sucção na resistência ao cisalhamento, permeabilidade e deformabilidade. Modelos constitutivos são ferramentas eficazes para a análise desse comportamento.

O desenvolvimento de modelos constitutivos para a descrição do comportamento geotécnico de solos não saturados teve início a partir da década de 1970. Os primeiros modelos apresentados eram do tipo elástico, admitindo-se uma relação linear entre as variáveis de tensão e deformação, dentre os quais destacam-se as propostas de Fredlund (1979) e Alonso et al. (1988).

Apesar de serem mais simples, os modelos elásticos, lineares ou não, apresentam limitações na representação do comportamento dos solos não saturados, pois não consideram aspectos como colapso, que é uma deformação irreversível, e dependência da trajetória de tensão (SOUZA NETO, 2004)

Alonso et al. (1990) e Wheeler e Sivakumar (1995) foram os primeiros autores que desenvolveram modelos elastoplásticos, com base na teoria da plasticidade e do estado crítico. Estes autores consideraram as deformações plásticas e o histórico de tensões do solo.

## 2.7.2 MODELO DE ALONSO et al. (1990)

### 2.7.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Alonso et al. (1990) apresentaram um modelo conceitual, para um estado de tensão isotrópico, o qual inclui o conceito de endurecimento plástico controlado pela tensão média líquida ( $p$ ) (Equação 5), e pela sucção matricial ( $s$ ) (Equação 6), sendo:

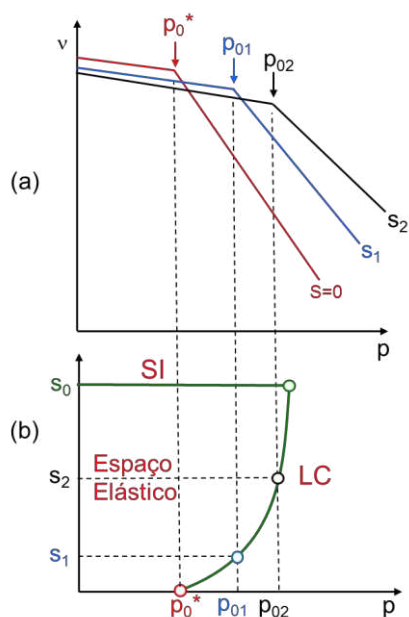
$$p = \sigma_m + u_a \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (6)$$

Num plano  $p$  versus  $s$  (Figura 10) o espaço elástico será definido por duas curvas de escoamento: a LC (“Load Collapse”) definida pela tensão de escoamento isotrópica em diferentes valores de sucção; e a outra SI (“Suction Increase”), que é paralela ao eixo de tensão isotrópica, definida pela sucção  $S_0$  (Figura 10b), idealizada como sendo a máxima sucção experimentada pelo solo. Qualquer variação ( $p$  e/ou  $s$ ) no estado de tensão dentro do espaço limitado por estas duas curvas resultará em deformações elásticas (recuperáveis). Uma vez ultrapassados estes limites, deformações plásticas (irreversíveis) ocorrerão, resultando na ampliação do espaço elástico.

Figura 10. a) Relação entre tensões de escoamento  $p_0$  e  $p_0^*$

b) Superfícies de escoamento SI e LC.



Fonte: Adaptado de Alonso et al. (1990).

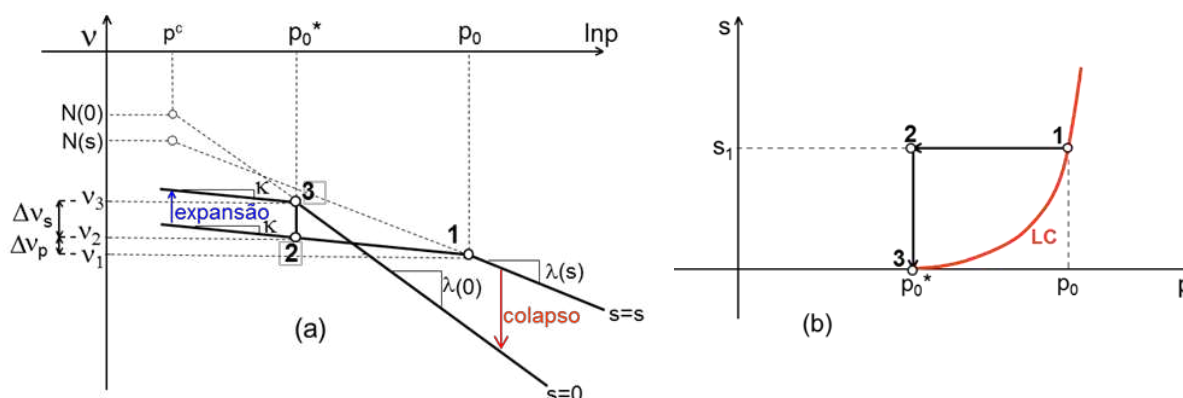
Vários caminhos de tensão poderão resultar na ampliação do espaço elástico. O aumento de  $s$  acima do limite  $S_0$  deslocará a curva SI. A redução da sucção sob uma tensão isotrópica constante, ou aumento da tensão isotrópica sob sucção constante resultará no deslocamento da curva LC, daí o termo “Load Collapse” (carga – colapso).

Sobre o modelo de Alonso et al. (1990) pode-se citar as seguintes particularidades:

- ✓ idealizado para um solo não plástico ou pouco plástico, de expansividade moderada, onde associa-se a expansão às deformações elásticas e o colapso às deformações plásticas;
- ✓ admite-se o acoplamento das curvas de escoamento LC e SI (Figura 10b), ou seja, o deslocamento de uma delas resultará no deslocamento da outra;
- ✓ a rigidez do solo aumenta com o aumento da sucção;
- ✓ as deformações volumétricas são independentes do caminho de tensões quando este envolve carregamento e redução da sucção, e dependentes quando o caminho de tensões envolve aumento da sucção.

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 ( $s$ ), como se ilustra na Figura 11a. O ensaio não saturado com sucção constante é carregado e tem suas deformações até o ponto 1 ( $p_0$ ) sob regime elástico (parâmetro de compressão elástica,  $\kappa$ ), e após esse ponto sob regime elastoplástico (reta virgem); a partir deste momento, o ensaio é descarregado sob sucção constante até o ponto 2 ( $p_0^*$ ) e, ao se 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 (parâmetro de compressão elástica,  $\kappa$ ) e, após esse ponto, sob regime elastoplástico (reta virgem).

Figura 11 – (a) curvas de compressão isotrópica para os solos saturado e não saturado; (b) caminhos de tensão e curvas de escoamento no plano ( $p,s$ ).



Fonte: Adaptado de Alonso et al. (1990).

Considerando-se acréscimos de tensões ao longo de seu estado virgem de sollicitações, em um ensaio a uma determinada sucção, tem-se que o volume específico ( $v = 1 + e$ ) pode ser definido por (Equação 7):

$$v = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln \frac{p}{p^c} \quad (7)$$

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 média líquida ( $p = \sigma_m - u_a$ );

$p^c$  - tensão de referência para a qual  $v = N(s)$ .

Na Figura 11b, é possível identificar uma curva do ponto 1 ao 3, definindo a fronteira entre os domínios elástico (região à esquerda da curva) e o plástico (região à direita da curva), que descreve a variação das tensões de pré-adensamento do solo em função da sucção.

A curva LC é definida pela Equação 8:

$$\left( \frac{p_0}{p^c} \right) = \left( \frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{[\lambda(0) - \kappa]}{[\lambda(s) - \kappa]}} \quad (8)$$

Em que:

$p_0$  - tensão isotrópica de pré-adensamento do solo não saturado com sucção  $s$ ;

$p_0^*$  - 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  $s$ ;

$\kappa$  - parâmetro de compressão elástica

O parâmetro elastoplástico do solo  $\lambda(s)$ , relacionado à rigidez, varia em função da sucção  $e$ , matematicamente, consiste na inclusão de uma equação (Equação 9), que descreve uma rigidez máxima assintótica:

$$\lambda(s) = \lambda(0) \cdot [(1 - r) \cdot \exp(-\beta s) + r] \quad (9)$$

Em que:

$r$  é um valor assintótico relacionado com a rigidez do solo para uma sucção tendendo ao

infinito [ $r = \lambda(s \rightarrow \infty)/\lambda(0)$ ];

$\beta$  é um parâmetro positivo que controla a taxa de variação da rigidez com a sucção.

### 2.7.2.2 DEFORMAÇÕES E LEIS DO ENDURECIMENTO

Um aumento de  $p$  dentro da região elástica induzirá uma compressão volumétrica dada pela Equação 10.

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p} \quad (10)$$

Uma vez que a tensão média  $p$  alcance o valor de escoamento  $p_0$ , a deformação volumétrica total pode ser calculada pela Equação 11.

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s)}{v} \cdot \frac{dp_0}{p_0} \quad (11)$$

Obtém-se a componente plástica da deformação volumétrica através do emprego da Equação 12:

$$d\varepsilon_{vp}^p = -\frac{\lambda(s) - \kappa}{v} \cdot \frac{dp_0}{p_0} \quad (12)$$

Da Equação 8, é possível mostrar que a deformação volumétrica plástica (Equação 12) pode, também, ser calculada pela Equação 13:

$$d\varepsilon_{vp}^p = -\frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \cdot \frac{dp_0^*}{p_0^*} \quad (13)$$

De forma semelhante ao aumento de  $p$ , um aumento da sucção dentro da região elástica resultará em deformação volumétrica elástica, segundo a Equação 14:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s}{v} \cdot \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad (14)$$

Caso a curva de escoamento  $s = s_0$  seja alcançada, deformações plásticas ocorrerão, como se apresenta nas Equações 15 e 16.

$$d\varepsilon_{vs} = \frac{\lambda_s}{v} \cdot \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad (15)$$

$$\frac{d\varepsilon^p}{v_s} = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \cdot \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad (16)$$

As deformações irreversíveis controlarão a posição das curvas de escoamento LC e SI através das Equações 13 e 16. Baseado em evidências experimentais, que indicam acoplamento entre as duas curvas de escoamento, Alonso et al. (1990) propõem a seguinte Lei de Endurecimento, segundo as Equações 17 e 18.

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda(0) - \kappa} \cdot d\varepsilon_v^p \quad (17)$$

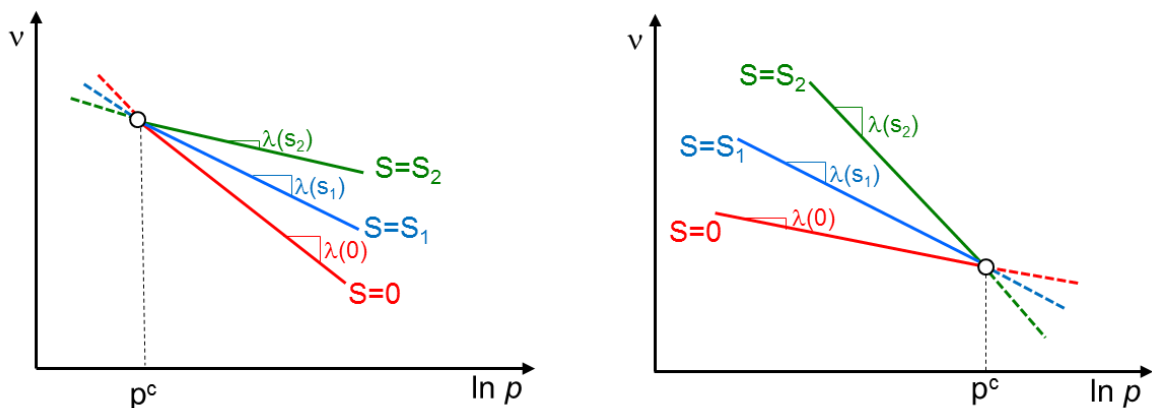
$$\frac{ds_0}{s_0 + p_{atm}} = \frac{v}{\lambda_s - \kappa_s} \cdot d\varepsilon_v^p \quad (18)$$

### 2.7.3 MODELO DE WHEELER E SIVAKUMAR (1995)

A proposta de Wheeler e Sivakumar (1995) visa corrigir algumas incompatibilidades do modelo de Alonso et al. (1990), de forma a obter melhor ajuste aos resultados experimentais realizados em um caulim compactado. A principal divergência observada entre os resultados experimentais e o previsto pelo modelo de Alonso et al. (1990) foi o aumento de  $\lambda(s)$  e  $N(s)$  com o aumento da sucção, onde o modelo prevê comportamento inverso (Figura 12).

