

Miguel Angel Alfaro Soto

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE IMPOSIÇÃO E  
DE CONTROLE DE SUCCÃO EM ENSAIOS COM  
SOLOS NÃO SATURADOS**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para a obtenção  
do Título de Doutor em Geotecnia.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar**

**São Carlos**

**2004**

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: aos meus pais Santos e Maura, meus exemplos de vida, e a Eliana, minha amada esposa, companheira e melhor amiga.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Orenco Monje Vilar, meus agradecimentos e gratidão pela inestimável orientação, dedicação, estímulo e ensinamentos.

Pelas valiosas contribuições técnicas e o auxílio fornecido para a elaboração deste trabalho, expresso minha profunda gratidão aos seguintes profissionais:

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang;

Ao Prof. Dr. Dorival Leão Pinto Júnior;

Ao Profª. Dra. Maria Cecilia Mendes Barreto;

Ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq;

A todos os docentes do Departamento de Geotecnia;

Ao Engenheiro Dr. Herivelto M. dos Santos;

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia, Srs. Antonio Garcia, Oscar dos Santos Neto e José Luis Guerra;

Aos colegas e funcionários deste Departamento.

À minha esposa Geól<sup>a</sup> Eliana Martins Pereira;

À Geól<sup>a</sup> Joceli Ferreira dos Santos;

Pela oportunidade de realizar o curso de Pós Graduação, meu profundo reconhecimento à comissão da Pós Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos -USP.

Finalmente, meu agradecimento e reconhecimento aos meus pais, minha esposa, meus caros irmãos, tios e toda a família pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a funcionabilidade de diferentes técnicas de imposição e de controle de sucção, bem como comparar os resultados por elas fornecidas, quando à determinação de certas características e propriedades dos solos não saturados. As técnicas testadas foram a de translação de eixos (TE), a osmótica (MO), a do papel filtro (PF), a do tensiômetro de alta capacidade (TAC) e a de controle da sucção por imposição da umidade relativa (CSIUR). Verificou-se que a variabilidade de cada um dos métodos estudados é da mesma ordem de grandeza das comumente medidas nos ensaios correntes na Mecânica dos Solos. Foi possível, também, estabelecer os limites de equivalência de resultados fornecidos por diferentes técnicas, quando se mediram as características de retenção de água, a compressibilidade e a resistência à compressão simples dos solos objeto de estudo. Constatou-se também a dificuldade de utilização do método osmótico no solo siltoso (caulim), provavelmente, pela ocorrência de reações que bloquearam a continuidade da osmose e do TAC na medição da sucção apresentando valores sempre crescentes da sucção sem estabilização dos valores lidos em solos com macro-porosidade considerável. Finalmente, desenvolveu-se e testou-se um método de previsão baseado na geometria fractal, que se mostrou eficiente para reproduzir a curva de retenção de água no solo.

**PALAVRAS-CHAVES:** Solos não saturados; sucção; análise estatística; curva de retenção; compressibilidade; compressão simples; geometria fractal.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the workability of different techniques of controlling or imposing suction as well as to compare the results they yield when applied to tests to measure certain properties of unsaturated soils. The tested techniques were the axis translation technique (TE), the osmotic technique (MO), the filter paper method (PF), the high capacity tensiometer (TAC) and the relative humidity technique (CSIUR). It was found that the variability of each of the proposed methods falls in the range usually shown by current Soil Mechanics tests. It was also possible to establish the equivalence between the results of different techniques when applied to measure the soil-water retention curve, the compressibility and the unconfined compressive strength of the soils used in the investigation. Some shortcomings of the MO and of the TAC were also highlighted. The former was unsuccessful in applying suction to the silty soil as the membrane was probably blocked, ceasing the osmotic transference of liquid, while the TAC was unable to read the suction acting in the soil with large amount of macro-pores. Finally, it was developed and tested a method of prediction based on fractal geometry that showed to be efficient to reproduce the soil-water retention curve.

