

OSVALDO DE FREITAS NETO

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO NÃO
SATURADO COM MEDIDA DIRETA DE SUCCÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Tit. Orencio Monje Vilar

São Carlos
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **OSVALDO DE FREITAS NETO**

Dissertação defendida e julgada em 08/07/2008 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **ORENCIO MONJE VILAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



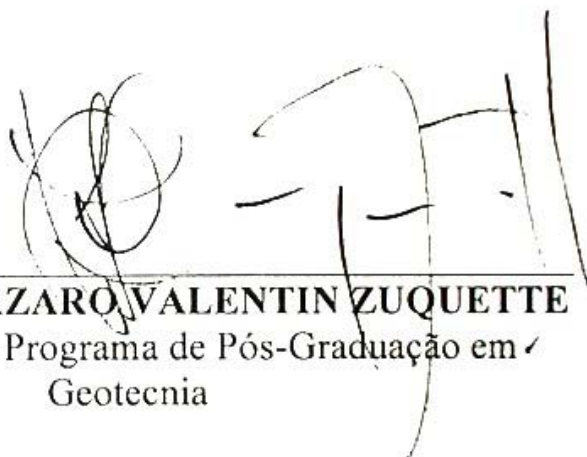
Prof. Dr. **EDMUNDO ROGERIO ESQUÍVEL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

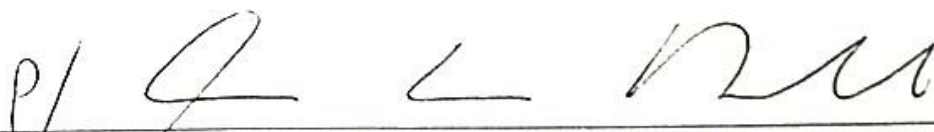


Prof. Dr. **SERGIO ANTONIO ROHM**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedicatória

À SANTÍSSIMA TRINDADE, PAI, FILHO E ESPÍRITO SANTO. A NOSSA SENHORA PELA INTERCESSÃO NOS MOMENTOS MAIS DIFÍCEIS DA MINHA VIDA.

Ao meu pai ANTÔNIO de FREITAS e minha mãe FLÁVIA JUREMA MARANHÃO de FREITAS pelo amor incondicional, confiança, eternos exemplos e ensinamentos. DEVO MINHA VIDA A VOCÊS. SEM VOCÊS EU NÃO SERIA NADA, NINGUÉM. MUITO OBRIGADO POR TUDO. OBRIGADO POR EXISTIREM.

À minha amada esposa MARIA LUIZA pelo amor, pelos sonhos comigo sonhados, pelos sonhos comigo realizados, pela coragem, compreensão, força e presença constante na minha vida. VOCÊ É MINHA FORTALEZA.

Às minhas amadas irmãs, FLÁVIA ANDRÉIA, VALÊSCA PATRÍCIA e SHEILA VERUSCA, pelo amor, apoio, conforto, incentivo e compreensão nos momentos em que estive ausente. VOCÊS FORAM E SEMPRE SERÃO MINHA PROTEÇÃO

Aos meus amados irmãos MARCOS WAGNER e EDÍLSON AVELINO pelo apoio, carinho fraterno e valiosos conselhos que serviram de alicerce no decorrer da minha vida. NUNCA ESQUECEREI.

Aos meus amados sobrinhos MATEUS, JOÃO MARCOS, MARIA ISABEL, LETÍCIA e GABRIEL (In Memoriam), pela CONFIANÇA, AMOR E RESPEITO.

À FAMÍLIA PONTES DE FRANÇA e FRANÇA DA SILVA, que também são minhas Famílias, pelas orações, incentivo e principalmente pelo AMOR.

Agradecimentos

Ao professor Orencio Monje Vilar, pela bondade, amizade, orientação, confiança e compreensão nos momentos mais difíceis da pesquisa.

Aos professores e grandes amigos Olavo Francisco dos Santos Júnior e Ricardo do Nascimento Flores Severo, pelos ensinamentos, conselhos e oportunidades desde o início da minha carreira. Agradeço acima de tudo pela amizade, confiança e apoio incondicional.

Aos amigos, Alexandre Cerqueira, Antonio Gilberto, Cleber Decarli, Diogo Pedreira, Fernando Jamal, José Orlando e Regis Eduardo, pela amizade, pelos momentos difíceis, mas também pelos vários momentos de descontração que vivenciamos durante todo o período de mestrado e que certamente levaremos para toda a vida..

Ao grande amigo Antônio Gustavo de Barros pela sua amizade sincera, bondade e disponibilidade, SEM IGUAL, de ajudar ao próximo.

Ao grande amigo Euclides Pereira Flores Júnior pela amizade mesmo na ausência, sempre esteve presente.

Aos amigos Roger Augusto Rodrigues, Heraldo Nunes Pitanga e Oscar dos Santos Neto, pelo convívio diário e amistoso no Laboratório, pela amizade, pelos valiosos conselhos, palavras de incentivo e pelas valiosas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Marcelo Augusto Tavares de Alcântara, pela amizade, oportunidades e aprendizado.

Aos amigos Júnio René Toledo Fagundes e William Bessa pela bondade e por estarem sempre solícitos a uma boa conversa.

Ao Professor Edmundo Rogério Esquível, pela amizade, bondade e contribuição sempre que necessária.

Aos amigos e técnicos laboratoriais José Luis Guerra, Benedito Osvaldo pela amizade e contribuição na realização dos ensaios laboratoriais.

Aos Funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC/USP pela contribuição sempre que necessária.

Um agradecimento especial ao Professor Nelson Aoki pela bondade e por estar sempre disposto a repassar seu vasto conhecimento.

Resumo

FREITAS NETO, O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 2008. 178f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho teve como objetivo utilizar um tensiômetro de alta capacidade (TAC) para realizar medidas diretas de sucção em ensaios de resistência ao cisalhamento de um solo compactado. Foram realizados ensaios de resistência à compressão triaxial do tipo consolidado drenado na condição saturada, ensaios consolidados não drenados na condição não saturada e ensaios de resistência à compressão simples. Os ensaios de compressão simples foram realizados em uma série de repetibilidade e outras duas para a verificação da influência da sucção na resistência de um solo compactado, fazendo-se variar a massa específica aparente seca do solo e o teor de umidade. Em todos os ensaios de compressão simples o TAC registrou aumento da sucção até cerca de 3% de deformação axial, quando a partir daí a sucção tendeu a estabilização. Os valores de resistência à compressão simples e de sucção tenderam a crescer com o aumento da massa específica aparente seca do solo e com a redução do teor de umidade. A resistência foi correlacionada com a sucção e com a massa específica aparente seca para os ensaios com teor de umidade constante e com a sucção e o teor de umidade para os ensaios com massa específica aparente seca constante. Os ângulos ϕ_b que relacionam o aumento da resistência com a sucção variaram dependendo da forma de determinação e foram maiores quando determinados diretamente a partir da resistência não drenada do que quando determinados a partir da proposta de Fredlund et al. (1978).

Palavras Chave: Resistência ao cisalhamento, Sucção, Tensiômetro de alta capacidade, Solos não saturados.

Abstract

FREITAS NETO, O. **Shear Strength of an unsaturated soil with direct measurement of suction.** 2008. 178f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The purpose this study was to measure the suction with high capacity tensiometer (HCT), placed at the bottom of the sample, during shear strength tests on a compacted soil. Three kinds of shear strength tests were performed on the sample in different conditions of saturation: triaxial consolidated drained in saturated condition, triaxial consolidated undrained with constant water content and unconfined compression in unsaturated condition. To assess the development of the suction and its influence on the shear strength of a compacted soil, the unconfined compression tests were performed in a series of repeatability and the others with variation of the dry density and water content of the sample. In all unconfined compression tests, the HCT recorded increase of suction until 3% axial deformation, approximately, from where the suction tended to stabilized. The values of compressive strength and suction increased with higher dry densities and lower water contents. Firstly, the shear strength was correlated with suction and the dry density, for constant water content tests. In sequence, it was correlated with suction and the water content for constant dry density tests. The ϕ_b angle, that relates the increase of the strength with suction, varied depending of determination method. Its values were higher when directly determined from the undrained strength than when determined from the model presented by Fredlund et al. (1978).

Keywords: Shear Strength, Suction, High capacity tensiometer, Unsaturated soils.

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1– Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	6
Figura 2.2– Representação conceitual de sucção total, matricial e osmótica	10
Figura 2.3 – Curva de retenção típica mostrando as zonas de drenagem (Vanapalli et al., 1999)	11
Figura 2.4 – Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971)	13
Figura 2.5 – Curva de retenção típica de diferentes tipos de solo (Rodrigues, 2007)	13
Figura 2.6 – Configurações do ensaio de papel filtro (Marinho e Oliveira, 2006).....	17
Figura 2.7 – Sucção matricial e total em amostra compactada estaticamente, preparada com água pura e uma solução salina (Marinho, 1994)	19
Figura 2.8 – Tensiômetro convencional.....	22
Figura 2.9 – Tensiômetro de alta capacidade (TAC) – Fabricado no Imperial College (Ridley e Burland, 1993).....	23
Figura 2.10 – Resposta Típica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) (Ridley e Burland, 1993)	26
Figura 2.11 – Seqüência do mecanismo de cavitação em um tubo de vidro (Harvey et al., 1944)	28
Figura 2.12 – Estágios do fenômeno de cavitação (Marinho et al., 2005).....	29
Figura 2.13 – Mecanismo desenvolvido para evitar a ocorrência da cavitação (Marinho et al., 2005).....	30
Figura 2.14 – Tensiômetro antes e após seu acoplamento a bomba hidráulica manual (Soto, 2004)	31