A principal modificação proposta por Wheeler e Sivakumar (1995) ocorre nas equações constitutivas da curva de escoamento LC e da elipse no plano  $(p,q)$ , permitindo modelar a diminuição ou aumento da rigidez com a sucção.

Figura 12 – a) Solo com  $\lambda(s)$  decrescente com o aumento da sucção, conforme modelo original de Alonso et al. (1990); b) Solo com  $\lambda(s)$  crescente com o aumento da sucção.



Fonte: Adaptado de Wheeler e Sivakumar (1995).

A expressão para a linha de compressão isotrópica permanece praticamente a mesma de Alonso et al. (1990), com a ressalva de que a pressão de referência  $p^e$  é substituída pela pressão atmosférica ( $p_{atm}$ ), considerada 100 kPa, conforme a Equação 19.

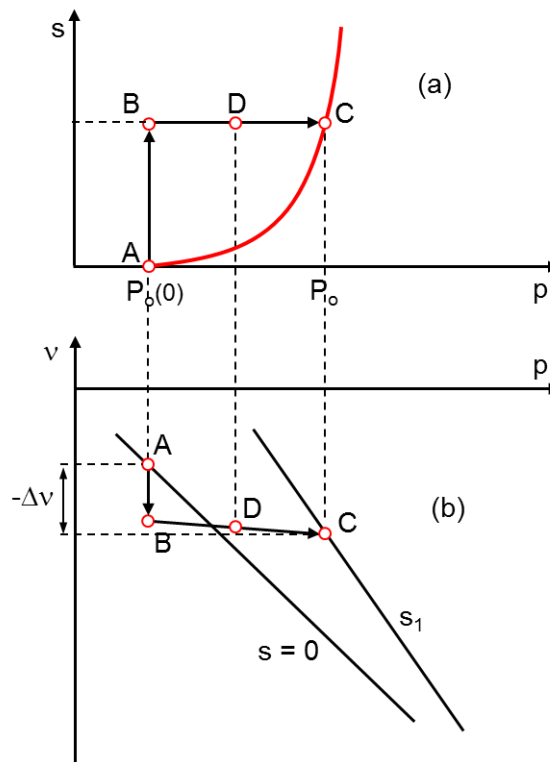
$$v = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln \frac{p}{p_{atm}} \quad (19)$$

Em que,  $N(s)$  e  $\lambda(s)$  são dependentes da sucção.

Wheeler e Sivakumar (1995) justificam a escolha de  $p_{atm}$  para tornar a Equação 19 dimensionalmente consistente e garantir que o intercepto  $N(s)$  refira-se a um valor de  $p$  dentro da faixa de dados experimentais.

A equação constitutiva da curva LC foi determinada considerando o caminho de tensões A-B-C, representado na Figura 13, semelhante ao adotado por Alonso et al. (1990), porém com sentido inverso.

Figura 13 – (a) Caminho de tensões e (b) Curvas de compressibilidade ( $v, p$ ) para definir a equação da superfície de escoamento LC.



Fonte: Adaptado de Wheeler e Sivakumar (1995).

O caminho ABC ocorre dentro do domínio elástico, sendo dividido em duas parcelas: um (A-B) partindo do estado virgem saturado (ponto A), submetido a um aumento da sucção ( $s$ ) sob

tensão isotrópica  $p(0)$  constante; o outro (B-C), correspondente ao aumento da tensão isotrópica sob  $(s)$  constante, até alcançar o estado virgem não saturado (ponto C). Os parâmetros  $\lambda(0)$ ,  $\lambda(s)$  e  $\kappa$  correspondem aos mesmos utilizados por Alonso et al. (1990), porém a tensão de escoamento saturada ( $p_o^*$ ) foi designada  $p(0)$  por Wheeler e Sivakumar (1995). A equação constitutiva da curva de escoamento LC é definida pela Equação 20:

$$[\lambda(s) - \kappa] \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p_{atm}}\right) = [\lambda(0) - \kappa] \cdot \ln\left(\frac{p(0)}{p_{atm}}\right) + N(s) - N(0) + \kappa_s \ln\left(\frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}\right) \quad (20)$$

O modelo proposto é similar ao de Alonso et al. (1990), diferindo ligeiramente nas posições iniciais adotadas nos caminhos de tensões. Para o caso particular de  $p^c = p_o^*$ , o modelo de Alonso et al. (1990) iguala-se ao de Wheeler e Sivakumar (1995). Concluindo, o modelo não apresenta funções para descrever o comportamento dos parâmetros  $\lambda(s)$  e  $N(s)$  com a sucção. A variação destes parâmetros é considerada empiricamente através da Equação 20.

#### 2.7.4 MODELO DE FUTAI (1997)

Além de Alonso et al. (1990) e Wheeler e Sivakumar (1995), outros autores, como Perazzo e Lins (1997) e Machado e Vilar (1997) também desenvolveram modelos constitutivos para a descrição do comportamento geotécnico de solos não saturados. Os resultados sobre o comportamento de  $\lambda(s)$  foram diversos, podendo citar alguns deles:

- $\lambda(s)$  diminuindo constantemente (Alonso et al., 1990);
- $\lambda(s)$  aumentando e voltando a decrescer em sucções maiores (Wheeler e Sivakumar, 1995);
- $\lambda(s)$  diminuindo, mas numa função diferente do modelo de Alonso et al (1990) (Perazzo e Lins, 1997)
- $\lambda(s)$  sempre aumentando (Machado e Vilar, 1997).

Analisando os diversos modelos elastoplásticos, Futai (1997) realizou adaptações e propôs novas funções que possibilitassem representar o comportamento mais realístico de alguns solos, tendo como princípio as teorias conhecidas; como a de Alonso et al. (1990) e Wheeler e Sivakumar (1995).

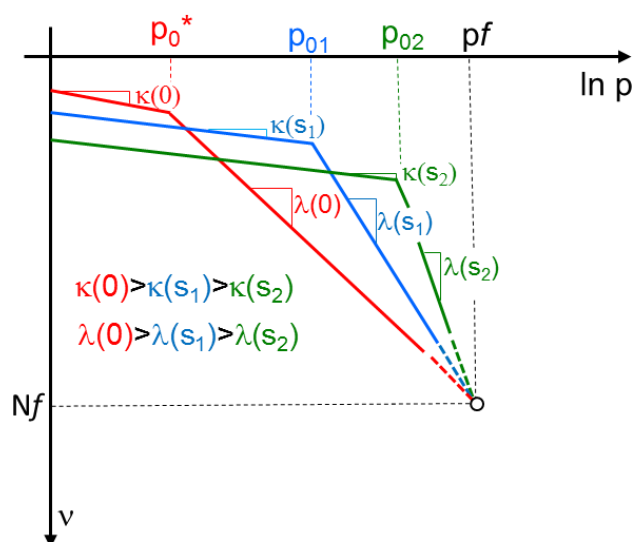
Segundo Futai (1997), a proposta de Alonso et al. (1990) relaciona a tensão de pré-adensamento à função  $\lambda(s)$ , porém os valores experimentais de  $\lambda(s)$  não são utilizados. A função de escoamento considera um parâmetro  $p_c$  problemático, pois para  $p_c$  igual a  $p_o^*$  a superfície de escoamento se torna vertical.

O autor verificou que o modelo de Wheeler e Sivakumar (1995) apresentava uma função de escoamento teoricamente correta, mas não eram formulados aplicações para valores dos parâmetros diferentes dos ensaiados. Este problema levou a alguns autores, como Silva Filho (1998) a utilizar trechos lineares ou regressões polinomiais. Entretanto, este procedimento tornava a função de escoamento totalmente dependente das regressões, visto que não existiam parâmetros que ajustassem os dados experimentais da tensão de pré-adensamento à mesma. Os valores experimentais de tensão de pré-adensamento eram negligenciadas. Wheeler e Sivakumar (1995) admitiam um caminho de tensões iniciando e terminando na mesma superfície de escoamento. A partir deste caminho, era obtida a equação que a define.

O modelo de Futai (1997) introduz propostas para as funções  $N(s)$ ,  $\lambda(s)$ ,  $\kappa(s)$ . Para a elaboração das funções, idealizou-se o comportamento dos solos naturais com colapso decrescente para elevados níveis de tensões de compressão. Partindo da premissa de que os solos têm aumento da tensão de escoamento com a sucção, como no modelo de Alonso et al. (1990), a rigidez aumenta dentro da região elástica e passa a diminuir quando o solo é plastificado. Isso permite que haja um valor máximo para as deformações de colapso.

Para modelar o parâmetro  $N(s)$ , idealizou-se um comportamento no espaço ( $\ln p$  versus  $v$ ), em que as curvas tendem a convergir e cruzam-se em um ponto (fora do domínio dos ensaios) com coordenadas  $p = p_f$  e  $v = N_f$ , mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros  $N_f$  e  $p_f$  no espaço ( $v$ ,  $\ln p$ ).



Fonte: Adaptado de Futai (1997).

Na Figura 14, o parâmetro  $N_f$  permite encontrar a função  $N(s)$ , representando as retas com sucções quaisquer, segundo a Equação 21.

$$N(s) = N_f + \lambda(s) \cdot \ln\left(\frac{p_f}{p_c}\right) \quad (21)$$

Assim, igualando o volume específico representado pela reta saturada com a outra não saturada, chega-se à Equação 22.

$$N(s) = N(0) + [\lambda(s) - \lambda(0)] \cdot \ln\left(\frac{p_f}{p_c}\right) \quad (22)$$

Futai considerou  $p_c$  igual a pressão atmosférica  $p_{atm}$  e esta igual a 100 kPa.

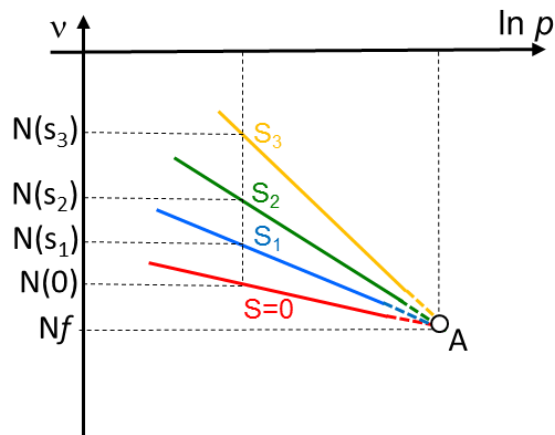
A função  $\lambda(s)$  foi proposta por Alonso et al. (1990) como sendo válida para solos compactados sob determinados níveis de tensões. Para os solos naturais, Futai (1997) propôs que a função fosse representada pela Equação 23.

$$\lambda(s) = \lambda(0) + [\lambda(\infty) - \lambda(0)] \cdot (1 - e^{-\beta s}) \quad (23)$$

O emprego da Equação (23) permite ajustar valores crescentes ou decrescentes de  $\lambda(s)$ .