**KEYWORDS:** unsaturated soils; suction; statistic analysis; soil-water retention curve; oedometer test; unconfined compressive strength.

## SUMÁRIO

	Lista de Figuras	iv
	Lista de Tabelas	viii
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	1
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	4
2.1	Conceitos energéticos da água no solo	4
2.1.1	Introdução	4
2.1.2	Potenciais da água no solo	4
2.1.3	Sucção no solo	6
2.2	Relação sucção vs umidade do solo	10
2.2.1	Introdução	10
2.2.2	Curva de retenção de água no solo	10
2.2.3	Relações empíricas para definir a curva de retenção de água no solo	11
2.2.4	Fenômeno de histerese no solo	12
2.3	Técnicas para medidas de sucção dos solos	13
2.3.1	Introdução	13
2.3.2	Técnica de translação de eixos	14
2.3.3	Técnica osmótica	16
2.3.4	Técnica de controle da sucção através da umidade relativa	29
2.3.5	Papel filtro	40
2.3.6	Tensiômetros de alta capacidade	42
2.4	Variáveis do estado tensional	47
2.4.1	Introdução	47
2.4.2	Tensões efetivas em solos saturados	47
2.4.3	Tensões efetivas em solos não saturados	48
2.4.4	Variáveis do estado tensional	50
2.5	Compressibilidade dos solos	51
2.5.1	Introdução	51
2.5.2	Solos colapsíveis	52
2.6	Geometria fractal	53
2.6.1	Introdução	53
2.6.2	Teoria fractal	53
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos</b>	59
3.1	Introdução	59
3.2	Adaptação da técnica osmótica para determinação da curva de retenção de água no solo	59
3.3	Adaptação da técnica osmótica para o estudo deformacional do solo não saturado	61
3.3.1	Construção de um edômetro osmótico	61
3.3.2	Arranjo utilizado para realização dos ensaios com o edômetro baseado na técnica osmótica	65
3.3.3	Calibração da solução PEG para correção da sucção matricial por modificação da sua concentração	66
3.4	Tensiômetro de alta capacidade	69
3.4.1	Calibração do transdutor e o tensiômetro de alta capacidade (TAC)	73
3.4.2	Pressurização do tensiômetro de alta capacidade (TAC)	74
3.5	Implementação de uma sala climatizada	74
3.6	Adaptação da técnica do controle da sucção por imposição da umidade relativa (CSIUR) para o estudo das propriedades de retenção e resistência do solo	75
3.7	Técnicas experimentais	79
3.7.1	Ensaio de caracterização geotécnica, mineralógica e compactação	79
3.7.2	Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	79
3.7.3	Determinação das propriedades de retenção da água no solo	79
3.7.3.1	Câmara de pressão de Richards e membrana de pressão	80
3.7.3.2	Método do papel filtro	81
3.7.3.3	Técnica osmótica	82
3.7.3.4	Curva de retenção a partir da técnica de controle da sucção através da imposição da umidade relativa (CSIUR)	84