Figura 2.15 – Câmara de saturação dos poros da pedra porosa na posição horizontal (Take e Bolton, 2002).....	31
Figura 2.16 – Câmara de saturação dos poros da pedra porosa na posição Vertical (Take e Bolton, 2002).....	32
Figura 2.17 – Resposta do Tensiômetro a ciclos de pressurização Kuwajima (2000).....	33
Figura 2.18 – Saturação do Tensiômetro de Alta Capacidade (Soto, 2004).....	33
Figura 2.19 – Resultado da calibração do transdutor sob pressão de compressão (Soto, 2004).....	34
Figura 2.20 – Resultado da calibração do transdutor sob pressão de tração (Soto, 2004).....	35
Figura 2.21 – Resultado da calibração do tensiômetro sob tensão de compressão (Soto, 2004).....	35
Figura 2.22 – Variação volumétrica frente ao mesmo incremento de pressão (a e b) e de sucção (c e d). (Jennings e Burland 1962).....	40
Figura 2.23 – Variação do parâmetro χ em função do grau de saturação (Bishop e Donald, 1961).....	40
Figura 2.24 – Variação do parâmetro χ em função do grau de saturação (Jennings e Burland 1962).....	41
Figura 2.25 – Representação das variáveis do estado tensional no elemento de solo não saturado.....	42
Figura 2.26 – Envoltórias de resistência para tensão confinante líquida constante (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	43
Figura 2.27 – Envoltórias de resistência da argila cinzenta de Madri (Escario e Sáez, 1986).....	44
Figura 2.28 – Envoltórias de resistência da areia argilosa de Madri (Escario e Sáez, 1986).....	45
Figura 2.29 – Resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento direto com diferentes sucções matriciais (Escario e Sáez, 1987).....	45
Figura 2.30 – Envoltória proposta por Fredlund et al. 1987.....	46
Figura 2.31 – Envoltória de resistência obtida por Carrillo et al. (1994).....	47
Figura 2.32 – Variação do ângulo de ϕ_b com a sucção em diferentes solos naturais brasileiros.....	47

Figura 2.33 – Variação da coesão e ângulo de atrito interno em função da sucção. (Delage et al., 1987)	48
Figura 2.34 – Relação entre a resistência ao cisalhamento e a curva de retenção (Fredlund et al., 1995)	49
Figura 2.35 – Câmara triaxial adaptada com dois tensiômetros de alta capacidade (Jotisankasa et al., 2006)	49
Figura 2.36 – Célula de cisalhamento adaptada (Oliveira ,2004).....	50
Figura 2.37 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no ramo seco da curva de Proctor (Oliveira ,2004).....	51
Figura 2.38 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no teor de umidade ótimo (Oliveira ,2004).....	51
Figura 2.39 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no ramo úmido da curva de Proctor (Oliveira ,2004).	52
Figura 2.40 – Sucção no início e no final dos ensaios em amostras não saturadas com teor de umidade constante (Toll, 1990)	52
Figura 2.41 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação axial para diferentes níveis de sucção (Colmenares e Ridley, 2002).	53
Figura 2.42 – Evolução da sucção com a deformação axial(Colmenares e Ridley, 2002).....	53
Figura 2.43 – Ajuste entre a sucção inicial e na ruptura em função do teor de umidade gravimétrica (Colmenares e Ridley .2002)	54

Capítulo 3

Figura 3.1 – Esquema do Transdutor em miniatura Entranco modelo EPX-NO1.	58
Figura 3.2 – Luva de acoplamento de aço inoxidável.....	59
Figura 3.3 – Esquema do tensiômetro de alta capacidade	59
Figura 3.4 – Bomba hidráulica utilizada na saturação do tensiômetro de alta capacidade.....	60

Figura 3.5 – Fissura na pedra porosa do tensiômetro (Fotografia ampliada 52 vezes).....	61
Figura 3.6 – Resultado da calibração do tensiômetro de alta capacidade	61
Figura 3.7– Furo na base da câmara de ensaios.	62
Figura 3.8– Pedestal acoplado a base da câmara de ensaios.	63
Figura 3.9 – Vista inferior do pedestal adaptado para acoplar o tensiômetro de alta capacidade.	63
Figura 3.10– Vista em corte do pedestal adaptado para acoplar o tensiômetro de alta capacidade.	64
Figura 3.11– Configuração final da base da câmara de ensaios.....	64
Figura 3.12– Esquema do funil de placa porosa adaptado de Libardi (1995).	66
Figura 3.13 – Corpo de prova envolto por plástico para reduzir a perda de umidade para o ambiente.	74
Figura 3.14 – Ensaio de compressão simples montado.....	74

Capítulo 4

Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo estudado.....	77
Figura 4.2 – Curva de compactação do Proctor normal	78
Figura 4.3 – Verificação da saturação do tensiômetro de alta capacidade.....	79
Figura 4.4 – Ajuste dos valores experimentais da curva de retenção obtidos pelos métodos do funil de placa porosa e papel filtro.	80
Figura 4.5 – Curva de retenção e pontos experimentais obtidos com o tensiômetro de alta capacidade.	81
Figura 4.6 – Gráfico com curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios “CD”	83
Figura 4.7 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação resultantes dos ensaios “CD”	84

Figura 4.8 – Envoltória de resistência referente à série de ensaios de compressão triaxial do tipo “CD”.....	84
Figura 4.9– Gráfico com curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios “CW _{PN} ”.....	85
Figura 4.10 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação resultantes dos ensaios “CW _{PN} ”.....	86
Figura 4.11 – Envoltória de resistência referente à série de ensaios de compressão triaxial do tipo “CW _{PN} ”.....	86
Figura 4.12 – Gráfico com curvas Tensão x Deformação da série de ensaios “CW _{residual} ”.....	87
Figura 4.13 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação da série de ensaios “CW _{residual} ”.....	88
Figura 4.14 – Envoltória de resistência referente à essa série de ensaios “CW _{residual} ”.....	88
Figura 4.15 – Gráficos de Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS1 ao CS5 da série de ensaios de repetibilidade.....	91
Figura 4.16 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS1 ao CS5 da série de ensaios de repetibilidade.....	91
Figura 4.17 – Gráficos Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS6 ao CS10 da série de ensaios de repetibilidade.....	92
Figura 4.18 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS6 ao CS10 da série de ensaios de repetibilidade.....	92
Figura 4.19 – Gráficos Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS11 ao CS16 da série de ensaios de repetibilidade.....	93
Figura 4.20 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS11 ao CS16 da série de ensaios de repetibilidade.....	93
Figura 4.21 – Resistência a compressão dos corpos de prova na série de ensaios com variação do grau de compactação e mesmo teor de umidade.....	95
Figura 4.22 – Evolução da sucção, medida com o TAC, no decorrer dos ensaios de compressão simples em corpos de prova com diferentes graus de compactação e mesmo teor de umidade.....	96

Figura 4.23 – Resistência a compressão dos corpos de prova na série de ensaios em corpos de prova com diferentes teores de umidade.	98
Figura 4.24 – Evolução da sucção, medida com o TAC, no decorrer dos ensaios de compressão simples em corpos de prova com diferentes teores de umidade.	98

Capítulo 5

Figura 5.1 – Resistência à compressão dos corpos de prova da série de ensaios de repetibilidade.	108
Figura 5.2 – Evolução da sucção, medida com o TAC, na série de repetibilidade dos ensaios de compressão simples.	109
Figura 5.3 – Características de compactação dos corpos de prova utilizados na série de ensaios com variação do grau de compactação.	110
Figura 5.4 – Evolução da sucção com o acréscimo da massa específica aparente seca dos corpos de prova.	112
Figura 5.5 – Evolução da resistência à compressão com o aumento do grau de compactação na série de ensaios com variação do grau de compactação.	113
Figura 5.6 – Evolução da sucção na série ensaios com variação do grau de compactação para o mesmo teor de umidade.	114
Figura 5.7 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção inicial, com o plano passando pela origem.	115
Figura 5.8 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção na ruptura, com o plano passando pela origem.	115
Figura 5.9 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção final, com o plano passando pela origem.	116
Figura 5.10 – Características de compactação dos corpos de prova utilizados na série de ensaios com trajetória de umedecimento e secagem.	117

Figura 5.11 – Teor de umidade <i>versus</i> sucção inicial e final no decorrer do ensaios de compressão simples da série com variação de teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.	119
Figura 5.12 – Medidas de sucção superpostas na curva de retenção do solo.	119
Figura 5.13 – Evolução da resistência à compressão simples com o teor de umidade – Corpos de prova moldados com massa específica aparente seca correspondente a 95% do grau de compactação do Proctor normal.....	120
Figura 5.14 – Evolução da sucção na série ensaios com variação do teor de umidade para o mesmo grau de compactação da amostra.....	121
Figura 5.15 – Determinação do ϕ_b para os valores obtidos a partir da resistência não drenada ($S_u = R_c / 2$) para a série de ensaios com variação do teor de umidade.....	123
Figura 5.16 – Envoltórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no início dos ensaios.....	124
Figura 5.17 – Envoltórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no pico de resistência dos ensaios.....	124
Figura 5.18 – Envoltórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no final dos ensaios.....	125
Figura 5.19 – Determinação do ϕ_b para os valores obtidos a partir da proposta de Fredlund et al (1978) para a série de ensaios com variação do teor de umidade.....	125
Figura 5.20 – Resistência não drenada ($RC/2$) em função do teor de umidade do solo e da sucção inicial.....	127
Figura 5.21 – Resistência não drenada ($RC/2$) em função do teor de umidade do solo e da sucção na ruptura.	128
Figura 5.22 – Resistência não drenada ($RC/2$) em função do teor de umidade do solo e da sucção final.	128
Figura 5.23 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção inicial.....	130
Figura 5.24 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção na ruptura.....	131

Figura 5.25 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção final.	131
Figura 5.26 – Resistência ao cisalhamento prevista pelo ajuste hiperbólico proposto por Vilar (2007) com os resultados das séries de ensaios de resistência a compressão simples superpostos.	133

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Métodos de medida de sucção (Vilar, 2006).....	15
Tabela 2.2 – Expressões para avaliação das tensões efetivas em solos não saturados	37

Capítulo 3

Tabela 3.1: Dimensões dos corpos de prova utilizados na pesquisa.....	58
---	----