Inicialmente  $\lambda(s)$  foi idealizado como crescente (Figura 15), onde existe um ponto no qual o prolongamento das diversas retas convergem, indicado na Figura 15 pelo ponto A. O ponto A não pertence aos valores experimentais, é uma idealização para facilitar a obtenção das funções que definem os parâmetros.

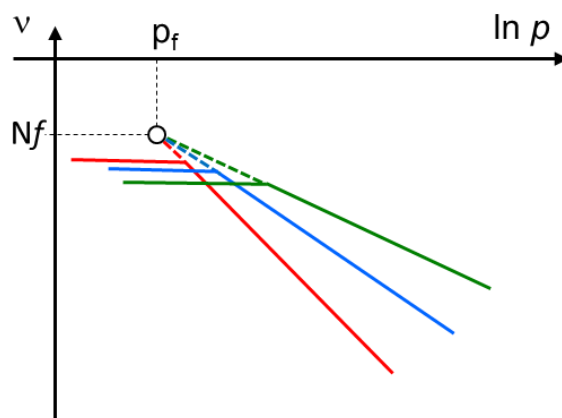
Figura 15 – Parâmetros  $N_f$  e  $p_f$  crescente.



Fonte: Adaptado de Futai (1997).

A extensão do modelo para os casos onde o parâmetro  $\lambda$  é decrescente com o aumento da sucção, será feita pela própria função  $\lambda(s)$ , bastando impor  $\lambda(0) > \lambda(\infty)$ . A correspondência física dos parâmetros continua a mesma. Os parâmetros  $N_f$  e  $p_f$  serão remetidos para cima, podendo cair fora do domínio de ensaio, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros  $N_f$  e  $p_f$  para  $\lambda(s)$  decrescente.



Fonte: Adaptado de Futai (1997).

Futai (1997) propôs, ainda, uma função para o parâmetro  $\kappa(s)$ , dada pela Equação 24.

$$\kappa(s) = \kappa(0) + [\kappa(\infty) - \kappa(0)] \cdot (1 - e^{-\chi s}) \quad (24)$$

Em que:

$\chi$  é o parâmetro que controla a rigidez com a sucção para a condição elástica.

No modelo de Futai, a função  $\kappa(s)$  modifica a rigidez do solo para a condição elástica com a sucção. Portanto, a superfície de escoamento LC torna-se dependente, também, de  $\kappa(s)$ .

Segundo Nesnas (1995), a utilização do modelo de Alonso et al. (1990), em elementos finitos, inverte o comportamento de carregamentos com sucção constante e Silva Filho (1998) complementa que, em modelagem numérica, utiliza-se o módulo volumétrico ( $K$ ), dado pela Equação 25.

$$K = \frac{v p}{\kappa} \quad (25)$$

Com relação à Equação 25, como o volume específico é menor para sucções mais elevadas e os dois outros valores constantes,  $K$  diminui com a sucção. Nesse caso, as sucções mais altas apresentarão maiores deformações elásticas, contrariando valores experimentais até então conhecidos. A modelagem sugerida por Futai (1997), introduzindo  $\kappa(s)$ , prevê melhor esse comportamento, visto que o modelo idealiza que o solo tem a rigidez aumentada com o aumento da sucção devido à  $\kappa(s)$  até a tensão de escoamento.

Realizando o mesmo procedimento de Wheeler e Sivakumar (1995), chega-se à curva de escoamento LC dada pela Equação 26.

$$\frac{p_0}{p_{atm}} = e^{\left\{ \frac{[\lambda(0) - \kappa] \ln \frac{p_0^*}{p_{atm}} + [\lambda(\infty) - \lambda(0)] (1 - e^{-\beta s}) \ln \frac{p_f}{p_{atm}} + \kappa_s \ln \left( \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \right)}{\lambda(0) - \kappa + [\lambda(\infty) - \lambda(0)] (1 - e^{-\beta s})} \right\}} \quad (26)$$

Na Equação 26, substituiu-se a tensão de referência para  $p = 1 \text{ kPa}$  para torná-la igual ao modelo Cam Clay. Para condições em que os carregamentos excedam a tensão  $p_f$ , deve-se dividir a curva de compressibilidade em dois trechos, sendo que, antes de  $p_f$ , deve-se usar as funções propostas, e após, deve-se adotar  $\lambda(s) = \lambda(0)$ , ou seja, não ocorre mais colapso. Refere-se que é possível incorporar esse comportamento em um programa de elementos finitos, tal como apresentado por Silva Filho (1998).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. MATERIAIS**

O material de estudo foi um solo residual maduro de gnaiss, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, aspecto poroso, com granulometria argilo-areno-siltosa. Refere-se que esse solo é de ocorrência expressiva no território brasileiro e, em especial, na Zona da Mata Norte de Minas Gerais.

A amostra deformada de solo foi coletada no Alto dos Barbados, município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, no horizonte B de um talude de corte de uma estrada de terra do sistema viário da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no ponto de coordenadas geográficas de posição 20° 45' 11,1" de latitude Sul e 42° 51' 31,2" de longitude Oeste de Greenwich.

#### **3.2. MÉTODOS**

No desenvolvimento da presente pesquisa, foi necessário realizar a reorganização e montagem da infraestrutura da Sala de Solos Não-Saturados do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que havia sido seriamente comprometida em um incêndio ocorrido em passado recente. Com a infraestrutura reestabelecida, passou-se à realização das atividades de laboratório no solo em estudo, que incluíram: (i) realização dos ensaios de caracterização e compactação para a amostra de solo coletada; (ii) preparação dos corpos de prova; (iii) determinação da curva característica de retenção da água no solo; (iv) ensaios de adensamento unidimensional; e (v) ensaios edométricos com sucção controlada. A seguir, detalham-se essas atividades.

##### **3.2.1. ORGANIZAÇÃO E REESTRUTURAÇÃO DO LABORATÓRIO**

Inicialmente, foi feito um levantamento dos materiais necessários para a reestruturação da Sala de Solos Não Saturados do LEC, para a posterior implantação da infraestrutura mínima de ensaios que possibilitasse a realização da presente pesquisa, incluindo, também, a montagem de painéis de controle de pressão e de medidas de variação de volume e sistemas de circulação de água na base da célula para extração de bolhas de ar.

### **3.2.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO NA AMOSTRA COLETADA**

A amostra deformada do solo, coletada para o estudo, foi destorroada, peneirada e estocada em vasilhames hermeticamente fechados, para posterior realização dos ensaios, conforme prescreve a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios geotécnicos foram realizados em obediência às normas técnicas, como segue: (i) caracterização geotécnica, com os ensaios de massa específica dos grãos (ABNT, 1984), limite de liquidez (ABNT, 2016b), limite de plasticidade (ABNT, 2016c), e granulometria (ABNT, 2016d); e (ii) compactação na energia do ensaio Proctor normal (ABNT, 2016e).

### **3.2.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

Para a realização dos ensaios edométricos com sucção controlada, as amostras foram reconstituídas de modo a se produzirem estruturas diferentes, segundo as técnicas de reconstituição hidrostática e edométrica, produzindo-se amostras com índices de vazios elevados e iguais porem com teores de umidade diferentes. Para facilitar a identificação dessas duas técnicas no trabalho, a partir desse ponto será utilizado o termo Amostra 1 para identificar o solo preparado com a técnica de reconstituição hidrostática, e o termo Amostra 2 para identificar a preparação do solo por reconstituição edométrica.

Na determinação dos teores de umidade de reconstituição, buscou-se adotar valores que se situassem nos ramos seco e úmido de uma hipotética curva de compactação representativa do índice de vazios das Amostras 1 e 2. Para a definição dessa hipotética curva de compactação, adotou-se uma similaridade geométrica da mesma com a curva de compactação do solo na energia do ensaio Proctor normal, o que possibilitou a determinação dos teores de umidade para a reconstituição das amostras 1 e 2. No caso da Amostra 1, adotou-se como teor de umidade de reconstituição o valor  $w_{ot} - 2\%$ . A seguir descrevem-se essas técnicas.

✓ Amostra 1 – Reconstituição hidrostática: foram adotados os seguintes procedimentos:

- a) determinou-se a curva de compactação do solo na energia do ensaio Proctor normal, para fins de obtenção do valor  $w_{ot} - 2\%$ . Para obter esse teor de umidade, acrescentou-se água ao solo seco ao ar, de forma que o mesmo atingisse a umidade  $w_{ot} - 2\%$ ;
- b) posteriormente, colocou-se esse solo em um molde de PVC, cilíndrico com 8,0 cm de diâmetro e 18,5 cm de altura, como se ilustra na Figura 17. A amostra foi produzida de modo a se atingir um estado fofo, com índice de vazios elevado e, conseqüentemente,

refletindo compressibilidade alta;

Figura 17 – Solo depositado no molde de PVC.



- c) foi colocada uma membrana de látex de 3 polegadas dentro do tubo de pvc. Para garantir que a membrana ficasse aderida ao tudo aplicou-se vácuo. O tubo de pvc foi mantido erguido sobre um disco perfurado para permitir a drenagem durante a aplicação da compressão hidrostática. Houve o controle da massa de solo que seria colocada ( $m=720g$ ), visando atingir sempre o mesmo valor de  $\gamma_d$ , e depositou o solo de forma padronizada até que todo o tubo estivesse cheio, Figura 18. Foi colocado um top cap que manteve-se erguido, de forma a não comprimir a amostra, por um suporte de madeira, especialmente desenvolvido para tal. Retirou-se a membrana de látex para prender o top cap e o disco, em seguida colocou o oringue para vedação do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Tudo de PVC erguido pelo suporte de madeira, com a membrana de latex presa ac top cap e ao disco por oringues.



Colocado sobre um berço, também feito de pvc, mostrado na Figura 19, e posto dentro da câmara de compressão hidrostática, cuidadosamente para garantir a integridade da amostra. A base perfurada foi conectada ao topo da câmara por uma mangueira, permitindo a drenagem, Figura 20. Colocou água até cobrir o corpo de prova, fechou a câmara e aplicou-se a pressão de 100 kPa por sete dias. Período este testado e considerado ideal para a dissipação de toda a poro pressão.

Figura 19 – Amostra sobre o berço de pvc.



Figura 20 – Amostra dentro da câmara de compressão hidrostática com a base conectada ao topo por uma mangueira permitindo a drenagem.



