

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Rodrigo Carreira Weber**

**Avaliação das Trajetórias de Umedecimento e Secagem na  
Deformabilidade Elástica de Solos Compactados**

Porto Alegre  
2013

RODRIGO CARREIRA WEBER

**AVALIAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE UMEDECIMENTO  
E SECAGEM NA DEFORMABILIDADE ELÁSTICA DE  
SOLOS COMPACTADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

201

### CIP - Catalogação na Publicação

Weber, Rodrigo Carreira

Avaliação das Trajetórias de Umedecimento e Secagem  
na Deformabilidade Elástica de Solos Compactados /  
Rodrigo Carreira Weber. -- 2013.

139 f.

Orientadora: Wai Ying Yuk Gehling.

Coorientador: Washington Peres Núñez.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2013.

1. Solos Não Saturados. 2. Curvas de Retenção. 3.  
Pavimentação. 4. Módulo de Resiliência. 5. Resistência  
ao Cisalhamento. I. Gehling, Wai Ying Yuk, orient.  
II. Núñez, Washington Peres, coorient. III. Título.

**RODRIGO CARREIRA WEBER**

**AVALIAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE UMEDECIMENTO  
E SECAGEM NA DEFORMABILIDADE ELÁSTICA DE  
SOLOS COMPACTADOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de setembro de 2013

Profa. Wai Ying Yuk Gehling  
Dra. pela Universidad Politécnica de  
Catalunya  
orientador

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul  
co-orientador

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

**Profa. Luciana Rohde (UFSC)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

**Profa. Lilian Ribeiro de Rezende (UFG)**  
Dra. pela Universidade de Brasília (UnB)

## RESUMO

WEBER, R. C. **Avaliação das Trajetórias de Umedecimento e Secagem na Deformabilidade Elástica de Solos Compactados**. 2013. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho analisa os efeitos das trajetórias de umedecimento e secagem no módulo de resiliência e cisalhamento direto quanto à resistência e deformabilidade elástica de solos compactados através de ensaios triaxiais de carga cíclica e ensaios de cisalhamento direto. O solo estudado é oriundo de jazida localizada próximo à BR116/RS, no município de Guaíba, sendo usualmente utilizado como material para execução de aterros rodoviários. As curvas de retenção do solo foram obtidas pelo método de papel filtro para solos compactados com variação de teor de umidade ótima de  $\pm 2\%$ . Os estudos de módulo de resiliência e de resistência ao cisalhamento foram analisados nestas condições e demonstraram que o efeito do teor de umidade é significativo nas trajetórias de secagem e umedecimento. As curvas de retenção mostraram diferentes formas de acordo com a umidade de compactação e apresentaram histerese após a amostra ser submetida à trajetória de secagem. Observou-se que os solos compactados no ramo seco apresentaram valores mais elevados de módulo de resiliência e de resistência ao cisalhamento que aqueles que se encontravam no ramo úmido da curva de compactação. Uma análise do solo compactado no ramo seco e umedecido posteriormente até o ramo úmido teve comportamento semelhante aos moldados neste ramo. Por outro lado, na trajetória de secagem dos solos compactados no ramo úmido observou-se um aumento na resistência. Os modelos de desempenho para módulo de resiliência apresentaram boas correlações e para os que utilizam a sucção, observa-se um comportamento diferente com relação aos que não utilizam e com relação às constantes de cada modelo.

Palavras-chave: solos não saturados; pavimentação; sucção; curva de retenção; módulo de resiliência; resistência ao cisalhamento.

## ABSTRACT

WEBER, R. C **Avaliação das Trajetórias de Umedecimento e Secagem na Deformabilidade Elástica de Solos Compactados**. 2013. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil UFRGS, Porto Alegre.

This paper analyzes the effects of wetting and drying paths in resilient modulus and shear strength for resistance and elastic deformability of compacted soils through triaxial cyclic load tests and direct shear tests. The soil studied is derived from BR116/RS near the Guaíba's city, usually being used for subgrade. The retention curves of the soil were obtained by the filter paper method, with optimum moisture content varying a range of  $\pm 2\%$ . The studies of resilient modulus and shear strength were analyzed in these conditions and showed that the effect of moisture content is significant in the drying and wetting trajectories. The retention curves showed different forms according to the moisture content in the compaction, showed hysteresis after the specimen is subjected to the drying trajectory. It was observed that the soils compacted and tested in the dry branch had higher resilient modulus and shear strength than those compacted in the wet branch. An analysis of the soil compacted in the dry branch and subsequently dampened up to the wet branch had similar behavior to the soil molded at this branch. On the other hand, in the trajectory of drying of the compacted soil at wet branch there is an increase in resistance. Performance models for resilient modulus showed good correlations and those using suction, observe a different behavior with respect to that use and not with respect to the constants of each model.

Key-words: unsaturated soil; pavement; suction; retention curve; resilient modulus; shear strength.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CAPES e ao CNPq pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos para alcançar com sucesso o final dessa etapa da minha vida.

Com grande respeito gostaria de agradecer a minha família por todo apoio e incentivo dado durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha mãe Valéria, por ter segurado a barra durante o desenvolvimento da pesquisa, ouvindo meus temores, receios e dando força pra continuar.

Agradeço a minha orientadora, e amiga, Profa. Wai Ying Yuk Gehling pelos conhecimentos transmitidos, paciência, atenção dedicada e confiança depositada em mim para a realização dessa pesquisa. Sem elas, certamente não conseguiria chegar ao final desta etapa da minha vida. Muito obrigado, de coração.

Também agradeço ao meu coorientador Prof. Washington Peres Núñez por toda dedicação dada para que se alcançasse um trabalho de boa qualidade. Obrigado por sua amizade ao longo desses anos de orientação, conselhos e preocupações, não apenas como acadêmico, mas com a vida.

Meus sinceros agradecimentos ao corpo docente do PPGEC, pelos conhecimentos transmitidos e atenção dedicada. Aos professores Luiz Bressani, Jorge Ceratti, Fernando Schnaid, Nilo Consoli e demais professores, muito obrigado.

Ao laboratorista Jair Silva pela ajuda para com minha pesquisa. Obrigado pela ajuda e paciência em me ensinar as práticas laboratoriais, dicas na execução de ensaios e como tratar resultados, e também, pela amizade adquirida ao longo desse tempo.

Agradeço ao Lageotec pelo espaço cedido, disponibilidade dos equipamentos e acolhimento, que sem estes, não seria possível a conclusão deste trabalho. Aos bolsistas Ana, Gabriel, Diego e Marco, pelos auxílios, descontração, apoio e amizade.

Também agradeço ao Lapav por sua infraestrutura que me permitiu realizar parte dos meus ensaios. Aos técnicos Daniel e Vinícius e aos colegas, André Bock, Lucas

Delongui, Matheus Nogueira, Lélío Brito, João Rodrigo e Alex Granich, a todos, muito obrigado pela ajuda e palavras de incentivo.

Ao meu bolsista e amigo Matheus Matuella por toda ajuda e auxílio prestado nos últimos meses de mestrado, que foram essenciais. Muito obrigado pela paciência e atenção a minha pesquisa.

A minha bolsista, auxiliar, companheira e principalmente, amiga, Rebeca Schimitz que ao longo de todo este trabalho esteve ao meu lado dando apoio, dedicando-se como sendo seu, e segurando a barra quando eu não conseguia estar presente. Te agradeço por tudo, muito obrigado.

Ao amigo, e colega, Marcelo Heidemann por me ajudar em tantos momentos, paciência para ouvir minhas dúvidas, medos e preocupações, e sempre mandar eu me acalmar, obrigado.

A minhas amigas Daniela Rosa, Gabriela Pinto e Emanuele Gauer, por suas amizades, carinho e compreensão. Pelos momentos de alegria, diversão, de estudo e aos de estresse e tensão também. Sem vocês, certamente este caminho teria sido mais pesado. Muito obrigado por me ajudarem a tornar essa jornada mais leve e prazerosa.

A todos os demais amigos e colegas pelo apoio, conselhos e palavras de conforto, obrigado a vocês todos, de coração.



Dedico este trabalho a minha mãe Valéria pela  
compreensão durante o período de seu  
desenvolvimento.

Dar menos que seu melhor é sacrificar o dom que  
você recebeu.

*Steve Prefontaine*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: fluxograma da metodologia empregada neste trabalho.....	24
Figura 2.1: classificação do solo não saturado proposta por Wroth e Houlby.....	26
Figura 2.2: curva de retenção unimodal.....	28
Figura 2.3: curva de retenção bimodal .....	29
Figura 2.4: a) curva de retenção mostrando valor de entrada de ar (VEA) e saturação residual; b) curva mostrando a relação da sucção mátrica com a resistência ao cisalhamento.....	31
Figura 2.5: curva de retenção para obtenção dos parâmetros do modelo de Fredlung e Xing (1994).....	35
Figura 2.6: curvas tensão x deformação para ensaios sob diferentes níveis de sucção em um silte não-saturado .....	39
Figura 2.7: envoltórias de ruptura para diferentes sucções.....	40
Figura 2.8: envoltórias de Mohr-Coulomb estendida para solos não-saturados.....	41
Figura 2.9: linha de intercepção ao longo do plano de ruptura que forma ângulo $\phi_b$ ....	42
Figura 2.10: (a) papel filtro com contato e (b) papel filtro sem contato.....	45
Figura 2.11: diferença causada pelas trajetórias de sucção no índice de compressão.....	47
Figura 2.12: curvas mostrando a influência dos trajetórias de sucção na resistência ao cisalhamento (a); deformação vertical (b); e variação de volume (c).....	49
Figura 2.13: curvas de retenção para diferentes umidade de compactação.....	50
Figura 2.14: (a) estrutura fofa; (b) estrutura compacta.....	51
Figura 2.15: a) curva para obtenção do parâmetro $m_c$ ; b) curva do log MR para obter os parâmetros $m_{ld}$ e $c_{ld}$ .....	55
Figura 2.16: variação do módulo de resiliência em diferentes trajetórias de umedecimento e secagem.....	56
Figura 2.17: variação do módulo de resiliência com a sucção.....	56
Figura 2.18: módulo de resiliência das amostras submetidas a trajetória de umedecimento e secagem.....	58
Figura 2.19: relação entre o módulo de resiliência e a sucção.....	58
Figura 2.20: diferença entre os métodos de compactação abaixo da umidade ótima.....	59
Figura 2.21: diferença entre os métodos de compactação acima da umidade ótima.....	59
Figura 2.22: diferença entre os métodos de compactação na umidade ótima.....	60
Figura 2.23: relação entre os métodos de compactação e a sucção.....	61
Figura 2.24: (a) relação entre o módulo de resiliência e a tensão desvio; (b) relação entre a deformação resiliente e a tensão desvio, devidas ao nível de sucção inicial.....	62
Figura 3.1: jazida do solo estudado.....	69

Figura 3.2: curvas granulométricas.....	70
Figura 3.3: curva de compactação com energia Proctor normal .....	71
Figura 3.4: equipamento para ensaio de módulo de resiliência.....	71
Figura 3.5: corpo de prova em umedecimento.....	73
Figura 3.6: moldagem do corpo de prova para ensaio de sucção.....	75
Figura 3.7: corpo de prova embalado com papel filme.....	76
Figura 3.8: amostra em processo de secagem ao ar.....	76
Figura 3.9: equipamento para resistência ao cisalhamento direto.....	77
Figura 4.1: curva de retenção da amostra com 14% de umidade inicial em trajetória de umedecimento e secagem .....	81
Figura 4.2: curva de retenção da amostra com 16% de umidade inicial em trajetória de umedecimento e secagem.....	82
Figura 4.3: curva de retenção da amostra com 18% de umidade inicial em trajetória de umedecimento e secagem.....	83
Figura 4.4: modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana(2004) da amostra com 14% de umidade inicial.....	85
Figura 4.5: modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana(2004) da amostra com 16% de umidade inicial.....	86
Figura 4.6: modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana(2004) da amostra com 18% de umidade inicial.....	87
Figura 4.7: comparação das curvas de retenção ajustadas para os trajetórias de secagem para diferentes teores de umidade de compactação (14%, 16% e 18%).....	88
Figura 4.8: curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelos de Fredlund e Xing (1994) da amostra com 14% de umidade inicial.....	89
Figura 4.9: curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelos de Fredlund e Xing (1994) da amostra com 16% de umidade inicial.....	90
Figura 4.10: curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelos de Fredlund e Xing (1994) da amostra com 18% de umidade inicial.....	90
Figura 4.11: resultado dos ensaios de módulo de resiliência para as amostras compactadas em diferentes umidades (12%, 14%, 16%, 18% e 20%).....	92
Figura 4.12: módulo de resiliência das amostras compactadas com 14% de umidade e submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem.....	93
Figura 4.13: módulo de resiliência das amostras compactadas com 18% de umidade e submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem.....	94
Figura 4.14: módulo de resiliência das amostras compactadas com 16% de umidade e submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem.....	95
Figura 4.15: módulo de resiliência das amostras quando alcançam a umidade ótima (16%) por trajetória de umedecimento ou secagem.....	96

Figura 4.16: módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 14% em tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio.....	98
Figura 4.17: módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 16% em tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio.....	98
Figura 4.18: módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 18% em tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio.....	99
Figura 4.19: comparativo entre módulos de resiliência e sucção com diferentes umidades de compactação em tensão confinante de 35kPa e tensão desvio de 69kPa.....	99
Figura 4.20: ruptura do corpo de prova submetido a secagem.....	102
Figura 4.21: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% ensaiadas na condição inundada.....	104
Figura 4.22: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas na condição inundada.....	105
Figura 4.23: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% ensaiadas na condição inundada.....	106
Figura 4.24: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% ensaiadas na condição não saturada.....	107
Figura 4.25: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas na condição não saturada.....	108
Figura 4.26: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% ensaiadas na condição não saturada.....	109
Figura 4.27: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% ensaiadas com umidade de 16% na condição não saturada.....	110
Figura 4.28: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas com umidade de 14% na condição não saturada.....	111
Figura 4.29: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas com umidade de 18% na condição não saturada.....	112
Figura 4.30: curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% ensaiadas com umidade de 16% na condição não saturada.....	113
Figura 4.31: tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas e ensaiadas na condição saturada.....	114

Figura 4.32: tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas e ensaiadas na condição não saturada.....	115
Figura 4.33: tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas em 16% submetidas a trajetórias de umedecimento e secagem, ensaiadas na condição não saturada.....	115
Figura 4.34: tensão normal x tensão cisalhante das amostras ensaiadas no teor de umidade de 16% alcançada através de trajetórias de umedecimento e secagem, ensaiadas na condição não saturada.....	116
Figura 4.35: curva de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 16% e ensaiadas em diferentes valores de tensão normal líquida.....	118
Figura 4.36: curva de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 14% e ensaiadas em diferentes valores de tensão normal líquida.....	119
Figura 4.37: curva de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 18% e ensaiadas em diferentes valores de tensão normal líquida.....	119
Figura 5.1: relação entre módulo de resiliência e as variações de umidade.....	122
Figura 5.2: relações entre módulo de resiliência com a umidade para as amostras ensaiadas na mesma umidade de compactação e amostras submetidas a trajetórias de umedecimento ou secagem.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: equações de resistência ao cisalhamento correlacionadas com a curva de retenção.....	32
Tabela 2.2: equações para modelagem do curva de retenção.....	33
Tabela 2.3: lista das principais equações de calibração do papel filtro.....	46
Tabela 2.4: análise estatística básica do modelo k1-k3, assumindo k6=0, e para cada um dos materiais de base e sub-base e solos de subleito.....	66
Tabela 3.1: frações do solo.....	69
Tabela 3.2: sequencia de tensões para fase de condicionamento (DNIT 134/2010).....	73
Tabela 3.3: programa de ensaios de módulo de resiliência.....	74
Tabela 4.1: parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 14% através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004).....	84
Tabela 4.2: parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 16% através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004).....	85
Tabela 4.3: parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 18% através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004).....	86
Tabela 4.4: parâmetros para modelo de curva de retenção propostos por Fredlund e Xing (1994).....	89
Tabela 4.5: relação entre teor de umidade, grau de saturação e sucção.....	96
Tabela 4.6: características dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.....	102
Tabela 4.7: parâmetros de resistência para todas as amostras ensaiadas.....	117
Tabela 5.1: parâmetros obtidos dos modelos k- $\sigma$ d e de Bishop .....	124
Tabela 5.2: parâmetros obtidos do modelo composto.....	125
Tabela 5.3: parâmetros do modelo da AASHTO.....	126
Tabela 5.4: parâmetros do modelo da AASHTO incorporando a sucção.....	127



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1 JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL .....	23
1.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS .....	23
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS E A SUCÇÃO.....	25
2.1.1 Curva de Retenção .....	27
2.1.2 Equações de Ajuste da Curva de Retenção.....	33
2.1.3 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados .....	38
2.1.3.1 Variáveis dos estados de tensão e equações de resistência .....	38
2.1.3.2 Envoltória de ruptura de solos não saturados .....	40
2.1.4 Técnicas para Medição da Sucção .....	42
2.1.4.1 Placa de Pressão.....	43
2.1.4.2 Translação de Eixos.....	43
2.1.4.3 Método do Papel Filtro .....	44
2.1.5 Comportamento Perante Trajetórias de Umedecimento e Secagem....	47
2.2 A IMPORTÂNCIA DA SUCÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS.....	51
2.2.1 Efeito da Sucção no Módulo de Resiliência.....	52
2.2.2 Modelos de Módulo de Resiliência .....	63
<b>3 METODOLOGIA E ENSAIOS REALIZADOS</b> .....	68
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E ÁREA DE ESTUDO .....	68
3.2 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	71

3.3 OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO.....	74
3.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	77
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
4.1 CURVA DE RETENÇÃO.....	79
4.1.1 Trajetórias das Curvas de Retenção.....	79
4.1.2 Ajustes das curvas de retenção .....	84
4.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA E A RELAÇÃO COM A SUCCÃO.....	90
4.2.1 Resultados dos Ensaios de Módulo de Resiliência.....	91
4.2.2 Correlações do Módulo de Resiliência com a Sucção.....	96
4.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	100
4.3.1 Características e Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto .....	100
4.3.2 Envoltórias de Ruptura ao Cisalhamento no Plano $\tau$ x $(\sigma-u_a)$ .....	113
4.3.3 Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento.....	117
<b>5 MODELAGEM E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DE</b>	<b>121</b>
<b>    MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....</b>	
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>128</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	128
6.1.1 Quanto à Curva de Retenção .....	128
6.1.2 Quanto ao Módulo de Resiliência .....	129
6.1.3 Quanto à Resistência ao Cisalhamento.....	130
6.1.3 Modelos Propostos.....	131
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	131
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>133</b>

## **LISTA DE SIGLAS**

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES

LAPAV – LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO

LAGEOTEC – LABORATÓRIO DE GEOTECNOLOGIA

LVDT – LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSDUCER

MR – MÓDULO DE RESILIÊNCIA

VEA – VALOR DE ENTRADA DE AR

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c'$ : intercepto coesivo

cm: centímetro

cm<sup>3</sup>: centímetro cúbico

$\phi'$ : ângulo de atrito interno

$\phi^b$ : ângulo que quantifica a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento quando a variável escolhida é  $(\sigma - u_a)$

$\gamma_d$ : peso específico aparente seco

$\gamma_s$ : peso específico real dos grãos

°C: graus Celsius

g: gramas

IP: índice de plasticidade

LL: limite de liquidez

LP: limite de plasticidade

kPa: kiloPascal

m: metros

mm: milímetro

$\Theta$ : teor de umidade volumétrico

$\theta$ : 1° invariante de tensão

s: segundo

S: grau de saturação

Sr: grau de saturação residual

$p_a$ : pressão atmosférica

$\psi$ : sucção

$\psi_b$ : valor de entrada de ar

$\psi_{b1}$ : valor de entrada de ar dos macroporos

$\psi_{b2}$ : valor de entrada de ar dos microporos

$\psi_r$ : sucção residual

$\psi_{res1}$ : sucção residual dos macroporos

$\psi_{res2}$ : sucção residual dos microporos

$(\sigma - u_a)$ : tensão normal líquida

$(\sigma - u_w)$ : tensão efetiva

$\sigma_1$ : tensão principal maior na ruptura

$\sigma_3$ : tensão principal menor na ruptura

$\tau$ : resistência ao cisalhamento

$\tau_{oct}$ : tensão cisalhante octaédrica

$u_w$ : poro pressão de água

$u_a$ : poro pressão de ar

$(u_a - u_w)$ : sucção mátrica

$\chi$ : parâmetro relacionado com o grau de saturação

$w$ : teor de umidade gravimétrico

$w_{ot}$ : teor de umidade ótimo

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A Mecânica dos Solos clássica foi desenvolvida basicamente a partir de estudos de solos sedimentares, na condição saturada e, também, pelo fato de solos sedimentares saturados serem abundantes na Europa e América do Norte, regiões onde a Mecânica dos Solos se originou. Isso se explica primeiramente pela maior facilidade na interpretação dos resultados nessa condição (princípio da tensão efetiva).

Contudo as teorias criadas para esta condição não se aplicam aos solos não saturados, que ocorrem em grandes áreas do mundo, principalmente nas regiões de clima tropical e subtropical. Com o passar do tempo verificou-se a necessidade de despender maior atenção ao estudo desses materiais, concluindo-se que as teorias até então estabelecidas necessitariam de adaptações para que pudessem ser empregadas. Desta forma, desenvolveu-se o ramo da Mecânica dos Solos voltada especialmente para o estudo de solos não saturados.

Nos solos não saturados, a sucção ( $u_a - u_w$ ), é um parâmetro influente no comportamento mecânico associado com a tensão efetiva. Determinar as relações constitutivas e os modelos de análises para o estudo da resistência ou deformação de solos não saturados tornaram-se premissa para uma nova abordagem teórica e prática dos problemas geotécnicos dos solos não saturados.

Em regiões com clima tropical verifica-se a ocorrência de períodos bem definidos de chuva e estiagem. Estas trajetórias levam a variação na umidade do solo, podendo ocasionar alterações no seu comportamento mecânico. Os períodos de chuva e estiagem não ocorrem de maneira uniforme na natureza, fazendo com que o solo atinja os valores de sucção diferentes (comportamento similar às trajetórias de umedecimento e secagem).

As estruturas de pavimentos são normalmente constituídas de camadas de base, sub-base e subleito. Estas, por sua vez, são estabilizadas pelo processo de compactação e

comumente encontram-se na condição não saturada, à qual está presente a sucção. Estas estruturas são impostas as solicitações do tráfego, gerando deformações elásticas ou resilientes e plásticas. A parcela plástica é muito menor que a elástica em cada aplicação da carga, considerando os estados de tensões que normalmente atuam nas camadas dos pavimentos. Mesmo assim, o acúmulo das pequenas deformações permanentes, devido ao elevado número de trajetórias de carga pode resultar em afundamentos significativos. A deformação permanente pode então ser definida como o somatório desses pequenos deslocamentos irreversíveis. Este comportamento é avaliado por meio de ensaios triaxiais de carregamentos repetidos. O uso de métodos mecânicos para o projeto de pavimentos requer o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais do subleito e das camadas que compõem sua estrutura.

Devido a sua aplicabilidade, o comportamento dos solos compactados vem sendo largamente estudado ao longo dos anos, principalmente com relação a obtenção de modelos que constituem seu comportamento. Os detalhes de procedimento de compactação, assim como o teor de umidade e esforço de compactação, são conhecidos por terem uma significativa influência no comportamento mecânico de solos finos compactados. A influência do procedimento de compactação no subsequente comportamento mecânico é comumente atribuído as diferentes formas da estrutura do solo que se produz quando o método de compactação é variado. Isto implica em mudanças de fundamental importância para o comportamento do solo e, conseqüentemente, nas constantes que englobam os modelos constitutivos.

A pesquisa relatada nesta dissertação visa estudar os solos compactados para uso em camadas de pavimentos, buscando analisar a influência da trajetória de umedecimento e secagem neste material. Para este estudo foi utilizado um solo coletado em uma jazida situada na BR 116/RS, próxima às cidades de Guaíba e Eldorado do Sul, no Rio Grande do Sul.

A análise do comportamento do solo no estado não saturado foi realizada através da obtenção da curva de retenção, com trajetórias de umedecimento e secagem. O comportamento quanto a resistência e deformabilidade foi avaliado pela variação do módulo de resiliência e da resistência ao cisalhamento com a umidade e em trajetórias de secagem ou umedecimento.

## 1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

A pesquisa tem como objetivo principal analisar o efeito da secagem e umedecimento no módulo de resiliência de um solo residual compactado para diferentes umidades de compactação e obter parâmetros aplicados no dimensionamento de pavimentos para este material.

## 1.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Como objetivos específicos deste trabalho, tem-se:

- a) Caracterizar o solo em estudo;
- b) Obter a curva de retenção do mesmo para diferentes teores de umidade de compactação;
- c) Determinar a relação entre os módulos de resiliência e a sucção;
- d) Verificar a variação da resistência ao cisalhamento do solo compactado frente às trajetórias de umedecimento e secagem;
- e) Analisar o comportamento resistência - deformação deste material face às trajetórias de umedecimento e secagem para diferentes umidades de compactação.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

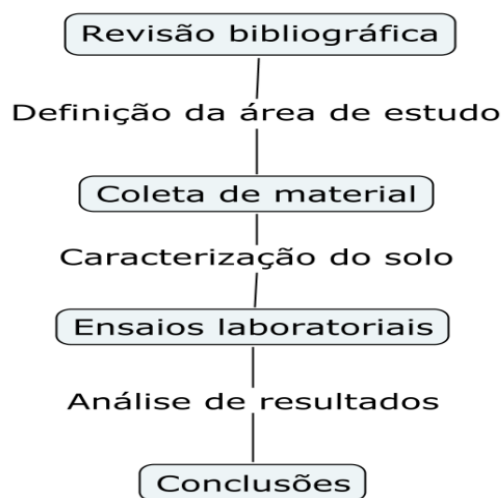
A dissertação está estruturada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo apresenta-se a introdução, justificativa e objetivos do estudo, ressaltando a sua importância e contribuição para o conhecimento na área da Geotecnia. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dividida em duas partes, uma sobre o comportamento dos solos não saturados e outra, focando o módulo de resiliência e sua relação com a sucção aplicado na pavimentação.

O terceiro capítulo apresenta as características dos materiais e o projeto experimental realizado para se alcançar os objetivos desta pesquisa. Descreve os experimentos realizados tais como moldagens dos corpos de prova e execução dos ensaios. O quarto capítulo traz os resultados dos ensaios e faz a análise dos mesmos. O quinto capítulo é



destinado ao uso de modelos e modelagens dos resultados obtidos. Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras. As diversas etapas para realização da pesquisa são apresentadas no fluxograma da Figura 1.1.

Figura 1.1 – fluxograma da metodologia empregada neste trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das áreas que abrangem este trabalho. Primeiramente, é realizada esta revisão sobre solos não saturados, englobando conceitos teóricos sobre resistência e definições. Os modelos para ajuste da curva de retenção e comportamento do solo perante as trajetórias de umedecimento e secagem são apresentados. Os conceitos sobre o módulo de resiliência, ensaio e fatores que influenciam, salientando a variação de umidade e a influência da sucção são apresentados.

### 2.1 SOLOS NÃO SATURADOS E A SUCÇÃO

Os solos não saturados diferem dos solos saturados por possuírem um sistema multifásico, composto pelas fases sólidas, líquida e gasosa. O conhecimento da constituição e distribuição de cada uma dessas fases na estrutura do solo é essencial para compreender o comportamento mecânico tais como, de resistência ao cisalhamento, variação volumétrica, condutividade hidráulica, erodibilidade, entre outros. Estão incluídos no grupo de não saturados os solos residuais, expansivos, colapsíveis, compactados e alguns solos sedimentares (VIVIAN, 2008).

Na condição não saturada surge uma pressão isotrópica resultante da interação entre líquido e o gás nos poros do solo, denominada sucção. Esta pode ser mátrica, que está relacionada à matriz do solo, ou seja, a combinação entre o tipo de partícula e o arranjo estrutural, e a osmótica, devida à concentração de sais na água do solo. A sucção mátrica é dada pela diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução, permitindo a passagem da água e dos solutos. Sendo assim, não há diferença de concentração química nos poros (FREDLUND E MORGENSTERN, 1997).

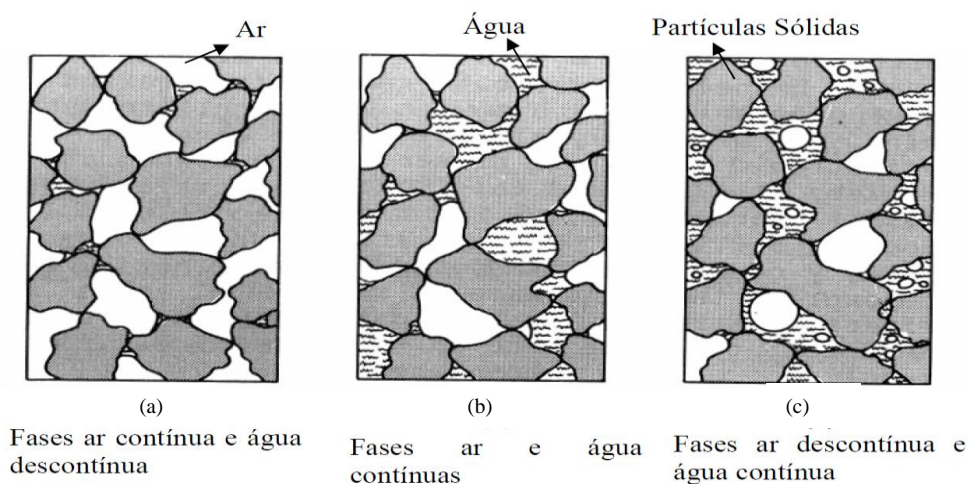
A sucção do solo é um dos parâmetros mais importantes para se entender o comportamento não saturado, uma vez que sua resistência e deformabilidade são fortemente influenciadas. Basicamente a sucção mátrica é uma quantidade energética que avalia a capacidade do solo de reter água. Quando a água livre migra dentro do solo não saturado, será adsorvida ou retida por ele. Para desprender essa água é necessária a aplicação de uma força externa. O valor da energia aplicada por unidade de volume de

água é a sucção. A sucção também pode ser definida como a tensão requerida para remover uma molécula de água do solo na fase de vapor (BENEVELI, 2002).

Os solos não saturados podem ser classificados em três categorias. A primeira trata-se de uma fase ar contínua e fase água descontínua, que ocorre em baixos graus de saturação. Nesta categoria o ar se apresenta na forma de canais e a água está retida, formando meniscos ao redor dos pontos de contato dos grãos (Figura 2.1 a).

A segunda categoria destina-se a fase ar e água contínuas, que ocorre para solos não saturados com grau intermediário de saturação (Figura 2.1 b). A terceira, por sua vez, a fase água é contínua e a fase ar descontínua, ocorrendo em graus de saturação elevados. Nesta categoria, a fase ar perde a continuidade e pode tornar-se oclusa na água. Quando finalmente o ar não está mais presente nos vazios é obtida a saturação completa. A Figura 2.1 ilustra as três categorias de acordo com a proposta de Wroth e Houlsby (1985).

Figura 2.1 – classificação do solo não saturado



(fonte: WROTH E HOULSBY, 1985)

Uma importante observação feita por Bao et al. (1998) foi a saturação para solos compactados. Sendo sugerido uma quarta categoria na classificação da saturação, a qual descreve uma fase intermediária onde o ar não está conectado com a atmosfera, mas contínua dentro da massa de solo. Essa observação é relevante, pois nos solos compactados os poros da superfície ou limites são submetidos a um esforço de

compactação maior e conseqüentemente são menores que aqueles dentro da massa de solo.

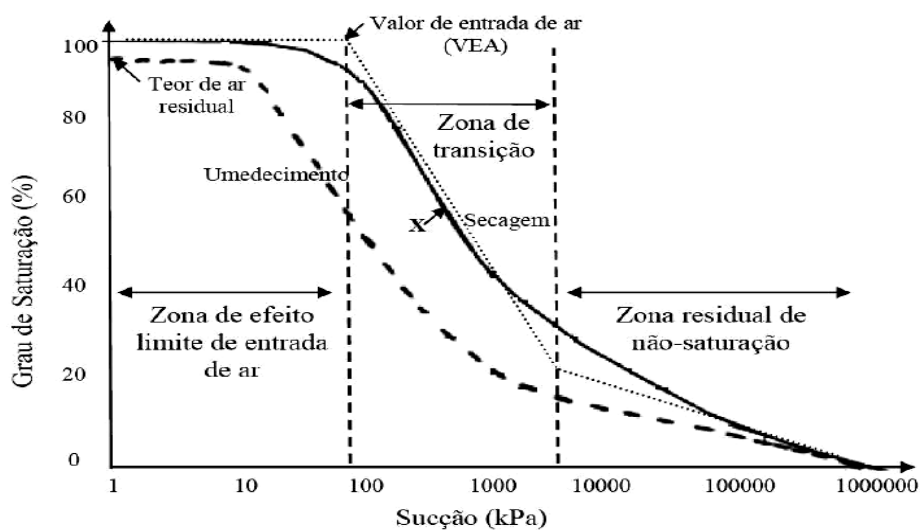
### **2.1.1 Curva de Retenção**

A curva de retenção representa a relação entre a quantidade de fluido presente nos poros do solo e a sua correspondente sucção. Quando o fluido em estudo é a água, sua quantificação pode ser expressa em termos de teor de umidade gravimétrico ( $w$ ), normalmente para casos que envolvem ruptura, teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), nos casos onde se avalia deformação, ou grau de saturação ( $S$ ). Dentre os principais fatores que influenciam na forma da curva de retenção pode-se citar o tipo de solo (estrutura e agregação), teor de umidade inicial, índice de vazios, textura, mineralogia, história de tensões e os métodos de compactação (VANAPALLI ET AL. 1999).

A partir dessa relação constitutiva é possível estabelecer (empiricamente ou teoricamente) as variações do comportamento do solo não saturado em diferentes condições de umidade. As mudanças podem ocorrer em relação à condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e variações volumétricas, ao longo das trajetórias de secagem e umedecimento do solo (VIVIAN, 2008).

A curva de retenção pode apresentar diferentes formas dependendo da estrutura do solo: unimodal (formato S) que constitui o formato mais comum e a bimodal (formato de sela), existente em alguns solos, principalmente os tropicais e subtropicais. Solos compactados apresentam normalmente formato unimodal. A Figura 2.2 mostra um exemplo de curva de retenção unimodal (FEURHARMEL, 2007).

Figura 2.2 – curva de retenção unimodal



(fonte: FEURHARMEL, 2007)

Fredlund e Xing (1994) citam que o valor de entrada de ar (VEA) representa o nível de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos maiores vazios do solo e o ponto de saturação residual corresponde ao teor de umidade além do qual uma grande variação de sucção é necessária para remover a água ainda presente no solo, pois a fase líquida encontra-se descontínua.

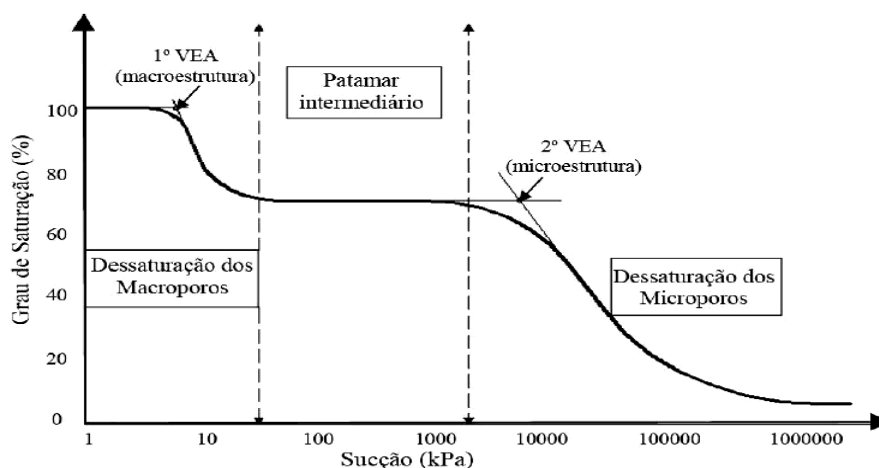
A zona de efeito limite de entrada de ar corresponde ao estágio onde todos os poros encontram-se preenchidos por água (saturado), zona onde os conceitos clássicos da mecânica dos solos são válidos. Na zona de transição, ocorre uma redução significativa do teor de umidade com o aumento da sucção e o menisco de água começa a perder sua forma contínua nos poros do solo. A zona residual é caracterizada pela ocorrência apenas de fluxo de vapor d'água, assim, pequenas variações no teor de umidade acarretam grandes aumentos na sucção.

Vanapalli et al. (1996) citam que o estado de saturação residual pode ser considerado como o grau de saturação em que a fase líquida torna-se descontínua. Conseqüentemente, abaixo desse valor é extremamente difícil remover a água em amostras por drenagem. O ponto de saturação residual nem sempre é claramente definido.

A curva bimodal é resultado da distribuição do tamanho dos poros que apresentam na sua estrutura microporos e macroporos bem definidos. Este modelo de curva apresenta

como características principais: a existência de dois valores distintos de entrada de ar e a presença de um patamar intermediário. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de curva de retenção bimodal (FEURHARMEL, 2007).

Figura 2.3 – curva de retenção bimodal



(fonte: FEURHARMEL, 2007)

As curvas bimodais têm no primeiro trecho a dessaturação governada pela macroestrutura, ou seja, os solos que em estado natural apresentam grumos ou partículas argilosas fortemente agregadas em tamanho de grãos de areia tendem a perder água mais facilmente. No patamar intermediário é onde o aumento da sucção não provoca uma variação significativa no teor de umidade, pela inexistência de poros de tamanho intermediário e devido à alta capacidade da microestrutura em reter água. O último trecho caracteriza-se pela redução no grau de saturação devido à retirada progressiva da microestrutura do solo, ou seja, do interior dos grumos ou micro-agregados de argila (FEURHARMEL, 2007).

A zona de efeito limite de entrada de ar é o primeiro estágio identificável da curva de retenção e que se inicia com um valor de entrada de ar (pressão de borbulhamento). Nesse estágio quase todos os poros do solo encontram-se preenchidos por água, ou seja, os meniscos de água em contato com as partículas de solo ou agregados estão em forma contínua. O primeiro ponto importante da curva de retenção é o valor de sucção correspondente a entrada de ar ( $\psi_b$ ), que identifica o ponto em que o ar começa a entrar no maior poro do solo não saturado. Esse valor é obtido graficamente estendendo-se a porção de declividade constante da curva de retenção até interceptar a linha de saturação

100%. O valor de sucção correspondente a esse ponto de encontro representa o valor de entrada de ar. Oliveira e Marinho (2002) sugerem que o valor de entrada de ar seja o correspondente ao ponto onde a parte horizontal da curva de retenção começa a inclinar-se.

A zona de transição é o próximo estágio da curva de retenção, o qual inicia na sucção correspondente ao valor de entrada de ar e termina no equivalente ao ponto de saturação residual. O solo começa a dessaturar-se no estágio de transição e o teor de umidade (ou grau de saturação) reduz significativamente com o aumento da sucção. A quantidade de água nos contatos entre as partículas ou agregados diminui com a progressiva dessaturação, ou seja, o menisco de água que se encontra ao redor das partículas começa a perder a forma continua. O ponto de saturação residual pode ser considerado como o teor de umidade além do qual torna-se difícil remover água do solo por drenagens, ou seja, a fase líquida encontra-se descontínua (FREDLUND ET AL. 1994).