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização	78
Tabela 4.2– Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água pelo método de Van Genuchten (1980).....	80
Tabela 4.3– Determinações da sucção com o Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC).....	81
Tabela 4.4 – Características dos ensaios e dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão triaxial.....	82
Tabela 4.5 – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão triaxial e suas respectivas média, desvio padrão e coeficiente de variação.	82
Tabela 4.6 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão triaxial tipo CD.....	84
Tabela 4.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão triaxial tipo “ CW_{PN} ”	86
Tabela 4.8 – Resumo dos resultados ensaios de compressão triaxial tipo $CW_{residual}$	89

Tabela 4.9 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples na série de repetibilidade.....	89
Tabela 4.10 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples na série de repetibilidade.....	90
Tabela 4.11 – Resumo dos resultados da série de repetibilidade dos ensaios de compressão simples.....	94
Tabela 4.12 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação.....	94
Tabela 4.13 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação.....	95
Tabela 4.14 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação dos corpos de prova.	96
Tabela 4.15 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.....	97
Tabela 4.16 – Índices físicos de moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.	97
Tabela 4.17 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples após o ajuste da umidade obtido numa trajetória de umedecimento e secagem.	97
Tabela 4.18 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade dos corpos de prova.	99

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Acréscimo da resistência com o aumento do grau de compactação.....	112
Tabela 5.2 – Valores de resistência à compressão simples para diferentes teores de umidade.	120

Tabela 5.3 – Resumo dos valores de ϕ_b obtidos para a série de ensaios com variação do teor de umidade..... 126

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados no ajuste hiperbólico..... 132

Lista de Abreviaturas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM - American Society for Testing and Materials.
- CD – Ensaio de Compressão Triaxial Consolidado Drenado.
- CS – Ensaio de Compressão Simples.
- CW_{PN} – Ensaio de Compressão Triaxial Consolidado com Umidade Constante em Amostras Não Saturadas com Teor de Umidade Ótimo do Proctor Normal.
- $CW_{residual}$ – Ensaio de Compressão Triaxial Consolidado com Umidade Constante em Amostras Não Saturadas com Teor de Umidade Residual.
- FPP – Ensaio de Funil de Pedra Porosa.
- NBR – Norma Brasileira.
- PF – Ensaio de Papel Filtro.
- R_c – Resistência à Compressão.
- TAC – Tensiômetro de Alta Capacidade.
- VG1 – Ajuste da primeira parte da curva de retenção pelo método de Van Genutchen.
- VG2 – Ajuste da segunda parte da curva de retenção pelo método de Van Genutchen.

Lista de Símbolos

Símbolos do alfabeto latino

- a e b : Parâmetros de ajuste da função hiperbólica (Vilar, 2007).
- A : Resultante das forças de atração.
- a_a : Parte da área total ocupada por ar.
- a_m : Área de contato ocupada pelos sólidos.
- a_w : Parte da área total ocupada pela água.
- B : Parâmetro de Skempton.
- c, c' : Coesão total e efetiva.
- c_{ult} : Coesão máxima ou coesão última.
- C_v : Coeficiente de variação.
- D_p : Desvio padrão.
- e : Índice de vazios.
- GC : Grau de compactação.
- GC_{mold} : Grau de compactação atingido na moldagem.
- h : Altura dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de laboratório.
- h_m : Sucção mátrica.
- h_s : Solução de soluto.
- I_p : Índice de plasticidade.
- m, n : Parâmetros de forma da curva de retenção (Van Genuchten, 1980).
- $M_{cp \text{ pós Traj.}}$: Massa do corpo de prova após a trajetória de umedecimento.
- M_{cp} : Massa total do corpo de prova.

- n : Porosidade.
- p'' : Deficiência de pressão neutra.
- p'' : pressão neutra negativa tomada como um valor positivo.
- P_{atm} : Pressão atmosférica.
- p_m'' : Sucção mátrica.
- p_s'' : Sucção de soluto.
- R : Resultante das forças de repulsão.
- R^2 : Coeficiente de determinação.
- R_c : Resistência à compressão.
- S : Sucção (Vilar, 2007).
- S_r, S : Grau de saturação.
- $u_a - u_w$: Sucção matricial.
- u_a : Pressão de ar.
- u_w : Pressão de líquido ou pressão na água.
- V_{CP} : Volume do corpo de prova.
- w_{final} : Teor de umidade da amostra no final do ensaio.
- $w_{inicial}$: Teor de umidade da amostra no início do ensaio.
- w_L, w_P : Limites de liquidez e de plasticidade.
- $w_{ót}$: Teor de umidade ótimo.
- w_{papel} : Teor de umidade do papel filtro.
- $w_{pós\ Traj.}$: Teor de umidade do corpo de prova após a trajetória de umedecimento.
- w_r, w_{res}, w_s e w_{sat} : Teor de umidade residual e de saturação.
- w : Teor de umidade gravimético.
- z_A, z_B : Alturas de referência do funil de placa porosa.

Símbolos do alfabeto Grego

- ψ : Sucção total.
 - α : Parâmetro de forma da curva de retenção (Van Genuchten, 1980).
 - β : Fator de ligação, que é a medida do número de ligações sob tensão.
 - β : Fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente.
 - χ_m : Parâmetro de tensão efetiva para sucção mátrica.
 - χ_s : Parâmetro de tensão efetiva para a solução de soluto.
 - χ : Parâmetro que varia de 0 a 1.
 - χ : Parâmetro relacionado com o grau de saturação.
 - ε_{final} : Deformação axial no final do ensaio.
 - $\varepsilon_{ruptura}$, ε_{rupt} : Deformação axial no instante da ruptura.
 - θ_w ou θ : Teor de umidade volumétrico.
 - ϕ , ϕ' : Ângulo de atrito interno total e efetivo.
 - ϕ_b : Ângulo que indica a razão do aumento da resistência em função da sucção em um solo não saturado.
-
- $\phi_{grãos}$: Diâmetro dos grãos e das partículas do solo.
 - $\phi_{Gravit.}$: Potencial gravitacional do solo.
 - $\phi_{matric.}$: Potencial matricial do solo.
 - $\phi_{osmót.}$: Potencial osmótico do solo.
 - $\phi_{Pneum.}$: Potencial pneumático do solo.
 - $\phi_{total.}$: Potencial total do solo.
 - π : Sucção osmótica.
 - ρ : Massa específica.
 - $\rho_{d95\%}$: Massa específica aparente seca do solo referente ao grau de compactação de 95%.

- $\rho_{dmáx}$: Massa específica aparente seca máxima.
- ρ_d : Massa específica aparente seca
- ρ_s : Massa específica dos sólidos.
- ρ_w : Massa específica da água.
- $\sigma - u_a$: Tensão normal líquida.
- $\sigma - u_w$: Sucção.
- σ, σ' :: Tensor de tensões totais e efetivas.
- σ_1, σ_3 : Tensões principais.
- $\sigma_1 - \sigma_3$: Diferença de tensões principais.
- $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: Tensão cisalhante nos planos XY, XZ e YZ.
- ψ : Sucção matricial.
- ψ : Sucção total.
- ψ_{final} : Sucção no final do ensaio.
- $\psi_{inicial}$: Sucção no início do ensaio.
- $\psi_{ruptura}$: Sucção na ruptura do corpo de prova.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO.....	6
2.2. SUCÇÃO NO SOLO	9
2.2.1. Curva de Retenção	10
2.3. TÉCNICAS PARA MEDIDA DE SUCÇÃO NO SOLO.....	14
2.3.1. Técnica do Papel Filtro	16
2.3.1.1. Vantagens e desvantagens da técnica do papel filtro.....	18
2.3.2. Técnica da Translação de Eixos	20
2.3.2.1. Vantagens e desvantagens da técnica de translação de eixos	21
2.3.3. Tensiômetros	22
2.3.3.1. Tensiômetros de alta capacidade (TAC).....	23
2.3.3.2. Tempo de resposta do tensiômetro de alta capacidade (TAC).....	25
2.3.3.3. Cavitação do sistema de medidas de sucção.....	27
2.3.3.4. Saturação do tensiômetro de alta capacidade (TAC).....	30
2.3.3.5. Calibração do tensiômetro de alta capacidade	34
2.4. RESISTÊNCIA DOS SOLOS NÃO SATURADOS.....	36
2.4.1. Proposta de Bishop (1959).....	38
2.4.2. Proposta de Fredlund et al. (1978).....	41
2.4.3. Ensaio de Resistência com Medida de Sucção	49
2.4.4. Previsão da Resistência em Solos Não Saturados.....	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1. CARACTERIZAÇÃO, PROCTOR NORMAL E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	57

3.2.	MONTAGEM, SATURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TENSIÔMETRO DE ALTA CAPACIDADE (TAC).....	58
3.3.	ADAPTAÇÃO DA CÂMARA DE ENSAIOS.....	62
3.4.	TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO	64
3.4.1.	<i>Técnica do Funil de Pedra Porosa.....</i>	65
3.4.2.	<i>Técnica de Papel Filtro</i>	66
3.4.3.	<i>Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC).....</i>	68
3.5.	AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO	69
3.6.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	70
3.6.1.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Triaxial.....</i>	71
3.6.1.1.	Ensaio de resistência à compressão triaxial consolidado drenado – (CD) – Solo Saturado.....	71
3.6.1.2.	Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade constante (CW_{PN}) - Solo não saturado compactado e ensaiado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal.....	72
3.6.1.3.	Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade residual ($CW_{residual}$) - Solo não saturado compactado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal e ensaiado com teor de umidade residual.....	72
3.6.2.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i>	73
3.6.2.1.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série de repetibilidade ...	74
3.6.2.2.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série com variação da massa específica aparente seca do solo (Grau de compactação).....	75
3.6.2.3.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série com variação do teor de umidade após aplicação de trajetória de umedecimento.....	75
4.	RESULTADOS.....	77
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	77
4.2.	ENSAIO DE PROCTOR NORMAL	78
4.3.	SATURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TENSIÔMETRO DE ALTA CAPACIDADE (TAC).....	79
4.4.	CURVA DE RETENÇÃO	79