- d) em sequência, adensou-se por uma semana a amostra hidrostaticamente, com tensão de adensamento de 100kPa. A adoção do valor de 100kPa buscou refletir condições adequadas para a realização dos ensaios edométricos com sucção controlada, cujo equipamento tem capacidade máxima de aplicação de tensão vertical da ordem de 1500 kPa. Refere-se que na definição da reta virgem de compressão, a tensão máxima de pré-adensamento deveria ser da ordem de 500 kPa, ou seja, da ordem de 1/3 da tensão máxima vertical aplicada;
- e) Moldaram-se então os corpos de prova com a parte central da amostra, de modo a minimizar os efeitos de borda, como se ilustra na Figura 21. Desta maneira, conseguiu-se moldar apenas dois corpos de prova de cada amostra reconstituída hidrostaticamente. Após a moldagem em anéis de 54mm de e 20mm de altura, como se apresenta na Figura 22, determinou os parâmetros geotécnicos da mesma: teor de umidade ( $w=28,45\%$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d=10,5 \text{ kN/m}^3$ ) e índice de vazios ( $e=1,6$ ). Os valores de  $\gamma_d$  e  $w$  foram utilizados na produção da Amostra 2. Refere-se que esse anel é da célula do ensaio edométrico com sucção controlada.

Figura 21 – Aproveitamento da parte central da Amostra 1.



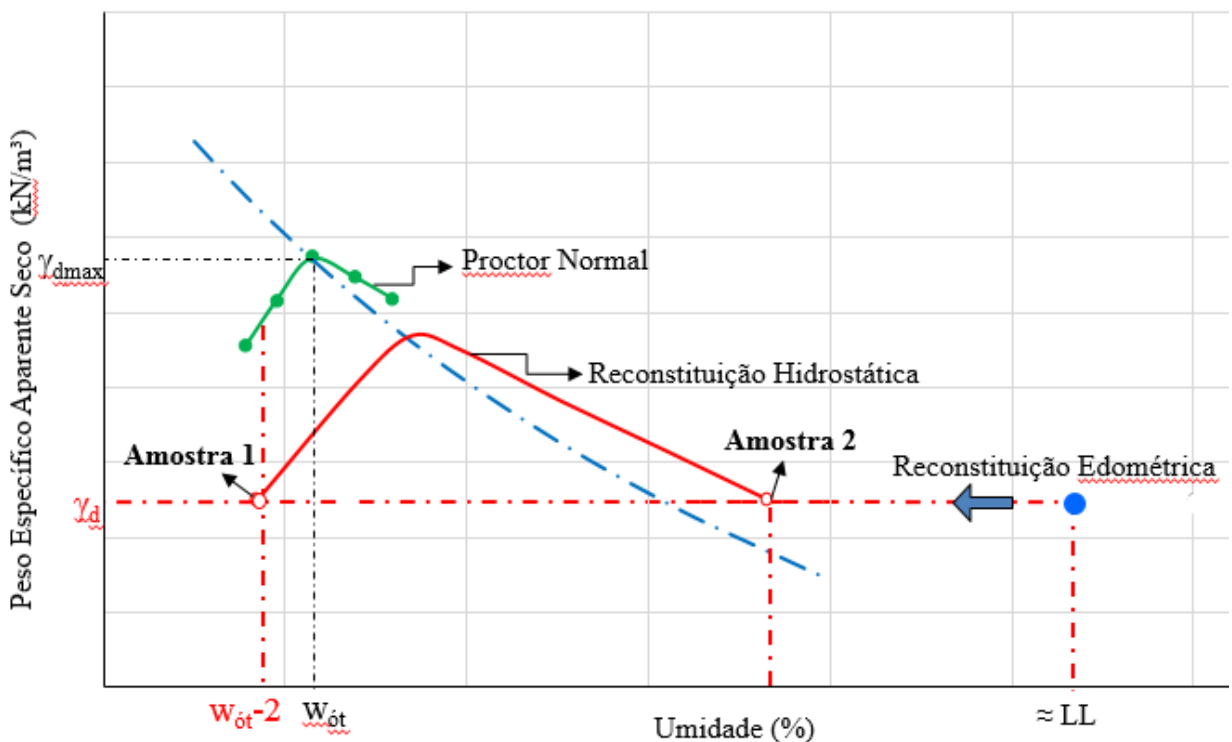
Figura 22 – Moldagem de um corpo de prova da Amostra 1.



✓ Amostra 2–Reconstituição edométrica: foram adotados os seguintes procedimentos:

- a) plotou-se o par de valores  $\gamma_d$  e  $w$  relativo aos corpos de prova da Amostra 1 em um gráfico com umidade no eixo das abscissas e peso específico aparente seco no eixo das ordenadas, como se ilustra na Figura 23, e, por semelhança geométrica com a curva de compactação do solo determinada na energia do ensaio Proctor normal, determinou-se a sua provável curva de compactação. Com esse procedimento, pôde-se estimar um teor de umidade no ramo úmido da curva de compactação para a produção da Amostra 2, com o mesmo peso específico seco da amostra 1;

Figura 23 – Esquema para preparação das amostras.



b) o procedimento referido no item (a) foi testado em laboratório, atingindo-se uma amostra com teor de umidade em torno de 57,7% mas, este teor de umidade não permitiu a reconstituição edométrica da Amostra 2 pois houve a formação de grumos. Assim, adotou-se um novo procedimento para a reconstituição edométrica da Amostra 2, partindo-se de uma amostra com teor de umidade de 87%, por subsequente sedimentação da lama de solo no anel da célula do ensaio edométrico com sucção controlada, obteve-se uma amostra com o teor de umidade e o peso específico seco determinados no procedimento apresentado na Figura 23. Refere-se que, para a produção do corpo de prova do solo, foi necessária a fabricação de um “anel guia” e uma tampa de pvc com um orifício superior. A altura dessa tampa foi dimensionada de forma que se realizasse leves compressões na massa de solo, permitindo a saída do excesso de água. Quando a tampa encostasse o anel teríamos a amostra de solo com a densidade necessária. O corte esquemático do anel de pvc e a tampa estão apresentados na Figura 24 e parte dos procedimentos descritos encontram-se ilustrados na Figura 25.

Figura 24 – Corte do molde de pvc.

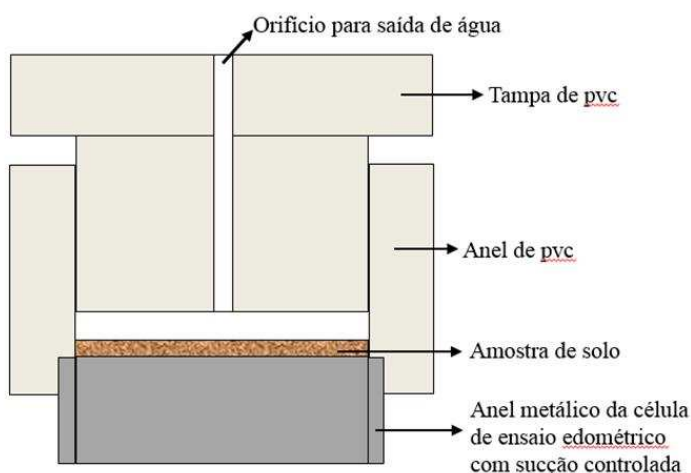


Figura 25 – Amostra reconstituída edometricamente.

a) Lama depositada no anel.



b) Compressão para retirada do excesso de água.



Seguindo os métodos citados, conseguiu-se, para o mesmo solo, amostras com diferentes estruturas e igual peso específico e índices de vazios.

### 3.2.4. DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A determinação da curva característica de retenção da água no solo foi conduzida em dois equipamentos diferentes e seguiu os seguintes passos:

- ✓ Mesa de sucção, como se ilustra na Figura 26a com aplicação de sucções de 1, 2 e 5kPa.
- ✓ Câmara de pressão (ou Câmara de Richards), segundo a Figura 26b, com aplicação de sucções de 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1500kPa.

Figura 26 – Equipamentos de determinação da curva característica de retenção da água no solo

a) Mesa de sucção.

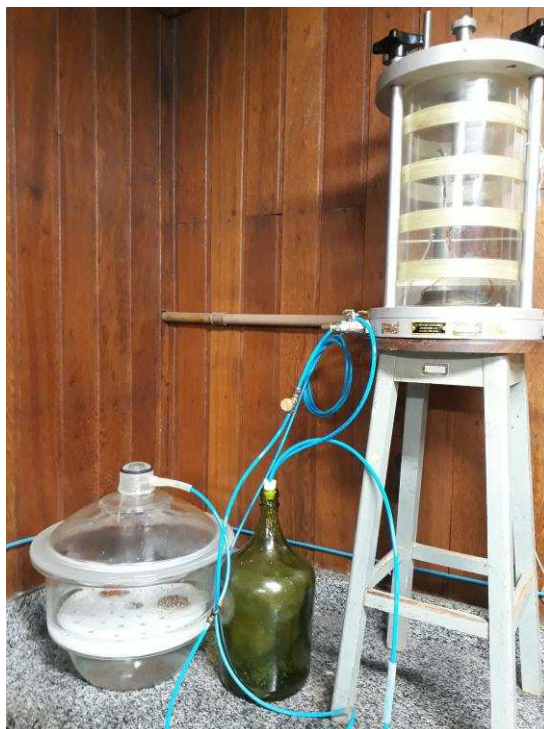


b) Câmara de pressão.



Todas as curvas de retenção foram obtidas por secagem a partir de corpos de prova saturados por aspersão de água destilada. O aparato apresentado na Figura 27, para a saturação dos corpos de prova, foi montado para inicialmente aplicar o vácuo e em seguida submergir as amostras em água destilada.

Figura 27 – Aparato montado para saturação dos corpos de prova.



Cada valor de pressão foi aplicado nas amostras até se observar interrupção do fluxo de água inicial, no mínimo por 3 dias. O critério de interrupção do ensaio foi a constância de massa verificada por meio da pesagem dos corpos de prova. Cessada a variação de massa, retiraram-se as amostras para cálculo dos teores de umidade correspondentes à sucção aplicada. De acordo com os pares sucção-umidade foram obtidas as curvas de retenção de água.

### **3.2.5. ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL**

Foram realizados ensaios de adensamento unidimensional (ABNT, 1990) nas Amostras 1 e 2. Refere-se que essa norma encontra-se cancelada pela ABNT, sem substituição até o presente momento. Em diferentes níveis de tensão promoveu-se a inundação, objetivando avaliar o efeito da sucção na rigidez do solo em estudo e a ocorrência de colapso para comprovar as diferentes estruturas das amostras. Os estágios de tensão de inundação foram de 12 kPa, 100 kPa e 1600 kPa.

Para os ensaios não saturados usou-se um filme de PVC, ao redor da célula, para minimizar a variação da umidade relativa do ar na amostra de solo. A variação na umidade, ou seja, no grau de saturação das amostras leva à variação da sucção atuante.

### 3.2.6. ENSAIOS EDMÉTRICO COM SUCCÃO CONTROLADA

Os ensaios de compressão edométrica com sucção controlada e taxa de deformação constante foram realizados nas células de adensamento desenvolvidas por Vieira (2006). Os valores de sucção aplicados foram de 50, 100 e 200 kPa nas Amostras 1 e 2, com vistas a se analisar a influência da estruturação das mesmas na compressibilidade do solo.

O valor de entrada de ar da cerâmica foi um fator limitante em relação ao máximo valor de sucção mátrica que pôde ser aplicado com a técnica de translação de eixos. Comercialmente, encontram-se cerâmicas porosas com alta entrada de ar para valores de até 1500kPa, mas o laboratório de solos não saturados da UFV possui pedras porosas com valor de entrada de ar de apenas 100 e 300kPa.