3.7.3.5	Tensiômetro de alta capacidade	85
3.7.4	Estudo da compressibilidade dos solos	86
3.7.4.1	Edômetro baseado na técnica de translação de eixos	86
3.7.4.2	Edômetro baseado na técnica osmótica	89
3.7.5	Ensaio de compressão simples	90
3.7.5.1	Translação de eixos	91
3.7.5.2	Método osmótico	92
3.8	Métodos estatísticos	93
3.9	Métodos teóricos e experimentais para previsão da curva de retenção mediante geometria fractal	99
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	104
4.1	Introdução	104
4.2	Adaptação da técnica osmótica para o estudo da compressibilidade de solos não saturados	104
4.2.1	Edômetro baseado no princípio osmótico	104
4.2.2	Ajuste da velocidade de fluxo da bomba peristáltica	105
4.2.3	Calibração da Solução PEG para Correção da Sucção Matricial por Modificação da sua Concentração	107
4.2.4	Tempo para imposição da sucção pelo método osmótico	108
4.3	Construção de um tensiômetro de alta capacidade (tac)	110
4.3.1	Calibração do tensiômetro (TAC)	110
4.3.2	Saturação do reservatório do tensiômetro (TAC)	112
4.3.3	Tempo de medição da sucção pelo tensiômetro (TAC)	112
4.4	Adaptação da técnica do controle da sucção por imposição da umidade relativa (CSIUR) para o estudo das propriedades de retenção e resistência do solo	115
4.4.1	Tempo de equilíbrio de umidade pelo método CSIUR	117
4.5	Aspectos gerais dos solos estudados	120
4.6	Ensaio de caracterização geotécnica, mineralógica e de compactação	120
4.7	Características dos corpos de prova	123
4.8	Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	124
4.9	Ensaio para determinação das propriedades de retenção da água no solo	125
4.10	Ensaio para o estudo da compressibilidade dos solos não saturados	131
4.10.1	Ensaio edométrico convencionais	132
4.10.2	Ensaio edométrico com imposição da sucção	134
4.10.2.1	Ensaio edométrico para avaliação da variabilidade dos métodos de imposição de sucção segundo a trajetória de tensões T1	134
4.10.2.2	Ensaio edométrico para avaliação da variabilidade dos métodos de imposição de sucção segundo a trajetória de tensões T2	136
4.11	Resistência à compressão simples dos solos não saturados	137
<b>5</b>	<b>Análises dos resultados</b>	140
5.1	Introdução	140
5.2	Calibração da solução de peg (20.000) e tempo de equilíbrio no processo osmótico	140
5.3	Calibração, saturação e tempo de resposta do tensiômetro de alta capacidade (TAC)	141
5.4	Calibração das soluções salinas e tempos de equilíbrio quando utilizado o método do controle da sucção por imposição da umidade relativa (CSIUR)	142
5.5	Características dos solos e corpos de prova estudados	143
5.6	Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	144
5.7	Retenção da água no solo	145
5.8	Compressibilidade Dos Solos Não Saturados	148
5.8.1	Ensaio edométrico convencionais	149
5.8.2	Ensaio edométrico com imposição da sucção para avaliação da variabilidade dos métodos de imposição de sucção segundo a trajetória de tensões T1	149
5.8.3	Ensaio edométrico com imposição da sucção para avaliação da variabilidade dos métodos de imposição de sucção segundo a trajetória de tensões T2	150
5.9	Ensaio para o estudo da resistência à compressão simples dos solos não saturados	150
5.10	Análise estatística dos resultados	151