Fredlund et al. (1994) sugere para obtenção deste parâmetro desenhar inicialmente uma tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção e depois traça-se uma reta que se ajusta aos pontos de alta sucção. A intersecção dessas retas corresponde ao ponto de saturação residual. Porém, essa definição é vaga e procedimentos empíricos são utilizados para determinar este ponto. Como por exemplo, utilizar o valor de 1500 kPa, por ser o ponto de murcha de muitas plantas, conforme Van Genuchten (1980).

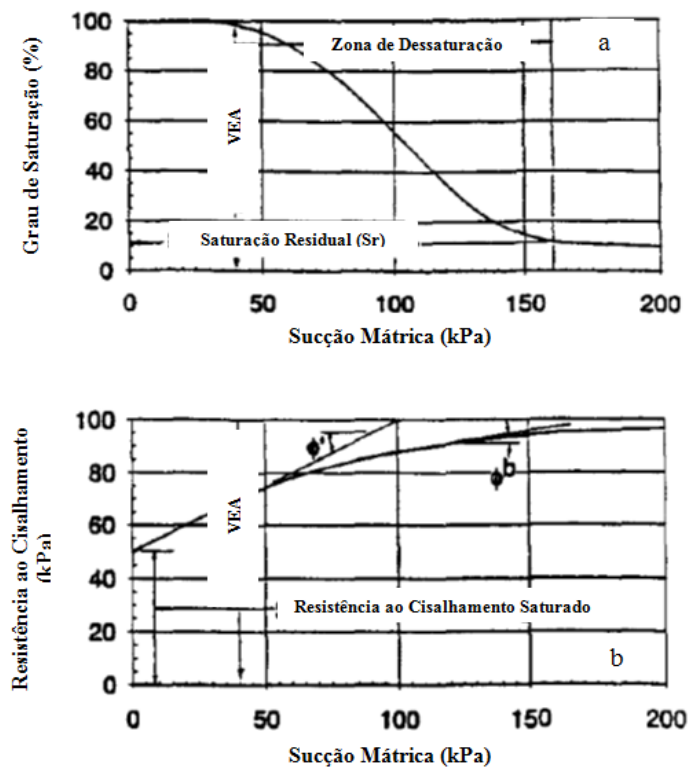
Zona residual de não saturação é o último estágio da curva de retenção e inicia no ponto de saturação residual e segue até a sucção máxima, ou seja, aquela que corresponde a um teor de umidade muito próximo de zero. Nesse estágio grandes aumentos de sucção conduzem a variações muito pequenas de teor de umidade. A dessaturação deve-se principalmente ao resultado do movimento de vapor que ocorre até que o teor de umidade do solo atinja o equilíbrio com a pressão de vapor existente em seus arredores (FREDLUND ET AL. 1995).

Algumas vezes existe uma diferença entre as curvas de secagem (dessaturação) e umedecimento (saturação) e esta é denominada histerese. A histerese ocorre devido a uma série de fatores, como: geometria não uniforme dos poros interconectados; variação do ângulo de contato entre o solo e a água com o avanço do menisco, devido a

rugosidade das partículas sólidas; presença de ar aprisionado nos poros, que tendem a reduzir o teor de umidade no processo de umedecimento (FEURHARMEL, 2007).

Fredlund et al. (1995) comentam que a resistência ao cisalhamento pode ser analisada a partir da curva de retenção. A contribuição da sucção na resistência é primeiramente através da água entre agregados, abaixo do valor de entrada de ar o ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) e ângulo que quantifica a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento ( $\phi^b$ ) são iguais. Após, a contribuição da resistência pela sucção diminui com a dessaturação e resulta em uma variação não linear. Assim, existe uma correlação forte entre a resistência não saturada e a curva de retenção. Ainda citam que com a curva de retenção e os parâmetros de resistência ao cisalhamento saturado se possui dados suficientes para prever a variação da resistência ao cisalhamento com respeito à sucção mátrica. A Figura 2.4 mostra o resultado de estudos correlacionando à curva de retenção com ensaios de cisalhamento.

Figura 2.4 – a) curva de retenção mostrando valor de entrada de ar (VEA) e saturação residual; b) curva mostrando a relação da sucção mátrica com a resistência ao cisalhamento



(fonte: modificado de FREDLUND et al., 1995)



Existem diferentes modelos de solução fechada para prever a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, como os propostos por McKee e Bumb (1984) e Brooks e Cory (1964). Porém, apesar de simples, eles são limitados a solos arenosos e siltosos com sucções baixas. Fredlund e Xing (1994) propuseram um modelo usando rigorosamente a forma da curva de retenção, validando para todos os solos e para um grande alcance de sucção. Khallili e Khabbaz (1998) sugeriram um modelo para a previsão da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado baseando-se na equação de resistência apresentada por Bishop (1959), onde o parâmetro  $\chi$  pode ser obtido a partir da relação entre sucção e o valor de entrada de ar. Os modelos citados estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: equações de resistência ao cisalhamento correlacionadas com a curva de retenção.

Autores	Equação
McKee e Bumb (1984)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)_b \tan\phi' + b_1 \left[ 1 - e^{-\frac{(u_a - u_w)}{b_1}} \right] \tan\phi'$ <p style="text-align: center;"><math>b_1 =</math> parâmetro de forma</p>
Brooks e Corey (1964)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)_b \tan\phi' + \frac{(u_a - u_w)_b^{b_1}}{b_2 - 1} \left[ \frac{1}{(u_a - u_w)_b^{b_2 - 1}} - \frac{1}{(u_a - u_w)^{b_2 - 1}} \right] \tan\phi'$ <p style="text-align: center;"><math>b_2 =</math> parâmetro de forma e <math>\neq 1</math></p> $\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)_b \tan\phi' + (u_a - u_w)_b \ln \left[ \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right] \tan\phi'$ <p style="text-align: center;"><math>b_2 =</math> parâmetro de forma e <math>= 1</math></p>
Fredlund e Xing (1994)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \tan\phi' \int_0^\psi \left[ \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right] d(u_a - u_w)$ $S = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1000000}{\psi_r} \right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right)} \right]^m$ <p><math>a =</math> aproximação do valor de entrada de ar; <math>n =</math> parâmetro que controla a inclinação no ponto de inflexão da curva de retenção; <math>m =</math> parâmetro que é relacionado a umidade residual.</p>
Khallili e Khabbaz (1998)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\chi \tan\phi']$ $\chi = \left\{ \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right\}^{-0,55}$

(fonte: elaborado pelo autor)

## 2.1.2 Equações de Ajuste da Curva de Retenção

As curvas de retenção podem ser representadas através de equações que correlacionam o valor da sucção com a quantidade de água nos poros. Dentre as modelagens existentes, a maioria leva em consideração a forma da curva de retenção e a distribuição de tamanho dos poros. Porém, alguns modelos representam estimativas diretas a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas do solo, sem considerar a influência de aspectos como o arranjo estrutural, estado de tensões, teor de umidade inicial e energia de compactação (GERSCOVICH, 2001).

Alguns modelos estão apresentados na Tabela 2.2, lembrando que a maioria destes foram propostos para solos específicos, para trajetória de secagem e unimodais.

Tabela 2.2 – equações para modelagem da curva de retenção.

Referência	Equação	Observações
Burdine (1953)	$S = \frac{1}{(1 + (a\psi)^n)^{(1-2/n)}}$	S= grau de saturação; $\psi$ = sucção a, n= parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$S = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$	$\lambda$ = índice de distribuição de tamanho de poros; $\psi_b$ = sucção de entrada de ar
Brutsaert (1966)	$S = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^n}$	n= parâmetro relacionado à distribuição de tamanho de poros
Van Genuchten (1980)	$S = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n}\right]^m$	a, n, m= parâmetros de ajuste
Mckee e Bumb (1987)	$S = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{n}\right)}$	a, n= parâmetros de ajuste
Haverkamp e Parlange (1986)	<p>Umedecimento</p> $\theta = \frac{n}{1+\lambda} \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \rightarrow \psi > \psi_b$ $\theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1+\lambda}\right) \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)\right] \rightarrow \psi_b^* \leq \psi_b$ $\theta = \theta_s \rightarrow \psi \leq \psi_b^*$ <p>Secagem</p> $\theta = n \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \left[1 - \frac{\psi_b}{\psi} \left(1 - \frac{\theta_s}{n}\right)\right] \rightarrow \psi > \psi_b$ $\theta = \theta_s \rightarrow \psi \leq \psi_b$	<p>n= porosidade</p> <p><math>\lambda</math>= parâmetro de ajuste relacionado à distribuição de tamanho de poro</p> <p><math>\theta_s</math>= teor de umidade saturado</p> <p><math>\psi_b</math> e <math>\psi_b^*</math>= sucção correspondente ao valor de entrada de ar para as curvas de secagem e de umedecimento, respectivamente</p>

(fonte: elaborado pelo autor)

Fredlung e Xing (1994) propuseram uma equação a partir da distribuição do tamanho dos poros e considerando parâmetros de forma obtidos a partir da curva de retenção. Se admite que o trecho para altas sucções seja linear, caindo para zero quando alcança o

valor de 1.000.000 kPa de sucção. As Equações 2.1 a 2.6 apresentam o modelo proposto e a Figura 2.5 mostra como se obter os parâmetros segundo os autores.

$$\theta = C_{\psi} \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left( e + \frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (\text{equação 2.1})$$

$$C_{\psi} = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad (\text{equação 2.2})$$

$$m = 3,67 \ln \left( \frac{\theta_s C_{\psi}}{\theta_i} \right) \quad (\text{equação 2.3})$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{m C_{\psi}} 3,72 s' \quad (\text{equação 2.4})$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p/\psi_i)} \quad (\text{equação 2.5})$$

$$s' = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i + \psi_p) \ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad (\text{equação 2.6})$$

Onde:

$C_{\psi}$  = é uma função de correção;

$m$  = parâmetro de forma relacionado com altas sucções;

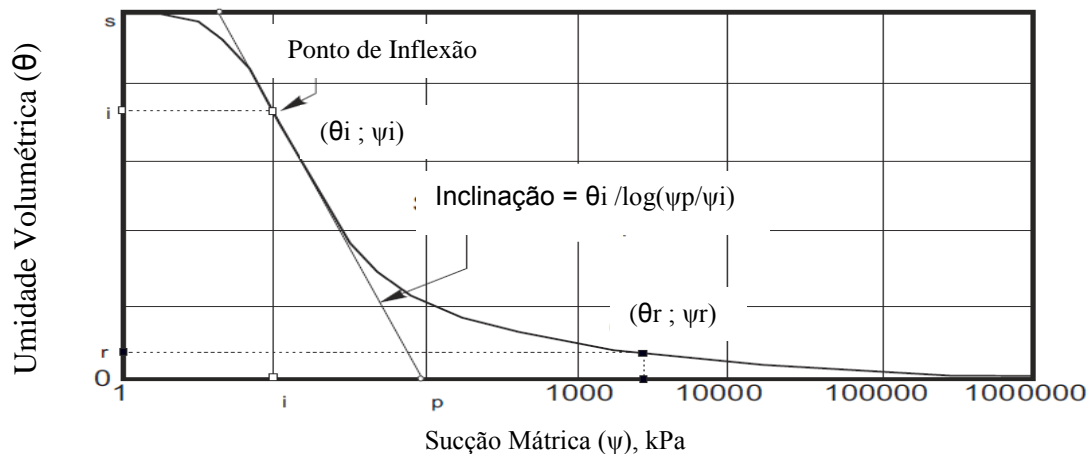
$n$  = parâmetro de forma relacionado com a inclinação da curva de retenção;

$a = \psi_i$ , sucção correspondente ao teor de umidade volumétrico do ponto de inflexão ( $\theta_i$ );

$\psi_p$  = intercepto da linha tangente que corta o eixo de sucção;

$s$  = inclinação da curva de retenção.

Figura 2.5 – curva de retenção para obtenção dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (1994)



(fonte: FREDLUNG E XING, 1994)

Com relação as curvas de retenção bimodais, Burger e Shackelford (2001) sugerem o ajuste de curvas através de duas funções unimodais distintas, conforme o intervalo de sucção. Para isso deve-se determinar o ponto de inflexão da curva, localizado no patamar intermediário, separando-a em dois trechos. Desta forma, qualquer curva unimodal pode ser utilizada para ajuste. Fredlund (1999) apresenta um modelo que descreve as curvas de retenção bimodais, conforme apresentado na Equação 2.7.

$$s = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \cdot \left[ \frac{S_1}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + (\psi/a_1)^{m_1} \right] \right]^{m_1}} - \frac{1 - S_2}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + (\psi/a_2)^{m_2} \right] \right]^{m_2}} \right] \quad (\text{equação 2.7})$$

Onde:

$a_1, m_1, n_1$  = parâmetros representativos de valores baixos de sucção;

$a_2, m_2, n_2$  = parâmetros representativos de valores altos de sucção;

$S_1$  = sucção correspondente ao ponto de inflexão;

$\psi_r$  = sucção residual.

Fredlund e Gitirana Jr. (2004) propuseram equações capazes de modelar qualquer curva: unimodais com um ponto de inflexão (Equação 2.8) ou dois pontos de inflexão (Equação 2.9); e bimodais com quatro pontos de inflexão (Equação 2.10). Com este modelo também é possível representar as trajetórias de secagem e umedecimento. As

expressões sugeridas pelos autores são baseadas na equação geral da hipérbole no sistema de coordenadas  $(\ln(\psi) - S)$ , posicionada em ângulo  $\alpha$  e com o centro transladado para fora da origem do sistema de coordenadas.

- Equação Unimodal com um ponto de inflexão:

$$S = \frac{\tan\theta(1+r^2)\ln(\psi/\psi_b)}{(1-r^2\tan^2\theta)} - \frac{(1+\tan^2\theta)}{(1-r^2\tan^2\theta)} \sqrt{r^2\ln^2(\psi/\psi_b) + \frac{a^2(1-r^2\tan^2\theta)}{(1+\tan^2\theta)} + 1} \quad (\text{equação 2.8})$$

Onde:

$$\theta = -\lambda/2 \text{ (ângulo de rotação da hipérbole);}$$

$$r = \tan(\lambda/2) \text{ (ângulo de abertura tangente);}$$

$$\lambda = \arctan \left\{ \frac{1}{\left[ \ln(10^6/\psi_b) \right]} \right\} \text{ (inclinação da dessaturação).}$$

- Equação Unimodal com dois pontos de inflexão:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left( \frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{res}}} \right)^d} + S_2 \quad (\text{equação 2.9})$$

Onde:

$$S_i = \frac{\tan\theta_i(1+r_i^2)\ln(\psi/\psi_1^a)}{(1-r_i^2\tan^2\theta_i)} + (-1)^i \cdot \frac{(1+\tan^2\theta_i)}{(1-r_i^2\tan^2\theta_i)} \cdot \sqrt{r_i^2\ln^2(\psi/\psi_1^a) + \frac{a^2(1-r_i^2\tan^2\theta_i)}{(1+\tan^2\theta_i)} + S_1^a}$$

$$\theta = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2$$

$$\lambda_i = \arctan \left\{ (S_i^a - S_{i+1}^a) / \left[ \ln \left( \frac{\psi_{i+1}^a}{\psi_i^a} \right) \right] \right\}$$

$$r_i = \tan[(\lambda_{i-1} - \lambda)/2]$$

$$d_j = 2 \cdot \exp \left[ \frac{1}{\ln(\psi_{res}/\psi_b)} \right] \quad i = 1, 2$$

$$S_1^a = 1; S_2^a = S_{res}; S_3^a = 0; \psi_1^a = \psi_b; \psi_2^a = \psi_{res}; \psi_3^a = 10^6$$

- Equação para 4 pontos de inflexão (bimodal):

$$S = \left[ \frac{S_1 - S_2}{1 + \left[ \frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{res1}}} \right]^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left[ \frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res1}}} \right]^{d_2}} + \frac{S_1 - S_2}{1 + \left[ \frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res2}}} \right]^{d_3}} + S_4 \right] \quad (\text{equação 2.10})$$

Onde:

$$d_j = 2 \cdot \exp \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{\psi_{j+1}^a}{\psi_j^a} \right)} \right] \quad j = 1, 2, 3$$

$$\psi_1^a = \psi_b ; \psi_2^a = \psi_{res1} ; \psi_3^a = \psi_{b2} ; \psi_4^a = \psi_{res2} ; \psi_5^a = 10^6$$

$$\theta = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2$$

$$\lambda_i = \arctan \left\{ (S_i^a - S_{i+1}^a) / \left[ \ln \left( \frac{\psi_{i+1}^a}{\psi_i^a} \right) \right] \right\}$$

$$S_1^a = 1 ; S_2^a = S_{res1} ; S_3^a = S_b ; S_4^a = S_{res2} ; S_5^a = 0$$

$$\lambda_0 = 0 ; i = 1, 2, 3, 4$$

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \cdot \ln \left( \frac{\psi}{\psi_i^a} \right)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i \cdot \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \cdot \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left( \frac{\psi}{\psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)}} + S_1^a$$

a= variável de forma da hiperbole;

d, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub> = fatores de peso;

r<sub>i</sub>= ângulo tangente de abertura da hiperbole;

S, S<sub>b</sub>= primeiro e segundo grau de saturação;

S<sub>i</sub>= hiperbole individual;

S<sub>i</sub><sup>a</sup>= coordenada y do centro da hipérbole;

S<sub>res</sub>, S<sub>res1</sub>, S<sub>res2</sub>= graus de saturação residuais;

θ<sub>i</sub>= ângulo de rotação;

ψ= sucção do solo;

ψ<sub>b</sub>, ψ<sub>b1</sub>, ψ<sub>b2</sub>= valores de entrada de ar;

ψ<sub>b</sub><sup>a</sup>= coordenada x do centro da hipérbole;

ψ<sub>res</sub>, ψ<sub>res1</sub>, ψ<sub>res2</sub>= sucções residuais.

### 2.1.3 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados

Nesta secção são abordadas as considerações sobre o comportamento de solos não saturados em relação à resistência ao cisalhamento. São apresentadas as variáveis do estado de tensões, equações de resistência e envoltórias de ruptura.

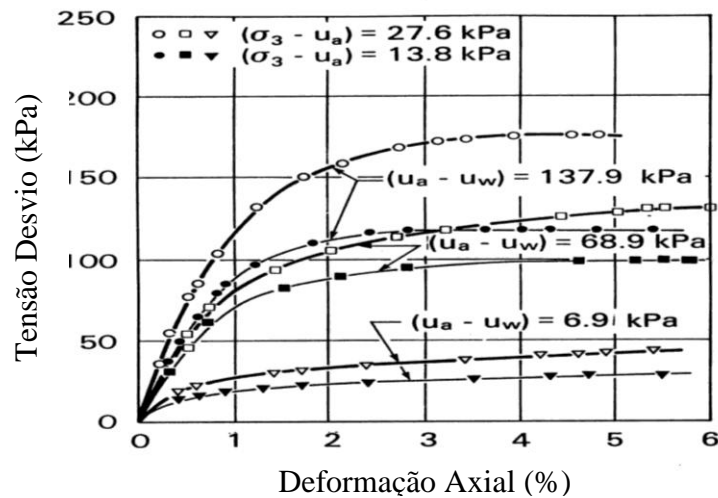
#### 2.1.3.1 Variáveis do estado de tensões e equações de resistência

O estudo da resistência ao cisalhamento de solos na condição não saturada pode ser realizado a partir de adaptações da teoria desenvolvida para solos saturados, lembrando que em solos não saturados tem-se um sistema composto por três fases: ar, água e solo (atualmente admite-se uma quarta fase relativa à membrana contrátil formada na interface água-ar). Assim, têm-se duas variáveis de tensão, para expressar as tensões nessa fase que podem ser:  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_a)$  e  $(\sigma - u_w)$ . Sendo  $\sigma$  a tensão normal;  $u_a$  é a poro pressão ; e  $u_w$  a poro pressão d'água.

Dentre os três pares de variáveis de tensão, o par  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  é o mais empregado nos estudos em solos não saturados. Estas variáveis representam a tensão líquida  $(\sigma - u_a)$  e a sucção matricial  $(u_a - u_w)$ . A sucção matricial contribui para a resistência ao cisalhamento dos solos como uma parcela de coesão, normalmente denominada de coesão ou coesão aparente (FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

A Figura 2.6 mostra resultados de ensaios triaxiais realizados sob três diferentes níveis de sucção e duas condições de consolidação. Fica evidente o aumento da resistência ao cisalhamento com a elevação da sucção, para qualquer nível de tensão confinante.

Figura 2.6 – curvas tensão x deformação para ensaios sob diferentes níveis de sucção em um silte não saturado



(fonte: BLIGHT, 1967 apud FREDLUND E RAHARDJO, 1993)

Sendo assim e dada a sua importância para levar em consideração os efeitos da sucção na resistência ao cisalhamento de solos não saturados adaptou-se a equação da resistência ao cisalhamento clássica (Equação 2.11 e 2.12). A primeira proposta de equação da resistência ao cisalhamento acolhida no meio geotécnico foi a desenvolvida por Bishop (1959), no entanto, a presença do parâmetro  $\chi$  (relação com o grau de saturação) e seu caráter empírico geraram diversas críticas à equação.

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (\text{equação 2.11})$$

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \cdot \tan \phi' \quad (\text{equação 2.12})$$

O parâmetro  $\chi$  busca expressar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, e segundo o autor o mesmo vai de zero quando o solo está seco, até 1 quando o solo encontra-se saturado. Vários pesquisadores tem encontrado valores superiores a 1 para este parâmetro e as causas para isso ainda são pouco conhecidas.

Posteriormente, Fredlund et al. (1977) propuseram as Equações 2.13 e 2.14 à seguir, sendo que a primeira delas emprega as variáveis do estado de tensões baseadas na



pressão do ar e é a mais comumente utilizada, sendo os ângulos  $\phi_b$  e  $\phi''$  a contribuição da sucção à resistência ao cisalhamento, assim como o parâmetro  $\chi$  de Bishop, como se verá adiante.

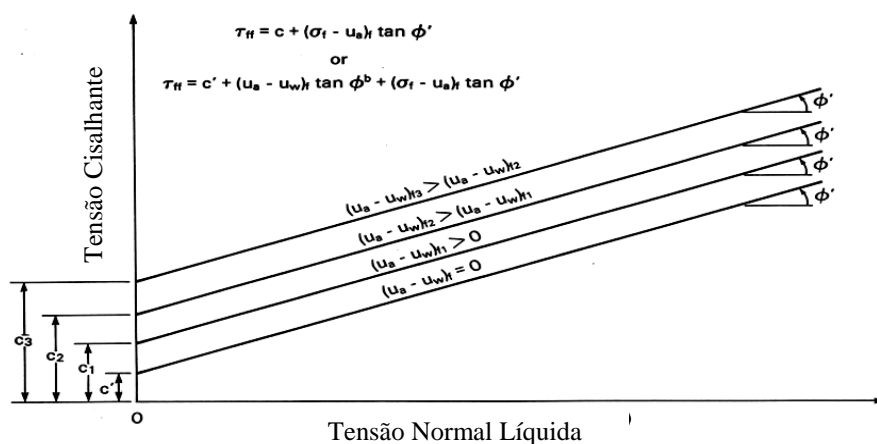
$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (\text{equação 2.13})$$

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi'' \quad (\text{equação 2.14})$$

### 2.1.3.2 Envoltórias de ruptura para solos não saturados

Diferentemente do que ocorre para solos saturados, a resistência ao cisalhamento em solos não saturados não pode ser completamente expressa a partir de uma reta. Isto porque para cada nível de sucção há um comportamento distinto do solo. A Figura 2.7 mostra que ao passo que se eleva a sucção, tem-se um aumento da coesão total, enquanto que o ângulo de atrito interno efetivo mantém-se constante. O acréscimo da coesão é referido à geração de coesão aparente, há que é creditada a maior resistência ao cisalhamento do solo quando em condição não saturada.

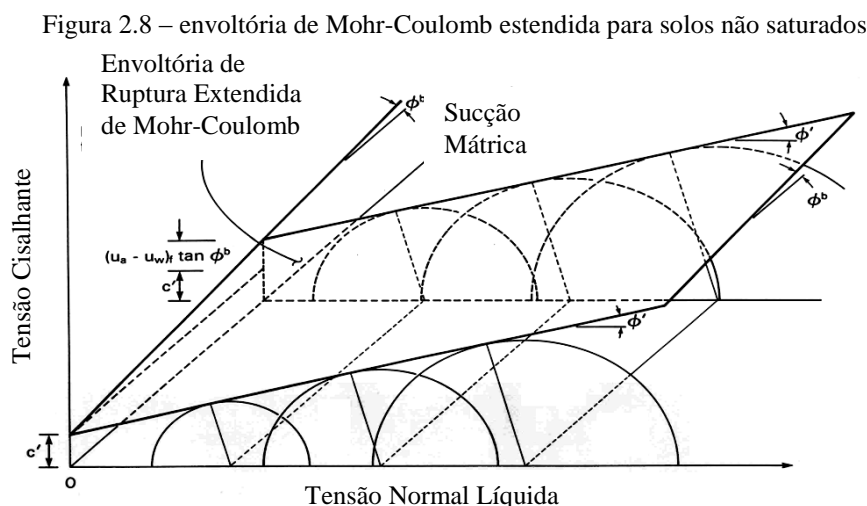
Figura 2.7 – envoltórias de ruptura para diferentes sucções



(fonte: FREDULUND E RAHARDJO, 1993)

Observa-se que para o mesmo solo, utilizando-se as mesmas tensões confinantes, tem-se uma envoltória de ruptura para cada nível de sucção. Pode-se plotar uma curva que relaciona sucção ( $u_a - u_w$ ) com a tensão cisalhante, tendo-se então uma curva para cada nível de tensão normal líquida ( $\sigma - u_a$ ).

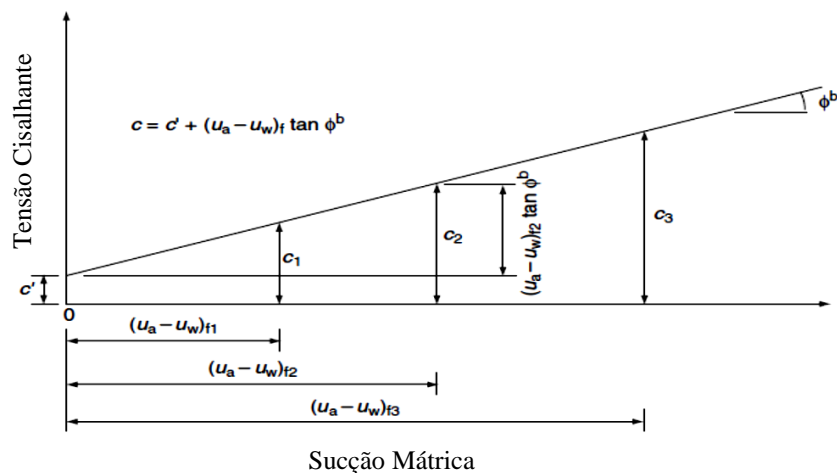
Sendo assim, no caso de solos não saturados a existência de um conjunto de envoltórias de ruptura permite que os dados de tensão normal líquida, sucção e tensão cisalhante sejam expressos em um espaço 3D, conforme mostrado na Figura 2.8. A envoltória de ruptura é estendida e tem-se um plano que expressa o conjunto de envoltórias. Ressaltando que os círculos são plotados da mesma maneira que para o caso de solos saturados, apenas considerando outros planos a diferentes níveis de sucção mátrica.



(Fonte: FREDULUND E RAHARDJO, 1993)

A envoltória estendida refere-se à extensão da linha no plano frontal para os demais planos, tangenciando os outros círculos. Dessa forma, cria-se um plano de ruptura sobre os círculos de Mohr. Prolongando-se as envoltórias de ruptura obtidas para diversos níveis de sucção até interceptarem o eixo vertical ( $\tau$ ), tem-se no plano  $(u_a - u_w) \times \tau$  um conjunto de pontos que descrevem uma função linear, como indica a Figura 2.9. Esta reta forma com o eixo  $(u_a - u_w)$  um ângulo denominado  $\phi^b$ , presente na equação expandida da resistência ao cisalhamento. Quando a sucção é nula, o intercepto da envoltória com o eixo vertical é a própria coesão efetiva.

Figura 2.9 – linha de intercepção ao longo do plano de ruptura que forma ângulo  $\phi^b$



(fonte: FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

O aumento na resistência ao cisalhamento provocado pela elevação da tensão normal líquida é caracterizado pelo ângulo de atrito ( $\phi'$ ) ao passo que o aumento na resistência ao cisalhamento causado por incrementos na sucção é descrito pelo ângulo  $\phi^b$ . De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) o valor de  $\phi^b$  é igual ou inferior ao valor de  $\phi'$  para solos estudados em diversos locais do planeta.

Dessa maneira, pode-se perceber que para descrever a resistência ao cisalhamento de solos na condição não saturada, diferentemente do que ocorre em solos saturados, são necessários três parâmetros:  $c'$ ,  $\phi'$  e  $\phi^b$ . Se  $\phi^b$  não variar com a sucção tem-se uma envoltória de ruptura plana, enquanto que, havendo variação deste ângulo, a envoltória de resistência torna-se uma superfície curva.

#### 2.1.4 Técnicas para Medição da Sucção

Nesta seção são apresentadas algumas técnicas utilizadas para a medição da sucção nos solos não saturados. Algumas destas são utilizadas em campo ou então previamente a outro ensaio, quando se deseja que este seja realizado em um nível conhecido de sucção. Outro mais simples e muito utilizado para obtenção da curva de retenção é o método do papel filtro, que receberá maior destaque neste trabalho, devido a sua praticidade e baixo custo.

#### 2.1.4.1 PLACA DE PRESSÃO

Consiste em uma câmara onde várias amostras são ensaiadas. A base desta câmara é constituída por uma pedra de alta pressão de borbulhamento, sobre a qual são colocadas as amostras e é conectada a pressão atmosférica. Com isso, a pressão de água ( $u_w$ ) é mantida nula, enquanto a pressão de ar ( $u_a$ ) é aplicada no interior da câmara. Com relação à faixa de sucção medida, esta depende da capacidade da pedra de alta pressão de borbulhamento utilizada.

Durante o ensaio, a pedra de alta pressão de borbulhamento deve estar saturada para garantir uma coluna de água contínua entre o corpo de prova e a câmara de água inferior. Com relação às amostras previamente saturadas, devem ser submetidas a uma diferença de pressão aplicada entre as faces opostas do corpo de prova, sendo esta diferença, causadora da saída de água das amostras, até que elas fiquem em equilíbrio com a diferença de pressão aplicada. Para o ensaio, é indicada a imposição de estágios de sucção de 50, 100, 200 e 300 kPa, sucessivamente, cada estágio permanecendo por um período de seis dias para equilíbrio da umidade. No final, as amostras são pesadas para determinação da umidade (SILVA, 2009).

#### 2.1.4.2 TRANSLAÇÃO DE EIXOS

Esta técnica permite a determinação da sucção e o seu controle durante a execução dos ensaios por meio da mudança de referência da pressão atmosférica pela imposição de pressão artificial de ar na superfície da amostra de solo. Desta forma ocorre um aumento de pressão negativa de ar na amostra igual a pressão artificial imposta pelo sistema, considerando a água e as partículas sólidas meios incompressíveis.

O método previne a ocorrência de medidas de poro pressão de água menores que o zero absoluto, o que poderia acarretar na cavitação da água do sistema de medida, que ocorre devido a formação de cavidades de vapor dentro do próprio líquido ou nos contornos limites com outros materiais. A ocorrência desse fenômeno cria bolhas de ar oclusas que acumulam-se abaixo do compartimento de água do disco de alto valor de entrada de ar, gerando erros na poro pressão e no volume de água medido.

O método pode ser aplicado de duas maneiras, aumentando a pressão de ar enquanto a pressão de água permanece constante e aumentando a pressão de água enquanto a

pressão de ar permanece inalterada. Consiste então, em aumentar a tensão total, a poro pressão de ar e a poro pressão de água na mesma proporção, mantendo as variáveis de estado de tensão (tensão normal líquida e sucção) constantes, sem interferir na curvatura da interface ar-água e permitindo que a poro pressão de água seja mantida em um valor positivo, sem risco de cavitação (FEURHARMEL, 2007).

A poro pressão de água em um solo não saturado pode ser medida (ou controlada) usando um disco cerâmico de alto valor de entrada de ar, que quando saturado trabalha como uma membrana semipermeável, permitindo a passagem de água e prevenindo a de ar livre. O ensaio possui algumas desvantagens como, ser incapaz de representar condições de campo (pressão do ar está na condição atmosférica) e existem dúvidas sobre o quanto o processo de aplicação de pressão interfere na pressão de água que é retida por adsorção. Também existe uma dificuldade na aplicação de solos com teores de umidade próximos a saturação, devido a ausência da fase gasosa (FEURHARMEL, 2007).

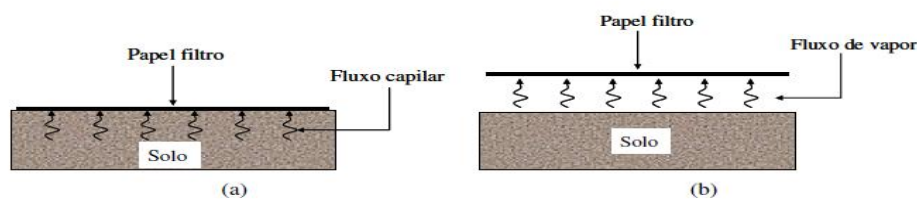
#### 2.1.4.3 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro constitui um meio indireto para medição de sucção, tendo entre as principais vantagens da técnica, a simplicidade, o baixo custo e a possibilidade de medir um grande intervalo de sucção. Além disso, a versatilidade deste método permite sua utilização tanto em laboratório como em campo. O princípio do método consiste em provocar uma transferência de água do solo para um material poroso (papel filtro), até que um equilíbrio seja atingido. O equilíbrio é definido pela igualdade de sucções entre os materiais, porém com diferentes teores de umidade. Dessa forma, conhecendo a relação entre sucção e umidade deste material poroso, através de uma curva de calibração, é possível determinar esta relação também para o solo. Um importante aspecto do método é o fluxo de umidade entre o papel e o solo, que pode ocorrer através de fluxo capilar ou de vapor. (LONG ET AL., 2002)

O fluxo capilar surge através dos poros do solo e das fibras do papel, sem que a água perca sua continuidade. Este processo ocorre quando o papel filtro está em contato direto com o solo e o procedimento é denominado “método em contato”. Neste caso, a parcela de sucção medida é a matriz. No fluxo de vapor, as moléculas de água devem sair dos poros do solo pela superação de forças capilares e osmóticas. As forças

osmóticas estão presentes em solos que possuem água intersticial contendo sais dissolvidos. Para que esse fluxo ocorra, deve ser deixado um espaço entre o papel filtro e o solo. A camada de ar entre estes materiais constitui uma barreira para os sais, permitindo apenas a saída de vapor de água do solo em direção ao papel. Neste processo, denominado “método sem contato”, o valor medido corresponde à sucção total. A determinação da sucção osmótica é permitida pela subtração entre a sucção total e a sucção mátrica. A Figura 2.10 mostra os dois usos do papel filtro (MARINHO, 1994).

Figura 2.10 – (a) papel filtro com contato e (b) papel filtro sem contato



(fonte: modificado de MARINHO, 1994)

O método do papel filtro apresenta alguns limites para medição da sucção, sendo para baixos valores de sucção, a sucção mátrica é mais facilmente medida em relação à sucção total, devido à baixa sensibilidade do papel filtro às variações de umidade em baixos níveis de sucção, quando esse não possui contato com a amostra. Entretanto, para altas sucções, a descontinuidade da água por causa do baixo teor de umidade, mesmo o papel estando em contato, à migração da água ocorrerá apenas por fluxo de vapor, e as curvas de sucção mátrica e sucção total tendem a coincidir a partir de um determinado nível de umidade (Houston et al., 1994).

Alguns cuidados devem ser tomados na execução do método do papel filtro, conforme citado por Vivian (2008):

- a) tipo de contato entre papel filtro e o solo;
- b) tempo para equalização da sucção;
- c) histerese entre as trajetórias de umedecimento e de secagem;
- d) correta medida de umidade do papel filtro;
- e) número de papéis utilizados;

## f) variações de temperatura;

A norma ASTM D 5298-94 (ASTM, 2002) sugere que para uma medida correta dos pontos da curva de retenção pelo método do papel filtro devem-se seguir alguns cuidados, como por exemplo: tempo mínimo de equalização requerido de 7 dias, dependendo do tipo de solo e magnitude da sucção medida; tempo entre a remoção do papel do topo da amostra e sua colocação em um compartimento fechado para pesagem deve ser no máximo de 5s, a partir deste tempo se supõem que o papel começa a variar a umidade; a temperatura padrão deve ser  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Os papéis filtros costumam apresentar diferentes sensibilidades de acordo com a faixa de sucção em que se está realizando a medição (comum usar o quantitativo do tipo II, como o Whatmam N° 42). Foram realizadas diversas calibrações do papel filtro, nas quais a curva de calibração é composta por duas equações que representam diferentes sensibilidades na resposta do papel filtro em intervalos de altas e de baixas sucções. A maioria dos estudos que determinam essa diferença para altos valores de sucção sugere que acima de determinado valor de sucção (em torno de 1000 kPa), grande parte da movimentação de água ocorre por transferência de vapor, e apenas uma pequena parte por capilaridade. A Tabela 2.3 apresenta um lista de equações de calibração do papel filtro, conforme foi apresentada por Vivian (2008).

Tabela 2.3 – lista das principais equações de calibração do papel filtro

Referência	Medida	Curva de Calibração
van Genuchten (1980)	Sucção Mátrica	$\Psi = 0,051 \cdot \left[ \left( \frac{248}{w} \right)^{9,615} - 1 \right]^{0,473}$
	Sucção Total	$\Psi = 56180 \cdot \left[ \left( \frac{37}{w} \right)^{0,44} - 1 \right]^{2,361}$
Chandler et al. (1992)	Sucção Mátrica	$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot w)}$ para $w \leq 47\%$
		$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w)}$ para $w > 47\%$
Fredlund e Xing (1994)	Sucção Mátrica	$\Psi[\text{kPa}] = 0,23 \cdot \left[ e^{(268/w)^{0,629}} - e \right]^{2,101}$
	Sucção Total	$\Psi[\text{kPa}] = 18500 \cdot \left[ e^{(37/w)^{3,42}} - e \right]^{2,248}$
Leong et al. (2002)	Sucção Mátrica	$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(2,909 - 0,0229 \cdot w)}$ para $w \geq 47\%$
		$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(4,945 - 0,0673w)}$ para $w < 47\%$
	Sucção Total	$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(8,778 - 0,222 \cdot w)}$ para $w \geq 26\%$
		$\Psi[\text{kPa}] = 10^{(5,31 - 0,0879 \cdot w)}$ para $w < 26\%$

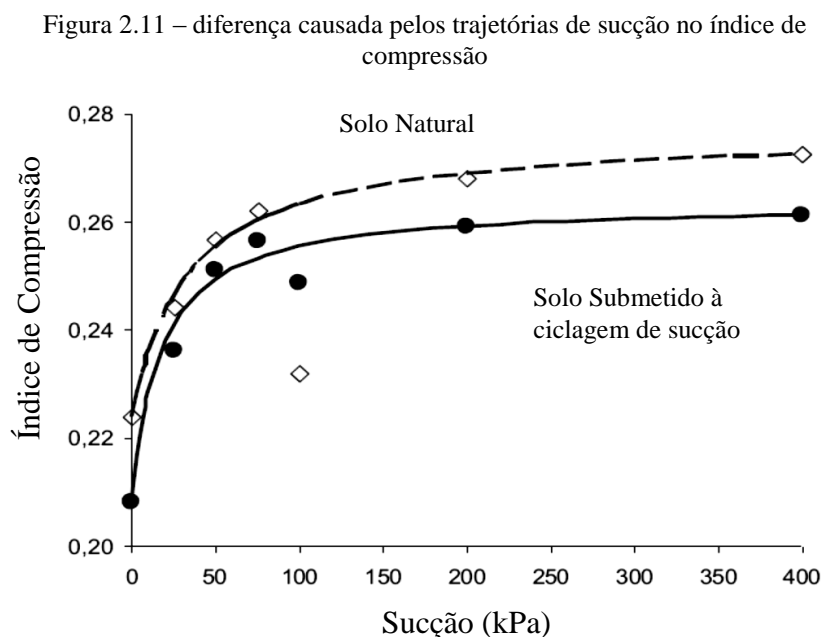
(fonte: VIVIAN, 2008)

### 2.1.5 Comportamento perante trajetórias de umedecimento e secagem

As deformações induzidas por umedecimento dos solos destacam-se como um dos problemas mais comuns da geotecnia, sendo o colapso um dos maiores. Na natureza o solo sofre influência da variação paulatina da umidade devido às alterações climáticas, como períodos de seca e de chuva, alterando a magnitude das deformações induzidas pela inundação. Nas camadas mais superficiais de solo, as trajetórias de umedecimento e secagem são mais intensas e, por esta razão, são capazes de afetar o comportamento mecânico do solo, enrijecendo-o ao longo do tempo (RODRIGUES e VILAR, 2011).