Anterior à compressão dos corpos de prova, foi adotada a seguinte rotina:

- ✓ Preparo e moldagem dos corpos de prova conforme descrito anteriormente;
- ✓ Saturação da pedra porosa de alto valor de entrada de ar, inundando a base da célula com água deaerada até aproximadamente a metade de sua altura, em seguida aplicando-se uma determinada pressão no interior da câmara. Após esse procedimento, realizou-se a remoção de ar na parte inferior da pedra porosa a partir da circulação de água pela base. Após o término dessa etapa, o excesso de água da pedra porosa foi removido com auxílio de um pano e os corpos de prova foram colocados sobre a mesma.
- ✓ O equilíbrio da sucção dos corpos de prova foi acompanhado por leituras diárias da variação do volume de água na bureta. Após essa variação permanecer constante, considerou-se que as amostras atingiram a sucção imposta. Para os casos de sucção igual a zero, os corpos de prova foram mantidos inundados durante todo o processo.
- ✓ Todos os corpos de prova foram comprimidos com velocidade constante de 0,0009mm/min. Esse valor foi adotado para que a deformação de 15% da altura do corpo de prova se desse em quatro dias, objetivando a completa dissipação da poropressão durante esta fase do ensaio.

No intuito de verificar a diferença de comportamento da Amostra 1, (moldada no ramo seco da curva de compactação), em relação às condições iniciais, adotaram-se sequencias distintas no início do ensaio. Aqui apresentados como métodos A e B, referem-se à saturação ou não do corpo de prova antes da aplicação da sucção desejada, imposta em trajetória de umedecimento ou secagem.

Para a Amostra 2, que já se encontrava saturada pelo processo de moldagem, foi adotada apenas sucção por secagem.

### ***Amostra 1***

#### ***Método A***

1°) Para o solo na umidade obtida após compactação hidrostática de 100kPa, sem inundação, aplicou-se a sucção nos valores de 50, 100 e 200kPa;

2°) Estabilização do corpo de prova, observando o volume de água que entrava na célula;

3°) Início do ensaio de compressão e obtenção dos gráficos.

### ***Amostra 1***

#### ***Método B***

1°) Os corpos de prova foram inicialmente saturados;

2°) Após saturação, foram submetidos aos valores de sucção adotados para os ensaios (50, 100 e 200kPa);

3°) Ao atingir o valor da sucção desejada, os corpos de prova eram carregados, mantendo-se constante o valor da sucção.

### ***Amostra 2***

1°) Aplicação da sucção nos valores de 50, 100 e 200 kPa;

2°) Estabilização do corpo de prova, observando o volume de água que saía da célula;

3°) Início do ensaio de compressão e obtenção dos gráficos.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1. ORGANIZAÇÃO E REESTRUTURAÇÃO DO LABORATÓRIO

A Figura 28 mostra o resultado do trabalho realizado na reestruturação do laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV), onde os ensaios da presente pesquisa foram realizados.

Novos painéis de controle de pressão foram fabricados com fibra de vidro, e medidores de volume de água foram refeitos com base no trabalho de Vieira (2006), onde a leitura é feita diretamente na coluna de água do tubo de vidro, por meio de escala adaptada para tal (Figura 29).

Figura 28 – Organização e reestruturação do laboratório.



Figura 29 – Detalhe dos novos painéis de fibra de vidro para controle de pressão, medidores de volume e circulação de água.



Como não havia tempo hábil para elaboração de um programa de aquisição de dados, as leituras para cálculo da tensão e deformação foram feitas manualmente, em instrumentos instalados na prensa. Em função da baixa velocidade dos ensaios (0,0009mm/min) e consequente longa duração, uma câmera e um software foram usados para gravar o ensaio em um Notebook. Desta forma, conseguiu-se fazer leituras regularmente espaçadas, representando com fidelidade o comportamento do ensaio e garantindo a qualidade das curvas tensão *versus* deformação.

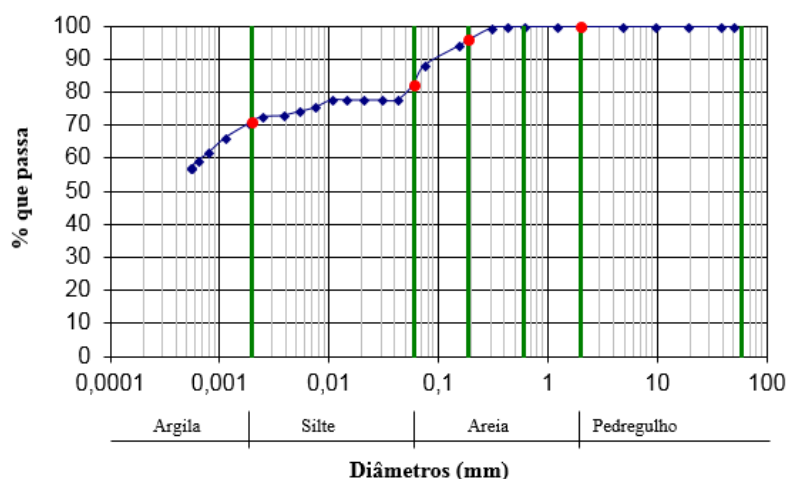
#### 4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DE COMPACTAÇÃO

Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios para caracterização do solo usado. Foram determinados os índices físicos ( $\rho_s$ , LL, LP, IP), a composição granulométrica segundo ABNT, peso específico aparente seco máximo ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima ( $w_{ot}$ ), quando compactado pelo ensaio Proctor Normal. A curva granulométrica é mostrada na Figura 30.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo.

Areia (%)	18
Silte (%)	11
Argila (%)	71
Peso Específico dos Sólidos ( $\rho_s$ - kN/m <sup>3</sup> )	27,4
Limite de Liquidez (LL - %)	82
Limite de Plasticidade (LP - %)	44
Índice de Plasticidade (IP - %)	38
Umidade ótima ( $w_{ot}$ - %)	31,5
Peso específico aparente seco máximo ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ - kN/m <sup>3</sup> )	13,7

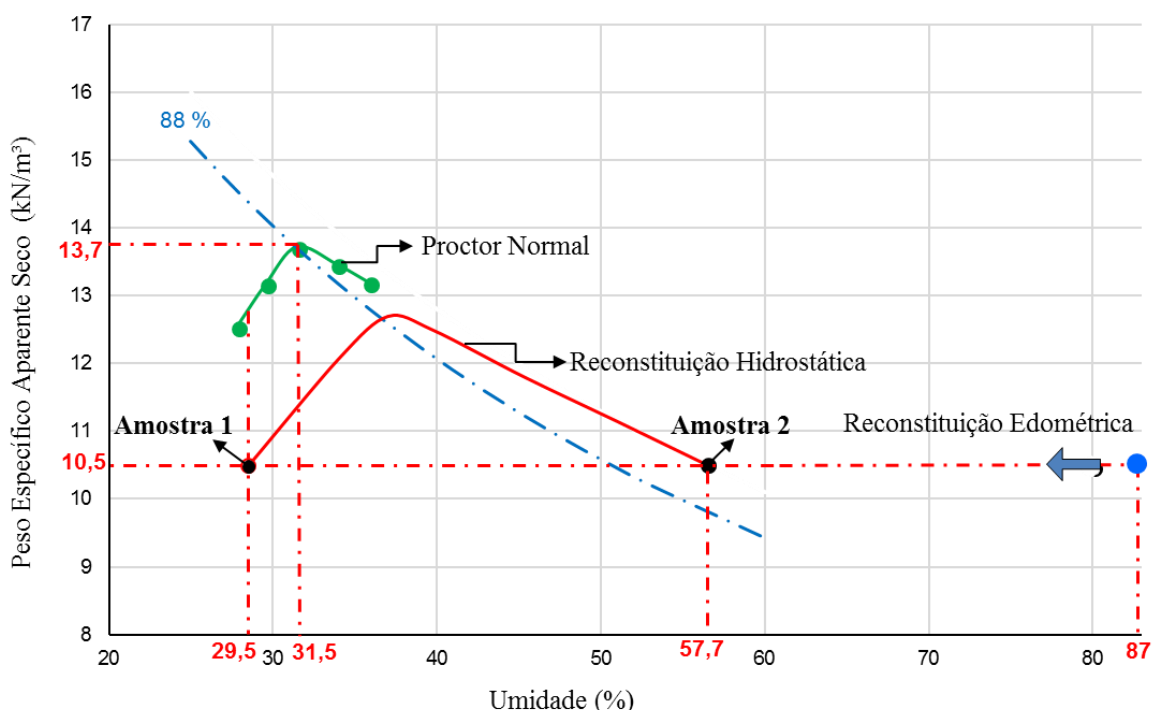
Figura 30 – Curva granulométrica do solo estudado.



Na Figura 31, está apresentada a curva de compactação do solo na energia Proctor normal, obtida segundo as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016e). Nesta curva, verifica-se que o ponto ótimo corresponde ao teor de umidade  $W_{ot} = 31,45\%$  e ao peso específico aparente seco máximo  $\gamma_{dm\acute{a}x} = 13,72 \text{ kN/m}^3$ .

Conforme descrito anteriormente, os ensaios da Amostra 1 foram realizados em corpos de prova compactados hidrostaticamente com o valor de umidade  $W_{ot} - 2\% = 29,45\%$ .

Figura 31 – Curva de compactação na energia Proctor normal e curva obtida por semelhança geométrica a partir do ponto  $(\gamma_d; w_{ot} - 2)$ .

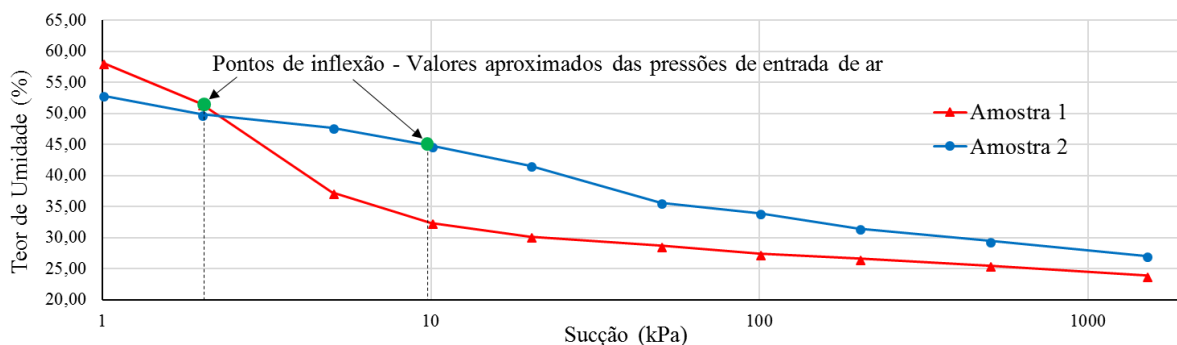


### 4.3. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.

Apresentam-se a seguir, os resultados experimentais de retenção de água obtidos pelo processo de secagem e representados através da relação entre sucção *versus* teor de umidade.

A figura 32 mostra os dados obtidos para as Amostras 1 e 2, valendo-se dos métodos da mesa de sucção e câmara de pressão (ou Câmara de Richards).

Figura 32 – Curvas de retenção obtidas para as Amostras 1 e 2.



Nota-se que há um incremento no valor da pressão de entrada de ar com a reestruturação do material, além de uma maior inclinação da parte inicial da curva para o solo moldado no ramo seco. A reestruturação do material e consequente redução do tamanho dos poros, tem como consequência direta a redução do capilar e, portanto, aumento da sucção.