4.5.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	81
4.5.1.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Triaxial.....</i>	81
4.5.1.1.	Ensaio de resistência à compressão triaxial consolidado drenado – Solo saturado	83
4.5.1.2.	Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade constante – (CW_{PN}) – Solo não saturado compactado e ensaiado com teor de umidade ótimo do Proctor normal	85
4.5.1.3.	Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade residual ($CW_{residual}$) - Solo não saturado compactado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal e ensaiado com teor de umidade residual	87
4.5.2.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples com Medida direta de Sucção</i>	89
4.5.2.1.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série de repetibilidade...	89
4.5.2.2.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série de ensaios com umidade constante e diferentes valores de massa específica aparente seca.....	94
4.5.2.3.	Ensaio de resistência à compressão simples – Série de ensaios com variação do teor de umidade dos corpos de prova e massa específica aparente seca do solo constante.....	96
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
5.1.	CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E CURVA DE RETENÇÃO	101
5.2.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	103
5.2.1.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Triaxial.....</i>	103
5.2.1.1.	Ensaio de resistência à compressão triaxial em solo saturado (CD)....	103
5.2.1.2.	Ensaio de resistência à compressão triaxial em solo não saturado com teor de umidade ótimo (CW_{PN})	104
5.2.1.3.	Ensaio de compressão triaxial não saturados com teor de umidade residual ($CW_{residual}$)	106
5.2.2.	<i>Série de Repetibilidade dos Ensaio de Compressão Simples....</i>	107
5.2.3.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples - Série com Variação do Grau de Compactação e Teor de Umidade Constante.....</i>	110

5.2.4. <i>Ensaio de Compressão Simples - Série com Variação do Teor de Umidade</i>	117
5.2.5. <i>Ajuste Hiperbólico</i>	132
6. CONCLUSÃO	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos solos tradicional é baseada nos conceitos de Terzaghi. Estes conceitos foram desenvolvidos a partir de solos formados em regiões de clima temperado e frio, onde a ocorrência de solos saturados é abundante. Regiões de clima árido e semi-árido, se caracterizam por possuírem taxa de evaporação superior a de infiltração e a maior parte dos solos dessas regiões não atinge a condição de saturação durante a vida útil de diversas obras nelas construídas. Desta forma pode-se afirmar que o clima é um fator fundamental não somente na formação do solo, mas também no comportamento das obras de engenharia neles construídos.

Os solos não saturados estão presentes, em grande parte das obras de engenharia nessas regiões, contudo não se limitam a elas. Solos compactados, por exemplo, são uma opção comum em diversas soluções geotécnicas e, desde que não associados a obras destinadas a reserva de água, poderão manter a sua condição de não saturação ao longo da vida útil da obra, independente da região em que ela tenha sido construída.

A condição de não saturação enseja diferentes abordagens dos problemas geotécnicos, como a capacidade de carga de fundações, os empuxos de terra e a estabilidade de taludes, pois, pode-se tirar partido do comportamento diferenciado dos solos nessas condições. Dessa forma, situações que envolvem ruptura constituem uma classe de problemas que demandam o conhecimento da resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

Os solos não saturados diferentemente dos solos saturados, não são compostos apenas por sólidos e água. Nos solos não saturados são consideradas mais duas fases que são o ar e uma espécie de película de água denominada por membrana contrátil, esta última considerada desprezível em termos volumétricos. E é exatamente a introdução dessas duas fases que dificulta a compreensão dos solos não saturados em termos de tensões efetivas.

A sucção dos solos é um parâmetro que está intimamente ligado às tensões efetivas e por consequência à resistência ao cisalhamento. A sucção no solo é composta pelas parcelas matricial ou mátrica, que dependem dos efeitos de adsorção e capilaridade, e a osmótica que dependem da presença dos solutos na água presente no solo.

No decorrer dos anos, tem-se observado o emprego de muitos esforços para compreender os processos envolvidos na medida da sucção em solos. Inúmeros equipamentos vêm sendo desenvolvidos e adaptados. Esses equipamentos se dividem em duas classes: os que fazem medidas indiretas e os que fazem medidas diretas de sucção. Os equipamentos que fazem medidas diretas de sucção baseiam-se na medida da quantidade de energia da água nos poros. As medidas indiretas, por outro lado, baseiam-se na calibração de um parâmetro mais prontamente disponível e a sucção do solo.

Até recentemente as medidas de diretas de sucção no solo eram limitadas pela cavitação do sistema de medidas, podendo-se medir no máximo valores próximos de 100kPa. Ridley e Burland (1993) desenvolveram o Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) que tem como princípio tirar partido da resistência à tração da água. A partir daí, os limites de medida de sucção com o uso de tensiômetros foram superados e atualmente podem atingir valores da ordem de 1500kPa.

A determinação experimental da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado repousa em diferentes técnicas que se valem de alternativas para imposição e controle da sucção atuante nos corpos de prova. Dentre estas, a mais comum e uma das mais

utilizadas, é a técnica de translação de eixos, em que se procura controlar tanto a pressão na água, quanto a pressão no ar presente no solo. Além destas, outras técnicas de ensaios vem sendo empregadas para a determinação da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, onde ao invés de impor a sucção, mede-se a sucção diretamente nos corpos de prova no decorrer dos ensaios de resistência.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da sucção na resistência a compressão simples de um solo compactado, acompanhando-se a evolução da sucção com o uso de um tensiômetro de alta capacidade (TAC).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um solo não saturado caracteriza-se pela ocorrência de ar em seus vazios de sorte que o modelo bifásico, onde se leva em consideração o sistema solo-água proposto pela mecânica dos solos tradicional, não pode ser considerado.

Um elemento de solo não saturado deve ser compreendido como um sistema trifásico, constituído por uma fase sólida (grãos e partículas minerais), uma fase líquida (composta geralmente por água) e uma fase gasosa (composta por ar). Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram a introdução de uma quarta fase, que é uma fase independente, que se refere à interface ar-água, chamada de membrana contrátil, conforme mostrado na Figura 2.1. Essa membrana possui uma propriedade chamada tensão superficial que promove a capacidade de exercer uma tensão de tração, fruto de forças intermoleculares atuantes dentro do sistema ar-água. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), em termos de massa e volume, a membrana contrátil pode ser considerada como parte líquida do sistema, sem acrescentar erros significativos.

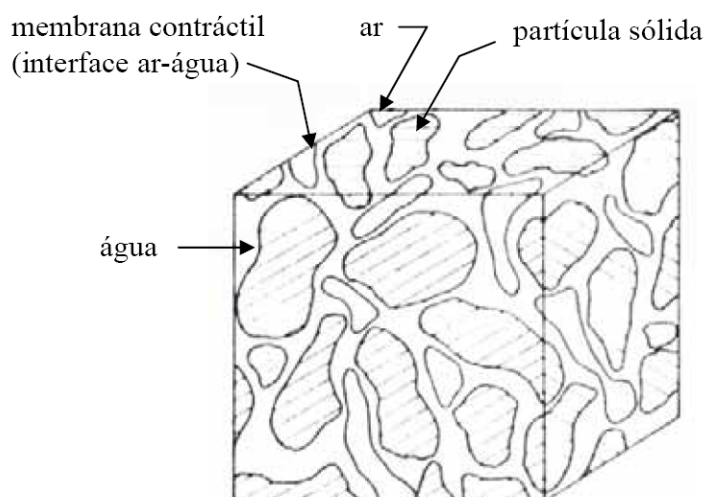


Figura 2.1– Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.1. DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

De acordo com Marshall e Holmes (1981), quando um trabalho é realizado sobre a água, sob condições específicas, sua energia potencial é alterada em uma quantidade igual ao trabalho realizado. A variação da energia potencial da água em consideração, em relação a um estado padrão de referência adotado, é denominada de Potencial da Água no Solo. O estado de energia da água no solo como a soma dos componentes da energia cinética e a potencial. Em relação à água no solo, sabe-se que seu fluxo através do sistema poroso ocorre em baixas velocidades, assim a parcela da energia cinética é quase sempre desprezível, se comparada com os valores de energia potencial. Desta forma o estado de energia da água no solo se caracteriza apenas pela energia potencial.

O potencial total da água no solo é definido pela Sociedade Internacional de Ciência de Solo, como a quantidade de trabalho realizado para transportar, reversa e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura, a uma elevação específica até a água presente nos interstícios do solo, estando o reservatório submetido à pressão atmosférica.

A água do solo está sujeita a um conjunto de esforços que incluem a pressão de água na posição considerada, a interação com a matriz sólida, a presença de solutos na água e a sua posição em relação a um referencial. A influência dessas forças é tratada como o trabalho reversível por unidade de massa para transferir água do solo para um reservatório de água pura, tomada como padrão.

O potencial da água em um solo é constituído principalmente das parcelas de potencial pneumático, gravitacional, osmótico e matricial, conforme apresentado na Equação 2.1. Além destes, pode-se citar outros de menor relevância no comportamento geotécnico dos solos não saturados, por exemplo, os potenciais de consolidação, cinético e térmico.

$$\phi_{Total} = \phi_{pneum.} + \phi_{gravit.} + \phi_{osmót.} + \phi_{matric.} \quad \text{Equação 2.1}$$

Em que:

$\phi_{Total}:$	<i>Potencial Total</i>
$\phi_{pneum.}:$	<i>Potencial Pneumático</i>
$\phi_{grav.}:$	<i>Potencial Gravitacional</i>
$\phi_{osmót.}:$	<i>Potencial Osmótico</i>
$\phi_{matric.}:$	<i>Potencial Matricial</i>

- O **potencial pneumático** é originado a partir da diferença de pressão externa que atua no solo e a pressão atmosférica (adotada como padrão). Tem especial importância quando se consideram os ensaios de placa de pressão ou de técnicas de translação de eixos, que serão apresentadas adiante.

- O **potencial gravitacional** equivale à energia potencial do campo gravitacional que é medido a partir de um referencial de posição.