Os efeitos das trajetórias de umedecimento e secagem no comportamento dos solos têm sido investigados por alguns pesquisadores e dada sua importância, tal efeito tem sido incorporado nos principais modelos elastoplásticos.

Rodrigues e Vilar (2011) avaliaram o comportamento da trajetória de umedecimento e secagem em ensaios de adensamento com amostra em estado natural. Observou-se que a sucção influencia na variação de volume e que o aumento na sucção gera um aumento na tensão de pré-adensamento, como também alteração na inclinação da reta virgem, diminuindo a variação volumétrica. Na Figura 2.11 nota-se a sensível redução do índice de compressão do solo submetido às trajetórias de sucção.



(fonte: modificado de RODRIGUES E VILAR, 2011)

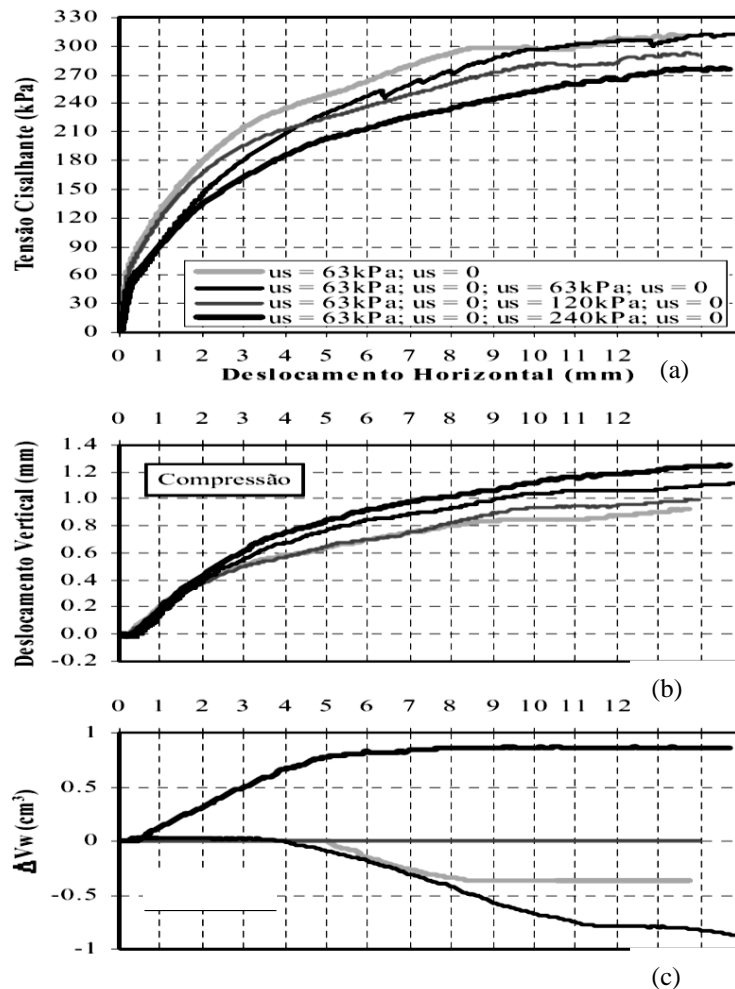


Nos ensaios realizados de cisalhamento direto com sucção controlada, observou-se que dada uma sucção inicial, quanto maior a secagem, menor era a resistência ao cisalhamento e maior a compressão. Acredita-se que após uma secagem ocorra uma desestruturação do solo, diminuindo a sua resistência. A Figura 2.12 apresenta os resultados encontrados por Beneveli e de Campos (2004).

Vanapalli et al. (1999) realizaram um estudo da influência da estrutura do solo e da história de tensões na curva de retenção em amostras compactadas em diferentes valores de umidade. Os solos finos, assim como areias e argilas, normalmente têm dois níveis estruturais: macroestrutura e microestrutura. A microestrutura do solo é descrita como as partículas elementares associadas dentro do solo, enquanto que o arranjo estrutural dos solos agregados se refere à macroestrutura. Tipicamente, tanto a macro como a micro estrutura estão presentes na natureza e em argilas compactadas. A macroestrutura difere em amostras preparadas com diferentes teores de umidade inicial, mesmo possuindo a mesma mineralogia, textura e método de preparação.

A resistência à dessaturação é relativamente menor em amostras preparadas abaixo da umidade ótima, quando comparadas aquelas no teor ótimo ou acima. Abaixo da umidade ótima os poros contêm um espaço relativamente amplo entre os torrões de solo em relação ao espaço dentro dos torrões. As relativas baixas sucções associadas com a remoção de água dos poros grandes é significativamente diferentes das grandes sucções requeridas para remoção da água nos espaços dos microporos entre as partículas de solo dentro dos torrões de argila. Assim, a macroestrutura controla a dessaturação inicial do solo compactado abaixo da umidade ótima (VANAPALLI ET AL., 1999).

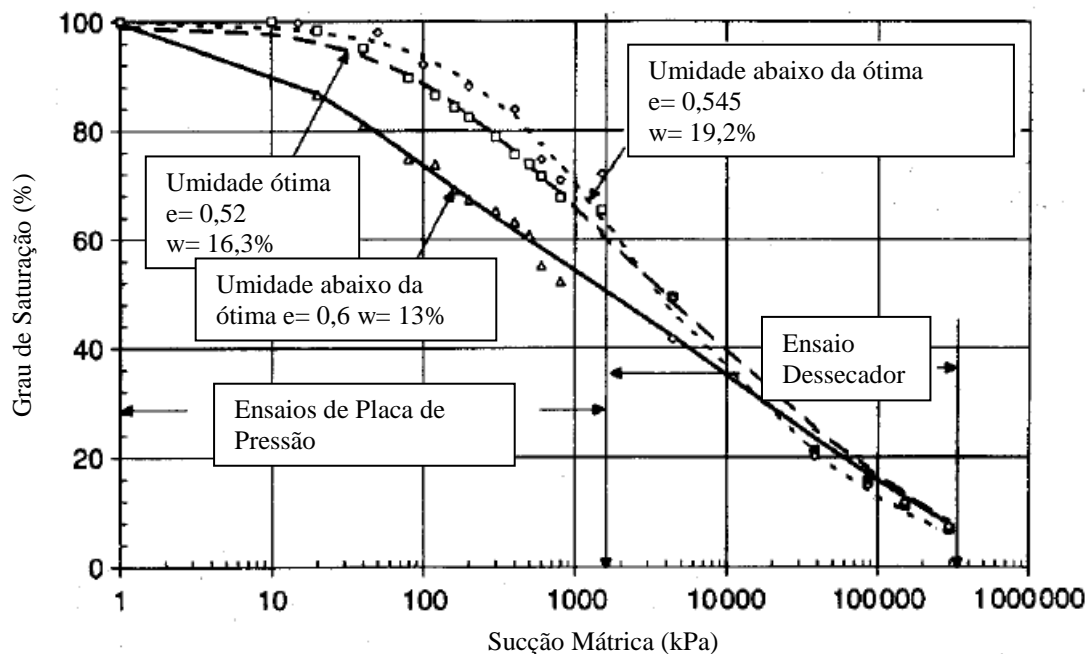
Figura 2.12 – curvas mostrando a influência dos trajetórias de sucção na resistência ao cisalhamento (a); deformação vertical (b); e variação de volume (c)



(fonte: BENEVELI E DE CAMPOS, 2004)

O espaço nos poros de argilas compactadas inicialmente na umidade ótima ou acima não são geralmente interconectadas ou de estado ocluso. Estes solos são mais homogêneos e possuem uma capacidade de armazenamento elevada em diferentes estruturas, oferecendo mais resistência à dessaturação em baixos níveis de sucção. Nestas amostras, a microestrutura controla a dessaturação do solo. A Figura 2.13 apresenta curvas de retenção de amostras compactadas em diferentes umidades.

Figura 2.13 – curvas de retenção para diferentes umidade de compactação

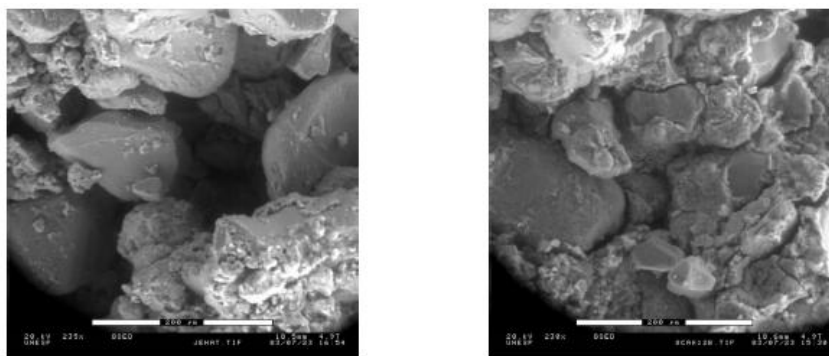


(fonte: modificado de VANAPALLI et al., 1999)

Fazendo algumas observações sobre o comportamento dos solos compactados, percebe-se que, para a mesma umidade, a permeabilidade é tanto menor quanto mais compacto for o solo (menor índice de vazios). Para a mesma densidade, a permeabilidade diminui com o aumento do teor de umidade, apesar do índice de vazios ser constante e estarem com o mesmo grau de saturação que pode ser atribuído à estrutura do solo compactado que é bastante diferente nos ramos úmidos e seco da curva de compactação. A estrutura floculada, que corresponde ao ramo seco, proporciona uma maior facilidade para a percolação da água do que a estrutura dispersa, característica do ramo úmido. (PINTO, 2006)

Lambe (1958, apud DAS, 2007), analisou o efeito da compactação em solos argilosos e deduziu que se a argila for compactada com um teor de umidade no ramo seco, a estrutura será floculada. Isso ocorre porque, quando o teor de umidade é baixo, as duas camadas difusas de íons em torno das partículas de argila não se desenvolvem totalmente. Assim, a repulsão entre as partículas é reduzida e resulta em orientação aleatória, logo, peso específico seco menor. A Figura 2.14 mostra a diferença entre as estruturas dos solos com estrutura fofa e quando é compactado.

Figura 2.14 – (a) Estrutura fofa, (b) Estrutura compacta



(fonte: LAMBE, 1958, APUD DAS, 2007)

## 2.2 A IMPORTÂNCIA DA SUCÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS

A caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa em virtude de suas propriedades dependerem de diversos fatores, entre eles: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos, e estado de tensões.

O emprego de metodologias racionais para dimensionamento de pavimentos tem crescido consideravelmente nos últimos anos, sendo que para avaliar o comportamento quanto a deformabilidade elástica mais importante é o módulo de resiliência. O comportamento à fadiga de pavimentos asfálticos é altamente sensível às mudanças do módulo de resiliência do subleito. O módulo de resiliência por sua vez não é constante, sofrendo variações devido as tensões aplicadas e as variações de umidade, não sendo suficiente assumir um único valor de módulo de resiliência para o ano. Assim, são necessários parâmetros que demonstrem essa variação anual e uma relação entre a condição de tensões e o módulo de resiliência deve ser estabelecida. Existem relações entre o volume e peso, método de preparação de amostra, tensão desvio, e o módulo de resiliência dos solos compactados. Entretanto, não se possuiu uma única relação entre estas variáveis.

### 2.2.1 EFEITO DA SUCCÃO NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência é um dos parâmetros mais importantes na caracterização do comportamento mecânico de solos e agregados, quando utilizados como camada estrutural de pavimentos. Este parâmetro é obtido em laboratório a partir de ensaios triaxiais de carregamento repetido. O ensaio de módulo de resiliência segue a norma DNIT-ME 134 (2010).

O objetivo deste ensaio é determinar um modelo do Módulo de Resiliência em função do estado de tensões. Segue-se algumas definições:

- a) Deformação Resiliente: é a deformação recuperável do corpo de prova. Ela é instantânea, ou seja, dura enquanto a tensão (carga) estiver sendo aplicada. No momento em que a tensão é retirada, a deformação resiliente deixa de existir.
- b) Deformação Plástica: é a deformação irrecuperável da camada de pavimento. Quando submetido a certa tensão o material se deforma, ocorrendo a deformação resiliente mais a deformação plástica. Quando retira-se a carga há um encurtamento do corpo de prova, ou seja, ocorre uma deformação plástica.
- c) Módulo de Resiliência: o módulo de resiliência (MR) dos solos é a relação entre a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada e a correspondente deformação específica vertical resiliente. Fica claro que, quanto maior a tensão aplicada e menor a deformação resiliente devido a ela associada, maior será o módulo de resiliência.

Existem alguns fatores que podem influenciar o comportamento resiliente dos solos, entre os quais pode-se citar: a intensidade de tensões; a razão de tensões principais ( $\sigma_1/\sigma_3$ ); o número de repetições da tensão-desvio; a história de tensões; a duração e frequência de aplicação da tensão-desvio; o tipo de agregado; a percentagem de material que passa na peneira 200; a densidade e umidade de compactação; o grau de saturação e método de compactação. Dentre os citados, o interesse maior para esse trabalho é a influência devido à umidade. Abaixo estão descritos alguns dos fatores que influenciam o comportamento resiliente dos solos.

- Efeito do número de repetições da tensão desvio: as medidas de módulo de resiliência só representam o real comportamento de deformações do material se ele é tomado após um grande número de aplicações de carregamento. O módulo de resiliência reduz com o número de repetições de tensão desvio. As variações irregulares do MR obtidas em laboratório para pequeno número de repetições são atribuídas aos contatos irregulares entre a amostra de solo, o cabeçote e a base da célula triaxial (PHILLIP, 1996).
- Efeito da umidade: a condição de umidade no subleito dependerá do clima da região em estudo, do equilíbrio entre a precipitação local e a evapotranspiração, das condições de drenagem e da permeabilidade do solo. No geral, ocorre diminuição do MR com o aumento da saturação (umidade), e este parâmetro é mais influente que o teor de umidade.
- Relação entre MR e Sucção do solo: Edil e Motan (1979) realizaram ensaios triaxiais de carregamento repetidos com medidas de variação de sucção através de psicômetros em solos compactados na umidade ótima, e em variações 2% de umidade. Os autores observaram que quanto maior a sucção maior o módulo resiliente, até alcançar um valor crítico. A partir deste valor, o módulo de resiliência decresce para valores de sucção maiores. Também através de estudos se observou a não linearidade entre estes parâmetros, sendo o módulo função de três variáveis para análise do estado de tensões, sendo estas tensão principal menor ou tensão confinante ( $\sigma_3$ ), tensão principal maior ( $\sigma_1$ ), poro pressão de ar ( $u_a$ ) e poro pressão de água ( $u_w$ ).
- Relação entre MR com o processo de secagem e umedecimento: estudos, como os apresentados por Parreira e Gonçalves (2000) e Ceratti et al. (2004), mostram que o umedecimento resulta na diminuição do módulo e a secagem em um aumento. Observa-se também que o processo de secagem seguido de umedecimento reduz significativamente os valores de MR.

Rodrigues (1997) observou que a sucção diminui após os ensaios de módulo de resiliência, se comparados aos valores medidos antes do ensaio. Admite-se que o carregamento cíclico causa uma redução dos vazios na amostra, alterando a estrutura da

mesma. Como o ensaio é apenas parcialmente drenado, com a redução do índice de vazios, o grau de saturação aumenta, ocasionando a redução da sucção.

Rodrigues (1997) cita que diversos autores como Russan e Coleman (1961); Fredlund et al. (1975); Preussler (1978); Svenson (1980); Haupt (1980); Jin et al. (1994); e Phillip (1996), fizeram diversos trabalhos estudando a influência da umidade na variação do módulo de resiliência. De maneira geral os módulos diminuem nas amostras compactadas com o aumento do grau de saturação para diferentes condições de peso específico aparente seco. Esse tipo de relação também depende do valor das tensões confinantes. Também observam que corpos de prova com umidades equivalentes e energias de compactação diferentes apresentam módulo de resiliência muito semelhante, tendo como fator preponderante o teor de umidade.

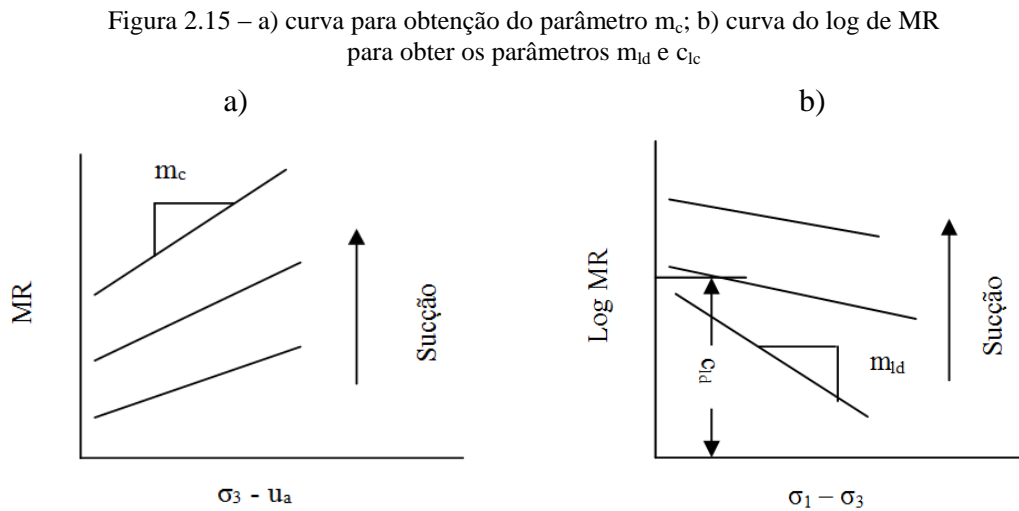
Os corpos de prova moldados abaixo do teor de umidade ótimo tendem a apresentar módulo de deformação maior, aparentemente devido ao aumento do nível de sucção advinda de um melhor arranjo do esqueleto do solo, redução dos vazios e formação de canalículos. Ao passar da umidade ótima, o aumento da poro pressão induz a um comportamento oposto, o módulo e a sucção diminuem com o aumento da umidade. (DAWSON ET AL., 1996)

Os materiais granulares saturados desenvolvem excesso de poro pressão sob carregamento repetido. Quando se desenvolvem poro-pressões, as tensões efetivas no material diminuem com uma consequente redução na resistência ao cisalhamento e no módulo de deformação do material. Alguns pesquisadores acreditam que não é o grau de saturação que influencia o comportamento resiliente do solo, mas sim a forma como a água se apresenta no material, seja apenas presente nos agregados lubrificados e contato entre eles, ou seja em excesso nos vazios do solo. Os estudos tem demonstrado que o efeito da umidade no módulo de resiliência é mais significativo em agregados bem graduados e com bastante presença de finos, devido a maior facilidade de aprisionar água no interior dos poros, ao contrário de materiais uniformemente graduados, onde é permitido uma drenagem mais rápida (WERK, 2000).

O guia da AASHTO Guide for Design of Paviment Structure (1993) usa o módulo de resiliência para caracterizar as propriedades do material de cada camada nas seções dos

pavimentos e apresenta um procedimento para considerar as variações do módulo com as mudanças sazonais e a quantia de água ao longo do ano.

Fredlund e Wong (1977), em seus estudos obtiveram relação do módulo com a sucção, apresentados pelas Equações 2.10 e 2.11, onde os parâmetros podem ser obtidos através de curvas, como os exemplificados na Figura 2.15.



(fonte: modificado de FREDLUND et al., 1977))

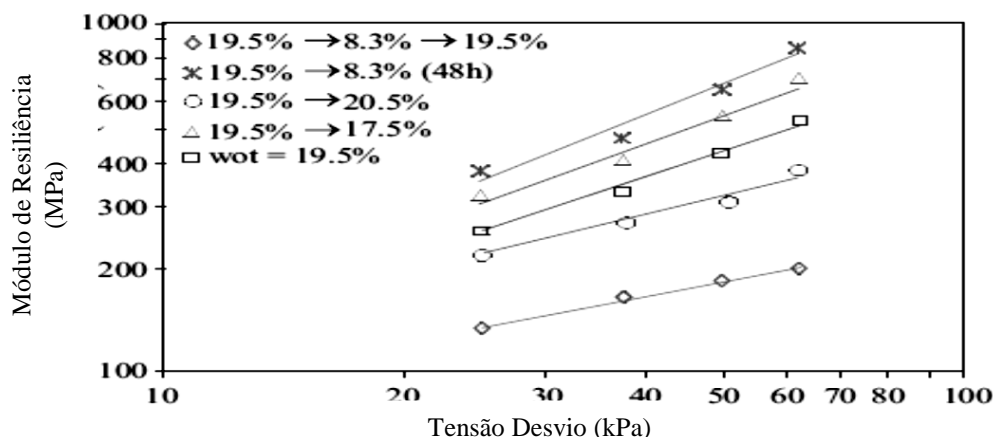
$$\log MR = c_{ld} - m_{ld} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (\text{equação 2.16})$$

$$\Delta MR = m_c \cdot \Delta(\sigma_3 - u_a) \quad (\text{equação 2.17})$$

Parreira e Gonçalves (2000) estudaram o comportamento do módulo de resiliência para uma argila arenosa laterítica compacta na umidade ótima, variando-se o teor de umidade antes do ensaio. Observou-se ao ensaiar corpos de prova 1% acima da umidade ótima que o módulo de resiliência reduziu 25%. A secagem de 2% de umidade resultou no aumento de 24% do módulo de resiliência e a secagem de 11,2% resultou no aumento de 54%. Já a amostra seca e umedecida até a umidade ótima obteve redução de 55%, sendo todas estas porcentagens referentes aos valores obtidos na umidade ótima. Na Figura 2.16 estão apresentados os resultados encontrados neste estudo.



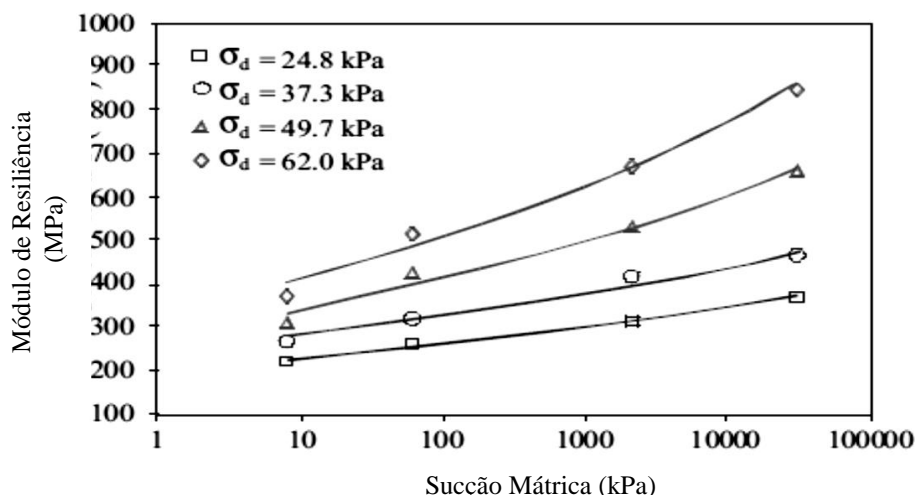
Figura 2.16– variação do módulo de resiliência em diferentes trajetórias de umedecimento e secagem



(fonte: PARREIRA E GONÇALVES, 2000)

Na Figura 2.17, apresenta-se uma relação entre módulo de resiliência e sucção para vários níveis de tensão desvio. Observa-se que o módulo de resiliência aumenta com a sucção e o mesmo ocorre com o aumento da tensão, de acordo com Parreira e Gonçalves (2000).

Figura 2.17 – variação do módulo de resiliência com a sucção em diferentes trajetórias de umedecimento



(fonte: PARREIRA E GONÇALVES, 2000)

O módulo de resiliência de solos coesivos é fortemente influenciado pela tensão desvio (pouco efeito da tensão confinante). Já solos granulares sofrem maiores influências da tensão confinante. Em ensaios de carga repetida os subleitos coesivos sofreram redução do módulo com o aumento da tensão desvio. Porém, existe um ponto de inflexão que costuma corresponder a uma tensão de 41 kPa, que corresponde ao ponto que

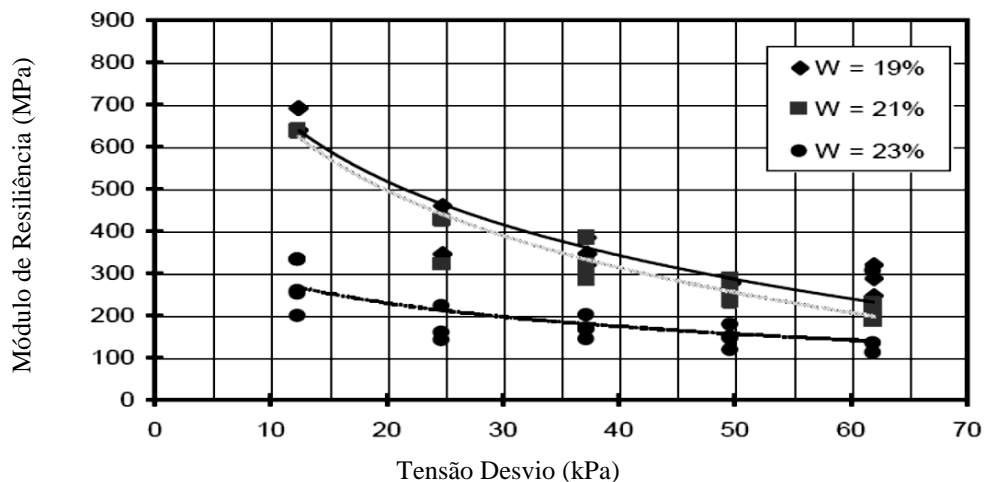
caracteriza o comportamento destes solos sob baixa repetição de carga. Após um número de trajetórias / tensão desvio, o módulo do solo coesivo é praticamente constante (KIM E KIM, 2007).

Medina e Motta (2005) definem a umidade de equilíbrio do subleito como o valor médio da gama de variação do teor de umidade do solo do subleito ao longo do ano, após alguns meses de construção do pavimento e dependem de alguns fatores como pluviosidade, evapotranspiração e nível do lençol freático. Quando a umidade encontra-se acima da ótima (baixa sucção), há um maior número de vazios com água e um aumento da tensão confinante produz pouca mudança no MR. Entretanto, em baixa umidade (alta sucção) o aumento da confinante produz considerável aumento no módulo de resiliência. A sucção do solo de subleito define os estados de tensão.

Khouty et al. (2003) mostraram que a sucção mátrica afeta o módulo de resiliência através de ensaios com controle de sucção utilizando a técnica de translação de eixos. Durante o ensaio o controle foi realizado pela entrada de ar das placas cerâmicas (pedras porosas) de alta precisão, medindo a sucção do ensaio. Assim foi aplicado a tensão confinante, primeiramente, e depois as cargas repetidas. Porém, inicialmente a pedra porosa foi saturada e a amostra tendo sua sucção controlada (se associou a umidade do solo com a sucção através da curva de retenção). Durante o ensaio ocorreu uma pequena diminuição da sucção mátrica, o que está associado ao acréscimo de poro pressão d'água a cada trajetória de carga. O aumento da sucção gera uma diminuição na deformação resiliente para o ensaio. Porém, observa-se que a sucção osmótica não tem efeitos, e a sucção mátrica é o parâmetro chave para descrever o módulo de solos coesivos.

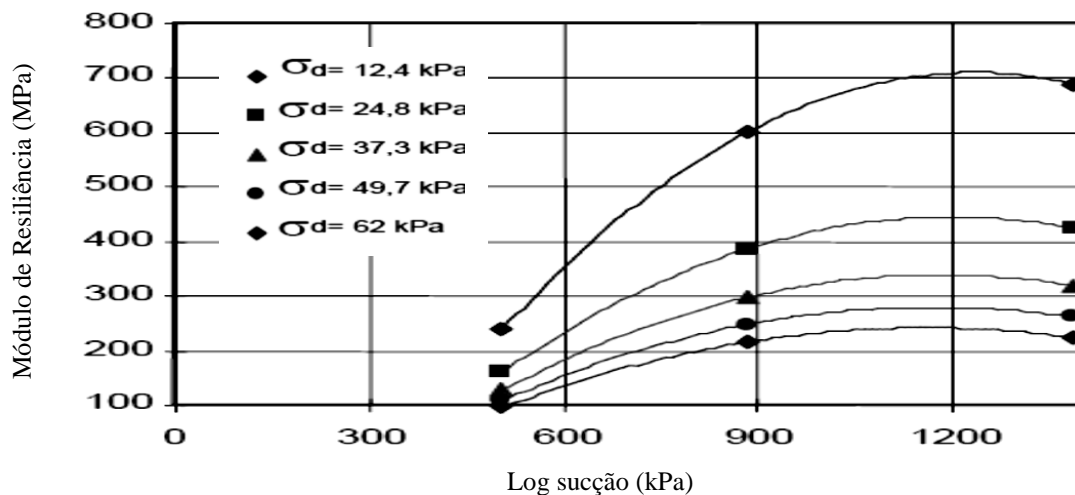
Ceratti et al. (2004) analisaram o comportamento do módulo de resiliência em solo laterítico com a variação de umidade através de trajetórias de umedecimento e secagem com medição da sucção pela técnica do papel filtro. Observaram que o módulo de resiliência é maior quando o solo era submetido a secagem e diminuía quando submetido à umedecimento. Notou-se também que o módulo de resiliência aumenta com a sucção até um valor limite (alta sucção), onde passa a diminuir. As Figuras 2.18 e 2.19 apresentam alguns resultados encontrados pelos autores.

Figura 2.18 – módulo de resiliência das amostras submetidas a trajetórias de umedecimento e secagem



(fonte: CERATTI et al., 2004)

Figura 2.19 – relação entre o módulo de resiliência e a sucção

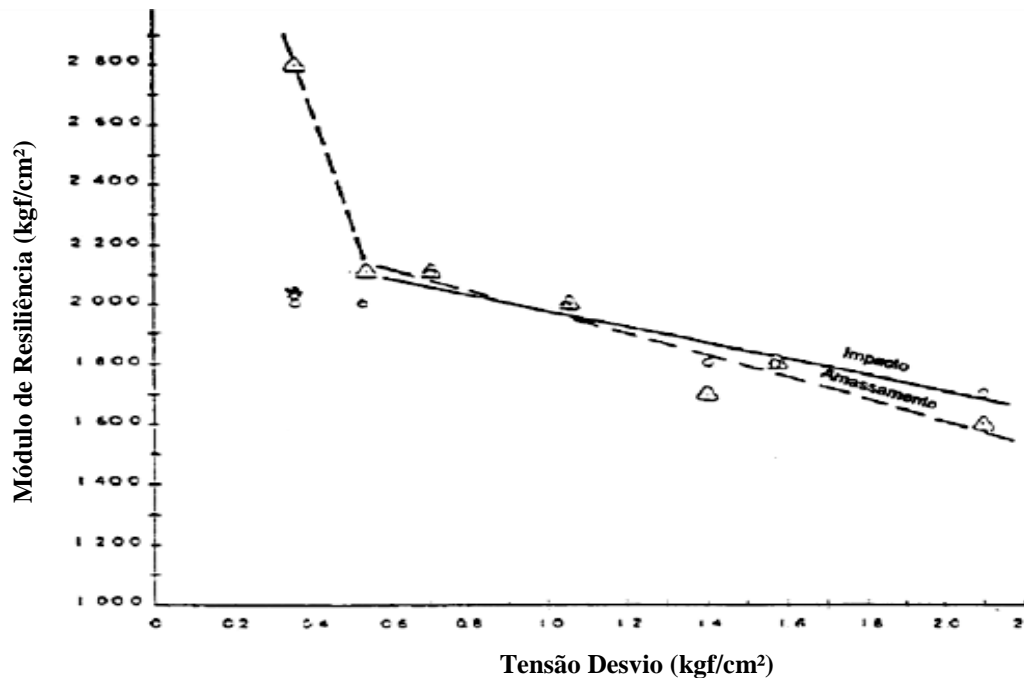


(fonte: CERATTI et al., 2004)

Svenson (1980) analisou o efeito do tipo de compactação, por amassamento e dinâmico, nos módulos de resiliência de um solo argiloso. Observou-se que para teores abaixo da umidade ótima não houve quase nenhum efeito do método de compactação, apenas em tensões desvio elevadas a compactação por amassamento resultou em valores menores de módulo de resiliência. Para corpos de prova compactados no teor de umidade ótima, se observou uma diferença mais significativa, sendo o método por amassamento que resultou em valores menores de módulo. Para valores de tensão desvio inferiores a 1 kgf/cm<sup>2</sup> a diferença foi mais pronunciada. Nos pontos acima da umidade ótima os valores também foram diferentes, sendo menores os por amassamento. Entretanto, o módulo de resiliência tende a se aproximar a medida que a tensão desvio aumenta. As

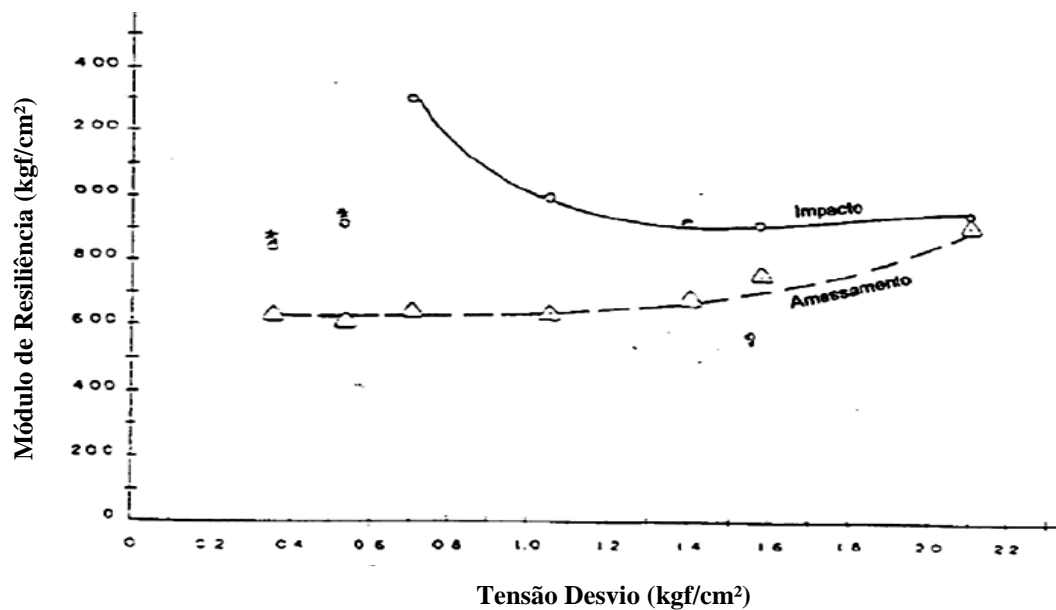
Figuras 2.20, 2.21 e 2.22 mostram os efeitos dos métodos de compactação no módulo de resiliência.

Figura 2.20 – diferença entre os métodos de compactação abaixo da umidade ótima com relação ao módulo de resiliência e tensão desvio



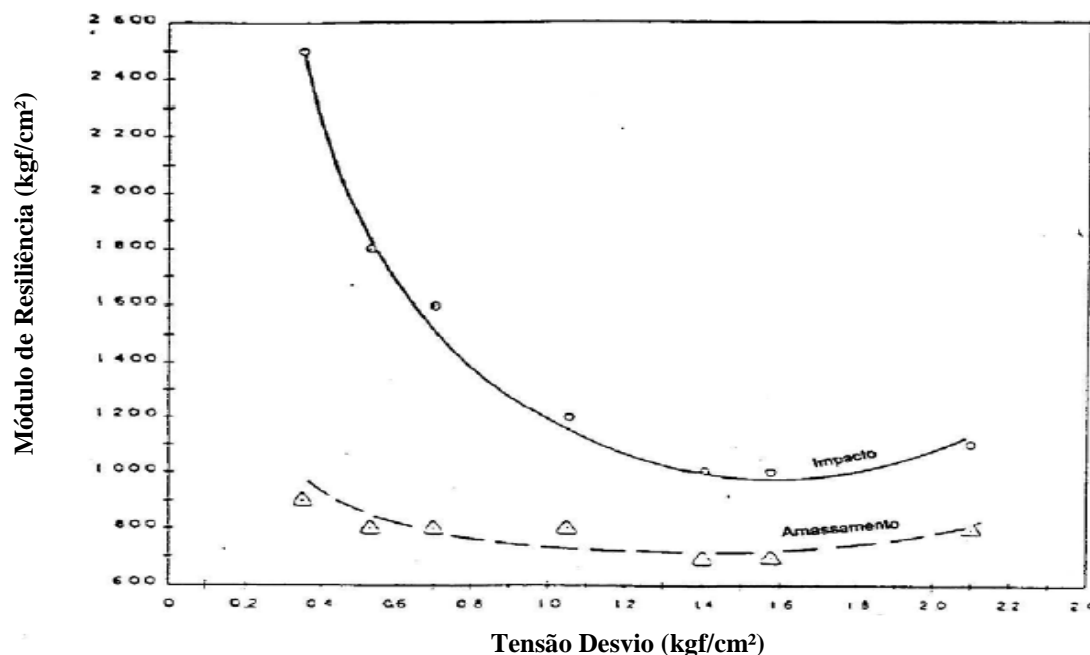
(fonte: SVENSON, 1980)

Figura 2.21 – diferença entre os métodos de compactação acima da umidade ótima com relação ao módulo de resiliência e tensão desvio



(fonte: SVENSON, 1980)

Figura 2.22 – diferença entre os métodos de compactação na umidade ótima com relação a módulo de resiliência e tensão desvio

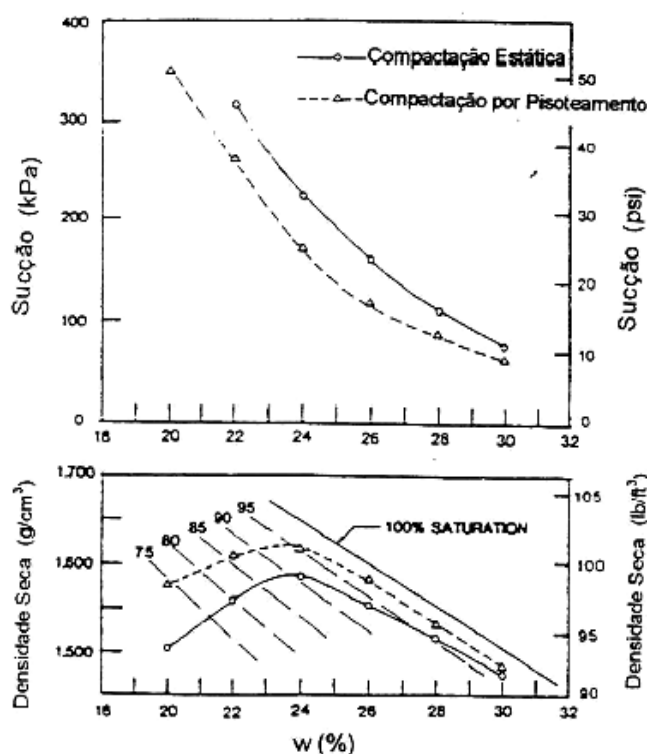


(fonte: SVENSON, 1980)

Mou e Chu (1981) avaliaram a sucção em amostras argilosas compactadas por pisoteamento e estaticamente, ambas com a mesma energia. A energia de compactação é importante para avaliar a sucção, pois esta depende da estrutura do solo, tensão superficial entre água e solo e tamanho dos poros. A Figura 2.23 mostra a variação do módulo de resiliência com o processo de compactação. Observou-se que a sucção foi maior na amostra compactada estaticamente e este método de compactação resultou e menor peso específico aparente seco.