Com base nos resultados dos ensaios, verifica-se que a estrutura do solo influencia diretamente na relação entre a sucção e o teor de umidade do material. Pelos resultados dos ensaios de laboratório para a obtenção da curva característica, o solo compactado no ramo seco apresentou, para um mesmo teor de umidade, valores de sucção menores que os apresentados pelo solo moldado com a consistência de lama.

Observando as trajetórias das curvas de retenção obtidas, nota-se que as mesmas não seguem o padrão das curvas típicas proposto por Fredlund e Xing (1994) onde se espera altos valores de pressão de entrada de ar para solos argilosos.

A pressão de entrada de ar da argila ensaiada assemelha-se ao de solos arenosos, o que confirma os resultados encontrados por Oliveira e Marinho (2004). Os autores verificaram que a compactação no ramo seco resulta na formação de agregações de partículas. Em função do valor da sucção no interior dessas agregações, as mesmas podem se comportar como um único grão de solo. O esforço da compactação não é suficiente para desagregar este aglomerado de partículas. A estrutura resultante se caracteriza pelos macroporos, formados pelos vazios entre as agregações, e os microporos, formados no interior das agregações. Estas duas famílias de poros estão relacionadas aos dois pontos de inflexão observados na Figura. A porcentagem de solo presente como agregação se reduz à medida que aumenta o teor de umidade na moldagem.

#### 4.4. ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAIS

A Figura 33 apresenta os resultados do ensaio de adensamento unidimensional de cinco corpos de prova obtidos das Amostras 1 e 2 cujas condições iniciais estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio de adensamento unidimensional.

<b>Dados dos corpos de prova</b>					
	Amostra	CP N°	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e
Reconstituição Hidrostática	1	1	28,3	10,5	1,6
		2	28,5	10,5	1,6
		3	29,3	10,5	1,6
		4	28,9	10,5	1,6
Reconstituição Edométrica	2	5	57,7	10,5	1,6

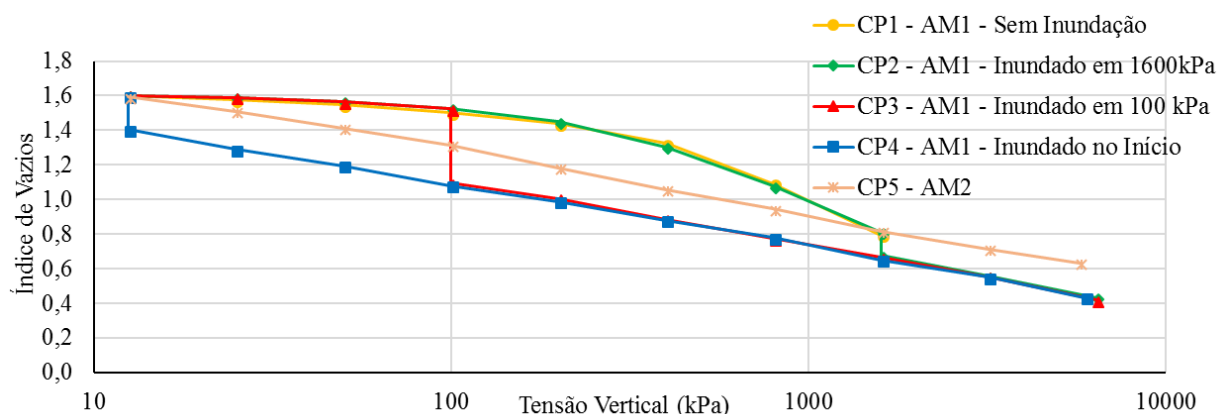
Os quatro corpos de prova iniciais foram obtidos da Amostra 1, em que o solo, inicialmente no ramo seco da curva de compactação, foi inundado em diferentes cargas. Os ensaios foram realizados na seguinte sequência: o primeiro corpo de prova, sem inundação, na umidade obtida após compactação hidrostática de 100 kPa; o segundo e o terceiro, com a mesma umidade, foram inundados nas tensões verticais de 1600 kPa e 100 kPa respectivamente, o quarto corpo de prova foi inundado no início do ensaio.

Um quinto corpo de prova foi obtido da Amostra 2, solo no ramo úmido da curva de compactação, moldado com a consistência de lama.

Os resultados apresentados na Figura 33 apontam diferenças entre as estruturas das Amostras 1 e 2. O comportamento colapsível da Amostra 1 permite supor a formação de agregações de partículas e do efeito da cimentação presente. Quando umedecidos, há, supostamente, a ruptura da estrutura cimentante, possibilitando o deslocamento relativo entre partículas.

O efeito da sucção pode ser avaliado pela comparação das curvas das Amostras 1 e 2. A sucção enrijece o material contra o carregamento. Após a inundação, o colapso da estrutura leva as curvas da Amostra 1 se convergirem para uma mesma relação  $e$  x  $\log \sigma_v$ , tornando-se paralelas à curva da Amostra 2.

Figura 33 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional.



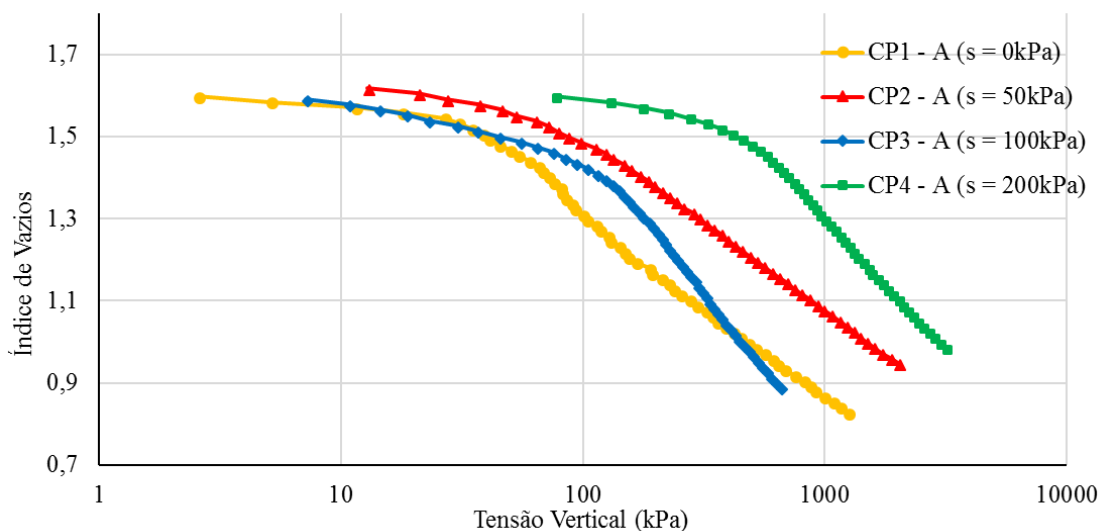
#### 4.5. ENSAIOS EDMÉTRICOS COM SUCCÃO CONTROLADA

A Figura 34 apresenta os resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada para os corpos de prova obtidos da Amostra 1, sem saturação inicial, sendo a sucção imposta em trajetória de umedecimento cujas condições iniciais estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método A).

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP	w	$\gamma_d$	e	s
				Nº	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )		(kPa)
Reconstituição Hidrostática	1	Trajetória por Umedecimento	A	1	29,2	10,49	1,60	0
			A	2	27,63	10,41	1,63	50
			A	3	28,54	10,51	1,60	100
			A	4	29,17	10,46	1,62	200

Figura 34 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 1.

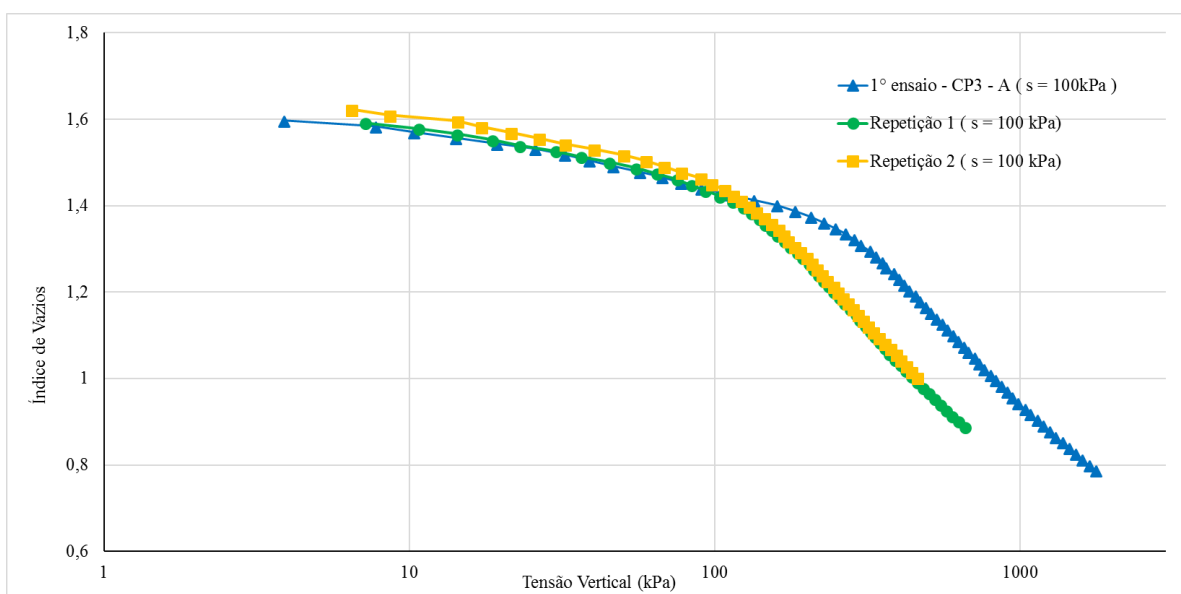


Na tentativa de verificar o comportamento para 100 kPa realizou-se novos ensaios para esta tensão. Mas, conforme verificado na Figura 35, os comportamentos foram bastante semelhantes. As condições iniciais dos corpos de prova estão expostas na Tabela 5.

Tabela 5 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método A) para sucção de 100 kPa.

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP N°	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	s (kPa)
Reconstituição Hidrostática	1	Trajetória por Umedecimento	A	3	29,26	10,45	1,62	100
			A	R1	28,54	10,51	1,60	100
			A	R2	29,36	10,39	1,64	100

Figura 35 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da amostra 1 (Método A) para sucção de 100 kPa.