- O **potencial osmótico** deriva da diferença de concentração entre a água padrão e a água presente nos interstícios do solo. Essa diferença é originada pela presença de “solutos”, por

exemplo, sais minerais e matéria orgânica. A água tende a hidratar as moléculas dos solutos, sendo necessário realizar trabalho sobre o sistema para retirá-la desta interação molecular. De acordo com Jiménez Salas (1993a) o potencial osmótico ocorre devido à água nos poros possuírem mais sais em dissolução, e exercerem uma sucção osmótica para conduzir a água do solo no estado original para o estado padrão o qual corresponde a água pura. De acordo com Fonseca (1991) a sucção osmótica tem influência significativa em solos finos, a depender do tipo e concentração do soluto presente. Em solos não saturados é comum desconsiderar esta parcela do potencial da água no solo, admitindo-se que o comportamento mecânico desses solos é governado apenas pelo potencial matricial. Blight (1983) afirma que o potencial osmótico não tem influência nas propriedades de resistência do solo, mas é fundamental no comportamento deformacional do solo. Tibana (1991) coloca que o potencial osmótico ou sucção osmótica é oriundo da diferença de concentração de sais existentes na água dos solos que se estabelece nos lados opostos de uma membrana seletiva, sendo considerado somente no caso em que esta diferença se faça presente.

- O **potencial matricial** é definido como a energia interna da água do solo por unidade de massa de solo. De acordo com Hillel (1971), o potencial matricial do solo é um potencial de pressão que resulta do efeito combinado da ação das forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas minerais ou matriz que constituem o solo.

Segundo Lier et al. (2004) quanto mais seco o solo, maior a energia necessária para retirar a água presente nos poros, ou seja, o solo retém a água nos poros com forças cujas intensidades aumentam conforme a quantidade de água diminui. Essas forças se manifestam devido à presença da matriz do solo que são denominadas por forças mátricas. As forças mátricas se subdividem em forças capilares, que são responsáveis pela retenção de água nos

microporos da fração grossa do solo e forças de adsorção que se responsabilizam pela retenção da água nas superfícies das partículas do solo. Segundo esses autores, é praticamente impossível quantificar a contribuição de cada um desses tipos de força, sendo possível dizer em termos qualitativos que logo após a drenagem livre de um solo saturado as forças capilares são dominantes e que, à medida que o solo seca a adsorção adquire maior importância.

2.2. SUCCÃO NO SOLO

A sucção no solo pode ser definida como a pressão manométrica negativa, que deve ser aplicada a um reservatório de água pura de forma que se mantenha o equilíbrio, através de uma membrana semipermeável, entre a água do reservatório e a água do solo.

Ao admitir que não haja nenhum processo de adensamento e que o ar existente nos poros do solo está interligado com a atmosfera, as parcelas correspondentes aos potenciais pneumático e gravitacional podem ser desprezadas no âmbito geotécnico. A partir daí pode-se afirmar que o potencial total da água no solo é influenciado basicamente pelas parcelas de potencial osmótico e matricial, que são apresentados como valores negativos.

Os potenciais matricial e osmótico podem ser tratados por pressões positivas que são denominadas respectivamente por sucção matricial e sucção osmótica, sendo a sucção total a soma dessas duas parcelas. A Figura 2.2 ilustra os conceitos de sucção Total, Matricial e Osmótica. O contato do solo com uma membrana semipermeável permite apenas o fluxo da água pura, impedindo o fluxo de solutos, nesta situação é medida a sucção total. Já a membrana permeável, permite o fluxo tanto da água quanto dos solutos, o que torna possível a determinação da sucção matricial. A sucção osmótica é obtida pela diferença entre a sucção total e matricial.

De acordo com Botelho et al. (2000), a sucção matricial é definida quantitativamente como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água existente no solo e a sucção osmótica deve-se a concentração de sais dissolvidos na água do solo. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a importância da sucção osmótica na geotecnia repousa nos solos expansivos, onde a concentração de sais tem considerável influência, entretanto na prática é comum considerar a sucção total aproximadamente igual à matricial.

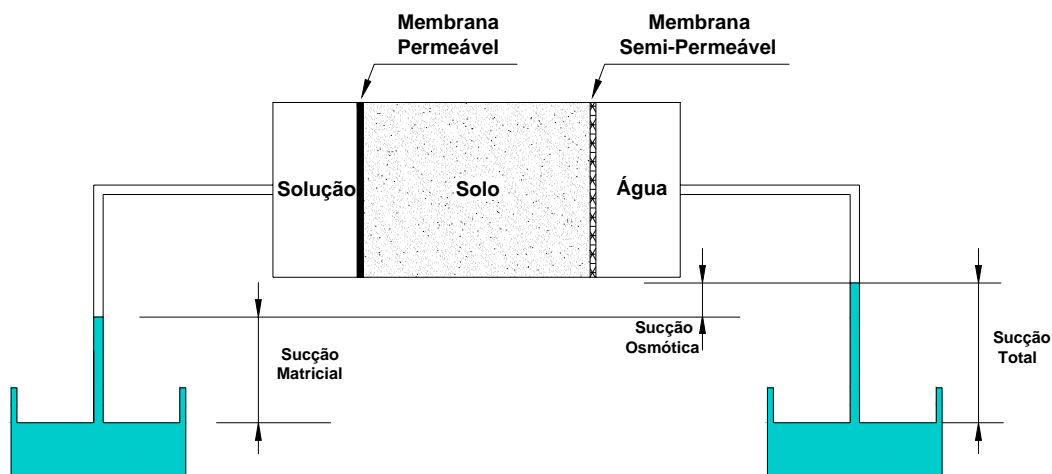


Figura 2.2– Representação conceitual de sucção total, matricial e osmótica

2.2.1. Curva de Retenção

Ao relacionar graficamente o teor de umidade volumétrico (θ), o teor de umidade gravimétrico (w) ou o grau de saturação (S_r) com a sucção, obtém-se a chamada curva característica ou como também é conhecida curva de retenção de água do solo.

De acordo com Vanapalli et al. (1999), a curva de retenção pode ser dividida em três estágios (Figura 2.3). O primeiro estágio denominado de zona de efeito limite, que predomina até o valor de entrada de ar, que corresponde a uma condição onde praticamente todos os poros estão preenchidos de água. O segundo estágio ocorre na curva de drenagem ou de sorção, que também pode ser denominada como fase de transição. Neste estágio o fluxo de

água ocorre na fase líquida e por fim a terceira fase, denominada por fase residual de drenagem. Nessa fase a continuidade da água nos vazios é reduzida e descontínua, além dos acréscimos de sucção levar o solo a mínimas variações no grau de saturação do solo.

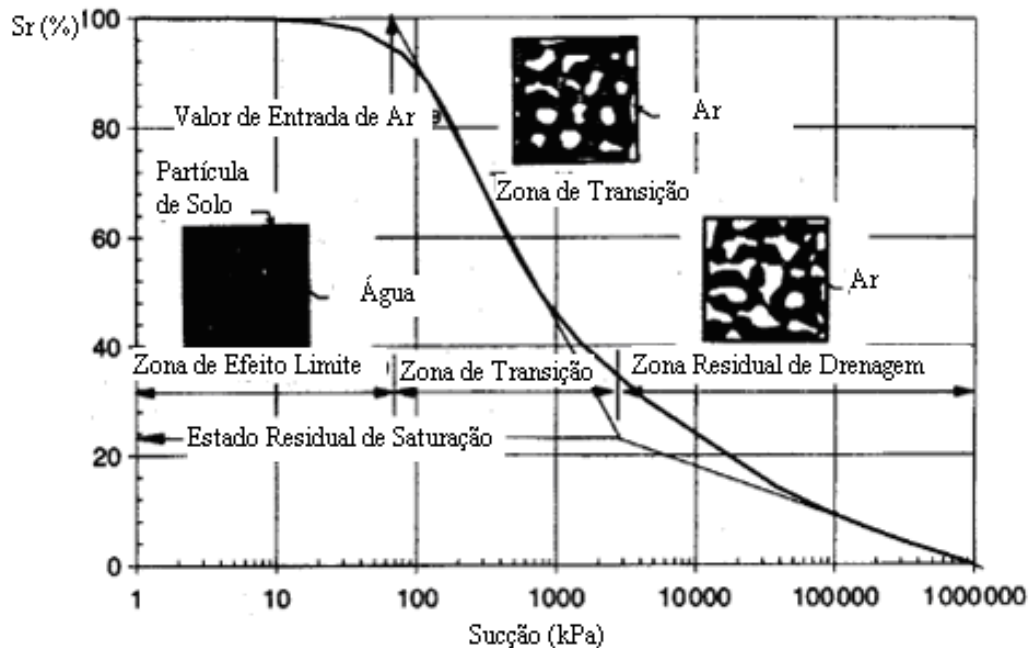


Figura 2.3 – Curva de retenção típica mostrando as zonas de drenagem (Vanapalli et al., 1999)

A relação sucção-umidade, por meio da curva de retenção, expressa a influência do volume e da distribuição dos poros, bem como a adsorção e a estrutura do solo, sobre a quantidade de água contida neste. Para baixos valores de sucção o efeito capilar e a distribuição dos poros determinam a quantidade de água presente no solo. Já para valores maiores de sucção, a textura e a superfície específica têm maior influência que na quantidade de água absorvida pelo solo.

Aguilar (1990) chama a atenção que a construção da curva característica em função do teor de umidade volumétrico (θ), apresenta o problema de que, variações de sucção produzem deformações no solo. Logo o volume total da amostra não é constante durante o ensaio. Assim o autor afirma que a definição correta da curva característica exige a

determinação da variação volumétrica do solo em cada estágio de sucção, o que complica notavelmente o ensaio, visto que a medida da variação do volume em uma amostra não saturada requer técnicas complexas. O autor sugere que os problemas de engenharia geotécnica relacionados à resistência sejam referenciados a umidade gravimétrica e não à volumétrica.