5.10.1	Análise estatística dos resultados para cada método de controle e imposição da sucção	151
5.10.2	Testes de aderência para determinação da normalidade dos resultados	165
5.10.3	Análise estatística para comparação dos resultados de diferentes métodos de controle e imposição da sucção	167
5.10.3.1	Testes de hipóteses para comparação dos resultados utilizando diferentes métodos na determinação das curvas de retenção	169
5.10.3.2	Testes de erro padrão e de hipóteses para comparação dos resultados de ensaios edométricos com diferentes métodos de controle e imposição da sucção para as trajetórias de tensões T1 e T2	178
5.10.3.3	Testes de hipóteses para comparação dos resultados de compressão simples em amostras com diferentes sucções impostas por diferentes métodos	181
5.11	Estimativa da curva de retenção de água no solo mediante geometria fractal	182
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>188</b>
6.1	Introdução	188
6.2	Quanto aos equipamentos e técnicas desenvolvidas	188
6.3	Quanto aos resultados da avaliação de cada método e comparação entre métodos	190
6.4	Quanto aos métodos estatísticos	192
6.5	Quanto ao modelo fractal	192
6.6	Sugestões para futuros trabalhos	193
<b>7</b>	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>194</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.01	Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total	7
Figura 2.02	Modelo capilar para a análise da sucção matricial (BUCKINGHAM, 1907)	8
Figura 2.03	Elementos da curva de retenção segundo FREDLUND <i>et al.</i> , (1994)	11
Figura 2.04	A histerese do solo formada pelas trajetórias provenientes dos processos de umedecimento e secagem	13
Figura 2.05	Edômetro com controle da Sucção baseado na Técnica de Translação de Eixos (ESCARIO 1967, 1969)	16
Figura 2.06	Curva de calibração da relação Pressão osmótica <i>versus</i> concentração da solução PEG DELAGE <i>et al.</i> , (1998)	18
Figura 2.07	a) Raio de luz incidente e de refração b) Ângulo crítico de refração	19
Figura 2.08	Equipamento osmótico desenvolvido por ZUR (1966) destinado à determinação da curvas de retenção de água no solo	22
Figura 2.09	Curvas de retenção obtidas para os métodos de translação de eixos e osmótico num solo argiloso e outro arenoso. (Laboratório de Califórnia)	23
Figura 2.10	Curvas de retenção obtidas para os métodos de translação de eixos e osmótico num solo argiloso e outro arenoso (Laboratório de Haifa)	24
Figura 2.11	Uso da técnica osmótica na determinação da curva de retenção de água no solo (CUI e DELAGE, 1996)	25
Figura 2.12	Porcentagem de expansão (com sobrecarga de 16 kPa) <i>vs</i> sucção matricial	26
Figura 2.13	Pressão de expansão <i>vs</i> sucção matricial	27
Figura 2.14	Uso da técnica osmótica em ensaios edométricos (DELAGE <i>et al.</i> , 1992).	28
Figura 2.15	Mudança da Sucção (100 para 200kPa) sob tensão axial constante (100 kPa)	29
Figura 2.16	Aumento de tensão axial (200 para 400 kPa) sob sucção constante (200 kPa)	29
Figura 2.17	Controle de Sucção por Imposição da Umidade Relativa através do dessecador de vácuo	30
Figura 2.18	Curva de retenção numa ampla faixa de sucções obtida pelos métodos osmótico e por controle da sucção por imposição da umidade relativa	38
Figura 2.19	Uso da técnica técnica de controle de sucção por imposição da umidade relativa em ensaios edométricos (ESTEBAN e SAEZ, 1988)	38
Figura 2.20	Relação entre deformação e tensão axial constante (sobrecarga) para diferentes valores de sucção	40
Figura 2.21	Tensiômetro de alta capacidade ( <i>Imperial college Tensiometer</i> )	43
Figura 2.22	Tempo de resposta do tensiômetro de alta capacidade do <i>Imperial College</i>	44
Figura 2.23	Calibração da solução de polietileno de glicol PEG (20.000) usando o tensiômetro de alta capacidade	45
Figura 2.24	Calibração da solução de polietileno de glicol PEG (20.000) usando diferentes técnicas	46
Figura 2.25	Comparação dos resultados de sucção entre os métodos do papel filtro e tensiômetro de alta capacidade	47
Figura 2.26	Representação gráfica das variações do índice de vazios e as tensões ( $\sigma-u_a$ ) e ( $u_a-u_w$ ). (variáveis de estado)	51
Figura 2.27	Objetos fractais com diferentes dimensões: a) D=0; b)D=1; c)D=2; d)D=1,89 (TURCOTTE, 1992).	55
Figura 2.28	Elementos de fractais, fractais determinísticos e imagens finais de aproximação com objetos naturais (VIEIRA e LOPES, 2002)	56
Figura 2.29	Esponja de Menger	57
Figura 3.01	Esquema montado para ensaios visando a determinação da curva de retenção de água no solo	59
Figura 3.02	Refratômetro manual marca ATAGO	60
Figura 3.03	Componentes do edômetro com controle de sucção, baseado na técnica osmótica	62
Figura 3.04	Esquema do sistema de fluxo da solução na câmara da base do edômetro	64
Figura 3.05	Esquema do sistema montado para execução dos ensaios	65
Figura 3.06	Calibração do refratômetro manual	67
Figura 3.07	Refratômetro Abbê	68
Figura 3.08	Adaptação do transdutor EPX-NO1 para ser utilizado como tensiômetro	70