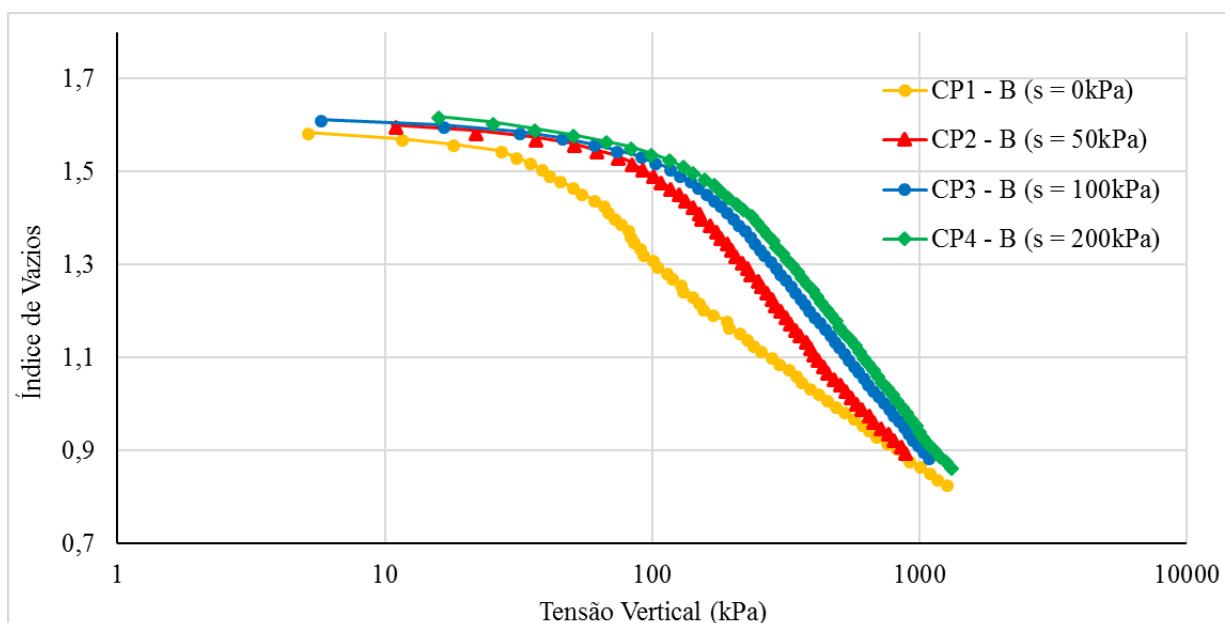


A Figura 36 apresenta os resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada para os corpos de prova obtidos da Amostra 1, saturados inicialmente, sendo a sucção imposta nos corpos de prova em trajetória de secagem cujas condições iniciais estão expostas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1 (Método B).

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP N°	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	s (kPa)
Reconstituição Hidrostática	1	Trajetória por Secagem	B	1	29,26	10,53	1,60	0
			B	2	28,55	10,37	1,64	50
			B	3	28,85	10,38	1,64	100
			B	4	28,70	10,35	1,65	200

Figura 36 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 1 (Método B).

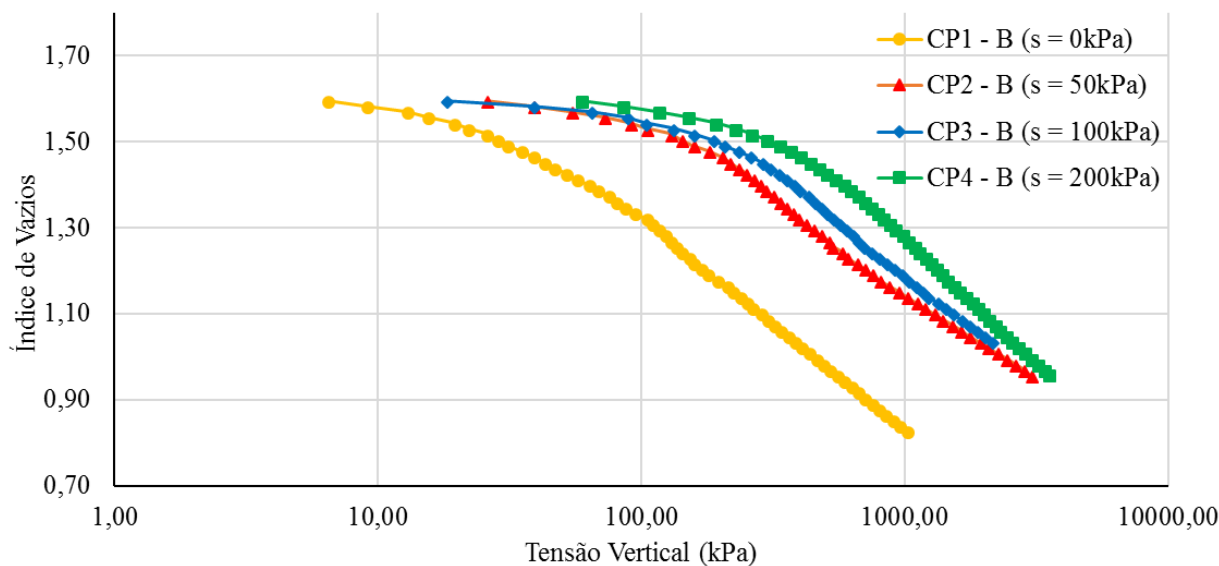


A Figura 37 apresenta os resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada para os corpos de prova obtidos da Amostra 2, sendo a sucção imposta em trajetória de secagem e cujas condições iniciais estão expostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 2.

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP N°	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	s (kPa)
Reconstituição Edométrica	2	Trajetória por Secagem	B	1	57,70	10,49	1,61	0
			B	2	55,95	10,49	1,61	50
			B	3	57,56	10,49	1,61	100
			B	4	55,92	10,49	1,61	200

Figura 37 – Resultados dos ensaios edométricos com sucção controlada da Amostra 2.



Nas Figuras 38 e 39 associamos os resultados dos ensaios para analisar as diferenças e semelhanças obtidas quanto ao método de preparação das amostras, investigando como a estrutura do solo interfere na sua característica compressibilidade. As condições iniciais dos corpos de prova estão expostas na Tabela 8 e 9.

Tabela 8 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada das Amostras 1 (Método A) e 2 (Método B).

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP	w	$\gamma_d$	e	s
				Nº	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )		(kPa)
Reconstituição Hidrostática	1	Trajetória por Umedecimento	A	1	29,2	10,49	1,60	0
			A	2	27,63	10,41	1,63	50
			A	3	28,54	10,51	1,60	100
			A	4	29,17	10,46	1,62	200
Reconstituição Edométrica	2	Trajetória por Secagem	B	1	57,70	10,49	1,61	0
			B	2	55,95	10,49	1,61	50
			B	3	57,56	10,49	1,61	100
			B	4	55,92	10,49	1,61	200

Figura 38 – Resultados da Amostra 1 (Método A) com Amostra 2 (Método B).

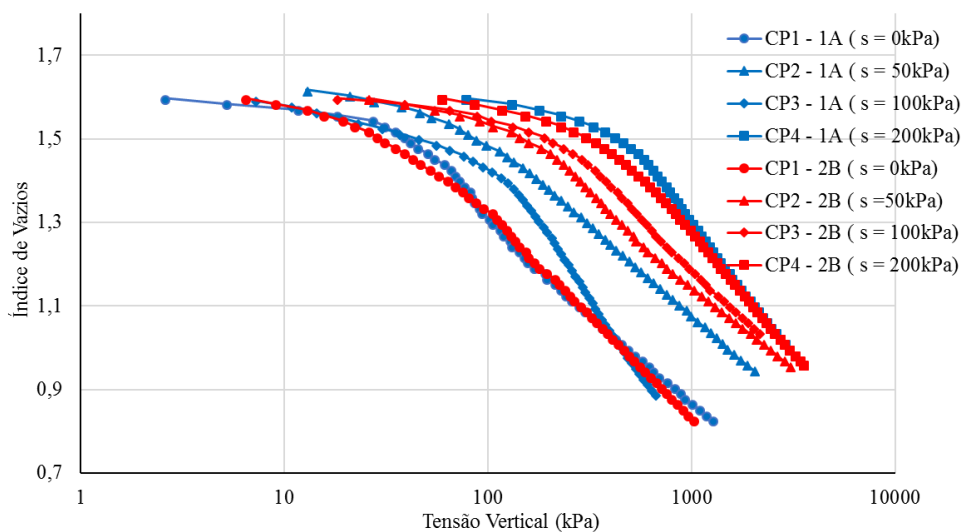
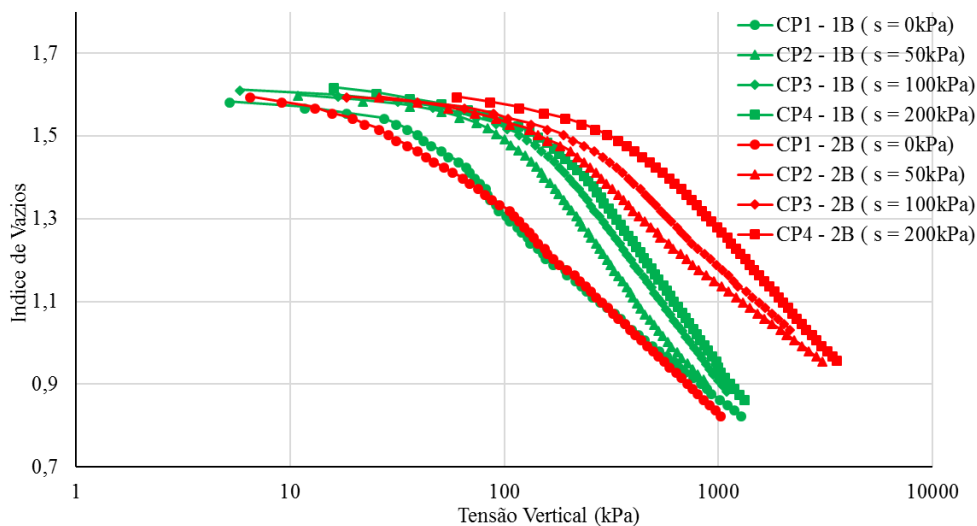


Tabela 9 – Condições iniciais dos corpos de prova do ensaio edométrico com sucção controlada das Amostras 1 (Método B) e 2 (Método B).

Condições dos corpos de prova								
	Amostra		Método	CP N°	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	s (kPa)
Reconstituição Hidrostática	1	Trajetória por Secagem	B	1	29,26	10,53	1,60	0
			B	2	28,55	10,37	1,64	50
			B	3	28,85	10,38	1,64	100
			B	4	28,70	10,35	1,65	200
Reconstituição Edométrica	2	Trajetória por Secagem	B	1	57,70	10,49	1,61	0
			B	2	55,95	10,49	1,61	50
			B	3	57,56	10,49	1,61	100
			B	4	55,92	10,49	1,61	200

Figura 39 – Resultados da Amostra 1 (Método B) com Amostras 2 (Método B).



Conforme pode-se observar nas Figuras 34, 36 e 37, as curvas de compressão edométrica com sucção controlada dos solos tendem, a partir de certo ponto, a se tornar mais próximas com o aumento da tensão vertical, independente da umidade das amostras e forma de moldagem do corpo de prova.

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. Conforme verificado, o solo, apresenta o comportamento mais próximo do proposto por Wheeler e Sivakumar (1995) e Futai (1997), que adaptam o modelo original para uso em situações de  $\lambda(s)$  crescentes com a sucção.

Nas amostras  $\lambda(s)$  aumenta com a sucção e conduzem a um acréscimo na tensão de pré-adensamento do solo com a sucção. Conforme relatado por Machado e Vilar (1997), este padrão de comportamento é típico de solos brasileiros.

Analisando as retas virgens e as tensões de pré-adensamento das Amostras 1 e 2 (Figura 39) é verificado que, para uma mesma sucção imposta em trajetória de secagem, o teor de umidade de moldagem influencia no comportamento das curvas  $\sigma \times e$ . Os valores de  $\sigma'_{vm}$ , e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de  $\sigma'_{vm}$ , e das Amostras 1 e 2 com sucção imposta em trajetória de secagem.