A relação entre sucção e teor de umidade pode ser influenciada por inúmeros fatores, e as diferenças originadas pela influência desses fatores é denominada histerese. Por exemplo, conforme apresentado na Figura 2.4, uma curva de retenção foi obtida com a trajetória de umedecimento e secagem para o mesmo solo, entretanto as curvas não se sobrepuseram. Essa diferença entre as curvas obtidas por métodos diferentes é denominada histerese. Assim a histerese da curva de retenção de um solo pode ser atribuída além do processo de umedecimento e secagem, a fatores como tipo de solo (composição granulométrica), teor de umidade na moldagem do corpo de prova, efeito da estrutura do solo, fenômenos de expansão e ressecamento, histórico de tensões do solo e outros.

Hillel (1971), Presa (1982) e outros autores, verificaram experimentalmente que a curva característica é dependente da trajetória de secagem e umedecimento e chegaram à conclusão que de maneira geral a quantidade de água liberada pelo solo no processo de secagem é superior a retida no processo de umedecimento (Figura 2.4).

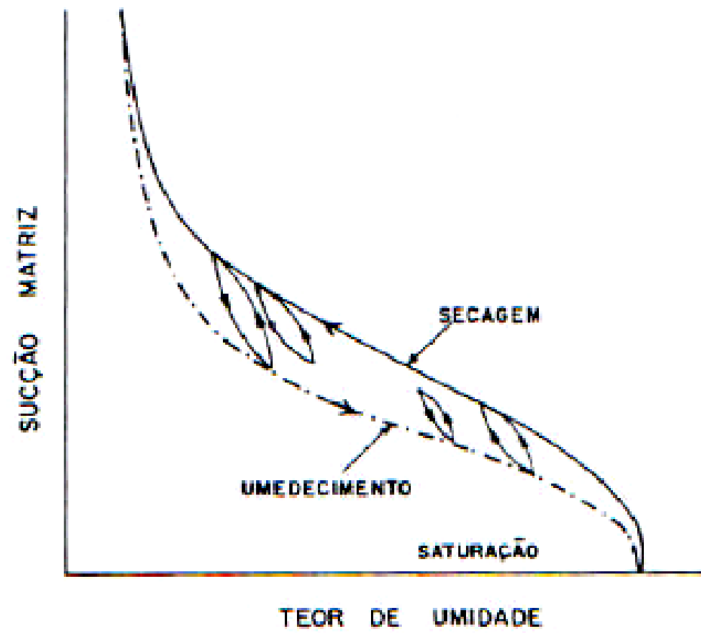


Figura 2.4 – Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971)

Quanto à composição granulométrica do material, em geral, quanto maior for a quantidade de argila no solo, maior será o teor de umidade para a mesma sucção. Isso ocorre devido à afinidade entre as partículas de argila e a água intersticial. Conforme apresentado na Figura 2.5, quanto mais argila no solo, mais aberta a curva de retenção, pois a distribuição dos poros grãos é mais heterogênea.

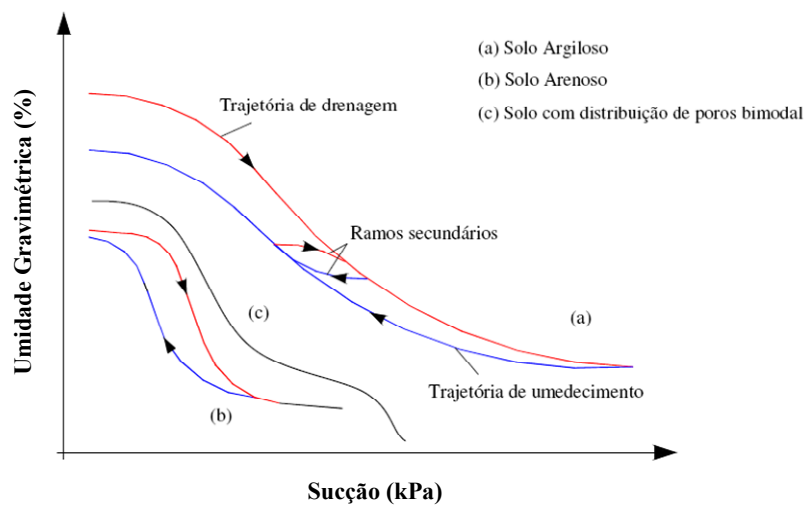


Figura 2.5 – Curva de retenção típica de diferentes tipos de solo (Rodrigues, 2007)

A composição mineralógica tem forte influência na forma da curva de retenção. Diferentes argilominerais apresentam diferentes forças de adsorção, que são função da natureza da superfície das partículas, do tamanho das partículas e dos tipos de cátions trocáveis.

Quanto ao ajuste das curvas de retenção, na literatura são encontradas inúmeras funções para este fim. Essas funções são predominantemente empíricas e a mínima variação dos seus parâmetros pode originar significativas variações na forma da curva de retenção. Dentre as equações destacam-se as funções de Van Genuchten (1980) e a de Fredlund e Xing (1994).

2.3. TÉCNICAS PARA MEDIDA DE SUCCÃO NO SOLO

No decorrer dos anos, têm-se observado o emprego de muitos esforços para compreender os processos envolvidos na medida de sucção dos solos. Inúmeros equipamentos vêm sendo desenvolvidos e adaptados. Esses equipamentos se dividem em duas classes: os que fazem medidas indiretas e os que fazem medidas diretas de sucção.

Os equipamentos que fazem medidas diretas de sucção baseiam-se na medida da quantidade de energia da água nos poros. Os métodos diretos têm a vantagem de serem capazes de medir pressões de água positivas ou negativas. As medidas diretas de sucção no solo são realizadas geralmente fazendo-se uso de um tensiômetro. As medidas indiretas, por outro lado, baseiam-se na calibração de um parâmetro mais prontamente disponível e a sucção do solo.

De acordo com Rahardjo e Leong (2006) a medida de sucção no solo é essencial quando se trata de solos não saturados, pois a sucção afeta direta ou indiretamente as

propriedades de engenharia. Os autores chamam a atenção que a sucção é mais afetada pelas condições climáticas do que condições de carregamento, diferentemente dos solos saturados.

Na Tabela 2.1 são mostradas algumas das técnicas utilizadas para medida de sucção dos solos com suas respectivas faixas de medidas e tempo de equilíbrio. Nesta revisão bibliográfica será dado destaque a técnica de medida de sucção por translação de eixos, por ser a técnica uma das técnicas mais difundidas no âmbito das medidas de sucção em solos não saturados, além das técnicas de papel filtro e tensiometria, em particular o Tensiômetro de Alta Capacidade, desenvolvido por Ridley e Burland (1993), no Imperial College, pois farão parte do desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 2.1 – Métodos de medida de sucção (Vilar, 2006).

Método de Medida / Tipo de Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
BLOCOS POROSOS (MATRICIAL)	10 A 1000	<ul style="list-style-type: none"> • Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como o gesso, a fibra de vidro e etc., bem como da resistência elétrica (ohms x Sucção); • Desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções; • Tempo de Equilíbrio: Semanas.
EQUILÍBRIO DA FASE VAPOR (TOTAL)	TODA A FAIXA ACIMA DE 400	<ul style="list-style-type: none"> • Solução com concentração conhecida; Umidade relativa; sucção total; • Amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso; • Tempo de equilíbrio demorado.
EXTRATO DA SOLUÇÃO DO SOLO (OSMÓTICA)	TODOS OS VALORES	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade elétrica do extrato da solução; • Concentração de solutos; • Extrato + psicrômetros: Resultados precários
FUNIL DE PEDRA POROSA (MATRICIAL)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> • Sucção aplicada diretamente à amostra • Indicado para determinar baixas sucções (Libardi, 1995); Tempo de equilíbrio: Horas.
MEMBRANA DE PRESSÃO	ATÉ 10000	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica da translação de eixos; • Emprega membrana de celulose. • Tempo de equilíbrio: Dias
PAPEL FILTRO COM E SEM CONTATO (MATRICIAL/TOTAL)	30 A 30000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende do contato com o solo, que, por sinal deve ser garantido; • Necessita da calibração do papel, • Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos/ • Pesagem com precisão de 0,0001g; • Tempo de equilíbrios de 7 a 30dias.

Tabela 2.1 – Métodos de medida de sucção (Vilar, 2006).

PLACA DE PRESSÃO (MATRICIAL)	0 A 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica da translação de eixos; • Depende da pressão de entrada de ar da pedra porosa; • Continuidade da fase ar; • Tempo de equilíbrio: Horas.
PRINCÍPIOS OSMÓTICOS (MATRICIAL)	200 A 1600 (PEG 20000)	<ul style="list-style-type: none"> • Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; • Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20000; • Útil para instalar e controlar sucção em ensaios. • Tempo de Equilíbrio: Horas.
PSICRÔMETROS (TOTAL/OSMÓTICA)	100 A 8000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; • Sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (Confiabilidade precária) (Fredlund; Rahardjo, 1993). Tempo de Equilíbrio: Minutos
TENSIÔMETRO PADRÃO (MATRICIAL)	0 A 100	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de resposta: Depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida; • Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos. • Tempo de Equilíbrio: Minutos
TENSIÔMETRO DE ALTA CAPACIDADE (TAC) * (MATRICIAL)	0 A 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Medem sucção abaixo de -1atm, até uma sucção de 1500kPa; • Tiram partido da elevada resistência à tração da água (Ridley; Burland, 1993) e tem curto tempo de resposta.

- Este será o tensiômetro utilizado para desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1. Técnica do Papel Filtro

Esta técnica baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com certa umidade é colocado em contato com o papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema atinja o equilíbrio. De acordo com Swarbrick (1995) esta técnica tem sido uma alternativa simples, econômica, rápida, precisa e versátil, se comparada com outros procedimentos laboratoriais.

De acordo com Marinho (1994), o método do papel filtro tem se mostrado eficiente na medição da sucção total e matricial dos solos. É utilizado na determinação das características de retenção de água nos solos tanto nos processos de secagem como de umedecimento.

A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do solo para o papel filtro. Essa transferência pode ocorrer por ação capilar ou através de vapor e é determinada pela interação entre o papel filtro e o solo. A Figura 2.6 mostra as duas configurações do ensaio de papel filtro.