Atualmente, sabe-se que a não só os estados de tensões afetam o módulo de resiliência, mas também as variações ambientais, caracterizadas pela sucção, provocam alterações nos valores de módulo de resiliência. As variações ambientais como precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento alteram a umidade do subleito dos pavimentos, podendo influenciar na magnitude da deformabilidade elástica dos materiais na determinação do módulo de resiliência.

Figura 2.23 – relação entre os métodos de compactação e a sucção

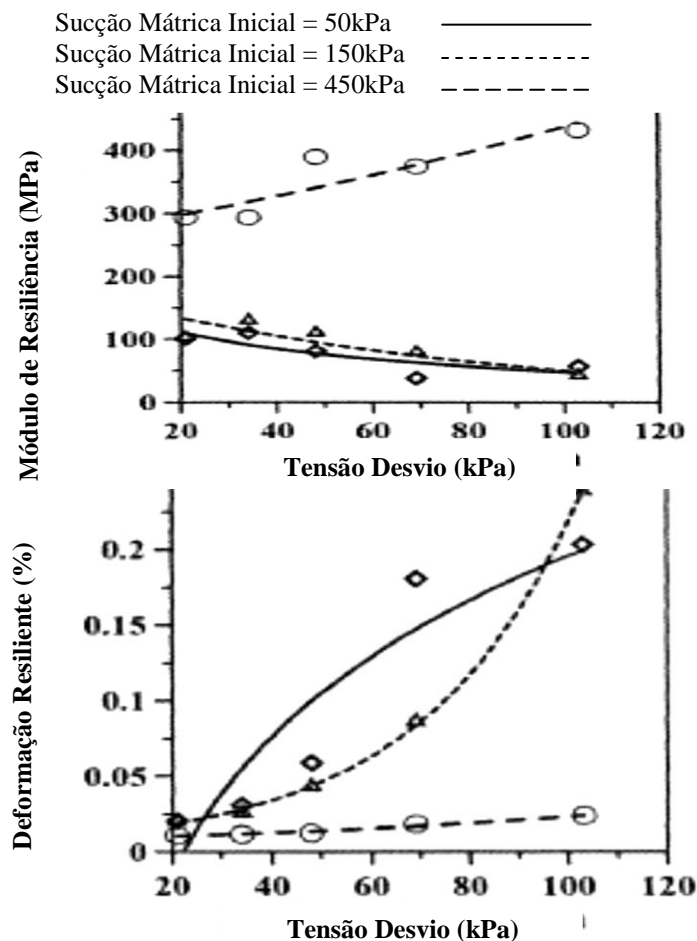


(fonte: MOU E CHU, 1981)

Szafron e Fredlund (1992) apresentaram um estudo realizado através do monitoramento da sucção matricial no subleito de uma rodovia no Canadá, onde destacam a influência do microclima. Notou-se que a sucção mátrica influi na resistência de subleitos de solo, em termos de durabilidade. Entretanto, ocorre uma variação entre a região da rodovia com maior tráfego e a com menos tráfego. Na porção de maior intensidade de tráfego, a sucção apresentou-se maior, devido a dois fatores: infiltração nesta área ser pequena, devido a boa impermeabilização da superfície do pavimento e devido a densificação da camada devido ao próprio tráfego.

Kung et al. (2006) realizaram ensaios de módulo de resiliência em solos coesivos com sucção imposta e variável afim de avaliar o seu efeito no comportamento elástico de um solo. As amostras foram compactadas e levadas até um nível de sucção inicial antes do ensaio de módulo. Observou-se que para valores de sucção mais baixos, o módulo de resiliência diminuía com o aumento da tensão desvio, porém para sucções mais elevadas esse comportamento era oposto. Verificou-se também que os níveis de deformação resiliente foram muito inferiores para a sucção mais elevada, quando comparada com os demais valores. A Figura 2.24 apresenta os resultados encontrados.

Figura 2.24 – a) relação entre o módulo de resiliência e tensão desvio;  
 b) relação entre a deformação resiliente e a tensão desvio, para diferentes níveis de sucção inicial



(fonte: KUNG et al., 2006)

Takeda et al. (2006) avaliaram a influência da umidade pós compactação em um grupo de 30 solos ao longo de uma rodovia, separando-os em grupos de acordo com sua granulometria e o comportamento laterítico ou não-laterítico. Notaram que, como era esperado, o módulo de resiliência aumentou em até 245% na secagem e reduziu-se em 37% no umedecimento, sendo observado que no grupo dos solos lateríticos a redução foi menor. Entretanto, sabe-se que o solo laterítico comporta-se melhor em campo do que os solos não-lateríticos sob a ação da água. Os autores concluíram que o umedecimento teria pouca influência.

As variações de umidade produzem modificações no MR que, para fins de projeto ou avaliações de pavimentos, devem ser transformadas em relações entre o módulo de resiliência e as condições ambientais. Assim, tem-se apresentado os valores em curvas que relacionam o módulo em uma determinada umidade normalizado pelo seu valor na

umidade ótima ( $MR/MR_{w_0}$ ) e a correspondente variação de umidade ( $w-w_0$ ) (TAKEDA ET AL., 2006).

### 2.2.2 Modelos de Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência não pode ser estimado a partir de um único valor e sim, de um comportamento que depende de diferentes variáveis. Para melhor visualizar seu comportamento, foram desenvolvidos diferentes modelos de previsão de desempenho para o módulo de resiliência. Os fatores que interferem em sua magnitude podem ser agrupados devido a condição de carregamento e estado de tensões, natureza do solo e estrutura, estado físico devido ao teor de umidade e massa específica, sendo as relações com o estado de tensões os mais utilizados.

No geral, o módulo de resiliência é representado na forma de modelos constitutivos, como por exemplo, o modelo potencial em função da tensão desvio para solos coesivos ou o modelo potencial em função do primeiro invariante de tensão para os solos granulares. Também podem ser representados a partir de relações com parâmetros vinculados a natureza e estado do material (TAKEDA ET AL., 2006).

O modelo  $k-\sigma_d$  (equação 2.18) geralmente é usado para solos coesivos na representação da variação do módulo de resiliência com a tensão desvio. Trata-se de um modelo simples, possuindo apenas dois parâmetros.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (\text{equação 2.18})$$

Outro modelo simples, comumente utilizado para solos granulares, é o  $k-\sigma_3$  que descreve a relação do módulo de resiliência com a tensão confinante. O modelo está apresentado na equação 2.19.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (\text{equação 2.19})$$



Para solos arenosos, ou granulares, o módulo depende principalmente da tensão confinante, ou da soma das tensões principais ( $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ ). Há muitas pesquisas que mostram a dependência do módulo com relação ao primeiro invariante de tensão, obtendo o modelo k- $\theta$  (equação 2.20).

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (\text{equação 2.20})$$

O modelo composto, apresentado na equação 2.21, representa o módulo de resiliência em função de todas as tensões aplicadas, apresentando um comportamento único para qualquer tipo de solo ou material. O modelo foi proposto por Macêdo (1996).

$$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_3^{K_3} \quad (\text{equação 2.21})$$

Drumm et al. (1997) avaliaram o efeito da umidade pós compactação no módulo de resiliência de subleitos em Tennessee. Concluíram que todos os solos variando das classes A-4 à A-7-A-6, de acordo com a classificação AASHTO, demonstravam um decréscimo no MR com o aumento do grau de saturação. O nível de redução no MR variava de acordo com o tipo de solo, sendo realizado uma correlação do MR com o grau de saturação. Entretanto, este modelo não considera o efeito de secagem ou umedecimento.

O modelo Universal de Uzan-Witczak utiliza o primeiro invariante de tensão e da tensão cisalhante octaédrica ( $\tau_{oct}$ ), podendo ser aplicado a todos os tipos de solos não tratados, uma vez que incorpora os efeitos das tensões desvio e volumétricas. Estudos mostraram que as constantes do modelo são dependentes das propriedades dos materiais, como por exemplo, massa específica aparente seca máxima, teor de umidade, índice de plasticidade, limite de liquidez e porcentagem de finos. O modelo está apresentado na equação 2.22 (TAKEDA, 2006).

$$MR = K_1 \cdot \theta^{K_2} \cdot \tau_{oct}^{K_3} \quad (\text{equação 2.22})$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d \quad (\text{equação 2.23})$$

A AASHTO em seu Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide de 2002 propôs o modelo (equação 2.24) para prever o efeito da variação de umidade no módulo de resiliência. Porém, o modelo não avalia a histerese no comportamento do MR.

$$\log \left( \frac{MR}{MR_{wopt}} \right) = a + \frac{b - a}{1 + e^{\ln\left(\frac{-b}{a}\right) + k_m(S - S_{opt})}} \quad (\text{equação 2.24})$$

Onde:

$k_1, k_2, k_3, a, b$  = parâmetros do modelo;

$MR_{wopt}$  = módulo de resiliência na umidade ótima;

$S_{opt}$  = grau de saturação na umidade ótima.

Ceratti et al. (2004) avaliaram o efeito da sucção no solo nos valores de módulo de resiliência de uma argila laterítica, a partir de ensaios de campo e laboratório e concluiu-se que o MR aumenta com sucções até 1000 kPa. Neste estudo também não foram avaliados os efeitos da histerese.

Khoury e Zaman (2004), realizaram novos procedimentos laboratoriais desenvolvidos para avaliar o efeito do umedecimento e da secagem tanto sobre o módulo de resiliência como na sucção do solo. Prepararam amostras em diferentes teores de umidade, sendo posteriormente aumentados ou reduzidos os teores de umidade antes do ensaio de MR. Observou-se que o MR diminuía com o aumento da umidade e aumentava com a redução desta, sendo esta mudança variável com o tipo de solo.

O modelo universal não linear da AASHTO é aplicável a todos os materiais de pavimentação não tratados e é o modelo adotado no guia de dimensionamento NCHRP 1-37A (2004), proposto pela instituição. O modelo está apresentado na equação 2.25.

$$MR = k_1 p_a \left[ \frac{\theta}{p_a} \right]^{k_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (\text{equação 2.25})$$

O parâmetro  $k_1$  é proporcional ao módulo de Young, logo, os valores devem ser positivos, pois o MR não pode ser negativo. O aumento da tensão volumétrica deveria produzir um enrijecimento ou endurecimento do material, resultando valores maiores de módulo de resiliência. Assim, o parâmetro  $k_2$  também deveria ser positivo. O parâmetro  $k_3$  deve ser negativo já que o aumento da tensão cisalhante produz um amolecimento do material, resultando em valores menores de MR e,  $p_a$  é a pressão atmosférica. A Tabela 2.4 apresenta uma comparação entre os valores dos coeficientes para cada grupo de solo, notando-se que  $k_2$  diminui a medida que o solo torna-se mais fino e, de maneira semelhante,  $k_3$  torna-se mais negativo (VON QUINTUS, 2002).

Tabela 2.4 – análise estatística básica de parâmetros do modelo k1-k3, assumindo  $k_6=0$ , para vários tipos de materiais

Parâmetros		Material		
		Materiais não tratados de base e sub-base	Solos granulares	Solos finos
K1	Mediana	0,85	0,76	0,80
	Média	0,87	0,80	0,89
	Desvio-padrão	0,272	0,26	0,31
K2	Mediana	0,63	0,45	0,24
	Média	0,63	0,45	0,28
	Desvio-padrão	0,13	0,19	0,15
K3	Mediana	-0,13	-1,05	-1,39
	Média	-0,17	-1,14	-1,57
	Desvio-padrão	0,21	0,74	1,11
Número de ensaios		423	257	105

(fonte: VON QUITUS, 2002)

Outro modelo apresentado por Yang et al. (2005), conforme equação 2.26, incorpora a sucção mátrica ( $\psi_m$ ) de acordo com a saturação do solo, através do  $\chi$  (0 para solo seco e

1 para solos saturados), e baseia-se no conceito de tensões efetivas. O modelo propõe uma relação entre o módulo de resiliência e a sucção. Khalili e Khabbaz (1998) citam uma relação para  $\chi$  (parâmetro que tem relação com o grau de saturação) em função do valor de entrada de ar ( $\psi_e$ ), obtido na curva de retenção.

$$MR = k_1(\sigma_d + \chi\psi_m)^{k_2} \quad (\text{equação 2.26})$$

Liang et al. (2008) propuseram um modelo para previsão do efeito da variação de umidade no módulo de resiliência usando o conceito de tensão efetiva e assumindo a poro pressão de ar igual a zero. O modelo apresentado na equação 2.27 requer a avaliação da sucção no solo.

$$MR = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta + \chi_w \psi_w}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (\text{equação 2.27})$$

Khoury et al. (2010) investigaram o efeito da histerese de sucção no módulo de resiliência de solos de subleito usando a técnica de translação de eixos e verificaram que o MR depende da historia de tensão de sucção do solo.

### **3 METODOLOGIA E ENSAIOS REALIZADOS**

Neste capítulo são apresentados o solo utilizado para compor os corpos de prova em estudo e os ensaios realizados. Não são descritos os ensaios de forma detalhada, pois o procedimento completo encontra-se nas normas citadas e em parte no capítulo destinado à revisão bibliográfica, sendo somente citados a sequência e alguns procedimentos específicos adotados para o trabalho.

#### **3.1 MATERIAIS UTILISADOS E ÁREA DE ESTUDO**

Nesta seção serão apresentadas as características do solo estudado, mostrando os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg e a curva granulométrica, para classificação do material. Também estão apresentados aqui a curva de compactação e a curva de saturação do solo estudado.

A área escolhida para coleta do material foi definida por conter uma jazida de solo próximo a uma rodovia que consta no projeto de duplicação e restauração. A empresa responsável pelo trecho tem interesse em usar o material e disponibilizou amostras para o estudo desta pesquisa. O material foi coletado na BR116/290, próximo às cidades de Guaíba e Eldorado do Sul, região metropolitana de Porto Alegre/RS. A Figura 3.1 mostra a localização e a jazida do solo estudado.

Figura 3.1– jazida do solo estudado na BR 116/290 – próximo às cidades de Guaíba e Eldorado do Sul



(fonte: elaborado pelo autor)

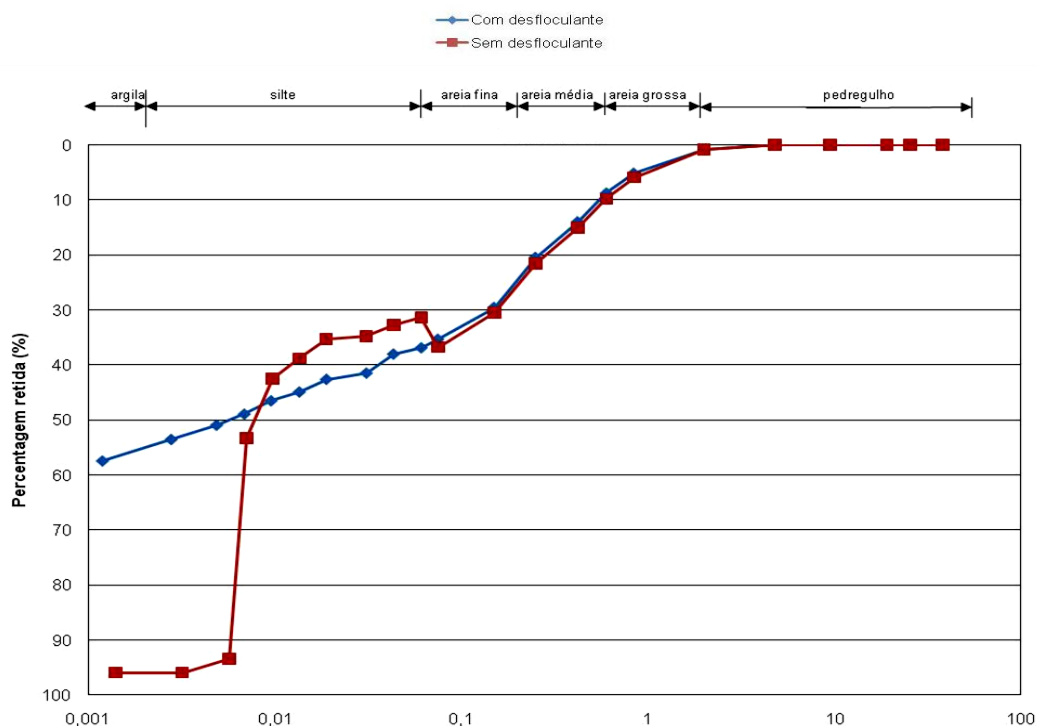
Foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento e por sedimentação conforme descrito na NBR 7181 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), para obter a curva granulométrica do material em análise. Foi realizado o ensaio com o uso do defloculante Hexametáfosfato de Sódio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>n</sub> e Carbonato de Sódio Anidro P.A. ACS ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). A Figura 3.2 apresenta as curvas granulométricas do solo e a Tabela 3.1 as porcentagens de cada fração do solo, com e sem defloculante.

Tabela 3.1 – frações do solo

Ensaio / Solo	Argila	Silte	Areias
Com defloculante	45 %	19%	36%
Sem defloculante	4%	65%	31%

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 3.2 – curvas granulométricas do solo estudado



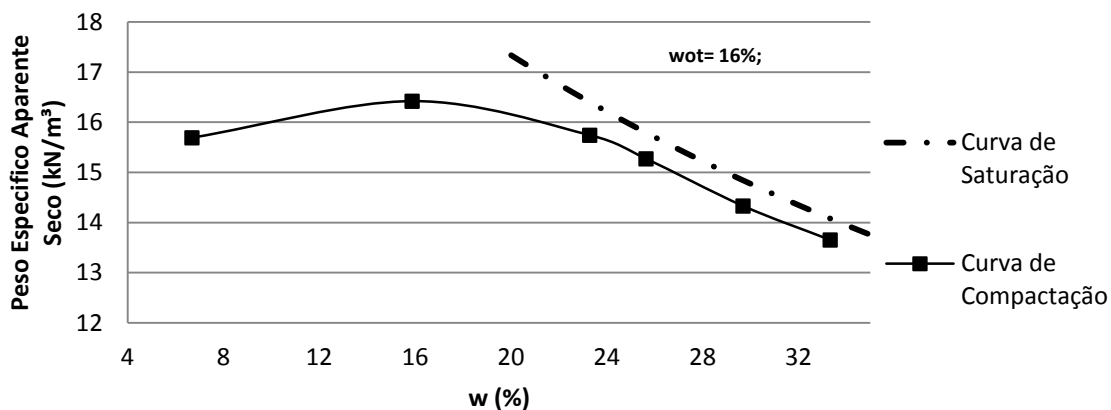
(fonte: elaborado pelo autor)

Foram realizados os ensaios de limites de Atterberg para definir a classificação do solo, seguindo o procedimento prescrito nas normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1988). Os resultados apresentaram Limite de Liquidez (LL) de 36% e o Limite de Plasticidade (LP) de 27%, com o Índice de Plasticidade (IP) de 9%. Com esses dados, pela classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o solo está ligeiramente abaixo da Linha A, situando-se no grupo dos siltes-argilas (ML) de baixa compressibilidade.

O ensaio de compactação segue o procedimento apresentado na NBR 7182 (1986). Com base nos cálculos, pode-se traçar a curva de compactação ( $\gamma_s \times w$ ). Aconselha-se a utilizar cinco pontos, sendo dois abaixo da umidade ótima, dois acima, e um que se julga próximo a ela. A umidade ótima corresponde ao ponto mais alto da curva que corresponde ao peso específico aparente seco máximo.

A umidade ótima encontrada foi de 16% e o peso específico aparente seco máximo de 16,5 kN/m<sup>3</sup> para o solo compactado na energia Proctor Normal. A Figura 3.3 apresenta a curva de compactação e a curva de saturação utilizando um peso específico real dos grãos de 26,5 kN/m<sup>3</sup> obtido através de ensaio apresentado na NBR 6508 (1984).

Figura 3.3 – curva de compactação com energia Proctor normal



(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.2 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O equipamento triaxial utilizado para execução de ensaios triaxiais de módulo de resiliência é apresentado na Figura 3.4, com os sistemas de aplicação de cargas, de medição de cargas, de medição de deslocamentos, pórtico de reação, câmara triaxial e cilindro pneumático. O sistema de aquisição de dados utilizado é o SEEPAV 8200 fabricado pela empresa Doering e Brito Ltda.

Figura 3.4 – equipamento para ensaio de módulo de resiliência



(fonte: elaborado pelo autor)



O SEEPAV 8200 é um sistema que foi desenvolvido especialmente para utilização em ensaios especiais de pavimentação, como módulo de resiliência triaxial, módulo de resiliência diametral e “creep” dinâmico. O equipamento utiliza transdutores de deslocamentos do tipo LVDT da empresa Solartron modelo DG-2,5. Este sensor possui curso de  $\pm 2,5$  mm. A tensão desvio é calculada a partir de medições realizadas com uma célula de carga Gefran TU K1 M, com capacidade nominal de 10kN.

O ensaio seguiu o procedimento apresentado na norma do DNIT-ME 134 (2010). Para a execução do ensaio, primeiramente o solo deve estar na umidade desejada. O corpo de prova é compactado em cinco camadas com energia especificada, sendo nesta pesquisa usada energia normal. A compactação ocorreu com o auxílio de um molde tripartido de aço de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Após a compactação, o corpo de prova é pesado, medido e levado para a câmara triaxial, onde é envolvido por uma membrana que foi aderida ao corpo de prova com anéis elásticos (O’rings).

Inicialmente é aplicada uma sequência de tensões para fase de condicionamento de 200 ciclos cada. O ensaio procede com a aplicação de tensões desvio aumentadas a cada trajetória de 200 Hz e tensão confinante a cada 600 ciclos. A carga é aplicada em média em um intervalo de 1/10 de segundo. Esse valor foi baseado no carregamento que sofre o pavimento quando por ele passa um veículo com velocidade usual de tráfego.

O projeto experimental constituiu na realização de ensaios de módulo de resiliência em um solo extraído da BR 116/290, com diferentes teores de umidade de compactação e por umedecimento. Para variar a umidade por capilaridade, os corpos de prova moldados em condições de umidade pré-determinadas foram submetidos a umedecimento e secagem. O umedecimento se deu borrifando água no CP moldado, cuidando para adicionar a quantidade de água necessária para alcançar o teor de umidade desejado, mediante o controle do peso. Em seguida, o CP foi colocado dentro de uma caixa de isopor fechada, umedecida, para que não ocorresse perda de umidade e para que a água adicionada fosse absorvida. A Figura 3.5 mostra um corpo de prova em processo de umedecimento.

Figura 3.5 – corpo de prova em processo de umedecimento.



(fonte: elaborado pelo autor)

A secagem ocorreu deixando-se os corpos de prova expostos ao ar, controlando a perda de peso e, conseqüentemente, a perda de umidade. Após, o corpo de prova foi deixado ensacado por 24h no mínimo, a fim de uniformizar a umidade, para então realizar o ensaio de módulo de resiliência.

O ensaio seguiu o procedimento recomendado pela norma DNIT-ME 134 (2010). Porém, os corpos de prova umedecidos e compactados acima da umidade ótima (ramo úmido), não suportaram o último par de tensões do condicionamento (excesso de deformação), impossibilitando a execução do ensaio. Por isso, optou-se por limitar o condicionamento a 600 ciclos iniciais com tensão desvio ( $\sigma_d$ ) de 21kPa e tensão confinante ( $\sigma_3$ ) de 21 kPa em todos os corpos de prova ensaiados, mantendo-se a uniformidade do procedimento. A Tabela 3.2 apresenta os valores de tensões aplicadas no condicionamento sugerida pela norma do DNIT-ME 134 (2010).

Tabela 3.2– sequência de tensões para fase de condicionamento

Tensão Confinante (kPa)	Tensão Desvio (kPa)	Razão de Tensões
20,7	20,7	2
68,9	68,9	2
102,9	309,0	4

(fonte: DNIT-ME 134, 2010)

Para avaliação do comportamento do módulo de resiliência perante os diferentes teores de umidade, foram realizadas as diversas variações de umidade durante a compactação e procedimento de umedecimento e secagem. A Tabela 3.3 apresenta o programa de ensaios, mostrando os valores de umidade do corpo de prova compactado e a umidade do corpo de prova no momento do ensaio.

Tabela 3.3– Programa de ensaios

<b>Teor de umidade de moldagem e trajetórias dos CPs</b>	<b>Umidade de compactação (%)</b>	<b>Umidade de Ensaio (%)</b>
$W_{ot}$	16	16
$W_{ot-2\%}$	14	14
$W_{ot+2\%}$	18	18
$W_{ot-2\%} + 2\%$	14	16
$W_{ot} + 2\%$	16	18
$W_{ot+2\%} - 4\%$	18	14
$W_{ot} - 2\%$	16	14
$W_{ot+2\%} - 2\%$	18	16
$W_{ot-4\%}$	12	12
$W_{ot+4\%}$	20	20
$W_{ot-2\%} + 4\%$	14	18
$W_{ot-2\%} - 2\%$	14	12
$W_{ot+4\%} + 2\%$	18	20

(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.3 OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

A curva de retenção foi obtida pelo método do papel filtro, o qual foi apresentado no capítulo de Revisão Bibliográfica 2.1.6. Neste estudo, os corpos de prova foram moldados compactando-os no molde do ensaio de compactação em energia normal, conforme seria executado o ensaio de compactação. Após a compactação, o solo era extraído de dentro do molde metálico para então, com a ajuda do anel de PVC (mesmo utilizado para ensaio de sucção) de 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro, a amostra era esculpida dentro do anel, o qual permanece até o final do ensaio. A Figura 3.6 mostra esse processo sendo executado.

Figura 3.6 – moldagem do corpo de prova



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a moldagem, pesaram-se os corpos de prova e retiraram-se amostras para determinação da umidade, de forma a verificar se foram atingidas as condições para a realização do ensaio. Em seguida, os corpos de prova foram embalados, para não perder umidade. Os materiais utilizados para medição da sucção mátrica pelo método do papel filtro foram:

- a. anéis de PVC com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura;
- b. papel filtro Whatman N° 42;
- c. balança eletrônica da marca Ohaus, modelo Adventurer AR 2140, com resolução de 0,0001 g e capacidade de 210 g, para pesagem dos papéis e das amostras;
- d. estufa à temperatura de 60 °C para secagem do papel filtro;
- e. filme de PVC e papel alumínio para embrulhar a amostra;
- f. cápsulas de vidro com tampa para pesagem dos papéis filtro;
- g. pinça metálica para manusear o papel filtro;
- h. estilete para cortar o papel filtro;
- i. conta-gotas para umedecer as amostras;
- j. caixa de isopor para armazenar as amostras durante o período de equalização, a fim de reduzir a variação térmica.

Foram moldados corpos de prova 2% abaixo da umidade ótima (14%), 2% acima (18%) e na umidade ótima (16%) com a finalidade de fazer a curva de retenção nos dois extremos das condições que normalmente podem ocorrer na compactação em campo e no próprio teor ótimo. O controle de umidade das amostras foi realizado medindo-se o peso dos corpos de prova, considerando que a variação ocorre exclusivamente pela evaporação ou umedecimento do solo, uma vez que é inibida a perda de material durante o processo. O tempo de equalização do papel filtro com o solo foi de sete dias. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram algumas etapas do processo de ensaio.

Figura 3.7 – corpo de prova embalado com papel filme



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 3.8 – amostra em processo de secagem ao ar



(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A utilização do ensaio de cisalhamento direto permite a obtenção de resultados, em geral, bastante confiáveis em termos de resistência drenada nas condições de pico e última. No entanto, não é possível controlar as condições de drenagem, e bem como medir as poro-pressões. Outra desvantagem é o plano de cisalhamento não ser uniforme e a ruptura ocorre progressivamente das extremidades para o centro do corpo de prova. Além disso, a área sobre a qual atuam as tensões normal e cisalhante não permanece constante durante o ensaio.

Os ensaios de cisalhamento direto deste trabalho foram executados com o objetivo de obter os parâmetros de resistência, para as variações de umidade das amostras. O ensaio foi executado em uma prensa convencional, do tipo deformação controlada, produzida pela empresa Wykeham Farrance Int. Este equipamento pertence ao Laboratório de Geotecnia da UFRGS. A Figura 3.9 apresenta o equipamento descrito.

Figura 3.9 – equipamento Wykeham Farrance para resistência ao cisalhamento direto



(fonte: elaborado pelo autor)

Neste equipamento ensaia-se amostras de 2cm de altura e 6cm de diâmetro às quais é aplicada a tensão normal requerida por meio de um pendural e um braço de alavanca. As medidas de deformação axial, deslocamento e carga aplicada são obtidas por meio de um sistema automatizado que é composto por uma célula de carga Kratos MM (capacidade 2kN) calibrada e um transdutor de deslocamentos Gefran LTM050, para

medidas de deformação vertical e de deslocamento horizontal. A aquisição de dados foi feita por um microcomputador, possibilitando a execução de ensaios de longa duração.

Para esta pesquisa foram moldadas amostras compactadas em cilindro Proctor a energia normal nas umidades de 14%, 16% e 18%. Após a compactação, o corpo de prova foi extraído do molde e esculpido (moldado) no tamanho compatível para ensaio no equipamento. Para cada umidade foram utilizadas tensões normais de 25kPa, 50kPa e 100kPa, sendo os ensaios realizados com amostras saturadas.

Também foram ensaiadas amostras na condição não saturada para analisar o comportamento as trajetórias de umedecimento e secagem. Assim, as amostras compactadas foram submetidas a secagem ou umedecimento antes de serem levadas ao cisalhamento. Durante o processo foram medidas as umidades de compactação e da amostra após o ensaio, a fim de verificar perdas de umidade, as quais não foram consideráveis ao longo do processo.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados experimentais e uma análise dos mesmos. Primeiramente, as curvas de retenção do solo são apresentadas, mostrando as influências do teor de umidade inicial de compactação e dos efeitos das trajetórias de umedecimento e secagem. Logo a seguir, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência são apresentados, avaliando a influência do teor de umidade de compactação e das trajetórias de umedecimento e secagem. Finalmente, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto são mostrados para complementar o estudo em questão.

### 4.1 CURVA DE RETENÇÃO

As curvas de retenção são fundamentais para a compreensão do comportamento do solo não saturado, uma vez que expressam a variação da quantidade de água dentro dos poros do solo quando este é submetido a diferentes valores de sucção em trajetórias de secagem e/ou umedecimento. A quantidade de água retida nos poros é definida pelo teor de umidade ou, também, pode ser representada pelo grau de saturação. Na primeira parte, são apresentadas as curvas de retenção para as amostras compactadas nas diferentes umidades. Na segunda parte, estão apresentados o uso de equações para modelagem das curvas de retenção e a comparação entre as diferentes curvas.

#### 4.1.1 Trajetórias das Curvas de Retenção

A fim de entender melhor o comportamento de solos compactados, frente às trajetórias de umedecimento e secagem, foram moldadas amostras na umidade ótima (16%), no ramo seco (14%) e no ramo úmido (18%), sendo esta variação de 2% acima e abaixo da umidade ótima, intervalo aceitável dentro dos valores críticos em uma compactação em campo. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os pontos obtidos no ensaio de papel filtro das amostras compactadas com teores de umidade de 14%, 16% e 18%.

As curvas de 16% e 18% iniciaram as suas trajetórias pelo processo de secagem, sendo na sequência submetidas a uma trajetória de umedecimento e em seguida a uma nova



secagem. A curva de 14% iniciou pelo processo de umedecimento, seguindo de secagem e aplicando novamente uma trajetória de umedecimento. As amostras foram conduzidas até valores muito pequenos de teor de umidade, no qual já se tornava muito difícil prosseguir com a secagem ao ar. Alguns corpos de prova quando atingiram um valor de umidade muito baixo começaram a apresentar pequenas fissuras, não sendo mais possível continuar com o processo de secagem. A trajetória de umedecimento foi levada até alcançar a saturação máxima.

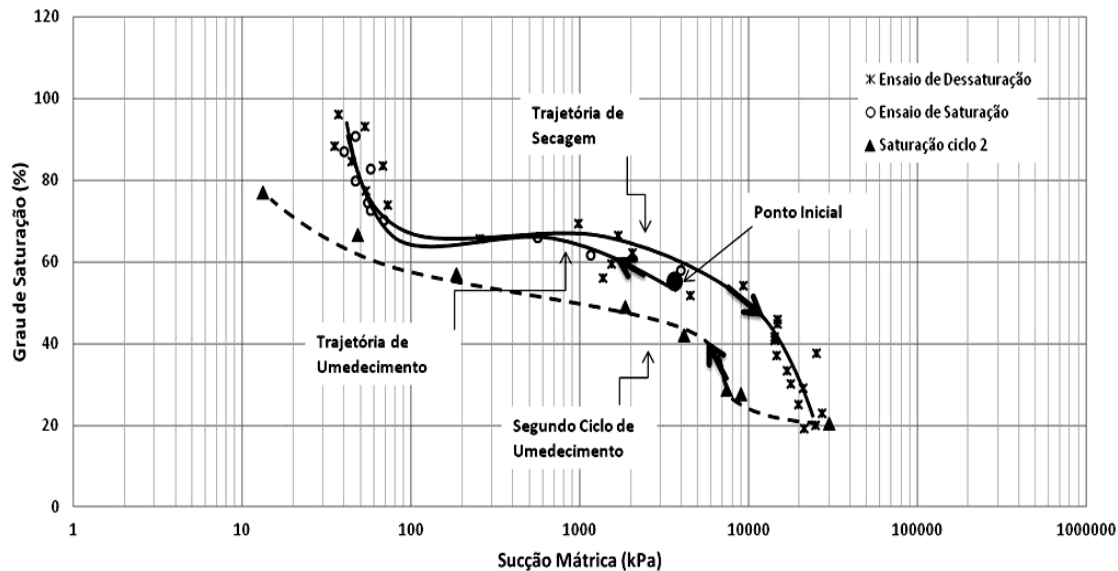
A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos para as amostras compactadas com 14% (ramo seco) e grau de saturação inicial de 58%. As amostras compactadas com 14% de umidade passaram pela trajetória de umedecimento inicialmente. Os resultados mostram que o comportamento do solo compactado em um teor de umidade menor que a ótima (estrutura floculada) gera uma rápida diminuição da sucção com o aumento da saturação, até aproximar-se de valores muito baixos que seriam correspondentes a um grau de saturação mais elevado. Com relação à dessaturação, a resistência é relativamente menor que em amostras compactadas na umidade ótima ou acima desta. Provavelmente, porque no ramo seco, os poros contêm mais espaço entre os agregados (macroestrutura) em relação ao espaço dentro das (microestrutura). Nota-se que com as trajetórias de umedecimento e secagem estas curvas de retenção não resultam em uma histerese, mostrando que sua estrutura não foi alterada pela saturação inicial.

De forma um pouco diferente que ocorre na curva de retenção da amostra acima da umidade ótima (Figura 4.3), a curva de retenção da Figura 4.1 apresenta uma forma, que tende a ser bimodal, com uma inclinação menos acentuada, (patamar intermediário) onde a sucção aumenta em menor taxa com relação ao grau saturação. Este comportamento poderia ser devido à estrutura floculada que apresenta este material quando compactado abaixo da umidade ótima. Porém, como não foram realizados ensaios de microscopia para verificar a estrutura, não é possível confirmar esta hipótese.

A Figura 4.1 apresenta, também, uma segunda trajetória de umedecimento a qual foi submetido o solo, que está definido como segundo ciclo de umedecimento. Percebe-se que os pontos tendem a voltar paralelamente à curva inicial, porém, abaixo destas. Isso mostra que após sofrer umedecimento e secagem, a estrutura sofre alterações. Este fato pode estar vinculado às trincas que surgem após o solo alcançar altas sucções (ou baixa

saturação), facilitando a passagem do ar e água pela estrutura compactada. Neste caso, se percebe que existe uma pequena histerese após a trajetória de secagem.

Figura 4.1– curva de retenção da amostra com 14% de umidade inicial em trajetórias de umedecimento e secagem

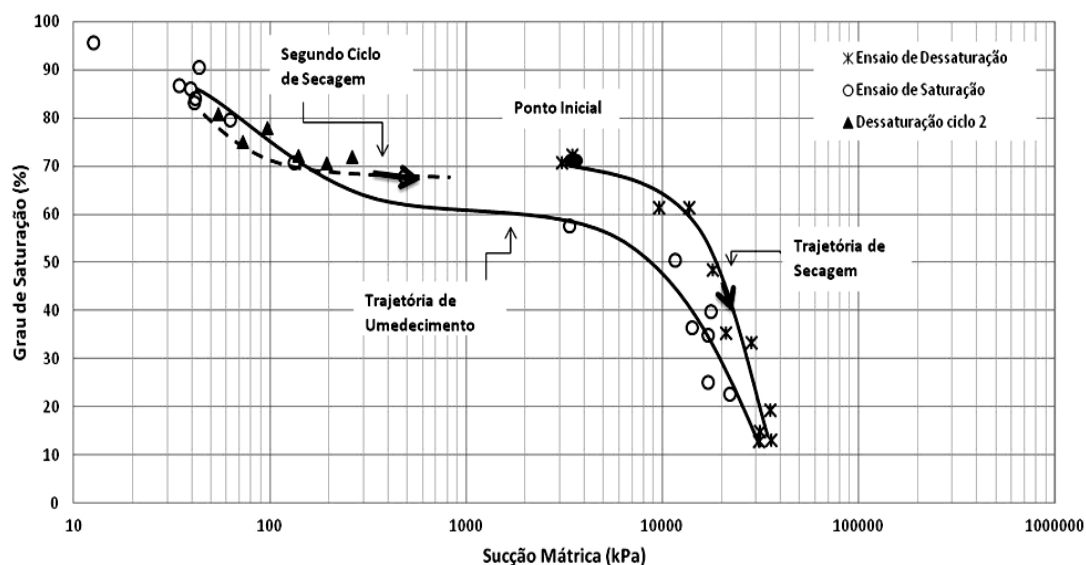


(fonte: elaborado pelo autor)

Foi realizado ensaio com amostra compactada na umidade ótima (16%) a fim de verificar seu comportamento e compará-lo com às curvas de retenção abaixo e acima desta umidade. Na Figura 4.2 nota-se que os pontos da umidade ótima estão levemente acima dos obtidos na amostra de 18%, o que indica que nesta condição o material apresenta maiores valores de sucção para mesmos graus de saturação. Este fato mostra coerência, uma vez que a estrutura do solo compactado na umidade ótima deve ser mais rígida e fechada com relação às demais.