			Sucção			
			0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa
<b>Reconstituição Hidrostática</b>	Amostra 1	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	40	100	200	250
		e	1,52	1,52	1,52	1,52
<b>Reconstituição Edométrica</b>	Amostra 2	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	70	200	350	500
		e	1,5	1,53	1,52	1,54

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foram avaliados os parâmetros de compressibilidade e a sucção de um solo não saturado, baseado nos conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados. Esperava-se obter, para o mesmo solo, corpos de prova com pesos específicos aparentes secos iguais, porém com diferentes estruturas. Para isso, foram alterados apenas o teor de umidade e a forma de preparação entre as amostras (reconstituição hidrostática, para as amostras do tipo 1, e por reconstituição edométrica para as amostras do tipo 2). Supunha-se que estas diferenças na estrutura iriam interferir diretamente nos respectivos comportamentos da curva de retenção de água e da curva de compressão edométrica sucção controlada deste solo, avaliando-os, neste último caso, segundo os modelos propostos por Alonso et al. (1990), ora aos encontrados por Wheeler e Sivakumar (1995) e Futai (1997).

Com base nas informações obtidas dos ensaios realizados nesse programa experimental e considerando-se as particularidades e objetivos previamente mencionados, as seguintes conclusões são delineadas:

- ✓ Por meio da curva característica de retenção de água e da curva de adensamento unidimensional, conclui-se que se conseguiu produzir estruturas diferentes nas Amostras 1 e 2, visto que os corpos de prova da Amostra 1, reconstituídos hidrostáticamente, moldados no ramo seco da curva de compactação, apresentaram um comportamento bastante diferente do apresentado pelos corpos de prova da Amostra 2, reconstituídos edométricamente, moldados no ramo úmido da curva de compactação, no que corresponde a essas curvas;
- ✓ As diferenças de comportamento no ensaio de adensamento unidimensional levam a supor que a moldagem dos corpos de prova da Amostra 1, no ramo seco, tenha gerado a formação de agregações de partículas nessa estrutura. Esta suspeita se deu primeiramente pela ocorrência de colapso da estrutura com a inundação dos corpos de prova, levando as curvas de adensamento unidimensional a coincidirem com a do material saturado. A presença da sucção na Amostra 1 (não saturada) ficou evidente pelo aumento de sua rigidez, o que pode ser constatado pela sua tensão de pré-adensamento que foi indiscutivelmente maior que a da Amostra 2;
- ✓ Nas curvas de retenção de água, o solo moldado no ramo seco apresentou, para um mesmo teor de umidade, valores de sucção menores, enquanto que, para o solo moldado com a consistência de lama, os valores de sucção foram maiores;

- ✓ Os valores de pressão de entrada de ar foram relativamente baixos, próximos aos valores obtidos para areias, mostrando que o comportamento deste solo se assemelha ao de um solo granular. Segundo os autores Oliveira e Marinho (2004), este comportamento parecido ao de solos arenosos se caracteriza pela formação de macros e microporos no interior das agregações;
- ✓ No que se refere à curva de compressão edométrica com sucção controlada, as duas amostras apresentaram comportamentos semelhantes. As tensões de pré-adensamento aumentaram e as retas virgens se aproximaram, indicando o aumento da inclinação e consequente redução da rigidez com aumento da sucção;
- ✓ O modelo de Alonso et al. (1990) prevê o aumento da rigidez, ao passo que, para os materiais pesquisados nesse trabalho, houve uma diminuição dessa propriedade. Os modelos de Wheeler e Sivakumar (1995) e Futai (1997), em geral, ajustaram-se melhor aos resultados experimentais dos ensaios de compressão edométrica com sucção controlada para as amostras 1 e 2;
- ✓ No intuito de verificar diferenças de comportamento no ensaio edométrico com sucção controlada da Amostra 1, impondo trajetórias de umedecimento ou secagem, adotou-se diferentes métodos no início do ensaio, os quais foram denominados A e B referindo-se a saturação ou não do corpo de prova antes da aplicação da sucção desejada. Os corpos de prova ensaiados por umedecimento (método A) apresentaram a retas virgens da curva de compressão um pouco mais dispersas, mas não o suficiente para assegurar que estejam se comportando conforme o modelo de Alonso et al (1990).

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestões para futuros trabalhos, destacam-se as seguintes:

- ✓ mesmos ensaios em silte e areia para também analisar o efeito da sucção na compressibilidade desses solos;
- ✓ Reduzir o índice de vazios inicial (aumentando a pressão hidrostática para 200 kPa) da amostra reconstituída hidrosticamente e, conseqüentemente, da amostra reconstituída edométricamente. Pretendendo assim, verificar se a pressão de entrada de ar da curva característica de retenção de água desta argila aumenta;
- ✓ Para o solo reconstituído hidrosticamente, no ramo seco da curva de compactação, fazer inundações no meio do ensaio edométrico com sucção controlada, comparando os potenciais de colapso com os do ensaio de adensamento unidimensional;

- ✓ Na amostra reconstituída hidrosticamente, saturar inicialmente deixando que a água percole pelo corpo de prova enquanto está sendo comprimido na panela;
- ✓ Aplicar valores de sucção maiores que 200 kPa, para verificar se o comportamento do solo em estudo altera com tensões elevadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 3336/90: Solo- Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990, 13 p.

AGNELLI, N.; ALBIERO, J.H. Aspectos físicos, químicos e mecânicos de um solo colapsível, inundado com diferentes líquidos. Solos e Rochas, n. 20, v. 2, p. 79-95, 1997.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. A constitutive model for partially saturated soils. Geotechnique, v. 40, n. 3, 1990.

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.

AZEVEDO, R. F. (1994). Comentários sobre um Modelo Constitutivo para solos não saturados – 2º Simpósio sobre solos não saturados. Recife – PE, 4 a 5 de Abril de 1994, p. 259-264.

BARBOUR. S. L: The soil water characteristic curve: a historical perspective. Nineteenth Canadian geotechnical colloquium Can Geotech J., Vol. 35, 1998.

BAVER L. D.; GARDNER W. H.; GARDNER W.R..Soil physics, 4 ed. London, Wiley & Sons, Inc, 1972.

BOCKING K. A., FREDLUND D. G. Limitations of the axistranslation technique. In: Proceedings of the 4th international conference expansive soils, Denver, 1980.

CARVALHO, S. R. L; ALMEIDA, M.S.S; MARTINS, I.S.M. Ensaio de adensamento com velocidade controlada: proposta de um método para definição da velocidade. Solos e Rochas, São Paulo, n. 16, v. 3, 1993.

CINTRA, J. C. A. (1998). “Fundações em Solos Colapsíveis”. Escola de Engenharia de São Carlos. SP, 106p.

CUSTÓDIO, G. S. Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados. 2009. 187f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

DE CAMPOS, T. M. P et al. Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório. 1ª Conferência sobre Estabilidade de Encostas – 1º COBRAE. Rio de Janeiro, RJ, VOL III, 1992.

DUDDLEY, J. M. (1970). Review of collapsing soils. Journal of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 96, nº SM3, Maio, pp.925-947.

ESCARIO V.; SAEZ J. Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel 1: 195–200. 1973.

EDIL, T. B., MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. 1981. Mechanical behaviour and testing methods of unsaturated soils, in R. N. Yong and F. C. Townsend (Eds.), Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP No. 740, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 103, n.GT5, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength for unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, v. 15, n. 3, 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, INC., New York, 1993.

FREDLUND, D.G., XING, A.; HUANG, S., Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31, 1994.

FUTAI, M.M. (1997). “Análise de Ensaio Edométrico com Sucção Controlada em Solos Colapsíveis”. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

GON, F.S. Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/SP. Faculdade de Engenharia Civil- UNICAMP, 2010. 166 p. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010.

GUTIERREZ, N. H. M. (2005) Influência de Aspectos Estruturais no Colapso de Solos do Norte do Paraná. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/ SP. 325p.

GUIMARÃES NETO, J.S. (1997). “Análise de Alguns Fatores que Podem Influenciar a Colapsibilidade de um Solo Compactado Devido à Inundação”. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife – PE, 105p.

HEAD, K.H. Manual of soil testing. Pentech Press, London, v. 3, 1984.

HILF, J. W. An investigation of pore – water pressure in compacted cohesive soils. Denver, 1956. 109p. Thesis (Ph.D.) – Faculty of the Graduate School, University of Colorado, Denver, 1956.

IBAÑEZ, J. P. Modelagem Constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados. 2003. 27f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.

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.

JUCÁ J.F.T., Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succio controlada. Tesis doctoral. Universidad de Madrid (1990).

KLUTE, A. (1986). Water retention: Laboratory methods. In A. Klute (ed), Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 635-662.

LEME, R. F.; LOBÃO, J. R. S.; SILVA FILHO, F. C., “Estudo da influência da estrutura do solo compactado na curva característica com aplicação a barragens de terra”. 7º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Vol. 1 – pp. 179-184

LEROUEIL, S.; BARBOSA, P.S. A. Combined effect of fabric, bonding and partial saturation on yielding of soils. Proceedings of Asian Conference on Unsaturated Soils – From theory to practice – Unsaturated Soils for Asia. H. Rahardjo, D. G. Toll e R. C. Leong (eds). 18-29 de maio 2000, Singapura, pp. 527 – 532.2000.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. 2. ed. Brasil: EDUSP, 2012.

LOPES, M.B.L. Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 2006, 176 p.

MACHADO, S. L. Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenos compactado em edômetro com sucção controlada. 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

MACHADO S.L.; VILLAR O.M. Collapse and Ko tests under controlled suction on a lateritic soil. XIV ICSMFE, Hamburg, Germany, 1997.

MOURA, A. P. “Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação (CRS): Desenvolvimento do Equipamento e Realização de Ensaios em Solos Moles do Leste de Santa Catarina”. Florianópolis, 2004. PPGEC/ UFSC.

NESNAS, K. 1995. A finite element implementation of a criticalstate model for unsaturated soils to simulate drained conditions. Ph.D. Thesis. Sheffield University, UK.

OLIVEIRA, O. M. e MARINHO, F. A. M. (2004), “Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado”. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Vol. 1 – pp. 279-287.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. 3.ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 391p.

PERAZZO, G. M. & LINS, A. H. P., 1997, Aplicação de um Modelo Elastoplástico na Análise do Comportamento Tensão-Deformação de um Solo Não Saturado Compactado. Anais de 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, 261 – 270.

PRESA, E. P. Deformabilidad de las Arcillas Expansivas bajo succión Controlada, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid, 269p, 1982.

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.

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.

SCHOFIELD, R. K. The pF of water in soil. In: International Congress for Soil Science, 3. Oxford, England, 1935. Trans. 3<sup>rd</sup> International Congress for Soil Science. London: T. Murby & Co., v. 2.

SILVA FILHO, F.C. (1998). “Análise Numérica de Problemas em Solos Não Saturados: Modelagem, Implementação e Aplicações Práticas”. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

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.

SOUZA NETO, J. B. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). Tese M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 468p.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. L.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUF AHL, D.E. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Geotechnique, v.49, n.2, 1999.

VIEIRA, G. S. Desenvolvimento de equipamento para ensaios CRS com sucção controlada e ensaios em solos não saturados cimentados artificialmente. 2006. 79f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

VILAR, O.M e GAIOTO, N. Comportamento Colapsível de um solo laterítico compactado. Anais de 2º Simpósio Sobre Solos Não-Saturados, AMSF- UFPE/ABMS- NE, Recife- Pe, 1994.

VILAR, O. M. Aspectos do comportamento colapsível de solos compactados. 110p. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

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.

WHEELER, S.J.; SIVAKUMAR, V. An Elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. Geotechnique. Vol. 45, nº 1. Araki e Carvalho (1995)