Figura 3.09	Esquema do pistão hidráulico manual e seus principais componentes	71
Figura 3.10	a) Tensiômetro (TAC); b) Tensiômetro acoplado à bomba	72
Figura 3.11	Suporte para facilitar a medição da sucção nos solos com o tensiômetro (TAC)	72
Figura 3.12	a) calibração do transdutor por compressão; b) calibração do transdutor por tração	73
Figura 3.13	Esquema do sistema de controle de temperatura para o ensaio	76
Figura 3.14	Técnica do controle da umidade relativa. a) Detalhe de um dessecador; b) Arranjo utilizado para execução dos ensaios	78
Figura 3.15	Câmaras de pressão de RICHARDS para determinação da curva de retenção	80
Figura 3.16	Técnica do Papel Filtro. a) Arranjo para sucção matricial; b) Arranjo para sucção total.	82
Figura 3.17	Esquema do arranjo utilizado para determinação da curva retenção pelo método osmótico (MO).	83
Figura 3.18	Arranjo utilizado para determinação da curva de retenção mediante o transdutor (TAC)	85
Figura 3.19	Edômetro baseado na técnica de translação de eixos; a) desmontado; b) montado numa prensa de adensamento	87
Figura 3.20	Trajcetórias de Tensão empregadas para o estudo dos solos	88
Figura 3.21	Sistema montado para execução dos ensaios edométricos baseados na técnica osmótica	89
Figura 3.22	Câmaras de Pressão utilizadas para imposição da sucção nos corpos de prova	91
Figura 3.23	Disposição dos corpos de prova para imposição da sucção no método osmótico	92
Figura 3.24	Fluxograma da análise estatística acerca da repetibilidade de um método e da comparação entre métodos de imposição e controle de sucção em ensaios com solos não saturados	93
Figura 3.25	Variável simplificada para comparação dos resultados de retenção de água no solo para diferentes métodos de imposição e controle da sucção	94
Figura 3.26	Variável simplificada para comparação de resultados das curvas de adensamento (Trajetória T1) em solos não saturados sob sucção imposta pelos métodos TE e MO	96
Figura 4.01	Deformações sofridas pela câmara quando submetidas a pressões verticais	105
Figura 4.02	Varição do fluxo da solução <i>versus</i> velocidade da bomba	105
Figura 4.03	Testes de variação do peso da solução em função do tempo	106
Figura 4.04	Ajuste polinomial de quarto grau a partir dos valores apresentados (concentração PEG 20.000 <i>versus</i> sucção matricial) em WILLIAMS e SHAYKEWICH (1969)	107
Figura 4.05	Índice de refração (%Brix) <i>versus</i> Temperatura para diferentes concentrações de PEG 20.000	108
Figura 4.06	Concentrações de PEG 20.000 (a 20°C) <i>versus</i> Índice de refração (%Brix), provenientes da medição com o refratômetro manual e Abbé	108
Figura 4.07	Varição de peso da solução PEG (20.000) <i>versus</i> tempo para o solo siltoso CC1	109
Figura 4.08	Varição de peso da solução PEG (20.000) <i>versus</i> tempo para o solo siltoso CC2	109
Figura 4.09	Varição de peso da solução PEG (20.000) <i>versus</i> tempo para o solo siltoso SFI	110
Figura 4.10	Varição de peso da solução PEG(20.000) <i>versus</i> tempo para o solo siltoso SFC	110
Figura 4.11	Calibração do transdutor por compressão	111
Figura 4.12	Calibração do transdutor por tração	111
Figura 4.13	Calibração do tensiômetro por compressão	111
Figura 4.14	Saturação do reservatório do tensiômetro (TAC)	112
Figura 4.15	Varição da sucção em função do tempo (até 10kPa) quando utilizado o método TAC em amostras provenientes dos diferentes solos	113
Figura 4.16	Varição da sucção em função do tempo (entre 10 e 50kPa) quando utilizado	113

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