Na Figura 4.2 percebe-se que a curva de retenção do solo compactado em 16% é relativamente semelhante à compactada em 18%. Com estas amostras foi possível atingir valores de saturação mais elevados. Nota-se que, após a secagem, a trajetória de umedecimento gera uma histerese no solo. A segunda trajetória de secagem já retorna próximo a de umedecimento anterior, indicando que a saturação não causou uma variação considerável na estrutura do solo.

Figura 4.2 – curva de retenção da amostra com 16% de umidade inicial em trajetórias de umedecimento e secagem



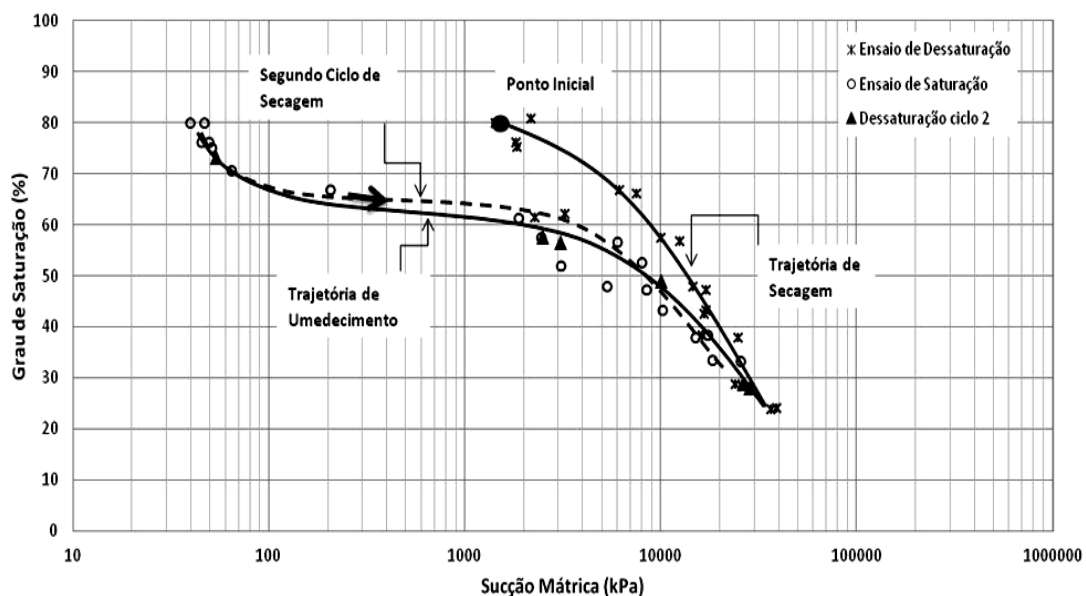
(fonte: elaborado pelo autor)

Nas Figuras 4.2 e 4.3 se percebe que existe uma tendência de curva unimodal, ocorrendo uma grande variação no grau de saturação e aumento da sucção com a diminuição deste. Esse comportamento é típico para solos compactados, uma vez que eles perdem suas estruturas naturais e modificam a microestrutura e macroestrutura. No caso dos solos compactados acima da umidade ótima, percebe-se uma homogeneidade maior do solo. Eles apresentam os poros não interconectados, conseqüentemente possuem uma capacidade de armazenamento de água mais elevada. No processo de secagem, estes materiais apresentam uma maior resistência para níveis menores de sucção.

Na Figura 4.3, após a dessaturação, as amostras foram submetidas à trajetória de umedecimento. Nota-se que inicialmente os pontos retornam próximos aos de dessaturação, mas a medida que a saturação aumenta, começa a surgir uma histerese na curva de retenção. Isso ocorre porque após uma secagem, a estrutura do solo modifica-se, possivelmente surgem mais vazios ou quebra dos pontos de conexão. Conseqüentemente o solo perde um pouco sua capacidade de armazenamento e passa a apresentar níveis menores de sucção ao longo de sua trajetória. Convém salientar que após obter um grau de saturação próximo a 80%, o solo tem dificuldade em absorver a água no processo de umedecimento. Esse grau de saturação é o mesmo correspondente ao do ponto inicial.

A fim de avaliar o comportamento frente às trajetórias de secagem e umedecimento, os corpos de prova foram submetidos a um novo processo de secagem. Este novo processo de secagem provoca uma trajetória próxima à trajetória anterior. Esse fato mostra que a trajetória de umedecimento não causou alterações significativas na estrutura do solo compactado, apresentando o mesmo comportamento.

Figura 4.3 – curva de retenção amostra com 18% de umidade inicial em trajetórias de umedecimento e secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

As curvas de retenção obtidas pelo método do papel filtro mostrou-se eficiente. Entretanto, fica evidente que existem limitações do método, como pode ser observado pelas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. O método não consegue determinar valores muito baixos de sucção, e também para sucções elevadas (limite em torno de 30000 kPa). Conforme mencionado na literatura, convém a execução de ensaios complementares, como placa de sucção, para a obtenção de outros pontos de sucção.

De maneira geral, percebe-se que o teor de umidade na compactação influencia diretamente a estrutura do solo, comportando-se como um material “diferente”, mesmo possuindo as mesmas características (como granulometria, limites, etc.). A diferença causada pelas mudanças no teor de umidade normalmente estão associadas a macroestrutura, entretanto, já sabe-se que quando o solo é compactado no ramo seco, existe uma alteração na microestrutura. Isso ocorre porque a argila tende a formar

estruturas agregadas com partículas maiores, e a água fica presa dentro destas agregações. Esse fato pode ser observado pela diferença das curvas de retenção, onde a curva de retenção do solo compactado no ramo seco tende a apresentar um patamar intermediário (próximo a uma curva bimodal). Observa-se, também, que as trajetórias de secagem devem modificar principalmente a macroestrutura. Entretanto, essa afirmação pode ser feita apenas com base na histerese ocasionada após a trajetória de secagem, uma vez que a macro e micro estruturas não foram avaliadas através de ensaios próprias para este fim.

#### 4.1.2 Ajustes das curvas de retenção

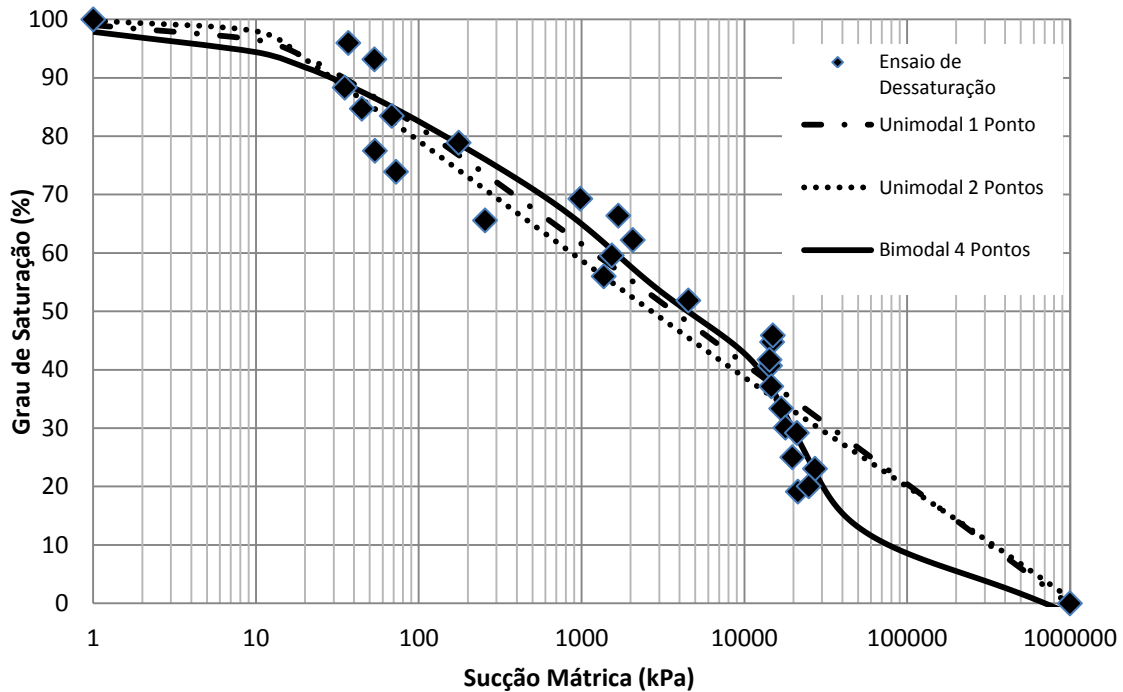
Nesta seção são apresentadas as modelagens das curvas de retenção e a comparação entre elas para os diferentes valores de umidade de compactação. As modelagens das curvas de retenção foram realizadas com o uso das equações propostas por Fredlund e Gitirana (2004), para os formatos unimodais com 1 e 2 pontos de quebra, e bimodais com 4 pontos. Também foi utilizado o modelo proposto por Fredlund e Xing (1994), a fim de obter os parâmetros para usar na equação de previsão de resistência ao cisalhamento, proposta pelos mesmos autores (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6). As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores encontrados para os modelos das curvas de retenção segundo proposto por Fredlund e Gitirana (2004), os quais estão apresentados nas equações 2.8, 2.9 e 2.10 na seção 2.1.2.

Tabela 4.1 – parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 14% através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004)

Unimodal 1 Ponto										
$\Psi_b$			a							
15			0,05							
Unimodal 2 Pontos										
$\Psi_1^a$	$S_1^a$	$\Psi_2^a$	$S_2^a$	$\Psi_3^a$	$S_3^a$	a				
10	1	500	0,65	1000000	0	0,02				
Bimodal 4 Pontos										
$\Psi_1^a$	$S_1^a$	$\Psi_2^a$	$S_2^a$	$\Psi_3^a$	$S_3^a$	$\Psi_4^a$	$S_4^a$	$\Psi_5^a$	$S_5^a$	a
15	1	200	0,8	15000	0,55	30000	0,25	1000000	0	0,07

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.4 – modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana(2004) da amostra com 14% inicial



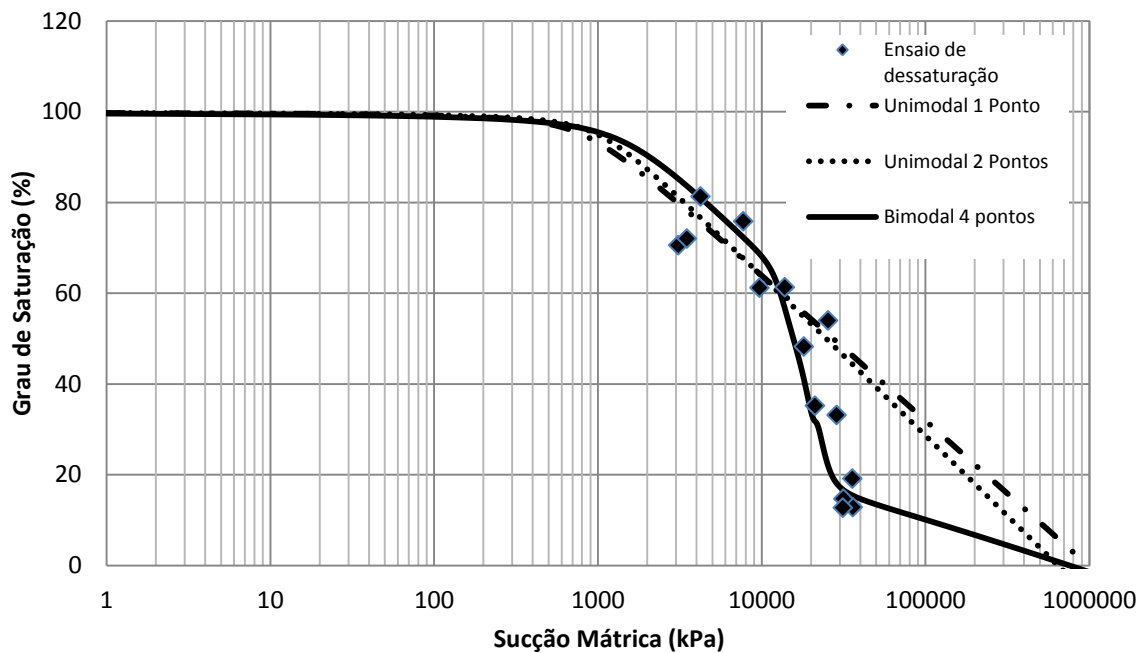
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4.2 – parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 16% (umidade ótima) através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004)

Unimodal 1 Ponto										
$\psi_b$			a							
800			0,05							
Unimodal 2 Pontos										
$\psi_1^a$	$S_1^a$	$\psi_2^a$	$S_2^a$	$\psi_3^a$	$S_3^a$	a				
1000	1	7000	0,7	1000000	0	0,05				
Bimodal 4 Pontos										
$\psi_1^a$	$S_1^a$	$\psi_2^a$	$S_2^a$	$\psi_3^a$	$S_3^a$	$\psi_4^a$	$S_4^a$	$\psi_5^a$	$S_5^a$	a
1000	1	10000	0,7	18000	0,55	25000	0,2	1000000	0	0,07

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.5 – modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana(2004) da amostra com 16% inicial (umidade ótima)



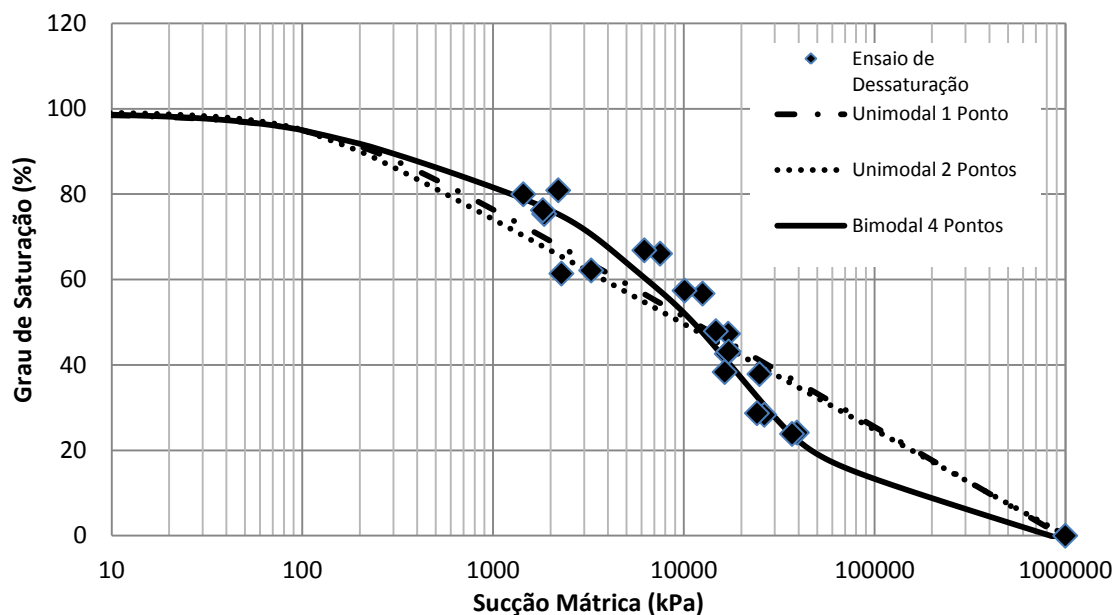
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4.3 – parâmetros para modelagem das curvas de retenção das amostras compactadas com teor de umidade de 18% através dos modelos propostos por Fredlund e Gitirana (2004)

Unimodal 1 Ponto										
$\psi_b$					a					
150					0,07					
Unimodal 2 Pontos										
$\psi_1^a$	$S_1^a$	$\psi_2^a$	$S_2^a$	$\psi_3^a$	$S_3^a$	a				
100	1	4000	0,6	1000000	0	0,05				
Bimodal 4 Pontos										
$\psi_1^a$	$S_1^a$	$\psi_2^a$	$S_2^a$	$\psi_3^a$	$S_3^a$	$\psi_4^a$	$S_4^a$	$\psi_5^a$	$S_5^a$	a
100	1	1500	0,8	10000	0,6	40000	0,2	1000000	0	0,05

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.6 – modelagem da curva de retenção através dos modelos propostos por Fredlund e Gítirana(2004) para amostra com 18% inicial



(fonte: elaborado pelo autor)

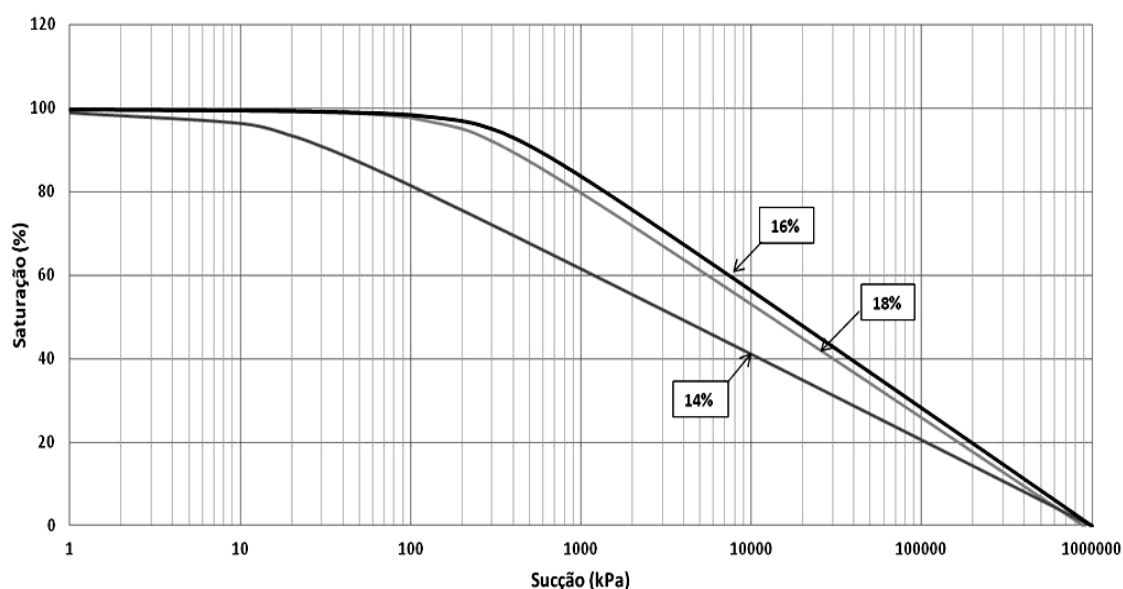
A curva de retenção de 18% (Figura 4.6) apresentou um valor de entrada de ar (VEA) de aproximadamente 200kPa. Já a curva com umidade inicial de 14% (Figura 4.4) apresentou um valor de entrada de ar (VEA) na ordem de 15kPa enquanto que a curva de retenção de 16% (Figura 4.5) apresentou um VEA de 1000kPa. Recordando que o valor de entrada de ar corresponde ao valor de sucção no qual o ar começa a entrar na macroestrutura, estando abaixo deste nível de sucção comportando-se como um solo na condição saturada.

Percebe-se que as três amostras compactadas apresentam comportamento unimodal, mostrando que o material sofre aumento na sucção com o decorrer da variação do grau de saturação. Observa-se que o uso do modelo unimodal para ajustar as curvas de retenção das amostras compactadas em 16% e 18% não foi ideal. Os modelos unimodais se ajustam para trecho linear, entretanto, para valores elevados de sucção a curva de retenção apresenta uma inflexão. Desta forma, a utilização de modelo bimodal para os pontos determinados pelo método de papel filtro se adequaram melhor para as amostras compactadas em 16% e 18%. A curva de retenção da amostra compactada em 14% se ajustou bem aos modelos unimodais, sofrendo uma variação de sucção com menor inclinação que as outras curvas de retenção.



Comparando as três curvas de retenção (Figura 4.7) pelo modelo unimodal de Fredlund e Gitirana (2004), observa-se que existe diferença entre a amostra moldada abaixo da umidade ótima (14%) e aquela moldada acima ou mesmo na própria umidade ótima do solo. Como observado por Vanapalli et al. (1996), a curva do solo compactado no ramo seco encontra-se abaixo das demais, refletindo no seu comportamento. Conseqüentemente, se observa que o material nesta condição apresenta menores valores de sucção para um mesmo valor de saturação, quando comparados às demais condições de moldagem. As curvas de retenção das amostras em umidade ótima ou acima apresentaram comportamento muito semelhante, ficando quase sobrepostas. Ambas estruturas são mais homogêneas e resistentes à dessaturação, resultando em valores mais elevados de sucção.

Figura 4.7 – comparação das curvas de retenção ajustadas para as trajetórias de secagem para diferentes teores de umidade de compactação (14%, 16% e 18%)



(fonte: elaborado pelo autor)

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros obtidos para o modelo proposto por Fredlund e Xing (1994) apresentado na equação 2.1 a 2.6 na seção 2.1.2 e as Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as curvas de retenção obtidas por este modelo para diferentes teores de umidade de compactação. Os parâmetros  $m$  e  $n$  foram obtidos para as amostras de 16% e 18% conforme sugerido pelos autores, entretanto para a amostra de 14% com este

método não foi possível a determinação, portanto a curva de retenção modelada foi realizada mediante uma regressão para ajustar os melhores parâmetros.

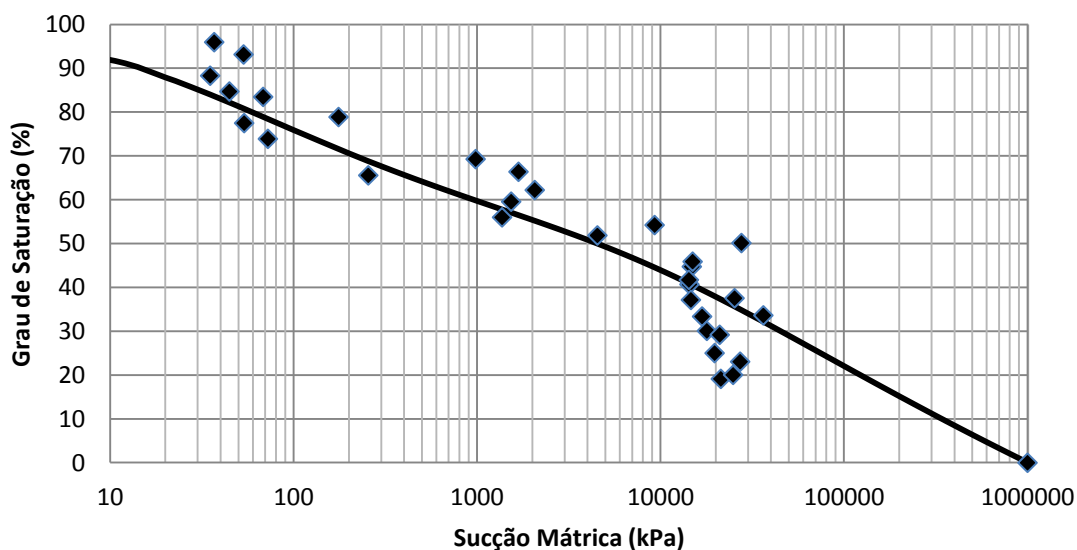
Nota-se que as curvas de retenção dos solos compactados em 16% e 18% foram bem adequadas ao modelo proposto pelos autores, apresentando um comportamento típico unimodal. Os valores de entrada de ar obtidos pelas curvas modeladas foram maiores que os encontrados pelos dados experimentais. A curva de retenção da amostra compactada em 14% possui um formato diferente das outras amostras, sendo a curva de retenção obtida pelo modelo de Fredlund e Xing (1994) muito semelhante ao encontrado pelo modelo de Fredlund e Gitirana (2004). Nota-se que o solo estudado compactado no ramo seco possui uma variação de saturação e sucção diferente das demais condições de compactação.

Tabela 4.4 – parâmetro para modelo de curva proposto por Fredlund e Xing (1994)

Umidade de Compactação	$\Psi_r$	a	m	n
16%	40000	15000	1,6	2,5
18%	60000	15000	0,9	2,9
14%	10000	15	0,8	0,4

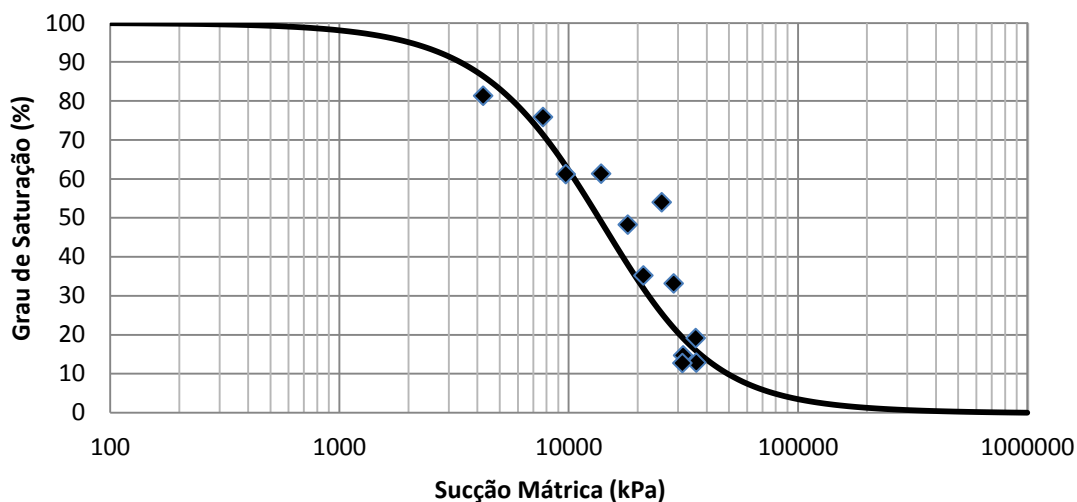
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.8 – curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelo de Fredlund e Xing (1994) para amostra compactada em 14%



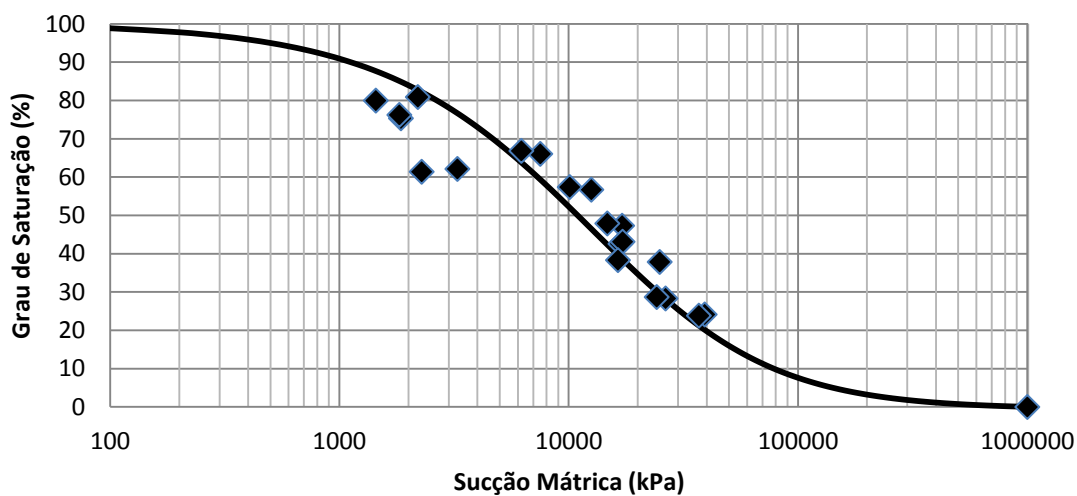
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.9 – curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelo de Fredlund e Xing (1994) para amostra compactada em 16%



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.10 – curva de retenção modelada para o trajetória de secagem pelo modelo de Fredlund e Xing (1994) para amostra compactada em 18%



(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA E A RELAÇÃO COM A SUCCÃO

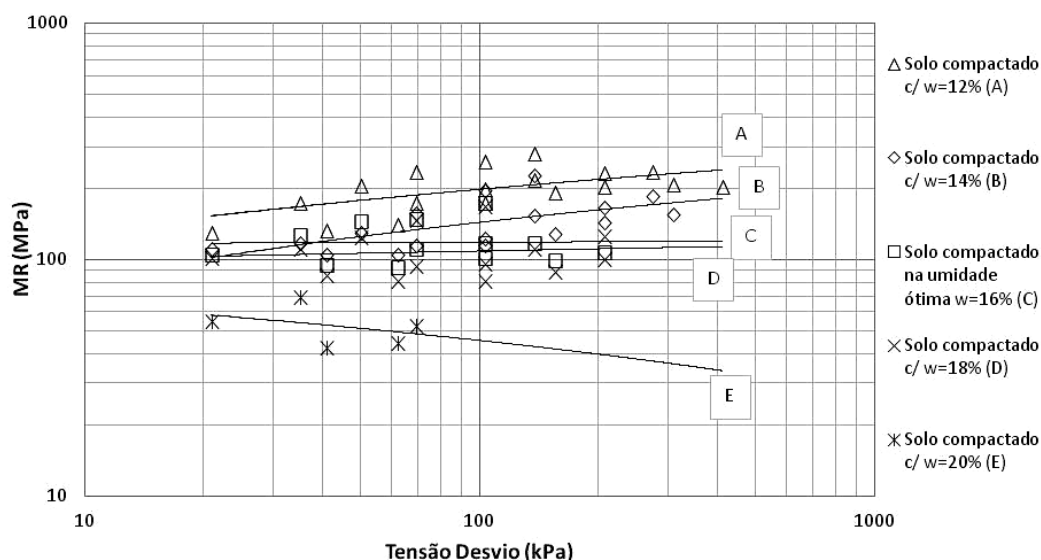
Nesta seção estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das amostras compactadas em diferentes teores de umidade de compactação e de amostras submetidas à trajetória de umedecimento e secagem. Também estão apresentadas as correlações do módulo de resiliência com a sucção.

### 4.2.1 Resultados dos Ensaios de Módulo de Resiliência

As Figuras 4.11 a 4.15 mostram a variação do módulo de resiliência com a tensão desvio para as diversas condições. A Figura 4.11 mostra os ensaios de módulo de resiliência para os corpos de prova compactados para diferentes teores de umidade de compactação. Quanto menor o teor de umidade de compactação, maior o módulo de resiliência obtido, variando entre aproximadamente 50MPa para uma amostra 4% acima da umidade ótima (20%) até 225 MPa para a amostra 4% abaixo da ótima (12%), tomando como referência os valores obtidas na tensão desvio de 69kPa. Percebe-se que as amostras compactadas em 16% (umidade ótima) e 18%, apresentam resultados muito próximos e uma tendência de valores de módulo praticamente constante no decorrer do ensaio (variação pequena em função da tensão desvio). Com relação às amostras compactadas no ramo seco, nota-se uma leve tendência de aumento no módulo de resiliência com a tensão desvio. Este é um comportamento atípico para solos coesivos, sendo mais comum para solos granulares. Uma hipótese para explicar esse comportamento é que o solo em estudo quando compactado no ramo seco apresente grumos com torrões mais resistentes, levando a um comportamento granular.

Por outro lado, percebe-se que o solo compactado no ramo úmido apresenta uma forte tendência de redução do módulo de resiliência com o aumento da tensão desvio. É importante ressaltar que nas amostras compactadas no ramo seco foi possível realizar o ensaio de módulo de resiliência completo, enquanto que para os corpos de provas compactados no ramo úmido, incluindo a amostra compactada na umidade ótima, não foram concluídos todos os pares de tensão do ensaio. As amostras compactadas acima da umidade ótima apresentam menor resistência ao carregamento, sofrendo deformações plásticas excessivas, tornando-se impossível a continuidade do ensaio.

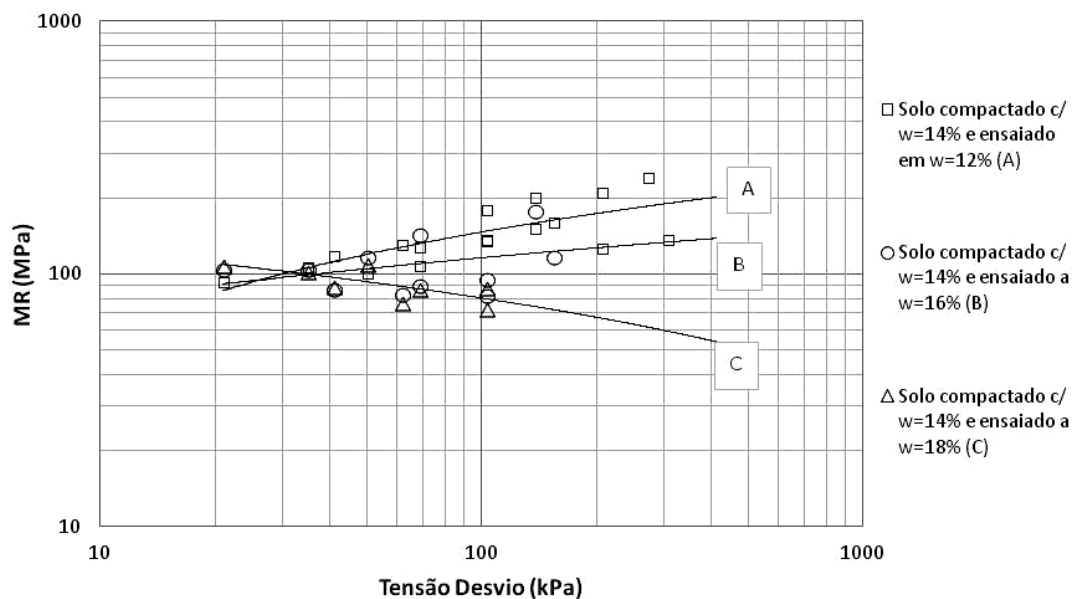
Figura 4.11 – resultado dos ensaios de módulo de resiliência para as amostras compactadas em diferentes umidades (12%, 14%, 16%, 18% e 20%)



(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 4.12 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das amostras compactadas em 14% e submetidas a trajetórias de umedecimento ou secagem. Em geral, observa-se que ocorre uma redução considerável nos valores de módulo de resiliência com o aumento da umidade após a compactação do solo. Também se percebe que as amostras resistiram a menos pares de tensão do ensaio, chegando à ruptura (excesso de deformações) mais rapidamente. Nota-se que a maior influência se deu no comportamento do material compactado em 14% de umidade e ensaiado em 18%, apresentando redução do módulo com o aumento da tensão desvio. A amostra compactada em 14% e ensaiada à 16% (umidade ótima) apresentou comportamento pior que a compactada na umidade de 14% e muito semelhante àquela compactada em 16%. Porém, uma exceção é para a amostra compactada em 14% (ramo seco) e ensaiada em 12%, a qual os valores de módulo de resiliência para a amostra compactada em 12% foram superiores.

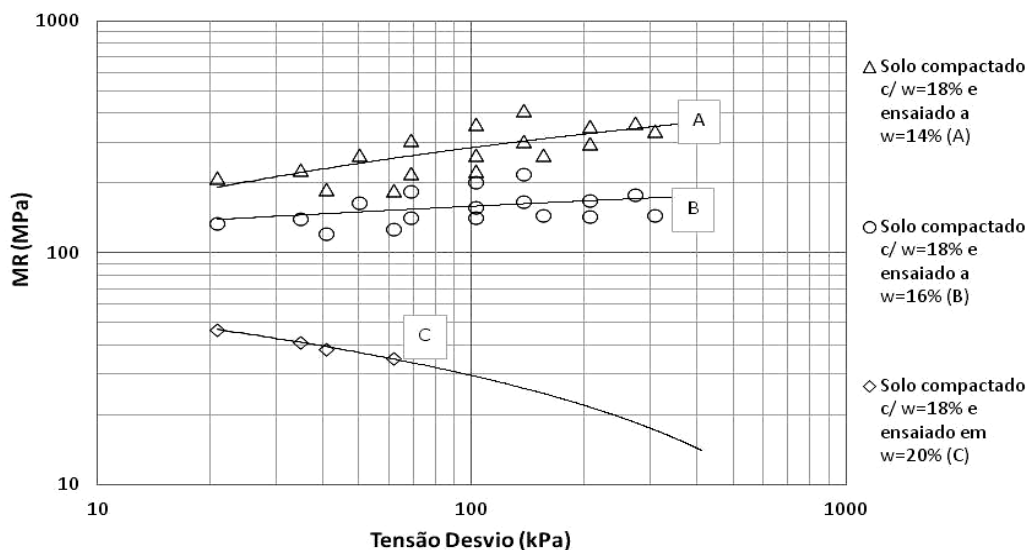
Figura 4.12 – módulo de resiliência das amostras compactadas com 14% de umidade e submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 4.13 apresenta os resultados de módulo de resiliência para as amostras compactadas no teor de umidade de 18% e submetidas a trajetórias de umedecimento ou secagem. Através dos resultados é possível perceber que o processo de secagem causa um aumento nos valores de módulo de resiliência quando os resultados são comparados com aqueles das amostras compactadas na mesma umidade. O aumento também é observado quando se compara os resultados com os das amostras na mesma umidade de ensaio. A amostra umedecida, por outro lado, apresentou queda considerável no módulo de resiliência, mostrando desempenho inferior à amostra compactada na mesma umidade (20%).

Figura 4.13 – resultado dos ensaios de módulo de resiliência para as amostras compactadas com 18% de umidade e submetidas à trajetória de umedecimento ou secagem

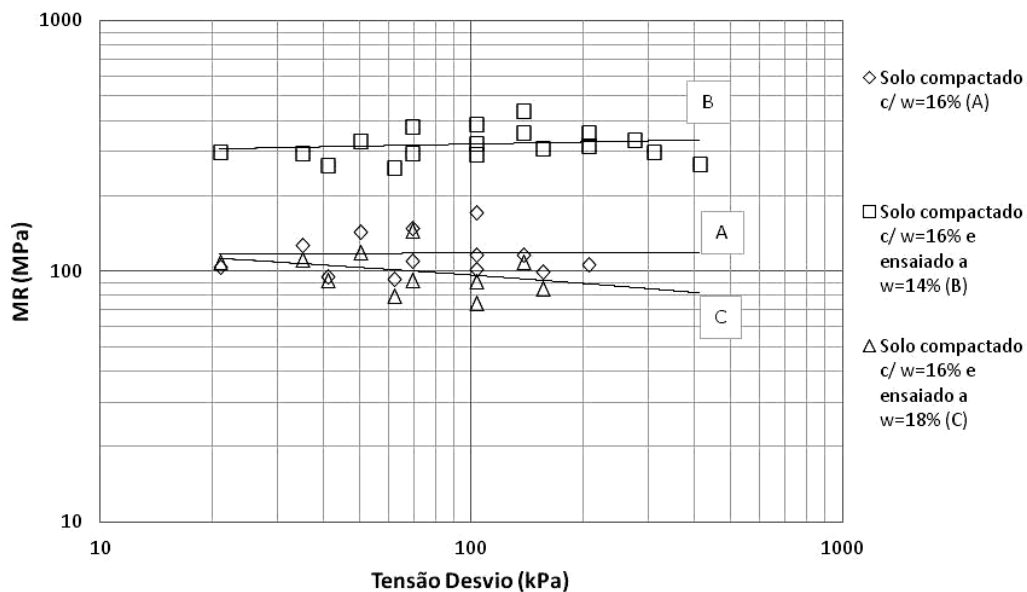


(fonte: elaborado pelo autor)

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados dos ensaios de módulo de resiliência para as amostras compactadas na umidade ótima (16%) e submetidas aos processos de secagem e umedecimento, e para as amostras compactadas no ramo seco (14%) e no ramo úmido (18%), levadas até o teor de umidade ótimo, a fim de melhor observar o comportamento do material em torno da umidade ótima. Observa-se, na Figura 4.14, que a amostra quando compactada na umidade ótima e submetida à trajetória de umedecimento ( $w=18\%$ ) sofre pouca alteração nos valores de módulo de resiliência, apresentando uma pequena redução deste com o aumento da tensão desvio. Na umidade de 18% o módulo de resiliência é mais dependente da tensão desvio.