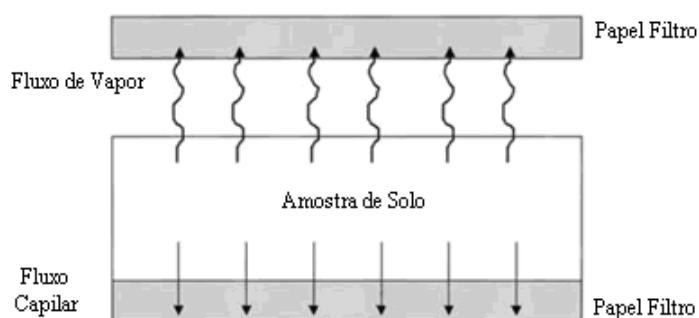


Figura 2.6 – Configurações do ensaio de papel filtro (Marinho e Oliveira, 2006)

Na primeira configuração do ensaio, o papel filtro é deixado afastado do solo, ou seja, o fluxo é dado através de vapor. As moléculas de água tendem a escapar da água do poro vencendo as forças capilares no solo e eventualmente as forças osmóticas que agem devido à presença de sais. O espaço de ar deixado entre o solo e o papel filtro fornece uma barreira para os sais, o que impede seu fluxo juntamente com o vapor de água. Neste caso, mede-se a sucção total (ψ), uma vez que estará incorporando as forças osmóticas e capilares que retêm as moléculas de água. Na segunda configuração do ensaio, o fluxo capilar ocorre das partículas de solo diretamente para as fibras do papel filtro, sem que a água perca continuidade. O fluxo capilar implica uma interação entre o papel filtro e a água do poro. Quando o fluxo ocorre por capilaridade a sucção matricial é medida. Neste caso, o componente osmótico não age como força adicional que impede o fluxo de água para o papel filtro.

O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém esses correspondem a teores de umidade diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da sucção correta.

A calibração do papel consiste em fazer com que o papel filtro alcance o equilíbrio com uma sucção conhecida mediante a utilização de diferentes métodos (placa de sucção, câmara de pressão, dessecador de vazios com soluções, entre outros). Marinho e Oliveira (2006) sugerem que antes da realização dos ensaios de papel filtro, que os mesmos sejam calibrados, a fim de assegurar a precisão e confiabilidade do método.

2.3.1.1. Vantagens e desvantagens da técnica do papel filtro

Dentre as vantagens apresentadas por esta técnica, Marinho e Pereira (1998) destacam a possibilidade de medições de sucção dos solos até cerca de 30000kPa. De acordo com McQueen e Miller (1968) esta técnica oferece versatilidade, economia e precisão similar ou superior a outros métodos convencionais além da simplicidade de execução. Dentre outras vantagens é fundamental destacar a possibilidade de se obter a sucção osmótica pela diferença entre a sucção total e matricial.

Greacen et al. (1987) mostrou que grande parte do volume de água é absorvida nos primeiros minutos e a partir daí, é lentamente absorvida e atinge o equilíbrio em aproximadamente 7 (sete) dias. Baseados em resultados experimentais obtidos em laboratório, é aconselhável deixar que a absorção ocorra por um período de 10 (dez) dias.

A principal desvantagem desta técnica reside na busca do contato entre o papel filtro e o solo. Dentre outras, destacam-se a necessidade do manuseio delicado do papel filtro e a precisão necessária na pesagem em uma balança, normalmente da ordem de 0,0001g. O tempo de resposta para medida de sucção total é da ordem de 30 dias, o que configura uma desvantagem do método.

Na Figura 2.7 são mostrados resultados obtidos por Marinho (1994) onde foram ensaiadas amostras de um solo argiloso compactado estaticamente. Uma das amostras foi compactada usando água pura como fluido e a outra usando uma solução com concentração de 0,1 molares de NaCl.

Marinho (1994) conclui que as medições de sucção matricial coincidem nas amostras com e sem solução salina. Já os resultados em termos de sucção total indicam uma diferença em relação à sucção matricial. Conforme se sabe a diferença entre a sucção total e a matricial é a sucção osmótica. Observa-se que mesmo na amostra onde apenas água foi utilizada existem sais.

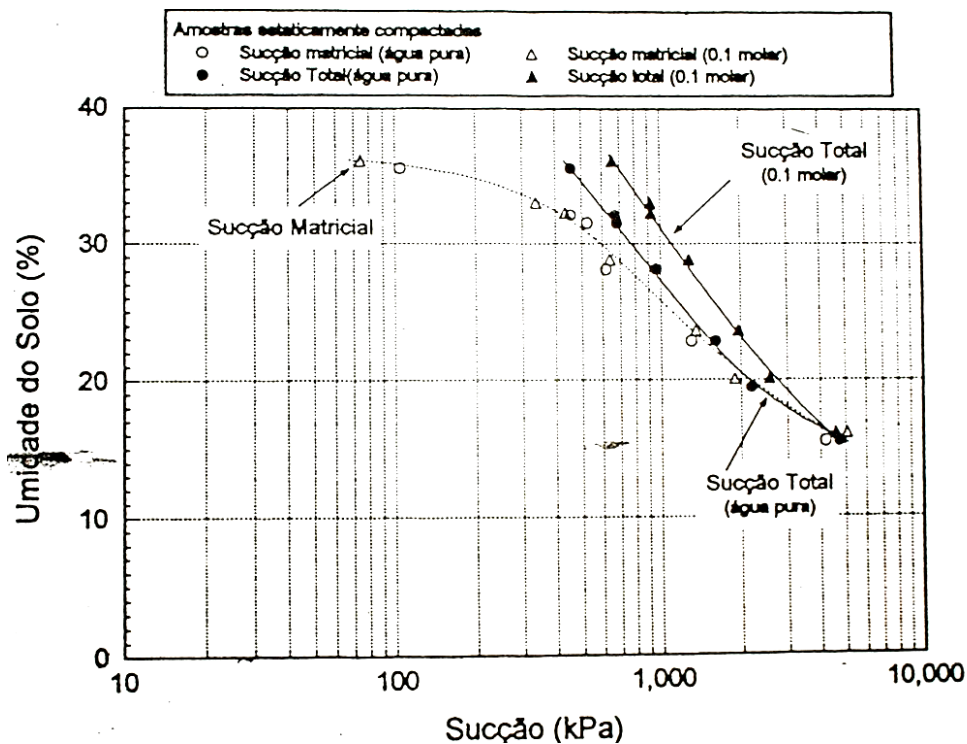


Figura 2.7 – Sucção matricial e total em amostra compactada estaticamente, preparada com água pura e uma solução salina (Marinho, 1994)

2.3.2. *Técnica da Translação de Eixos*

Esta técnica foi inicialmente proposta por Hilf (1956) e baseia-se no princípio dos aparelhos de placas de pressão utilizados para definir as características de retenção de água pelo solo. Na sua essência, a técnica consiste na mudança do referencial de pressão, ou seja, uma translação de eixo. Para tanto, a pressão no ar é aumentada donde decorre igual acréscimo da pressão de água, ou seja, a sucção ($u_a - u_w$) permanece constante. Ambos os valores são levados até os limites mensuráveis dos equipamentos de medida.

Para a aplicação desse método de ensaio, é necessário contar com placas porosas especiais que permitam o fluxo de água e não o de ar. A sucção a ser imposta ao solo fica limitada à pressão de entrada de ar das placas porosas, que pode atingir até pressões de 1500kPa. A aplicação desta técnica, normalmente, envolve o controle da pressão de ar e o controle ou medida da pressão de água. Vale salientar que, como esta técnica permite passagem de solutos através da placa porosa, a variável controlada ou imposta ao solo é a sucção matricial.

A panela de pressão ou câmara de Richards é um equipamento tipicamente utilizado para a imposição da sucção e para a determinação da curva de retenção de um solo. Este equipamento é constituído de uma câmara capaz de suportar elevadas pressões onde é acoplada uma pedra porosa de alta entrada de ar. A técnica de translação de eixos também pode ser aplicada dentro da câmara de ensaios de compressão triaxial, no caso da realização desses ensaios em solos não saturados com imposição da sucção.

2.3.2.1. Vantagens e desvantagens da técnica de translação de eixos

Devido às dificuldades intrínsecas nos ensaios em solos não saturados, onde freqüentemente se tem sucção superior a 100kPa, a técnica de translação de eixos surge como alternativa tanto na medida da pressão neutra quanto na imposição e controle da sucção em amostras de solo. De acordo com Vilar (1997), as dificuldades experimentais encontradas estão relacionadas à necessidade de se controlar e/ou medir tanto as pressões na fase gasosa como na fase líquida dos fluidos intersticiais. A translação de eixos tem por objetivo evitar que as micro-bolhas de ar, contidas na água do sistema de medição, sejam submetidas à pressão negativa e provoquem o fenômeno de cavitação.

De acordo com Olson e Langfelder (1965) e Bocking e Fredlund (1980), o sucesso nas medidas de sucção por meio desta técnica é condicionado à continuidade da fase gasosa através da amostra, ou seja, os vazios de ar devem estar interconectados. Caso exista ar ocluso no solo, os valores obtidos podem estar distorcidos, com a medição da sucção superestimada. Assim, deve-se cogitar a possibilidade da incoerência de valores de sucção para graus de saturação mais elevados. Concordam com essa afirmativa autores como Barden (1965), Matyas (1966), Jiménez Salas (1993a) e Libardi (1995). Além das desvantagens mencionadas, cabe ressaltar que esta técnica não é recomendada para solos de granulação fina.

Segundo Bocking e Fredlund (1980) as amostras de solos ensaiadas com o auxílio da técnica de translação de eixos são submetidas à variação volumétrica reversível, e nos casos de solos que apresentam a fase gasosa interconectada, e irreversível, quando há ar ocluso no solo.