Nota-se, também, que se comparada com amostra compactada em 18% de umidade, o comportamento é muito semelhante, indicando que houve pouca alteração na sua estrutura. Por outro lado, quando o solo é compactado na umidade ótima e submetido à trajetória de secagem ( $w=14\%$ ) atinge valores muito superiores de módulo de resiliência, mostrando-se maior resistência dentre as condições analisadas, inclusive, as compactadas no ramo seco. Isso mostra, principalmente, uma grande influência da sucção.

Figura 4.14 – módulo de resiliência das amostras compactadas com 16% de umidade e submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem



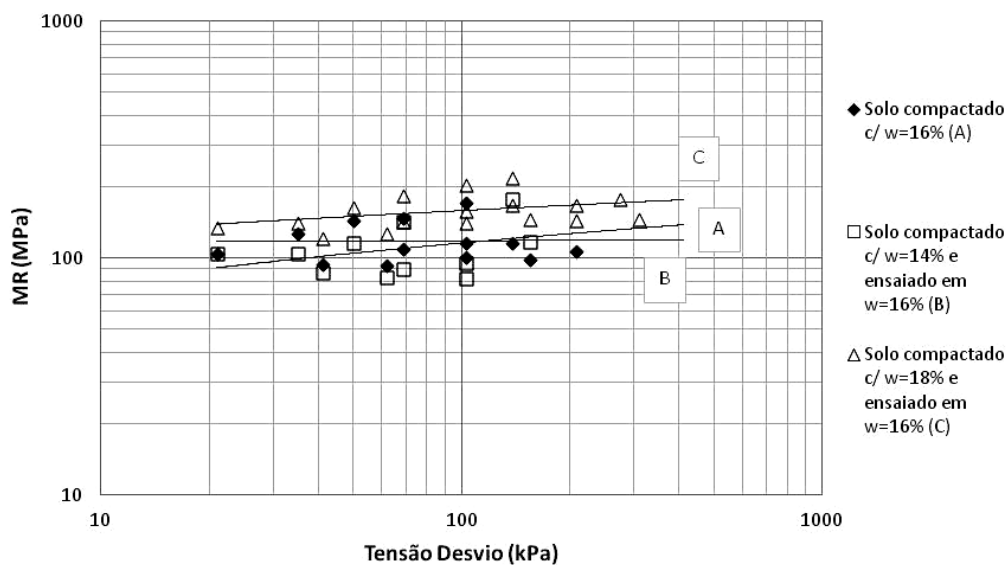
(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se na Figura 4.15 que as amostras umedecidas para atingir a umidade de 16% apresentaram valores semelhantes ou levemente inferiores aos da amostra compactada a 16%. Isso mostra que o aumento da umidade no solo causa uma perda de resistência. O oposto ocorre quando compacta-se a amostra acima da umidade ótima e se submete à trajetória de secagem até alcançar a umidade de 16%. Além de gerar um aumento considerável nos valores de módulo de resiliência, a amostra suporta tensões mais elevadas de ensaio antes de alcançar a ruptura (ou excesso de deformação).

Observa-se também que em geral a tendência das amostras é de aumentar o módulo de resiliência com a tensão desvio. Esta tendência pode estar ocorrendo devido ao fato da trajetória de secagem, além da redução da umidade e consequente aumento da sucção, estar promovendo a aglutinação das partículas, formando agregados, e assim, conferindo ao material comportamento distinto daquele esperado como interpretação baseada apenas na curva granulométrica. É importante ressaltar que as amostras não possuem a mesma densidade inicial, mesmo esta tendo apresentado pouca variação conforme pode ser visto na curva de compactação apresentada na Figura 3.3. Assim, os resultados foram tratados e comparados apenas em termos de umidade. Porém, é importante ressaltar que todos os corpos de prova estavam com grau de compactação entorno de 100%.



Figura 4.15 – módulo de resiliência das amostras quando alcançam a umidade ótima (16%) por trajetória de umedecimento ou secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.2 Correlações do Módulo de Resiliência com a Sucção

A fim de avaliar melhor o comportamento do módulo de resiliência com as trajetórias de umedecimento e secagem, os resultados de módulo de resiliência foram correlacionados com a sucção. Ressaltando que os valores de sucção foram estimados a partir das curvas de retenção correspondentes ao teor de umidade de compactação das amostras. As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam as correlações dos módulos de resiliência com a sucção para tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio. A Tabela 4.5 apresenta os teores de umidade (na compactação e em trajetória de umedecimento ou secagem) e seus correspondentes graus de saturação, para uma melhor comparação com as curvas de retenção, juntamente com os valores de sucção atribuídos.

Tabela 4.5 – teores umidade e seus correspondentes graus de saturação e sucção.

w (%)	14	14 <sub>+2</sub>	14 <sub>+4</sub>	16	16 <sub>-2</sub>	16 <sub>+2</sub>	18	18 <sub>-2</sub>	18 <sub>-4</sub>	18 <sub>+2</sub>
S (%)	58	70	79	67	60	78	80	71	62	84
Ψ (kPa)	3800	70	30	3000	10000	2000	1500	2200	5000	10

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 4.16, nota-se que as amostras compactadas no ramo seco (umidade igual a 14%) apresentaram uma maior variação do módulo de resiliência com a tensão desvio para o mesmo nível de sucção. Nestas amostras, pode-se perceber que a variação do módulo de resiliência com o aumento da sucção foi menor que nas demais amostras compactadas em outras umidades (16% e 18%). Também observa-se que o solo compactado no ramo seco alcançou valores menores de sucção, sendo mais sensível a trajetória de umedecimento e pouco alterada com a trajetória de secagem.

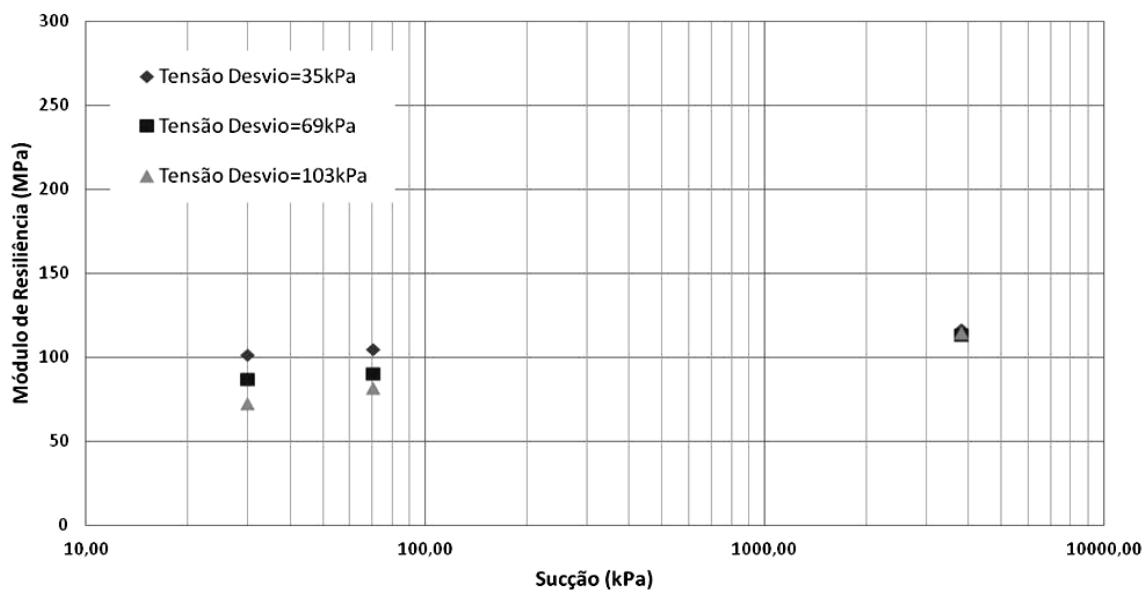
A amostra compactada na umidade ótima (16%) apresentada na Figura 4.17 mostra que o módulo de resiliência sofre uma grande influência por parte da sucção, que atinge valores elevados para o solo compactado na umidade ótima. Um comportamento semelhante pode ser observado para as amostras compactadas no ramo úmido (18%), como pode ser visto na Figura 4.18. Nota-se que existe pouca influência da sucção para valores menores de 1000kPa nos valores de módulo de resiliência, ocorrendo um grande aumento quando a sucção atinge valores superiores.

Estas variações no comportamento do material devido à diferença das umidades de compactação podem estar justificadas devido à estrutura do solo na umidade a qual foi compactado e às trajetórias de umedecimento ou secagem sofridas. O solo compactado abaixo da umidade ótima apresenta uma estrutura aberta (floculada) e pode estar se comportando como um material granular. As amostras compactadas na umidade ótima ou acima (estrutura dispersa), apresentam grandes variações de módulo de resiliência com a sucção. Entretanto, essas amostras sofrem o aumento de sucção devido a uma trajetória de secagem, resultando em uma possível alteração na sua estrutura, como pode ser observado nas curvas de retenção após passarem por uma dessaturação.

A Figura 4.19 apresenta um comparativo entre os resultados de módulo de resiliência e a sucção para as três condições de compactação na tensão desvio de 69kPa e tensão confinante de 35kPa. Pode-se observar que existe uma boa correlação exponencial para as três amostras. Pode-se ver claramente a diferença de comportamento devido à umidade de compactação frente às variações de umidade pós-compactação e conseqüentemente, a sucção. Entretanto, ressalva-se que os valores de sucção foram ser estimados para a condição inicial de ensaio de módulo de resiliência, pois sabe-se que ao fim do ensaio ocorre uma variação do índice de vazios inicial, e como trata-se de um

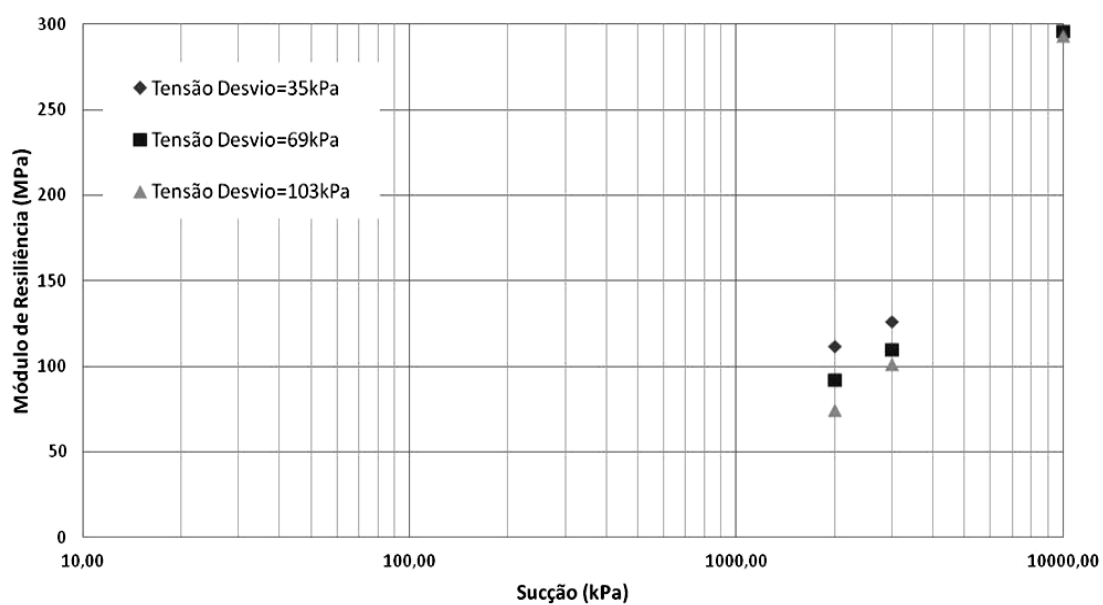
ensaio não drenado, tem-se variação do grau de saturação e conseqüentemente, da sucção.

Figura 4.16 – módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 14% para tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio



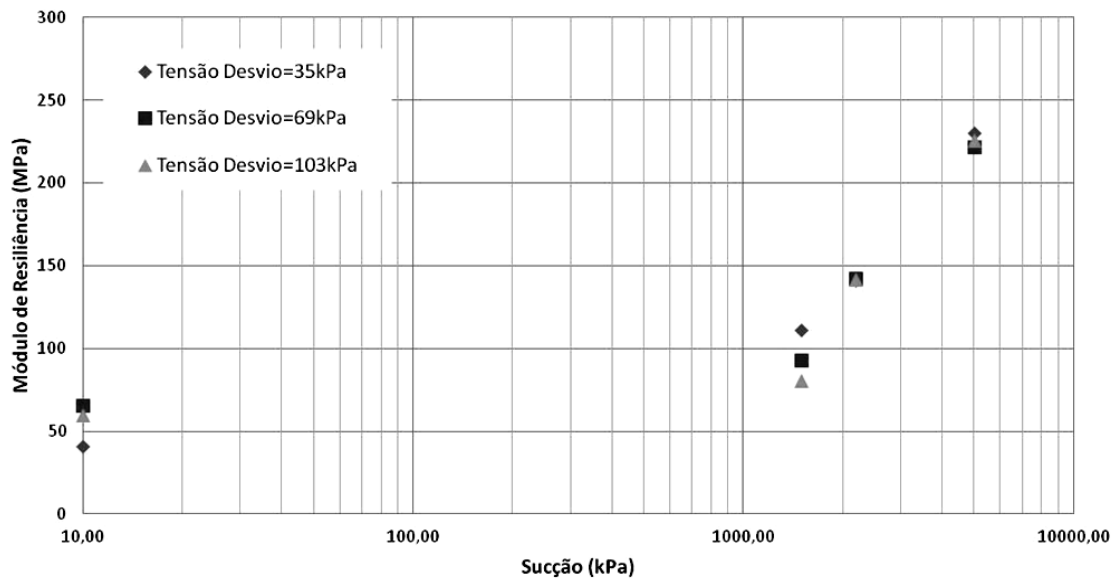
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.17 – módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 16% para tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio



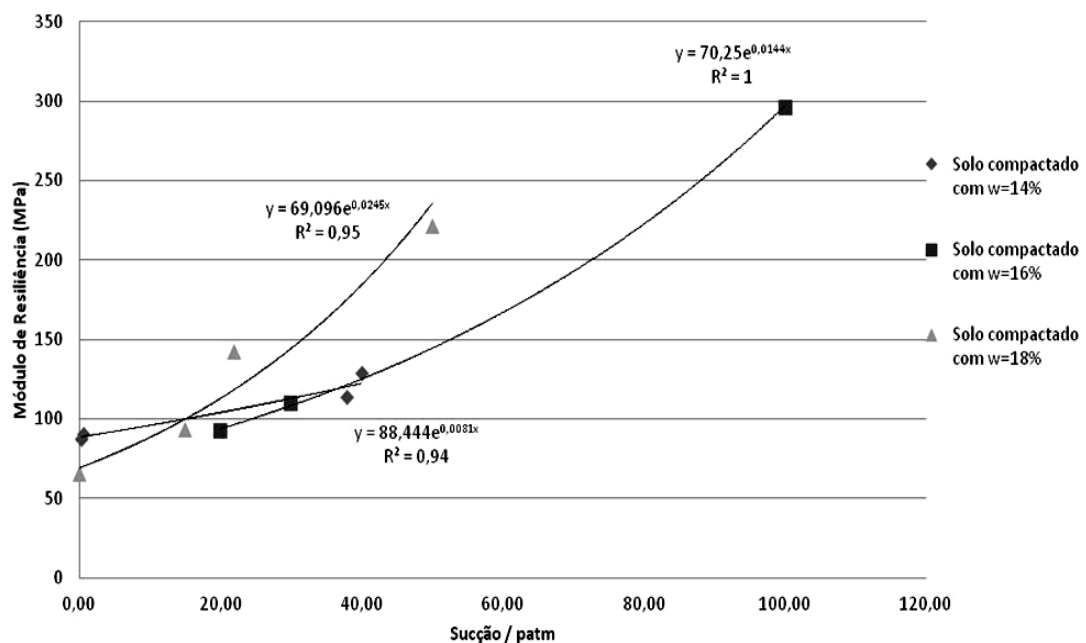
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.18 – módulo de resiliência x sucção para amostras compactadas com umidade de 18% para tensão confinante de 35kPa e diferentes tensões desvio



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.19 – comparativo entre os módulos de resiliência e sucção com as diferentes umidades de compactação para tensão confinante de 35kPa e tensão desvio de 69kPa



(fonte: elaborado pelo autor)

Diferentemente do que mostra a literatura, onde o módulo de resiliência cresce com a sucção até um valor limite, passando a estabilizar ou cair, no solo estudado o módulo de resiliência não apresentou uma diminuição com o aumento da sucção. Este fato pode

estar associado ao tipo de solo. Grande parte das teorias em mecânica dos solos surgiu estudando-se argilas moles (ou muito plásticas).

Ceratti et al. (2004) obtiveram um valor crescente de módulo de resiliência até atingir valores elevados de sucção para um solo laterítico. Porém, Parreira e Gonçalves (2000) encontraram um valor crescente com o aumento da sucção para uma argila arenosa laterítica. Isso mostra a importância de se estudar o comportamento do módulo de resiliência com a sucção para diferentes solos, a fim de obter melhores modelos de previsão.

### 4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento nas trajetórias de umedecimento e secagem do solo compactado estudado foi avaliada através de ensaios de cisalhamento direto convencionais, realizados na condição saturada e não saturada. As amostras foram compactadas na umidade ótima (16%), no ramo úmido (18%) e no ramo seco (14%). Na condição não saturada, também foram realizadas trajetórias de umedecimento nas amostras compactadas no ramo seco e na umidade ótima e a trajetória de secagem para as amostras compactadas no ramo úmido e na umidade ótima. O nível de sucção para as amostras foi estimado a partir das curvas de retenção, considerando que ocorre pouca variação ao longo do ensaio. Os ensaios foram realizados para tensões normais líquidas de 25kPa, 50kPa e 100kPa.

#### 4.3.1 Características e Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto

A Tabela 4.6 apresenta as principais características e resultados dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto do solo estudado na condição compactada com secagem prévia. Nesta tabela os valores de sucção correspondem à sucção inicial, estimada pelo método do papel filtro para uma amostra moldada em condição idêntica à amostra ensaiada. Cabe ressaltar que os ensaios realizados com as amostras submetidas a alguma trajetória de umedecimento ou secagem foram executados com o objetivo de analisar a resistência ao cisalhamento em solos compactados, podendo sofrer variações de umidade após a compactação. Nas Figuras 4.21 a 4.23 estão apresentadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento

horizontal das amostras ensaiadas na condição saturada e nas Figuras 4.24 a 4.30 os das amostras ensaiadas na condição não saturada.

A partir da análise das curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal das amostras é possível fazer algumas observações preliminares a respeito da resistência ao cisalhamento do solo compactado estudado. A resistência ao cisalhamento do solo aumenta com a elevação da sucção e da tensão normal líquida. Em geral, para as amostras saturadas observa-se um comportamento do tipo dúctil, onde a tensão cisalhante cresce monotonicamente e tende a um valor, sem apresentar picos muito pronunciados. Tal comportamento também pode ser observado nos ensaios sem inundação (não saturado) para as amostras com tensão normal líquida de 100kPa e para as amostras que foram submetidas a umedecimento. Entretanto, as amostras ensaiadas na mesma umidade de compactação, sem inundação, e aquelas que foram sujeitas a secagem, apresentaram comportamento do tipo frágil. Nessas curvas, observa-se nitidamente um pico de tensão cisalhante, sendo seguido por uma queda acentuada da tensão.

A Figura 4.28 apresenta a amostra compactada na umidade ótima e submetida a secagem que apresentou um comportamento diferente das demais amostras. Observa-se que para as tensões normais líquidas de 25kPa e 50kPa, a amostra sofre, aparentemente uma ruptura, porém a tensão cisalhante volta a aumentar na sequência do ensaio, até atingir um novo pico de tensão. Notou-se que o solo nesta condição apresentava-se muito rígido e possivelmente para baixas tensões normais, a amostra resistia ao deslocamento horizontal, com a ruptura não ocorrendo no plano horizontal, conforme pode ser observado na Figura 4.20.

Tabela 4.6– características das amostras dos ensaios de cisalhamento direto

Amostra	$\Psi_0$ (kPa)	$(\sigma-u_a)$ (kPa)	$w_0$ (%)	$w_f$ (%)	$\tau_{rupt}$ (kPa)
16% Saturado	0	25	16	23,5	31,3
	0	50	16	24	52,8
	0	100	16	23	84,8
14% Saturado	0	25	14	30	22,9
	0	50	14	24,5	41,1
	0	100	14	24	62,4
18% Saturado	0	25	18	23,6	36,8
	0	50	18	23,5	44,5
	0	100	18	22,3	83,2
16%	3000	25	16	16	71,8
	3000	50	16	16	116,9
	3000	100	16	16	146,0
14%	3800	25	14	14	117,3
	3800	50	14	14	138,4
	3800	100	14	14	161,5
18%	1500	25	18	18	58,6
	1500	50	18	18	78,2
	1500	100	18	18	103,7
16%-2%	10000	25	16	14	167,0
	10000	50	16	14	286,2
	10000	100	16	14	392,8
16%+2%	2000	25	16	18	39,3
	2000	50	16	18	62,4
	2000	100	16	18	112,4
14%+2%	100	25	14	16	50,3
	100	50	14	16	61,8
	100	100	14	16	103,2
18%-2%	2100	25	18	16	105,6
	2100	50	18	16	135,6
	2100	100	18	16	173,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.20 – ruptura do corpo de prova submetido a secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

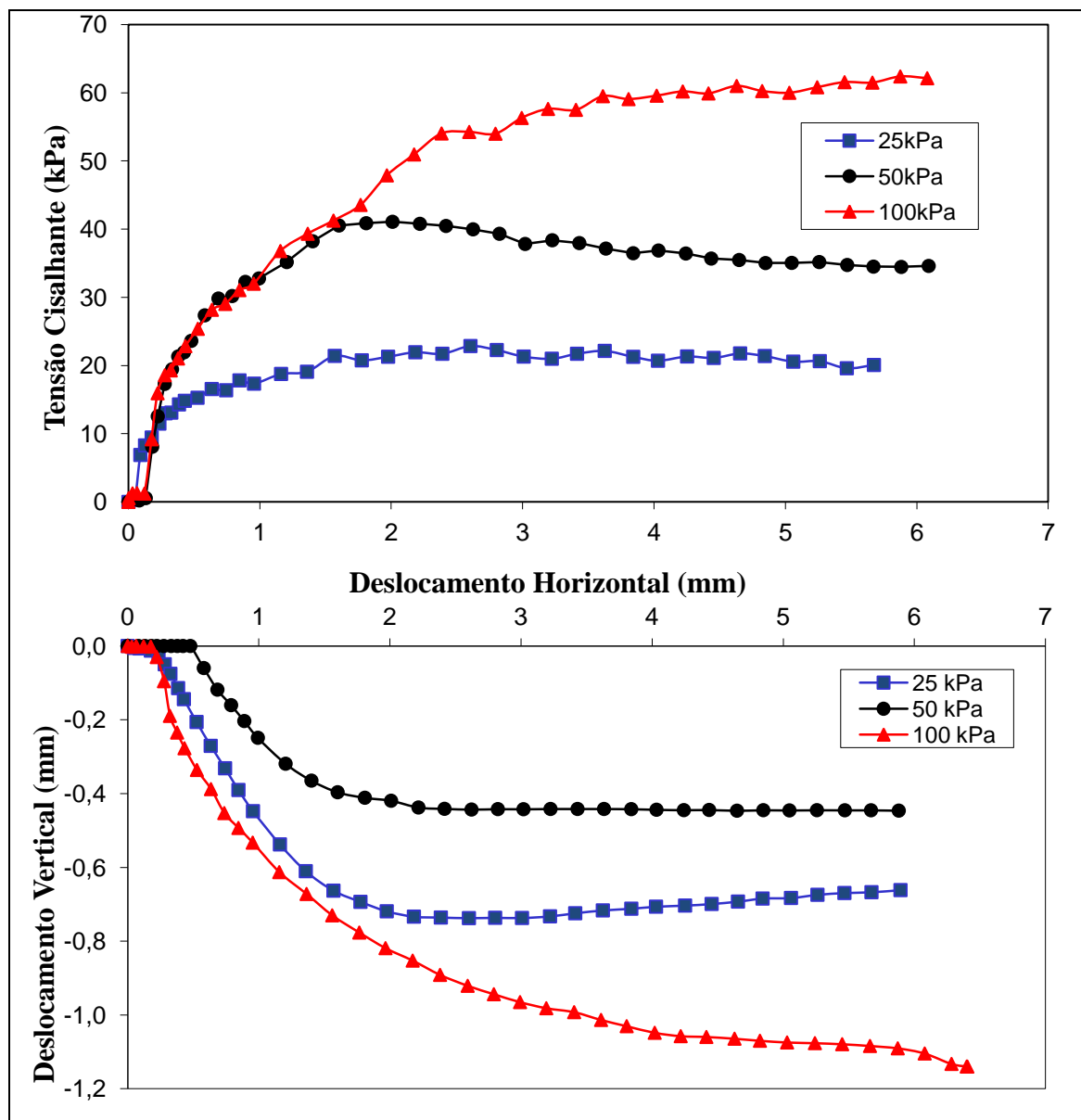
Para ajudar na análise de comportamento perante às deformações do solo compactado a diferentes situações de trajetórias, também estão apresentadas as curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras. Com base nessas curvas, observa-se que as amostras saturadas apresentaram compressão ao longo do ensaio. Nota-se que para o corpo de prova compactado na umidade ótima o nível de deslocamento vertical aumentou com a tensão normal aplicada, porém o mesmo comportamento não foi observado nas amostras compactadas em 14% e 18%, variando com o nível de tensão normal.

Com relação aos ensaios realizados na condição não saturada, observa-se um comportamento distinto nas amostras. As amostras compactadas e ensaiadas na mesma umidade, sem sofrer alguma trajetória de umedecimento ou secagem, apresentaram uma pequena compressão no início do ensaio, sofrendo expansão no decorrer deste. Nota-se que o nível de expansão diminuiu com o aumento da tensão normal líquida aplicada e também com a umidade do material. Nas amostras compactadas no ramo seco (umidade de 14%), todas apresentaram expansão, independente do valor de tensão normal líquida aplicada. Por outro lado, as amostras compactadas no ramo úmido (umidade de 18%), apresentaram maior compressão ao longo do ensaio, sendo a amostra ensaiada com tensão normal líquida de 25kPa apresentando expansão.

Um comportamento semelhante pode ser observado nas amostras submetidas aos trajetórias de umedecimento e secagem. As amostras que foram secas apresentaram maior expansão, enquanto as umedecidas sofreram maior compressão. Desta forma, torna-se evidente que a forma como se deforma a amostra está relacionada com a sua rigidez, uma vez que as amostras compactadas no ramo seco ou submetidas a secagem apresentaram expansão e as compactadas no ramo úmido ou umedecidas, sofreram maior compressão. De modo geral, observa-se que quanto maior a tensão normal líquida no ensaio, menor a tendência à expansão durante o ensaio.

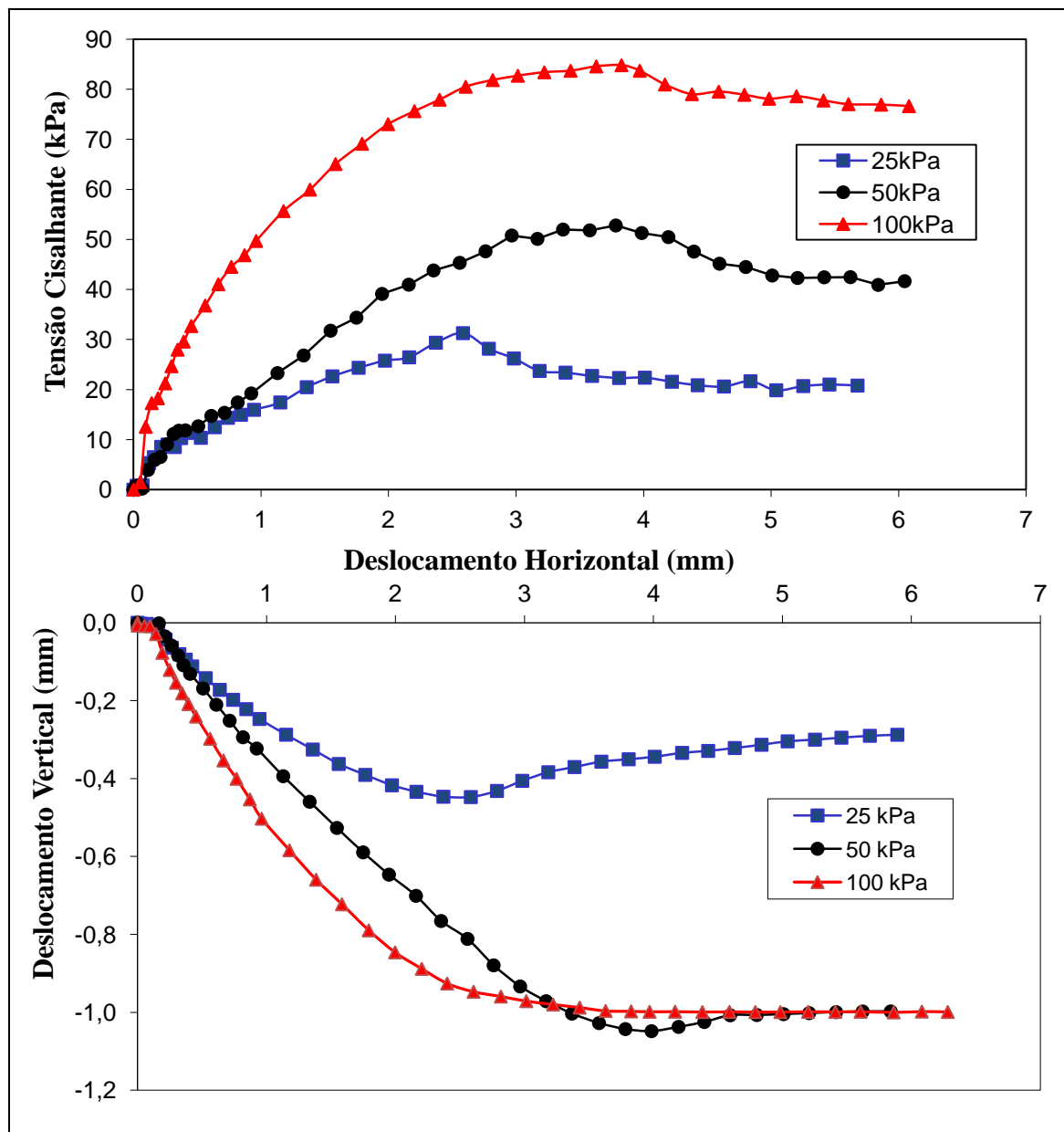


Figura 4.21 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% ensaiadas na condição inundada.



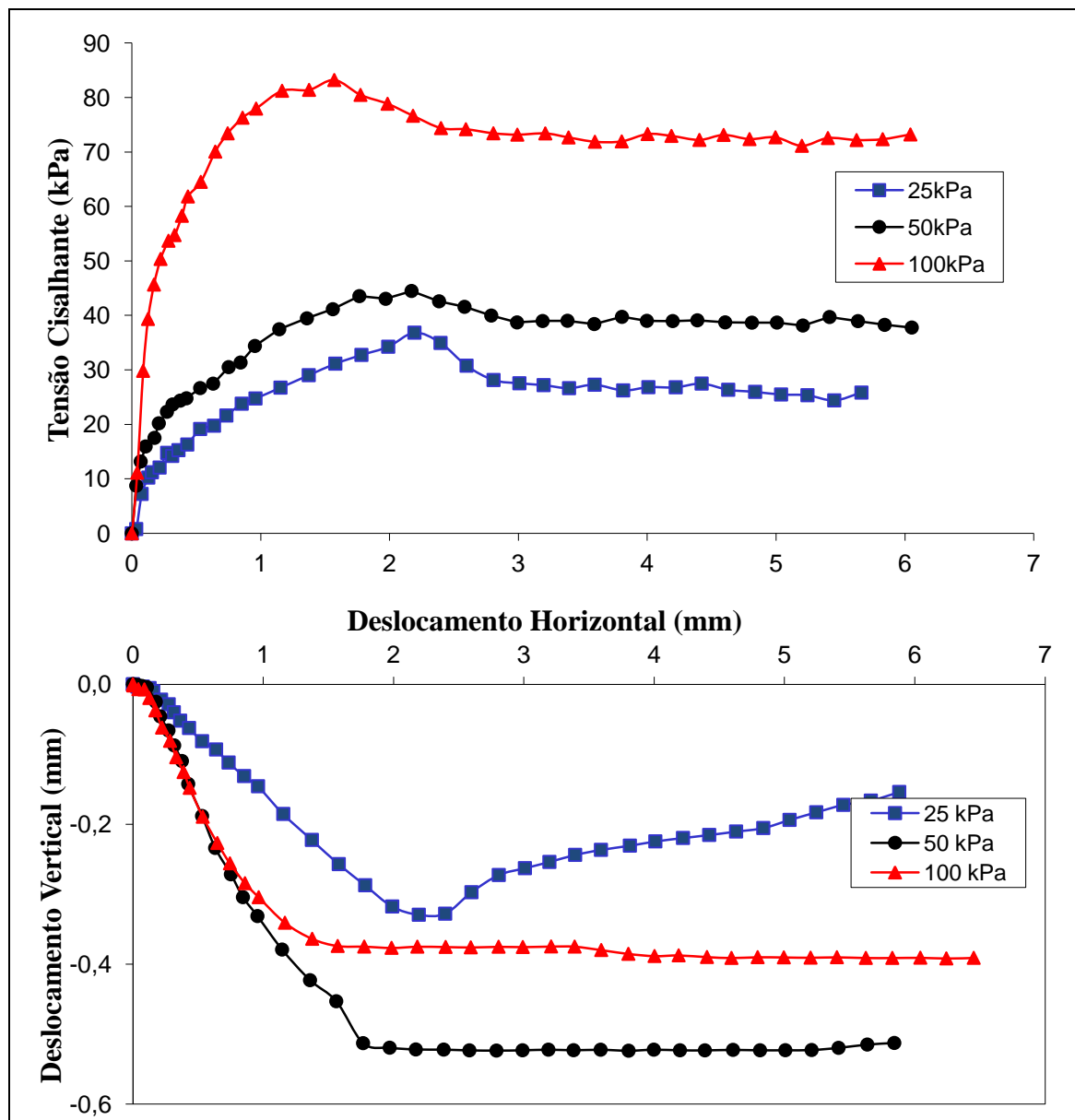
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.22 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas na condição inundada.



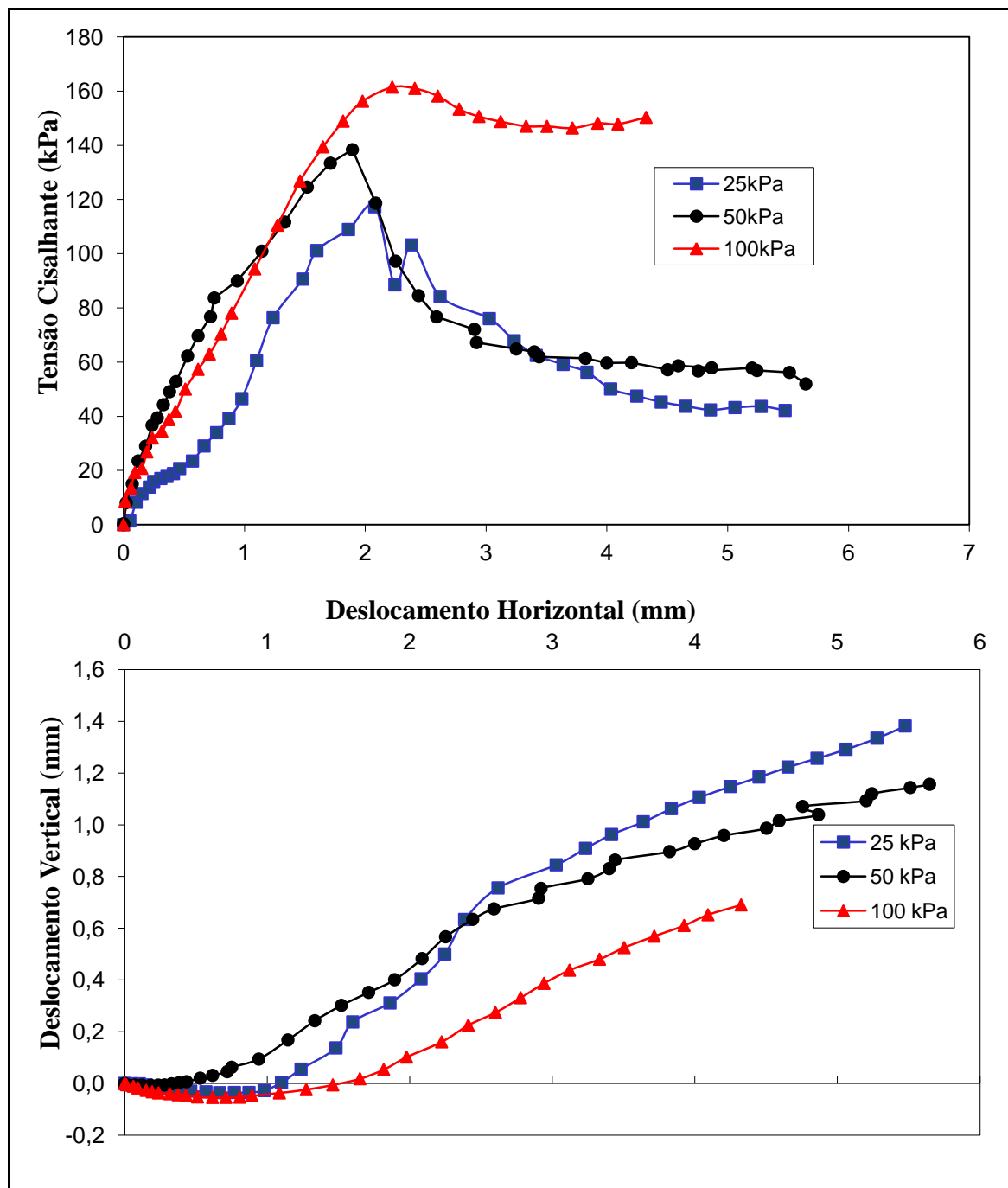
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.23 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% ensaiadas na condição inundada.



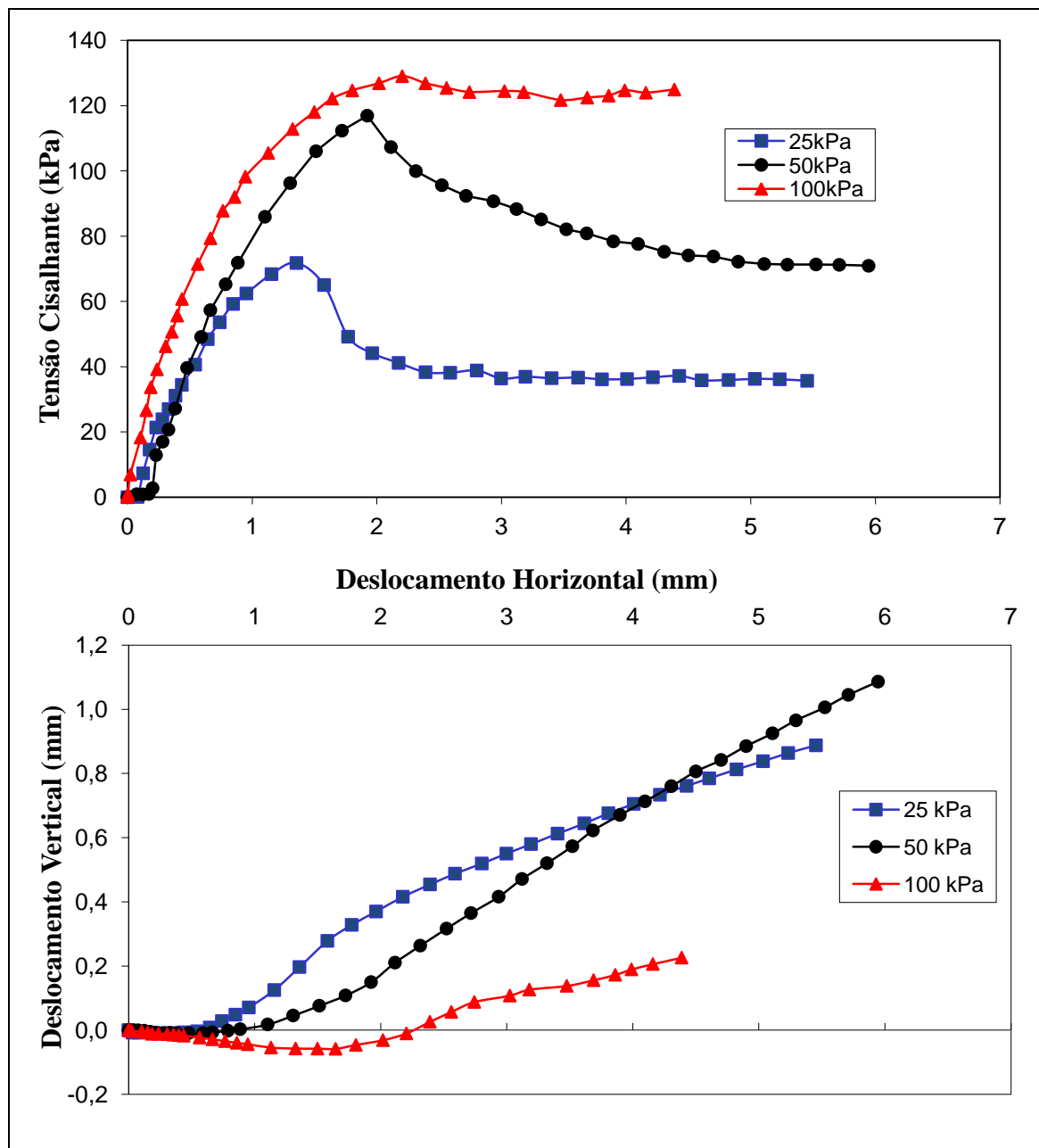
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.24 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% ensaiadas na condição não saturada.



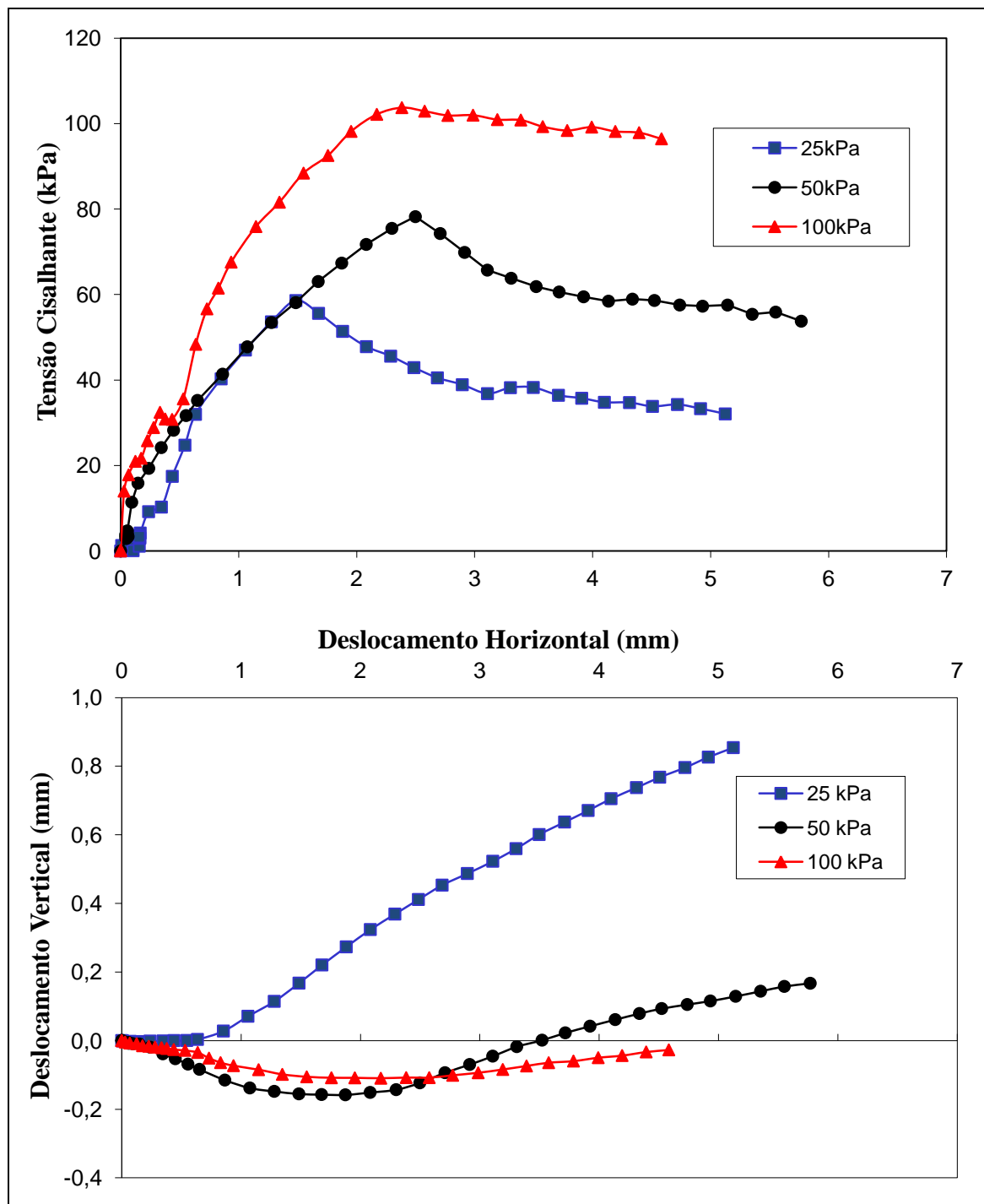
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.25 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% ensaiadas na condição não saturada.



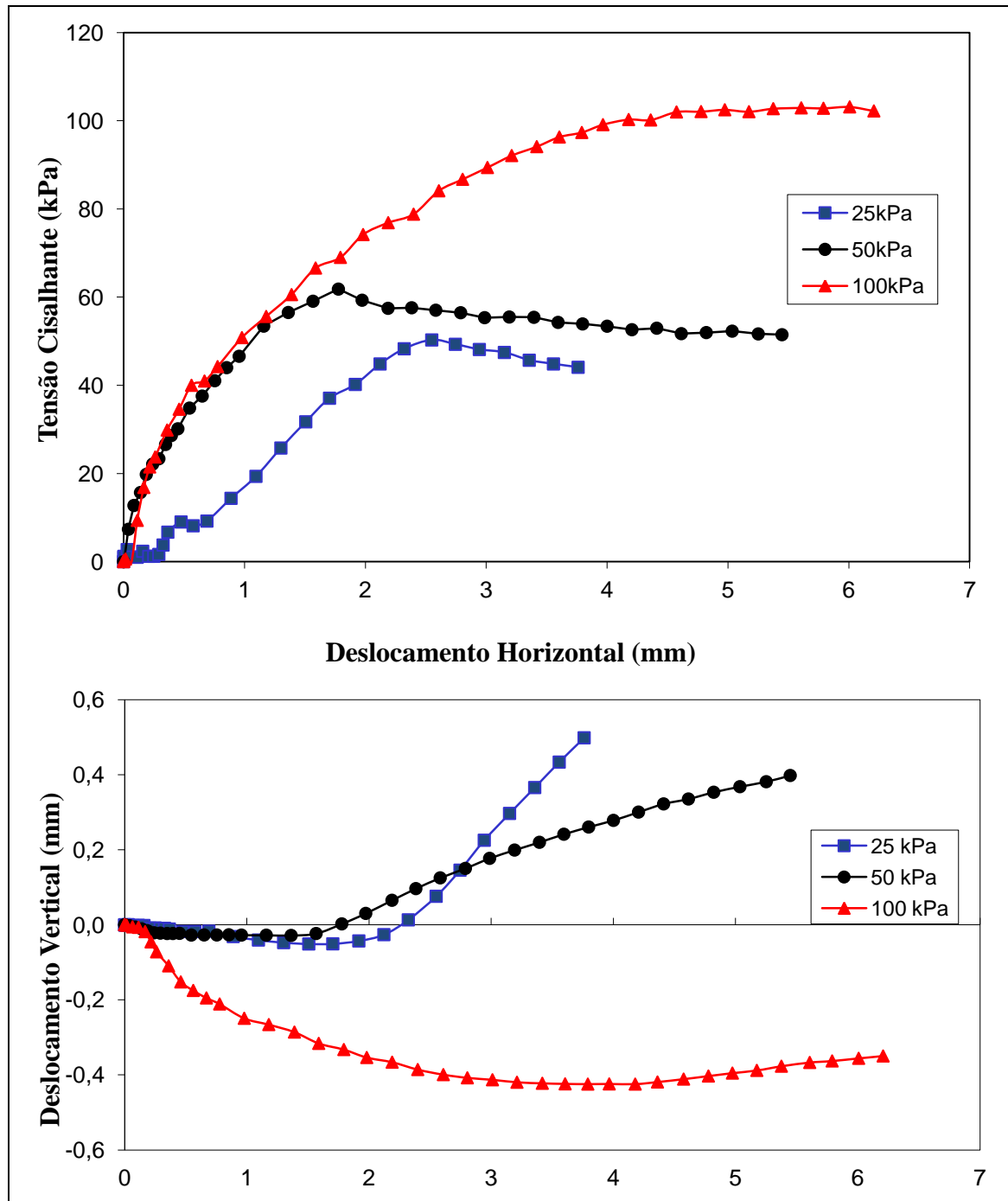
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.26 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% ensaiadas na condição não saturada.



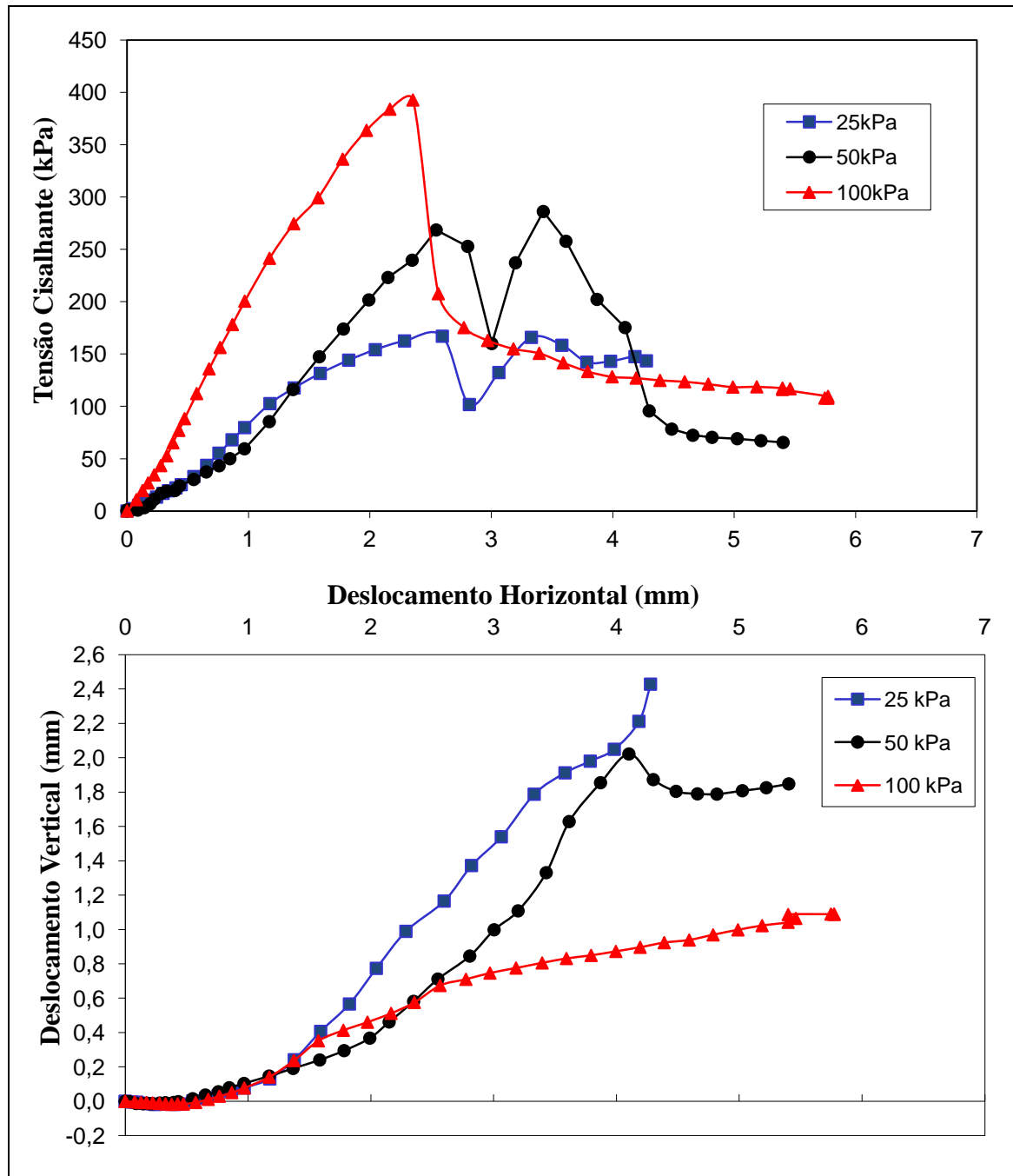
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.27 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 14% e ensaiadas com umidade de 16% na condição não saturada.



(fonte: elaborado pelo autor)

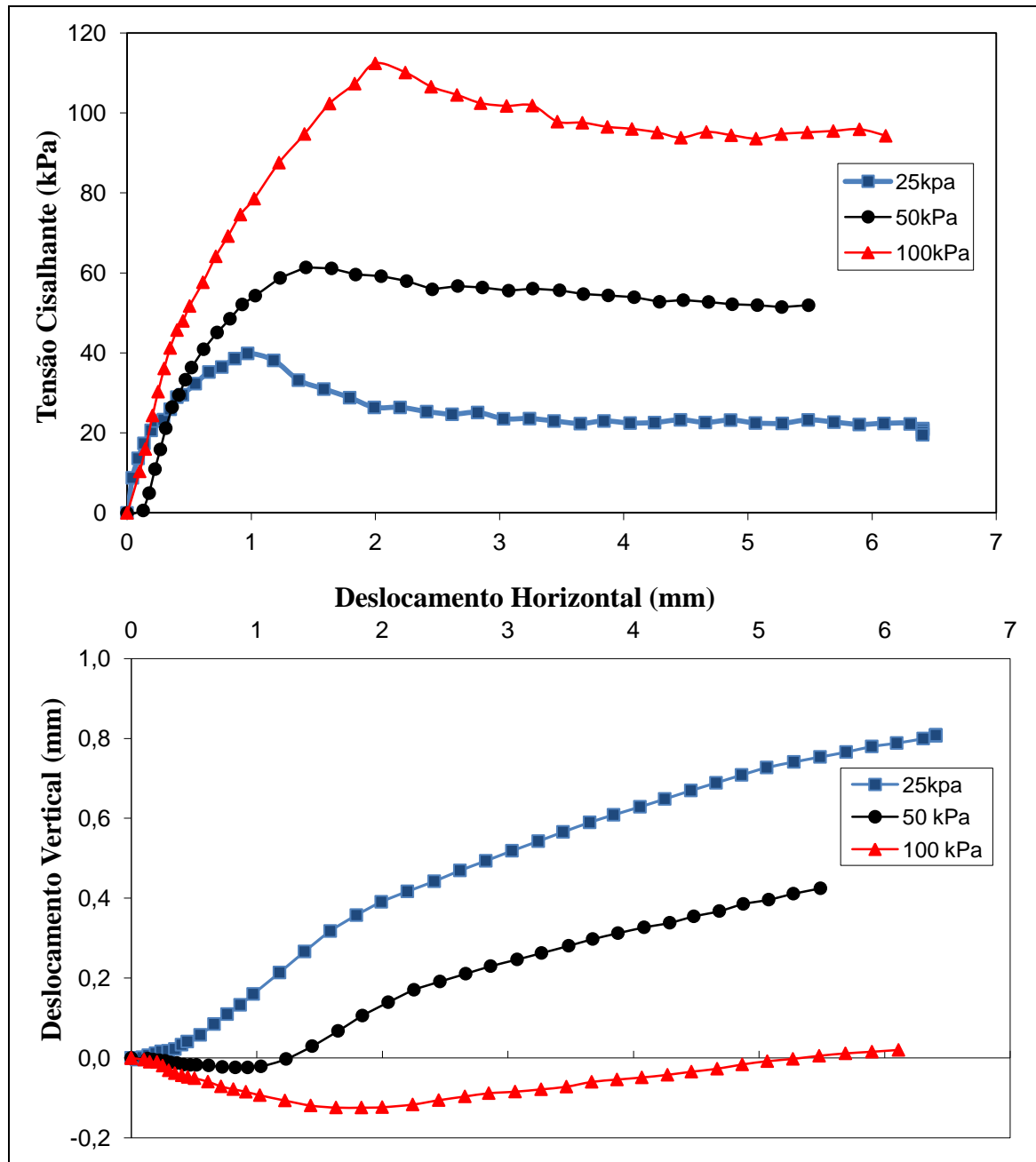
Figura 4.28 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% e ensaiadas com umidade de 14% na condição não saturada



(fonte: elaborado pelo autor)

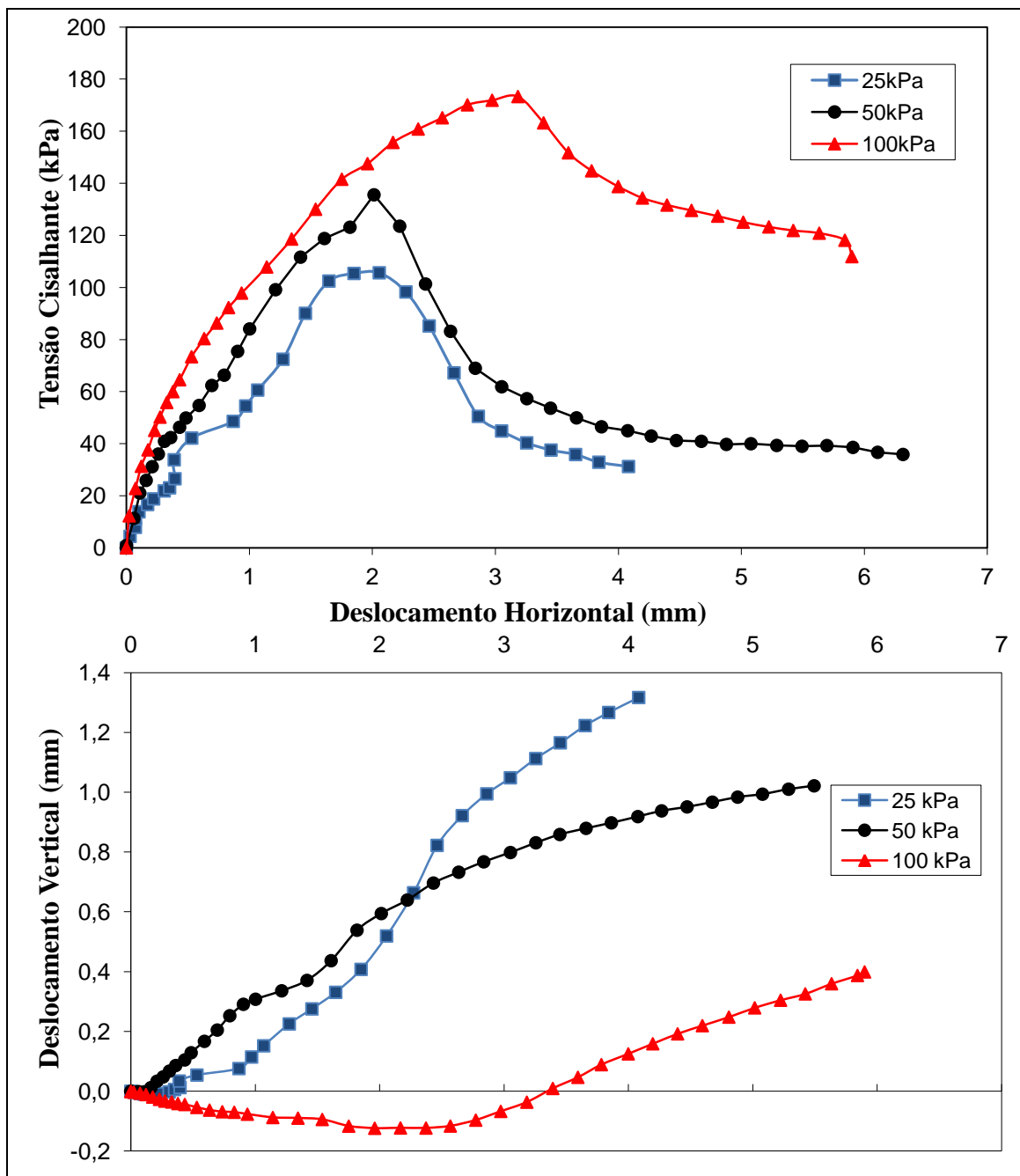


Figura 4.29 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 16% e ensaiadas com umidade de 18% na condição não saturada



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.30 – a) curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras compactadas em 18% e ensaiadas com umidade de 16% na condição não saturada



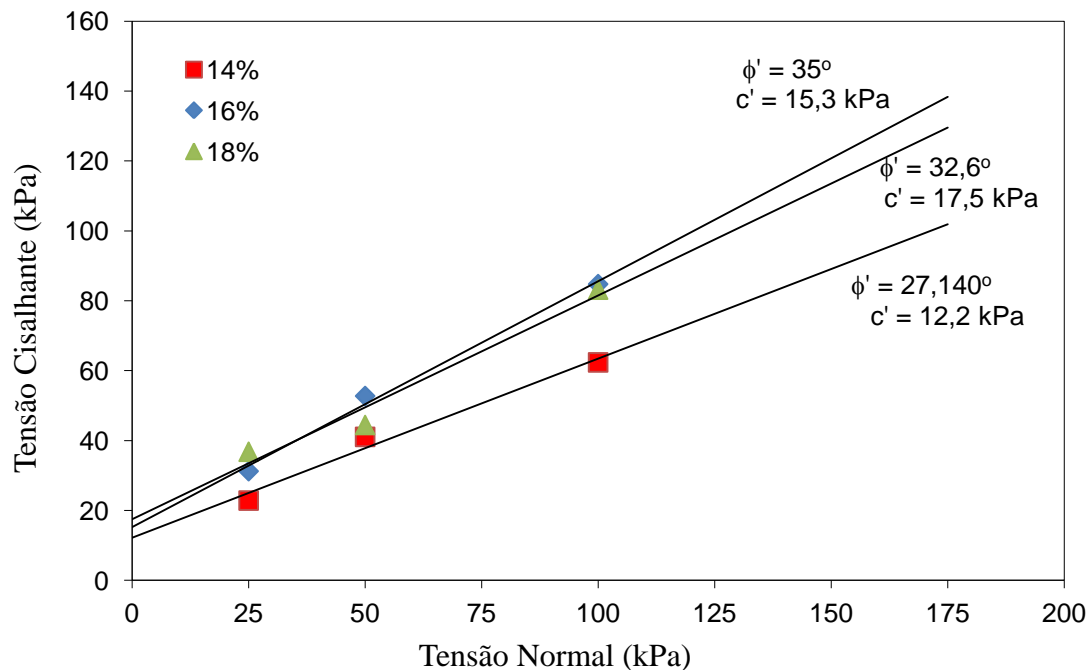
(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.3.2 Envoltórias de Ruptura ao Cisalhamento no plano $\tau$ x $(\sigma-u_a)$

Como critério de ruptura, adotou-se a tensão cisalhante máxima nos ensaios, uma vez que grande parte destes apresentaram um pico evidente. As Figuras 4.31 a 4.34 apresentam as projeções da envoltória de ruptura no plano  $\tau$  x  $(\sigma-u_a)$  dos corpos de prova compactados e ensaiados nas condições saturadas e não saturadas. Os parâmetros

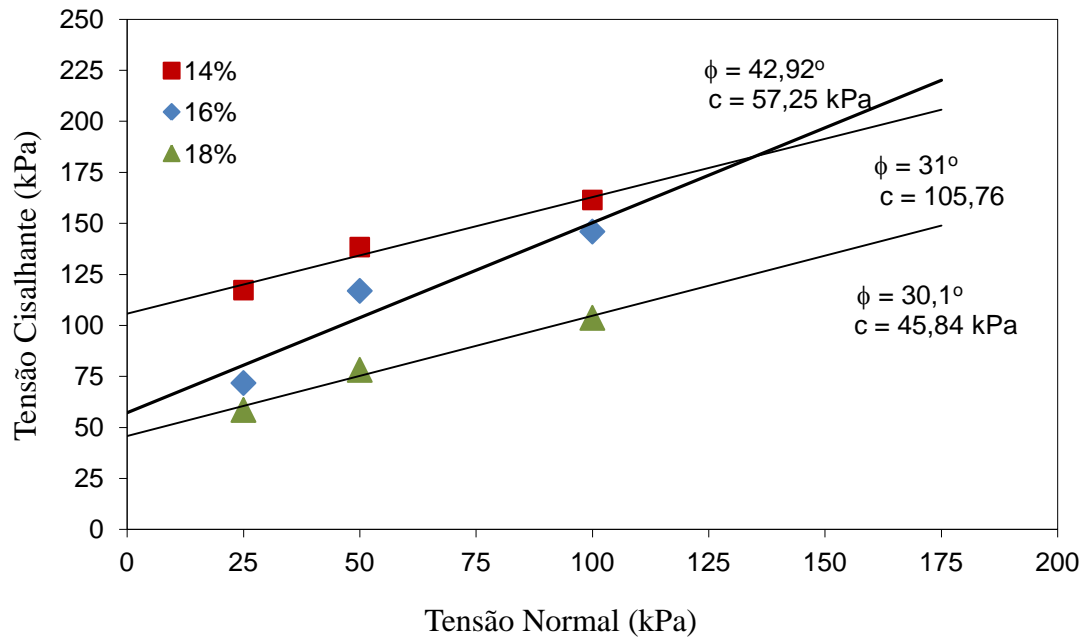
de resistência ao cisalhamento  $c'$  (intercepto coesivo) e  $\phi'$  (ângulo de atrito interno) são parâmetros saturados definidos para as envoltórias de sucção 0kPa. Para o solo estudado, as envoltórias de resistência ao cisalhamento, tanto saturadas como não saturadas puderam ser ajustadas por uma reta, cuja inclinação define o ângulo de atrito interno e a intersecção com o eixo  $y$  o valor da coesão. Com a intenção de visualizar a influência da sucção no ângulo de atrito interno, foram traçadas as retas de ajuste das envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras ensaiadas sem inundação (não saturada), considerando a sucção inicial igual a obtida nas curvas de retenção do mesmo material.

Figura 4.31 – tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas e ensaiadas na condição saturada



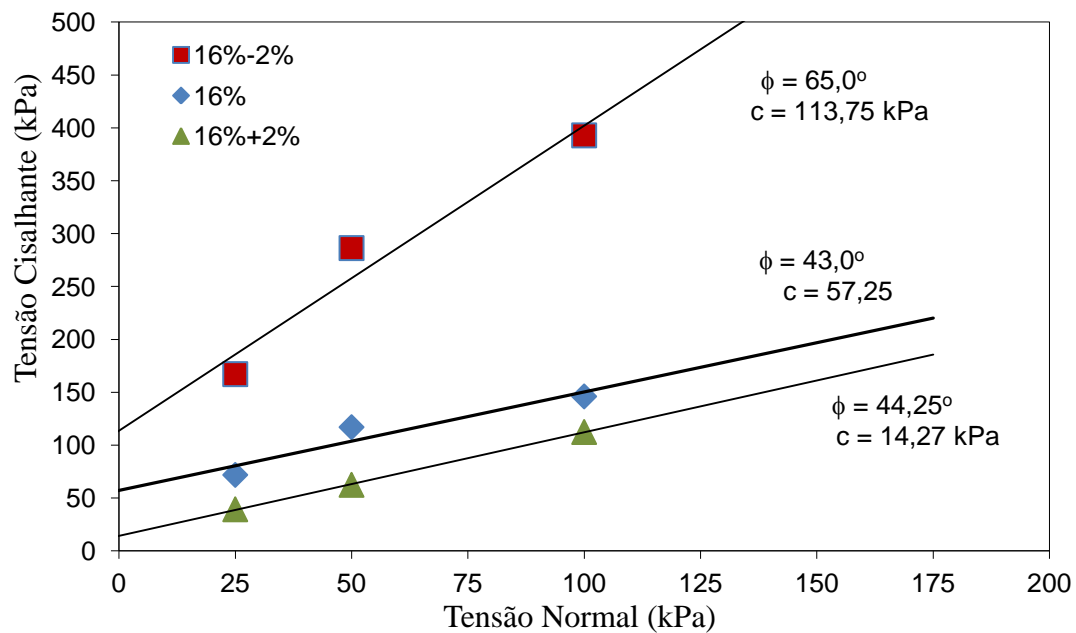
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.32 – tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas ensaiadas na condição não saturada



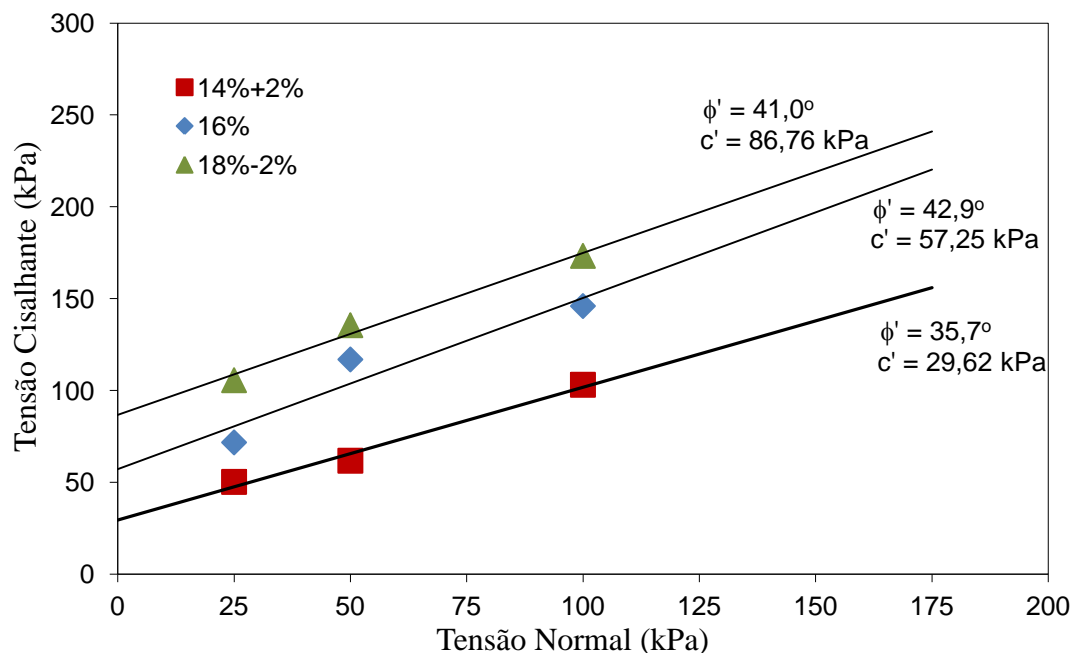
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.33 – tensão normal x tensão cisalhante das amostras compactadas em 16% e submetida a trajetórias de umedecimento e secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.34 – tensão normal x tensão cisalhante das amostras submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Para ensaios na condição saturada, as amostras compactadas na umidade ótima apresentaram maior resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito interno e coesão. Isso provavelmente se deve ao fato dessas amostras apresentarem estruturas mais homogêneas e fechadas. O mesmo pode-se dizer das amostras compactadas acima da umidade ótima. Por outro lado, as amostras compactadas no ramo seco apresentaram valores inferiores de resistência. Entretanto, nos ensaios de módulo de resiliência as amostras compactadas no ramo seco apresentavam maior rigidez e conseqüentemente menores deformações. Porém, estes ensaios ocorriam com o solo no estado não saturado. Diferentemente do que ocorre nos ensaios de cisalhamento direto, onde as amostras eram saturadas antes de ensaiar. Dessa forma, mostra-se que a estrutura do solo abaixo da umidade ótima torna-se mais sensível a elevação da umidade pós compactação.

Nas envoltórias de ruptura das amostras compactadas e ensaiadas sem inundação (não saturadas), nota-se que o maior ângulo de atrito é da amostra na umidade ótima, havendo um acréscimo com relação a condição saturada. Percebe-se também que na condição não saturada ocorre um aumento da parcela coesiva, sendo esta mais

significativa para a amostra abaixo da umidade ótima, comportamento distinto do ensaio saturado.

Com relação às envoltórias de ruptura das amostras submetidas a secagem ou umedecimento, percebe-se que, no geral, a secagem promoveu um forte aumento na parcela coesiva e no ângulo de atrito da amostra, enquanto que no umedecimento ocorre uma redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Observa-se que a amostra compactada na umidade ótima e submetida a secagem resultou em um ângulo de atrito extremamente elevado e uma coesão também alta. Esta mesma amostra é a que apresentou comportamento distinto na curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal, confirmando a alta rigidez do material quando compactado nesta condição e sujeito a esta trajetória.

Nota-se que as trajetórias de umedecimento das amostras compactadas altera de maneira mais significativa, a coesão do solo reduzindo-a, enquanto que a secagem resulta, além de um acréscimo na coesão, um grande aumento no ângulo de atrito. A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento encontrados nas envoltórias traçadas.

Tabela 4.7 – parâmetros de resistência para diferentes condições de umidade das amostras

Amostra	Ângulo de Atrito	Coesão (kPa)
14% Saturado	27,2°	12,2
16% Saturado	35°	15,3
18% Saturado	32,6°	17,5
14% Não Saturado	31°	105,7
16% Não Saturado	43°	57,3
18% Não Saturado	30,0°	45,8
16%-2% Não Saturado	65,0°	113,7
16%+2% Não Saturado	44,5°	14,3
14%+2% Não Saturado	35,7°	29,6
18%-2% Não Saturado	41,0°	86,8

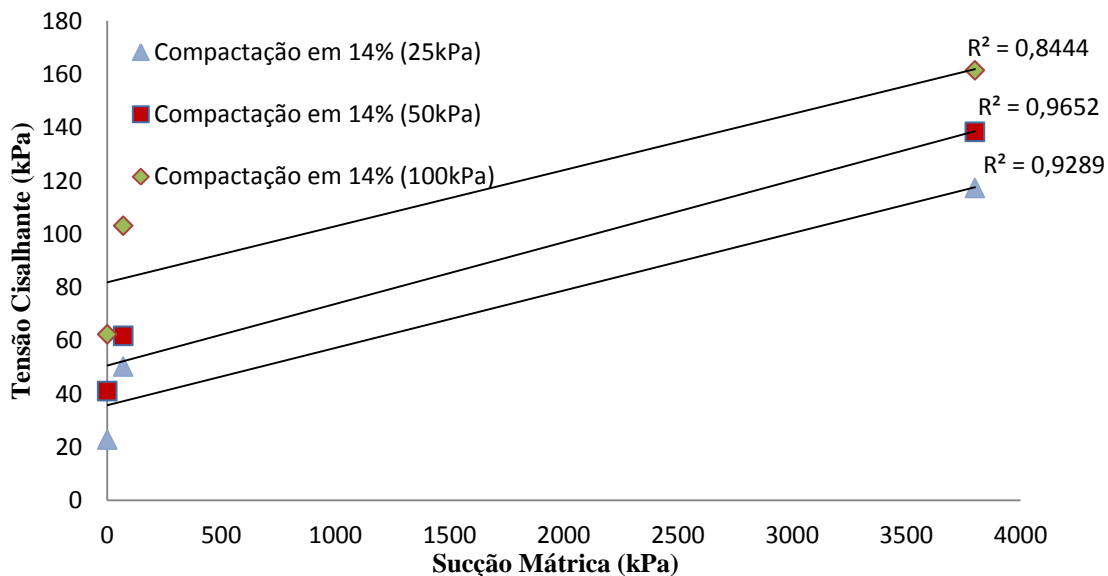
(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.3.2 Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento

A projeção da envoltória de resistência ao cisalhamento no plano  $\tau$  x  $(u_a - u_w)$  define o ângulo  $\phi^b$ , o qual quantifica a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento.

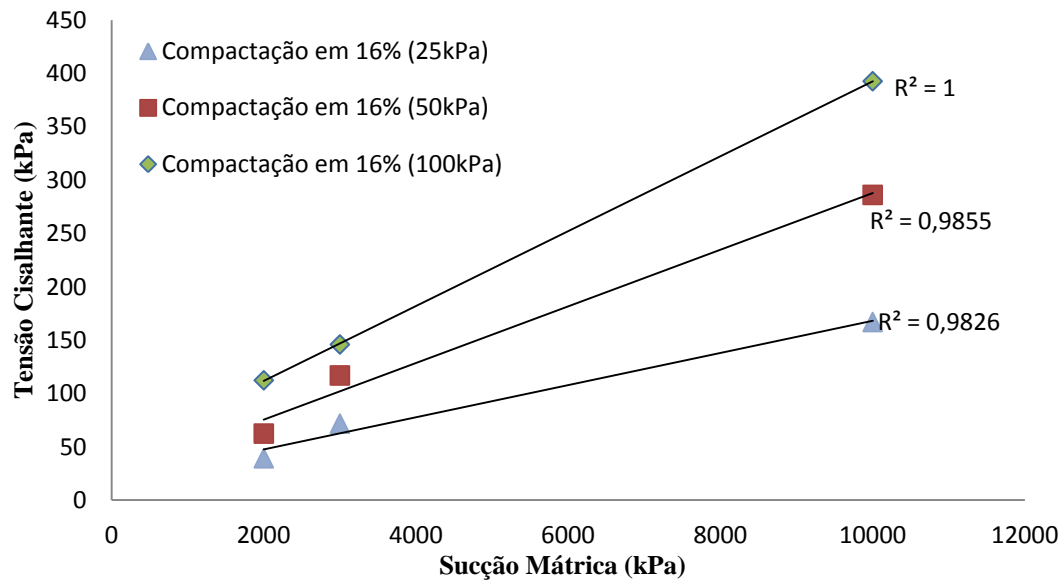
Porém, este parâmetro é melhor observado para valores baixos de sucção, quando se pode observar uma linearidade. Para valores de sucção mais elevados, a envoltória se torna bilinear (ou não linear). Na literatura se encontra que o parâmetro  $\phi^b$  tem um valor inicial próximo ao de  $\phi'$ , para sucções menores que o valor de entrada de ar do solo. Isso porque a sucção atua efetivamente em toda a seção transversal da amostra, assim como a tensão líquida. Após o valor de entrada de ar, o solo começa sua dessaturação e a área de atuação da sucção diminui, resultando em um decréscimo no valor de  $\phi^b$ , que continua até que as condições residuais sejam alcançadas. Desta forma, para altos valores de sucção, o parâmetro  $\phi^b$  passa a ter pouca influência na resistência ao cisalhamento do solo não saturado, sendo esta definida principalmente pela parcela coesiva. As Figuras 4.35, 4.36 e 4.37 apresentam as curvas de tensão cisalhante x sucção dos solos compactados, ressaltando que os valores de sucção foram estimados a partir das curvas de retenção dos solos compactados nos diferentes valores de umidade.

Figura 4.35 – envoltórias de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 14% em diferentes valores de tensão normal líquida



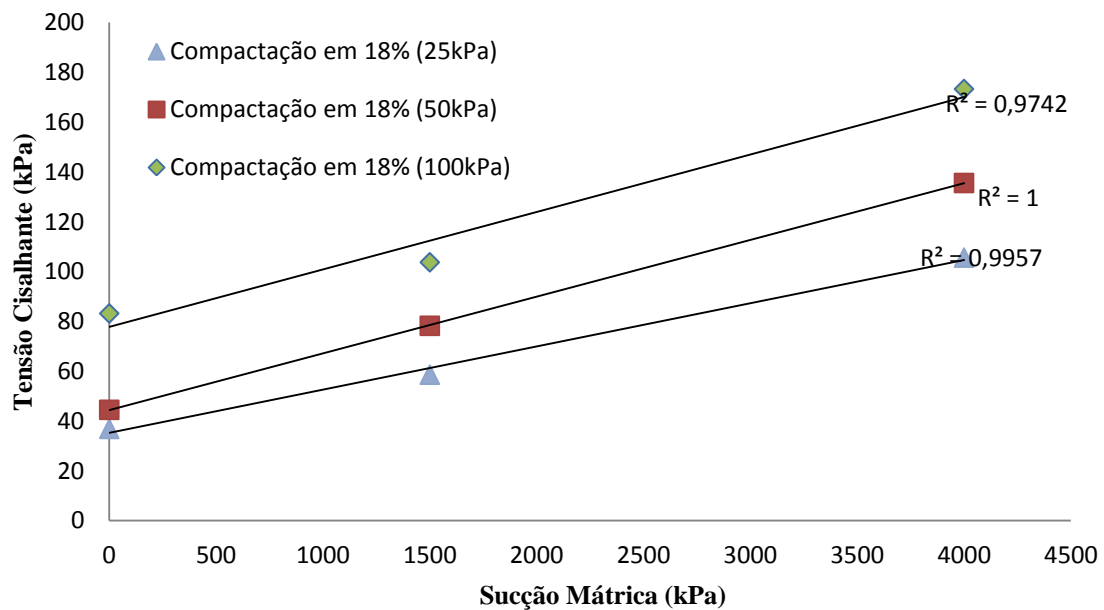
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.36 – envoltórias de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 16% em diferentes valores de tensão normal líquida



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.37 – envoltórias de tensão cisalhante x sucção para as amostras compactadas em 18% em diferentes valores de tensão normal líquida



(fonte: elaborado pelo autor)

Através da Figura 4.37 de tensão cisalhante x sucção, evidencia-se o aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção para as três amostras compactadas. As envoltórias são lineares aumentam quase paralelamente com o aumento da tensão normal líquida. Para os solos compactados em 16% e 18%, observa-se que existe uma boa correlação entre os valores de resistência obtidos nos ensaios de



cisalhamento direto e os valores de sucção estimados através das curvas de retenção desse material. Entretanto, para o solo compactado em 14%, a sucção do material quando submetido ao umedecimento resulta em um valor baixo de sucção (70kPa), quando comparado com os valores obtidos nas demais condições.

A partir destes ensaios não foi possível estimar valores para o parâmetro  $\phi^b$  de forma adequada, devido ao fato dos materiais apresentarem valores elevados de sucção, muito superiores aos do valor de entrada de ar do solo. Desta forma, a tentativa de estimar um  $\phi^b$  através da envoltória dos pontos obtidos nos ensaios, resulta em um ângulo de atrito extremamente baixo. Todavia, sabe-se que o parâmetro  $\phi^b$  decresce com o aumento da sucção para valores acima do seu valor de entrada de ar. Pode-se afirmar que para elevadas sucções o incremento de resistência proporcionado com o parâmetro  $\phi^b$  resulta ser menos influente na resistência ao cisalhamento.

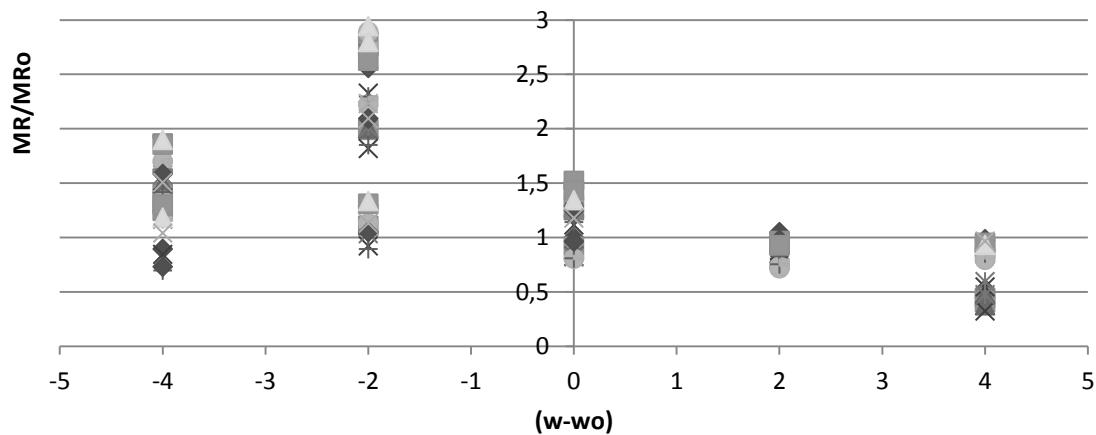
## 5 MODELAGEM E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Neste capítulo são apresentados modelos que relacionam as curvas de retenção e os resultados dos ensaios de módulo de resiliência. Alguns dos principais modelos foram utilizados para módulo de resiliência com a finalidade de encontrar parâmetros capazes de comparar com outros valores existentes e verificar a consistência destes com os dados experimentais obtidos. Os parâmetros obtidos através do uso dos modelos de previsão de módulo de resiliência foram determinados, a fim de comparar os diferentes modelos e avaliar qual é o modelo mais adequado para o solo em estudo.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados dos ensaios de módulo de resiliência executados em diferentes umidades de compactação e também em amostras submetidas a trajetórias de umedecimento e secagem. Estas figuras apresentam os valores de módulo de resiliência (MR) em uma determinada umidade de ensaio, normalizadas pelo valor de módulo de resiliência na umidade ótima (MR<sub>o</sub>) e a correspondente variação de umidade, umidade final menos umidade ótima ( $w-w_o$ ), para o conjunto de amostras ensaiadas. Assim, pode-se avaliar a variação do módulo de resiliência em qualquer condição do solo em termos de variação de umidade.

A Figura 5.1 apresenta a variação de resultados de módulo de resiliência para todas as variações de umidade ensaiadas (diferentes umidades de compactação e umidades após trajetórias de umedecimento ou secagem) e em diferentes valores de tensão desvio. Nota-se uma tendência clara do aumento do módulo de resiliência quando se reduz a umidade do material. Pode-se observar também que os valores não sofrem grandes alterações com a diferença de tensões para solos na mesma condição. Percebe-se que tanto para a variação de umidade devido a trajetórias de umedecimento ou secagem, quanto para a de compactação, a diferença devido às tensões aplicadas são pequenas quando o solo encontra-se no ramo úmido. Entretanto, quando o solo está abaixo da umidade ótima (ramo seco) a diferença torna-se mais pronunciada.

Figura 5.1 – relação entre o módulo de resiliência e as variações de umidade

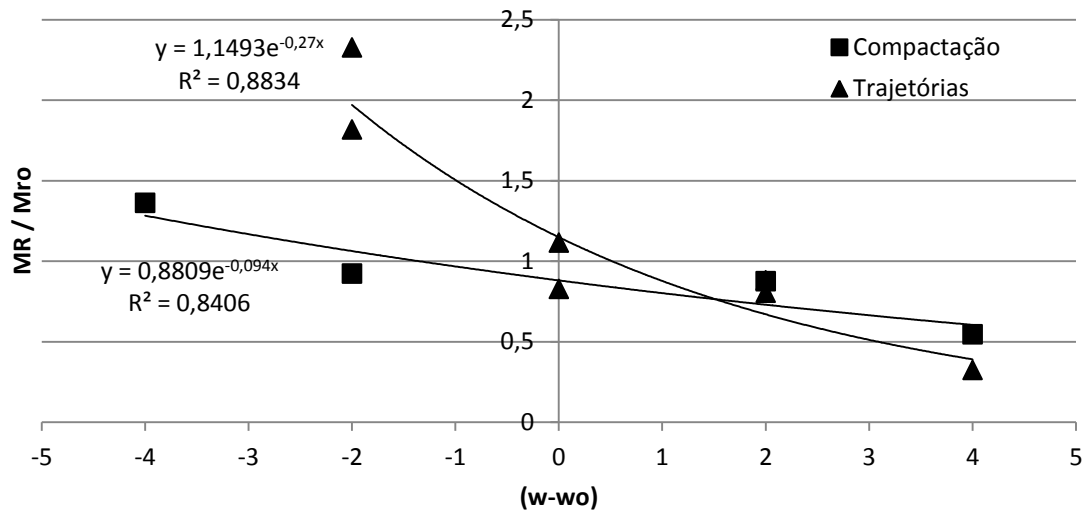


(fonte: elaborado pelo autor)

A tentativa de correlacionar todas as condições de variação de umidade do material (em compactação ou trajetórias) a partir da primeira figura não apresentou valores de  $R^2$  muito bons (na ordem de 0,6). Desta forma, os resultados foram separados nas duas condições, conforme pode ser visto na Figura 5.2. Percebe-se que os ajustes exponenciais apresentam boas correlações,  $R^2$  em torno de 0,85, e que o material tem comportamentos distintos de acordo com a maneira que se alcançou a umidade do solo.

Observando os ajustes, percebe-se que o solo quando submetido a trajetórias de umedecimento, apresenta valores levemente inferiores de módulo de resiliência aos compactados acima da umidade ótima. Entretanto, quando os corpos de prova são submetidos a secagem apresentam um crescimento considerável. Este fato pode ser notado pela variação dos parâmetros do modelo.

Figura 5.2 – relações entre o módulo de resiliência com a umidade para as amostras ensaiadas na mesma umidade de compactação e amostras submetidas a trajetória de umedecimento ou secagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Os modelos explicitam o efeito do teor de umidade de compactação no módulo de resiliência e do teor de umidade de ensaio, após umedecimento ou secagem. As Equações 5.1 e 5.2 apresentam os modelos para o solo compactado e submetido a ciclagens, respectivamente.

$$\left(\frac{MR}{MR_0}\right) = 0,88. e^{-0,094(w-w_0)} \quad (\text{equação 5.1})$$

$$\left(\frac{MR}{MR_0}\right) = 1,15. e^{-0,27(w-w_0)} \quad (\text{equação 5.2})$$

Alguns dos principais modelos de previsão do módulo de resiliência com base nos diferentes estados de tensão e sucção foram avaliados, a fim de verificar o comportamento do material e qual melhor modelo e adapta a ele. Para isso, foram considerados os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) correspondentes a cada modelo como critério de medida de sua acurácia.

O modelo apresentado por Yang et al. (2005) incorpora a sucção mátrica ( $\psi_m$ ) de acordo com a saturação do solo e baseia-se no conceito de tensões efetivas, sendo proposta uma relação entre o módulo de resiliência, a sucção e a tensão desvio, sendo  $\chi$  o parâmetro de Bishop que pode ser relacionado com a sucção atuante e o valor de entrada de ar do material. A Tabela 5.1 apresenta os valores das constantes encontradas para este modelo e compara com os encontrados para o modelo  $k-\sigma_d$ .

Tabela 5.1– parâmetros obtidos dos modelos  $k-\sigma_d$  e de Bishop

Dados				Modelo Bishop $MR = k_1(\sigma_d + \chi\psi_m)^{k_2}$		Modelo $k-\sigma_d$ $MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	
Amostra	VEA (kPa)	$\psi_m$ (kPa)	$\chi$	k1	k2	k1	k2
16,00	1000	3000	0,55	150	-0,47	113	0,01
16+2	1000	2000	0,68	220	-2,18	58	0,19
16-2	1000	10000	0,28	376	-0,15	93	0,03
14,00	15	3800	0,03	259	0,44	65	0,11
14+2	15	70	0,42	164	0,19	204	-0,21
14+4	15	30	0,65	42	-0,29	155	-0,11
14-2	15	5000	0,03	330	0,60	31	0,09
18,00	200	1500	0,33	115	0,18	281	0,03
18+2	200	10	5,19	85	0,28	41	0,27
18-2	200	2200	0,27	178	0,38	107	0,08
18-4	200	5000	0,17	286	1,55	101	0,22

(fonte: elaborado pelo autor)

Ambos os modelos de previsão apresentaram  $R^2$  inferiores a 0,5, mostrando que o material não se adapta bem a eles, lembrando que o modelo  $k-\sigma_d$  é tradicionalmente usado para solos finos coesivos. Comumente, os solos coesivos apresentam redução no módulo de resiliência com o aumento da tensão desvio e através do modelo  $k-\sigma_d$  percebe-se que o parâmetro  $k_2$  é positivo, indicando aumento do módulo com a tensão. O modelo de tensão desvio apresenta parâmetros menores que o modelo de Bishop, mas não fica claro o comportamento para as diferentes condições de umidade. Entretanto, através do modelo de Bishop, nota-se que  $k_2$  passa a ser negativo quando o solo é submetido a trajetória de umedecimento e nas amostras compactadas na umidade ótima (16%). Também, pode-se observar que  $k_2$  torna-se maior quando o solo passa por uma trajetória de secagem. Esse comportamento pode estar associado ao fato do umedecimento causar uma redução na sucção, conseqüentemente ocorrendo redução na resistência, e a secagem, além de gerar um aumento considerável na sucção deste

material, pode estar causando a formação de grumos devido a redução de umidade, e consequente aumento de sucção, fazendo com o que o solo passe a comportar-se como se possuísse uma parcela granular. Isso poderia explicar a razão do modelo  $k-\sigma_d$  não se ajustar bem ao solo estudado.

Outro modelo muito utilizado é o modelo composto, que utiliza a tensão desvio e a tensão confinante. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros encontrados para o modelo, juntamente com os  $R^2$  para cada amostra. Percebe-se que este modelo apresenta uma boa relação com as amostras ensaiadas, possuindo  $R^2$ , em geral, na ordem de 0,95. Através dos resultados se observa que o parâmetro  $k_2$ , que está vinculado a tensão desvio, é negativo, indicando que o módulo de resiliência decresce com o aumento da tensão, e que o parâmetro  $k_3$  que é função da tensão confinante, é positivo, o que mostra que o módulo aumenta com o confinamento, sendo ambas as relações corretas. Em geral, observa-se que o  $k_2$  torna-se mais negativo quando a amostra passa por uma trajetória de umedecimento, mostrando que o material fica mais sensível ao aumento da tensão desvio.

Tabela 5.2– parâmetros obtidos do modelo composto

$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \cdot \sigma_3^{K_3}$				
Amostra	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>
16%	54,13	-0,27	0,51	0,97
14%	34,96	-0,14	0,49	0,97
18%	40,15	-0,32	0,62	0,98
14%+2%	19,22	-0,08	0,56	0,8
14%+4%	111,68	-0,31	0,29	0,98
16%+2%	60,89	-0,35	0,54	0,95
18%+2%	5,17	0,12	0,52	0,62
16%-2%	205,48	-0,18	0,32	0,84
14%-2%	29,83	0,1	0,27	0,79
18%-2%	75,4	-0,17	0,38	0,94
18%-4%	68,48	-0,08	0,44	0,98
12%	67,75	-0,14	0,42	0,94
20%	17,95	-0,31	0,68	0,96

(fonte: elaborado pelo autor)

A aplicação do modelo universal da AASHTO apresenta coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,90, mostrando que os ajustes são bons. A Tabela 5.3 apresenta os

resultados obtidos pelo modelo universal da AASHTO. Analisando as constantes se percebe que  $k_1$  sofre variações significativas devido à variação de umidade, tanto de compactação como por trajetórias de umedecimento ou secagem. Em geral, a constante diminui com o aumento da umidade e aumenta consideravelmente quando sofre uma dessaturação. Por outro lado, a constante  $k_2$ , que está vinculada a 1ª invariante de tensões, sofre pouca alteração entre as diferentes condições de ensaio, não estando claro seu comportamento. Porém, para uma mesma umidade de compactação a variação de umidade posterior causa redução na constante  $k_2$ . Entretanto, a constante  $k_3$ , que tem ligação com a tensão cisalhante, se altera consideravelmente. Observa-se que o valor diminui (torna-se mais negativo) quando a amostra é submetida à trajetória de umedecimento ou aumenta (torna-se menos negativo) quando sofre uma secagem. Isso demonstra que o solo quando umedecido perde parte de sua resistência ao cisalhamento.

Tabela 5.3– parâmetros do modelo da AASHTO

$MR = k_1 p_a \left[ \frac{\theta}{p_a} \right]^{k_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right]^{k_3}$				
Umidade (%)	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>
16,00	1291,3	0,673	-1,83	0,97
16+2	1287,4	0,658	-2,23	0,88
16-2	3095,2	0,451	-0,964	0,94
14,00	1074,7	0,681	-0,986	0,96
14+2	922,38	0,673	-0,895	0,77
14+4	1290,4	0,347	-2,05	0,91
14-2	993,49	0,436	-0,192	0,79
18,00	1098,4	0,785	-1,87	0,98
18+2	405,3	0,634	-0,111	0,57
18-2	1446,7	0,532	-1,05	0,98
18-4	2047,6	0,601	-0,701	0,98
12,00	1612,1	0,615	-0,984	0,99
20,00	889,71	0,935	-3,82	0,95

(fonte: elaborado pelo autor)

O outro modelo é semelhante ao anterior, porém incorpora a parcela da sucção. Foram obtidos os parâmetros do modelo, a fim de verificar sua alteração com as trajetórias de umedecimento e secagem e a influência da sucção nestes. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros encontrados.

O modelo apresentou coeficientes de determinação razoáveis, variando principalmente entre 0,7 e 0,94. Nota-se uma grande variação nos parâmetros quando comparados com o modelo que não considera a sucção. Neste, percebe-se que o k1 varia muito de acordo com a umidade inicial da amostra, sendo muito pequeno para a amostra compactada na umidade ótima, apresentando valores elevados quando compactado na ramo seco e um pouco maiores quando compactados no ramo úmido. Entretanto, k2 se torna extremamente alto nas amostras compactadas na umidade ótima, parâmetro correspondente ao somatório de tensões e sucção, indicando uma influência maior nesta parcela. Sendo em segundo lugar as amostras acima da umidade ótima, seguida pelas amostras no ramo seco. Também, percebe-se que os parâmetros são maiores que os do modelo anterior, indicando que o módulo de resiliência passa a sofrer grande influência por parte da sucção. Observa-se também que nas amostras com R<sup>2</sup> baixos, nas amostras compactadas acima da umidade ótima submetidas a secagem de 2% e umedecimento de 2%, apresentam sinais negativos no parâmetro k2, comportamento diferente das demais amostras. O parâmetro k3, porém, tem o valor mais negativo para a amostra compactada na umidade ótima e submetida à trajetória de umedecimento, variando nas demais condições, não sendo observado grandes diferenças com relação ao modelo anterior, e não apresentando uma tendência clara. Semelhante ao que ocorreu com o parâmetro k2 para as amostras compactadas no ramo úmido, o parâmetro k3 também apresenta sinais invertidos em relação as demais amostras, sendo positivo.

Tabela 5.4 – parâmetros do modelo da AASHTO incorporando a sucção

$MR = k_1 p_a \left[ \frac{\theta + \chi \psi}{p_a} \right]^{k_2} \left[ \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right]^{k_3}$				
%	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>
16,00	0,00118	4,91	-1,49	0,91
14,00	537,06	0,94	-0,85	0,94
18,00	7,74	2,78	-1,73	0,94
14+2	852,08	0,53	-0,46	0,75
14+4	1196,53	0,24	-1,56	0,91
16+2	0,00175	4,19	-1,93	0,7
18+2	353,16	-0,59	2,99	0,57
16-2	0,0025	4,21	-0,94	0,73
14-2	614,18	0,65	-0,18	0,81
18-2	3428,75	-0,51	0,73	0,54
18-4	13,74	2,35	-0,98	0,94

(fonte: elaborado pelo autor)



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste capítulo são expostas as conclusões mais relevantes desta pesquisa. Algumas já foram mencionadas nos capítulos anteriores deste trabalho. No final, são indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 CONCLUSÕES

O programa experimental desenvolvido neste trabalho permitiu uma avaliação do comportamento de um solo compactado em diferentes umidades, com relação à determinação das curvas de retenção e à variação do módulo de resiliência. As análises de resultados permitiram concluir os seguintes itens.

#### 6.1.1 Quanto à Curva de Retenção

- O método do papel filtro mostrou-se eficiente para a obtenção das curvas de retenção das amostras compactadas. Os valores apresentaram dispersão, mas sendo praticamente todos os pontos utilizados para modelagem das curvas.
- As curvas de retenção das amostras compactadas apresentaram formatos unimodais, como era esperado para solos remoldados, uma vez que suas estruturas foram destruídas e reconstituídas. A principal diferença observada entre as diferentes umidades de compactação foi em relação ao nível de sucção encontrado para um mesmo grau de saturação. Os menores valores foram encontrados para o solo compactado abaixo da umidade ótima (~10 kPa). Isto pode estar sendo justificado pelo fato de que o solo na condição abaixo da umidade ótima pode apresentar uma estrutura flokulada e menos homogênea, facilitando a perda de água e conseqüentemente menor sucção.
- Observa-se também que existe uma diferença considerável nos valores de entrada de ar das diferentes curvas de retenção. Não é possível ajustar a curva de

retenção com o modelo unimodal, devendo necessariamente corrigir os valores obtidos.

- Para verificar o comportamento da curva de retenção, ou modelagem, é necessário realizar ensaios por metodologias diferentes para avaliar com mais acurácia os pontos acima de 30000kPa de sucção e abaixo de 100kPa aproximadamente.
- As curvas de retenção para solos compactados na umidade ótima e acima apresentam valores semelhantes, enquanto que abaixo do teor de umidade ótimo, a curva de retenção é bem diferenciada. Conclui-se que a umidade de compactação influencia diretamente a estrutura do solo que, apesar de tratar-se do mesmo solo, podem ser considerados materiais diferentes.

### **6.1.2 Quanto ao Módulo de Resiliência**

- Os ensaios de módulo de resiliência mostraram, como esperado, que os corpos de prova moldados abaixo da umidade ótima apresentaram maior módulo de resiliência quando comparados aos moldados acima da umidade ótima.
- Os níveis de tensões aplicadas na fase de condicionamento se mostraram excessivamente elevados para ensaios em corpos de prova moldados no ramo úmido ou submetidos a umedecimento. Desta forma, optou-se por não executar todo o condicionamento previsto na norma DNIT 134 (2010), a fim de se obter resultados para todas as trajetórias analisadas.
- Os valores de módulo de resiliência para amostras submetidas a trajetórias de umedecimento apresentaram valores muito inferiores do que aqueles compactados no ramo úmido. Os casos mais sensíveis a essa variação foram para aqueles moldados no ramo seco (estrutura floculada), mostrando a sua sensibilidade ao aumento de umidade. Por outro lado, as amostras na umidade ótima ou no ramo úmido mostraram menor redução do módulo de resiliência com o acréscimo de umidade.

- As amostras submetidas à secagem sofreram um aumento considerável nos valores de módulo de resiliência. Verifica-se que as amostras compactadas no ramo úmido e submetidas à secagem apresentaram valores semelhantes independente da umidade final (umidade de ensaio). Entretanto, a amostra compactada na umidade ótima e submetida à secagem apresentou valores elevados de módulo de resiliência. Com relação à amostra compactada no ramo seco, esta não mostrou grandes variações com a trajetória de secagem, uma vez que a estrutura pouco se alterou com esta trajetória.

### **6.1.3 Quanto à Resistência ao Cisalhamento**

- Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostraram que os solos compactados em diferentes teores de umidade apresentam comportamentos distintos perante a resistência ao cisalhamento. As amostras compactadas no ramo seco apresentaram menor resistência que as amostras compactadas na umidade ótima e no ramo úmido, quando ensaiadas na condição saturada. A perda de resistência devido ao aumento da saturação nas amostras é mais significativa naquelas compactadas no ramo seco, como pode ser visto, também, nos ensaios de módulo de resiliência.
- Os ensaios realizados sem saturação das amostras permitiu avaliar o comportamento de forma mais semelhante às trajetórias que ocorreriam no campo, oscilando em torno da umidade ótima de compactação. Os valores de resistência obtidos nestes ensaios foram muito superiores àqueles obtidos nos ensaios realizados sob saturação, mostrando a grande influência da sucção no comportamento deste material. Observou-se que a trajetória de secagem gera um aumento considerável na resistência ao cisalhamento, principalmente na parcela coesiva, tornando-o mais rígido, dificultando inclusive o deslocamento horizontal das amostras no ensaio. O comportamento oposto foi observado nas amostras submetidas à trajetória de umedecimento, perdendo resistência.

### 6.1.4 Modelos Propostos

- Os resultados dos ensaios mostraram que existe uma forte influência da umidade nos módulos de resiliência, principalmente quando o solo sofre alguma trajetória de umedecimento ou secagem. Pode-se, assim, ser correlacionado o módulo de resiliência com o nível de sucção ao qual o material está submetido após sofrer uma alteração de umidade pós-compactação.
- Dentre os diversos modelos existentes na literatura para prever o módulo de resiliência, os que incluem a sucção ou mesmo tensões cisalhantes (como o modelo da AASHTO), para o solo estudado, apresentaram coeficientes de determinação melhores que aqueles que somente incluíam a tensão desvio ou confinante.
- A proposta de tentar correlacionar a sucção através da curva de retenção com o módulo de resiliência se mostrou adequada. O modelo relaciona o módulo de resiliência com a tensão desvio e a sucção. Este apresentou coeficientes de determinação elevados, indicando boa acurácia para previsão de módulo de resiliência. Porém, vale ressaltar que este modelo é válido dentro das limitações dos ensaios e valores analisados de sucção.

### 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A importância das trajetórias de umedecimento e secagem se mostrou clara ao longo deste estudo. Os módulos de resiliência apresentam grandes variações, tanto de resistência quanto à deformação, em função das trajetórias de umedecimento e secagem, e uma vez sendo um parâmetro altamente utilizado para projetos de pavimentos, que são submetidos as oscilações climáticas, deve ser melhor analisado. É possível listar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- A realização de medidas de sucção nas amostras submetidas ao ensaio de módulo de resiliência, a fim de calibrar os resultados encontrados na curva de retenção do solo.

- Um estudo sobre as deformações permanentes e como elas se comportam ao longo das trajetórias de umedecimento e secagem poderia trazer um melhor entendimento sobre o desempenho dos pavimentos perante essas oscilações.
- Uma análise sobre a resistência ao cisalhamento e sua variação com as trajetórias de umedecimento e secagem também seria necessária, a fim de verificar seu comportamento e vinculá-lo à curva de retenção do solo.
- No campo é comum compactar na umidade ótima e deixar secar antes que surjam trincas de retração. Nessa condição o módulo de resiliência é muito elevado, selando as trincas (com o próprio solo), pode-se executar a próxima camada, sem que depois (quando o solo estiver mais úmido) o módulo de resiliência caia muito. Seria a aplicação de um trajetória de secagem mais uma trajetória de umedecimento. Como se comporta o solo em laboratório nesta condição?

## 7 REFERÊNCIAS

ALONSO, E. E., GENS, A., JOSA, A. The Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Géotechnique*, v. 40, n° 3, p. 405-430, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 6508: grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 6457: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: determinação do limite de plasticidade de solos. Rio de Janeiro, 1988.

ASTM D-5298. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. 2002.

BAO, C. G., GONG, B., ZHAN, L. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soil. Keynote Lecture. UNSAT 98, 2nd International Conference on Unsaturated Soils, Beijing, 1998.

BENEVELI, R. M. Estudo dos efeitos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo compactado em laboratório. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro (PUC-RJ), p. 182, 2002.

BENEVELI, R. M., de CAMPOS, R. M. P. Efeitos da Secagem Seguida da Saturação na Resistência de um Solo Compactada em Laboratório. 5° Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos. p. 9-13, 2004.

BISHOP, A. W. The Principle of Effective Stress. Publish in *Teknisk Ukeblad*, Vol. 106, n° 39, p. 859-863, 1959.

BROOKS, R. H., COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrologic Paper n°3*, Colorado State University, Ft. Collins, 27p. 1964.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Trans. Am. Inst. Min. Eng.* 198, 71-78, 1953.

BURGER, C. A., SHACKELFORD, C. D. Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 38, p. 53-66, 2001.

BRUTSAERT, W. Probability laws of pore-size distributions, *Soil Sci.* 101, 85-92, 1966.

CÁSSARO, F. A. M. PIRES, L. F. SANTOS, R. A. GIMÉNEZ, D. REICHARDT, K. Funil de Haides modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. R. Bras. Ci. Solo, 32:2555-2562, 2008.

CHANDLER, R.J., GUTIERREZ, C.I. The filter-paper method of suction Measurement. Géotechnique, v.2, n°36, p. 265-268, 1986.

CERATTI, J. A. P., GEHLING, W. Y. Y., NÚÑEZ, W. P. Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in southern Brazil. Transportation Research Record, Washington, D. C., v. 1874, p. 165-173, 2004.

DAS. B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução da 6 ed.. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DAWSON, A. R., PAUTE, J. L., THOM, N. H. Mechanical Characteristic of Unbound Granular Materials as a Function of Condition. Flexible Pavements, p. 35-45, ed. A. Gomes Correia. 1996.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT ME 134 (2010). Pavimentação - Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE, DNIT 134. Pavimentação – Solos - Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2010.

DRUMM, E. C., REEVES, J. S., MADGETT, M. R., TROLINGER, W. D. Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 116, n° 7, p. 663-671, 1997.

EDIL, T. B., MOTAN, S. E. Soil-water potencial and resilient behavior of subgrade soils. Transportation Research Record, n° 705, p. 54-63, 1979.

FEUERHARMEL, C. Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. p. 127. 2003.

FEUERHARMEL, C. Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral. 2007. 329 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FREDLUND, D. G. MORGENSTERN, N. R. Stress state variable for unsaturated soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 103 (GT5), p. 447-466, 1977.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. Soil Mechanics for unsaturated soils. Ed John Wiley & Sons. New York, NY. 1993.

- FREDLUND, D. G., BERGAN, A. T., WONG, P. K. Relation Between Resilient Modulus and Stress Conditions for Cohesive Subgrade Soils. *Transportation Research Record*, n° 642, p. 73-81, 1977.
- FREDLUND, D. G., XING, A. Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 521-532, 1994.
- FREDLUND, D. G., VANAPALLI, S. K., XING, A., PUFAHL, D. E. Predicting the Shear Strength Function for Unsaturated Soil Using the Soil-water Characteristic Curve. *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, v. 1, p. 63-70, 1995.
- FREDLUND, D. G. The role of unsaturated soil property functions in the practice of unsaturated soil mechanics. PhD. Thesis – University of Saskatchewan – Canada. P. 292, 1999.
- FREDLUND, D. G. GITIRANA JR, G. F. N. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. February 2004.
- GERSCOVICH, D. M. S. Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicada a Solos Brasileiros. In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT01, Porto Alegre, Anais..., Vol. 1, p. 76-92. 2001.
- HAVERKAMP, R., PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particle-size distribution. I. Sandy Soils without organic matter. *Soil Sci.* 142, p. 325-339, 1986.
- HEIDEMANN, M. Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar – SC. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2011, 178p.
- HEYDINGER, A. G., DAVIES, B. O. Analysis of Variations of Pavement Subgrade Soil-water content. *Unsaturated Soils*, p. 247 -257, 2006.
- HOUSTON, S. L., HOUSTON, W. N., WAGNER, A. M. Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, v17 (2), p. 185-194, 1994.
- KHALILI, N. E., KHABBAZ, M. H. A. A unique relationship for  $\chi$  for determination of the shear strength of unsaturated soil. *Technical Note. Géotechnique*, v.48(5), p. 681-687, 1998.
- KHOURY, N. N., ZAMAN, M. M., NEVELS, J. B., MANN, J. Effect of Soil Suction on Resilient Modulus of Subgrade Soil Using the Filter Paper Technique. In: 82th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washinfon, DC. 2003.
- KHOURY, N. N., ZAMAN, M. M. Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., v. 1874, p. 99-107, 2004.



KHOURY, N., BROOKS, R., KHOURY, C., YADA, D. Modeling Resilient Modulus Hysteretic Behavior with Moisture Variation. *Journal of Transportation Engineering*, v. 12, n° 5, p. 519-527, 2012.

KIM, D. KIM, J. R. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test. *Construction and Building Materials* 21, 1470-1479, 2007.

KUNG, J. H. S., LIN, H. D., YANG, S. J., HUANG, W. H. Resilient Modulus and Plastic Strain of Unsaturated Cohesive Subgrade Soils. *Unsaturated Soils*, p. 541-552, 2006.

LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.V., *Soil mechanics, SI version*, John Wiley & Sons, 1979, 553p.

LEONG, E. C., RAHARDJO, H., TANG, S. K. Characterization and engineering properties of Singapore residual soils. *Proceedings of International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, December 2-4, p. 1-10, 2002.

LEONG, E. C. TRIPATHY, S. RAHARDJO, H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Géotechnique* 53, No. 2, 173-182. 2003.

LIANG, R. Y., RABAB'AH, S., KHASAWNEH, M. Predicting Moisture-Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept. *Journal of Transportation Engineering*, v. 134, n° 1, p. 34-40, 2008.

MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis – A experiência com FWD no Brasil. 1996. 456 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MALYSZ, R. Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camadas de pavimentos. 2009. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Foz de Iguaçu. Anais, v2, p. 515-22, 1994.

MARINHO, F. A. M. Medição de Sucção em Solos. 7° *Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Pirenópolis. p. 373-398, 2011.

MASSAD, F. *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MCKEE, C. R., BUMB, A. C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies. *Proceedings, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference*, Houston, TX, March 1984. p. 50-58, 1984.

MCKEE, C. R., BUMB, A. C. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. In: SPE Formation Evaluation, December, p. 599-608, 1987.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G., Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ. 2005.

MOU, C. H., CHU, T. Y. Soil Suction Approach for Evaluation of Swelling Potential. Transportation Research Record, n° 790. Washington, DC, p. 54-60, 1981.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP) 1-37A, Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report, Transportation Research Board. 2004.

OLIVEIRA, O. M. Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. SP. 2004. 330p.

OLIVEIRA, O. M., FERNANDO, F. A. M. Evaluation of Filter Paper Calibration. Unsaturated Soils, p. 1845-1851, 2006.

PARREIRA, A. B. GONÇALVES, R. F. The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil. GeoEng – An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia. 2000.

PEREIRA, A. Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Análise Experimental e Teórica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2006, 153p.

PHILLIP, A. W. The relation between resilient modulus and suction of fine grained soil in pavement design. Dissertação de Mestrado. University of South Australian, 1996.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIDLEY, A.M. Discussion on “Laboratory Filter Paper Suction Measurements” by Sandra L. Houston, William N. Houston, and Anne-Marie Wagner, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v.18(3), p. 391-396, 1995.

RODRIGUES, M. R.. Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul. 1997. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RODRIGUES, R. A., VILAR, O. M. Efeito de Trajetórias de Umedecimento e Secagem no Comportamento de um Solo Arenoso Não Saturado. 7º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis. p. 113-118, 2011.

SAWANGSURIYA, A. EDIL, T. B. BOSSCHER, P. J. Modulus-Suction-Moisture Relationship for Compacted Soils in Postcompaction State. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. Vol. 135, n° 10, p. 1390-1403, 2009.

- SILVA, B. A. Análise Mecânica de um Pavimento Rodoviário Submetido à Oscilação do Lençol Freático Simulada em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza. 2009. 304 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SILVA, M. T. M. G. Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com umidade conhecida. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília. Brasília.
- SOTO, M. A. A. Comparação entre métodos de imposição e controle de sucção em ensaios com solo não saturados. 2004. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.
- SVENSON, M. Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos. Dissertação de Mestrado. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1980.
- SZAFRON, B. J., FREDLUND, D. G. Monitoring Matric Suction in the Subgrade of unpaved roads. Canadian Geotechnical Conference, n° 45, pp. 52-1 – 52-10, 1992.
- TAKEDA, M. C. A Influência da Variação da Umidade Pós-compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2006, 199p.
- TAKEDA, M. C. PARREIRA, A. B., MOTTA, L. M. G. A Influência da Variação da Umidade Pós-compactação no Módulo de Resiliência de Solos Tropicais. XX ANPET, Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Brasília, DF. v. II, p. 1244-1255, 2006.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science of America Journal, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VANAPALLI, S. K, FREDLUND, D. G., PUFAHL, D. E. The relationship between the soil-water characteristic curve and unsaturated shear strength of a compacted glacial till. Geotechnical Testing Journal, v19(3), p. 259-268, 1996.
- VANAPALLI, S. K, FREDLUND, D. G., PUFAHL, D. E. CLIFTON, A. W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, v33(3), p. 379-392, 1996.
- VANAPALLI, S. K, FREDLUND, D. G., PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till. Géotechnique, v49(2), p. 143-159, 1999.
- VIVIAN, J. B. Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminada com Óleo Diesel. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WERK, S. M. S. Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos. 2000. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WHOTH, C. P., HOULSBY, G. T. Soil Mechanics: property characterization and analysis procedure. In: 11<sup>th</sup> ICSMFE, San Francisco, Proceeding..., v. 1, p. 1-55, 1985.

YANG, S. R., HUANG, W. H., TAI, Y. T. Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils. Transportation Research Record, 1913, Transportation Research Board, Washington, D. C., p. 96-106, 2005.

YANG, S. R., LIN, H. D., KUNG, J. H. S., HUANG, W. H. Suction-Controlled Laboratory Test on Resilient Modulus of Unsaturated Compacted Subgrade Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. Vol. 134, n° 9, p. 1375-1384, 2008.

YANG, S. R., LIN, H. D., KUNG, J. H. S., HUANG, W. H. Variation of Initial Soil Suction with Compaction Conditions for Clayey Soils. Journal of Mechanics, v. 28 (3), p. 431-437, 2012.

YAU, A., VON QUINTUS, H. L. Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics: final report. Publication n° FHWA-RD-02051. 2002.