2.3.3. *Tensiômetros*

O tensiômetro convencional (Figura 2.8) é composto por um tubo fechado em sua parte superior, que tem em sua extremidade inferior uma pedra cerâmica porosa que está em contato com a matriz do solo. É estabelecida uma ligação hidráulica entre a água do solo e a água do tensiômetro, por meio do contato entre a pedra porosa e o solo. Na outra extremidade do tensiômetro, a sucção é medida por meio de um manômetro ou outro sistema de medição moderno, como transdutores de pressão. O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se no equilíbrio entre os potenciais da água presente no solo e a água contida no interior do aparelho.

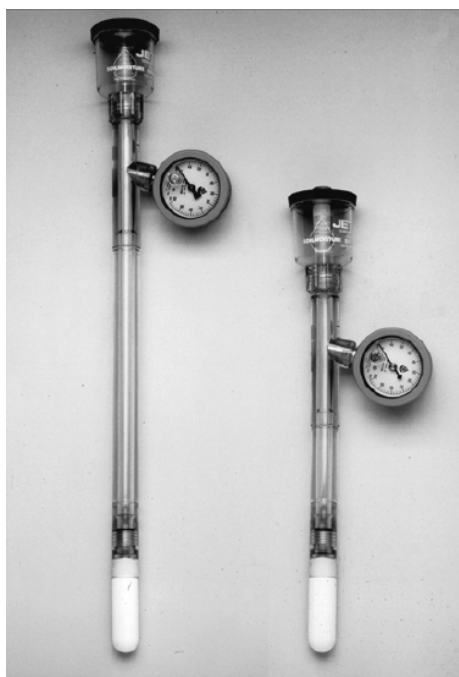


Figura 2.8 – Tensiômetro convencional.

O domínio de leituras desses tensiômetros não ultrapassava valores de sucção superiores a 100 kPa devido a problemas de cavitação do sistema. Ridley e Burland (1993, 1995) propuseram um novo tensiômetro cujo diferencial é medir sucções superiores a 100 kPa sem que a cavitação ocorra no sistema. A proposta destes autores baseia-se em tirar partido da

resistência à tração da água, que de acordo com Tabor (1979) é de aproximadamente 500 MPa.

2.3.3.1. Tensiômetros de alta capacidade (TAC)

Segundo Ridley e Burland (1993), os valores de sucções medidos são de até 1500kPa. O instrumento desenvolvido no Imperial College, mostrado na Figura 2.9, faz uso de um transdutor de pressão de água em miniatura do tipo Entran EPX-500, com escala de trabalho de até 3500kPa. Este é encoberto por uma bainha de aço inoxidável com uma pedra porosa de 1500kPa de pressão de entrada de ar. A abertura entre a pedra porosa e o transdutor de pressão é de 250 μ m o que equivale a um volume total de água livre no reservatório de aproximadamente 3mm³.

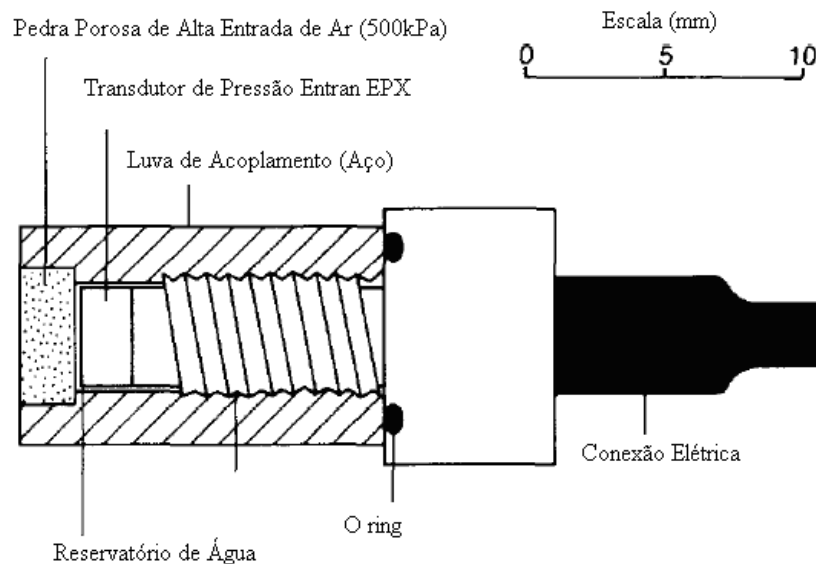


Figura 2.9 – Tensiômetro de alta capacidade (TAC) – Fabricado no Imperial College (Ridley e Burland, 1993)

Este pequeno volume de água é utilizado para impedir a formação de bolhas de ar, o que permite uma faixa de medição direta superior aos alcançados por outros métodos, assim como, facilitar a eliminação das bolhas de ar e minimizar o tempo de resposta.

As pequenas quantidades de ar que possam ficar remanescentes em minúsculas fendas ou irregularidades nas paredes ou superfície do reservatório são retiradas com a aplicação de um vácuo. Porém, após o vácuo podem existir bolhas de ar preso (dentro da solução e/ou nas fendas) que são dissolvidas através da pressurização da água. Para a pressurização da água Ridley e Burland (1993), utilizaram uma bomba hidráulica capaz de produzir uma pressão de 6000 kPa. Marinho et al. (2008) ressalta que o limite entre o sucesso e o insucesso nas medidas de sucção é função da adequada saturação e ao acondicionamento da água do reservatório do tensiômetro.

Soto (2004) utilizou um tensiômetro semelhante ao apresentado por Ridley e Burland (1993). Em busca de adaptar o equipamento às condições e necessidades exigidas em seu trabalho, foi utilizado o transdutor ENTRAN EPX-N01.

Soto e Vilar (2006) avaliaram o desempenho de tensiômetro de alta capacidade (TAC) para medidas de sucção em solos não saturados. Os resultados obtidos com o tensiômetro foram comparados com os resultados obtidos por meio de outros métodos como translação de eixos, papel filtro e funil de pedra porosa. Os ensaios foram realizados em três solos, um solo arenoso indeformado, um arenoso compactado e em um solo siltoso compactado. Os autores concluíram que o TAC não forneceu medidas de sucção em toda a faixa possível de medição, até 500kPa, principalmente nos solos arenosos. Aparentemente o TAC encontra dificuldades para efetuar medições quando os solos arenosos se encontram com sucções matriciais inferiores a 70kPa. Os autores relacionam este problema com os vazios de maior tamanho nos solos arenosos e afirmam que a impressão é que os vazios, quando interconectados, proveriam um caminho entre a ponta porosa do tensiômetro e a atmosfera.

Essa condição forneceria um diferencial de potenciais entre eles que provocaria medições com acréscimos ilimitados da sucção. Nesses ensaios observou-se também que o tensiômetro (TAC) não forneceu medidas para graus de saturação relativamente altos. De acordo com os resultados dos ensaios, o TAC não acusou resposta para o solo siltoso compactado quando o grau de saturação era maior que 80%, e para os solos arenosos indeformados e compactados quando o grau de saturação foi maior que 75%.

Guan e Fredlund (1997) desenvolveram um tensiômetro capaz de registrar sucção até 1250kPa. Meilani et al. (2002) desenvolveram um tensiômetro e modificaram uma câmara triaxial para receber três destes dispositivos, que foram instalados a $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da altura do corpo de prova. Os autores concluem que o desempenho dos tensiômetros foi satisfatório para uma série de ensaios. As medidas de sucção no topo, no meio e na base do corpo de prova foram de 426, 400 e 495kPa respectivamente, entretanto, os autores mencionam que o equipamento apresentou resultados confiáveis para medir sucções até 400kPa. Em um dos ensaios o dispositivo foi capaz de medir uma sucção de 200kPa por até 155 horas e em outro ensaio a sucção matricial de 400kpa foi mantida por 15 horas.

Além destes, outros pesquisadores montaram outros tensiômetros, e além de realizar medidas diretas adaptaram equipamentos para a realização de medidas de sucção no decorrer dos ensaios, entretanto todos os tensiômetros têm o princípio de funcionamento semelhante ao apresentado por Ridley e Burland (1993).

2.3.3.2. Tempo de resposta do tensiômetro de alta capacidade (TAC)

Uma das vantagens do TAC, citadas pelos por Ridley e Burland (1993), diz respeito ao tempo de resposta. O tempo necessário pode levar de horas até meses em outros métodos, já com o uso do TAC, o tempo de resposta diminui para poucos minutos com uma

precisão satisfatória. A Figura 2.10 mostra uma resposta típica do TAC. O nível de sucção medido foi de aproximadamente 1200kPa e o tempo de resposta foi menor que 5 minutos. Além destas vantagens pode-se citar que a sucção matricial do solo é medida em condições naturais, ou seja, não é imposta pressão alguma na fase gasosa.

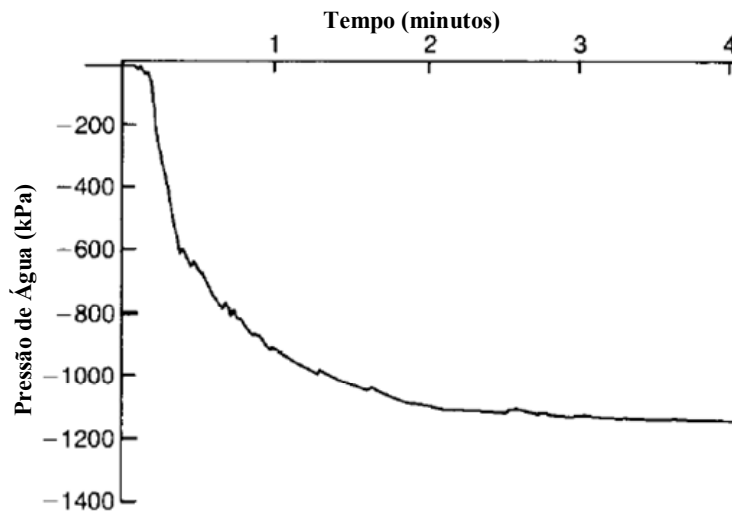


Figura 2.10 – Resposta Típica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) (Ridley e Burland, 1993)

Oliveira e Marinho (2008) avaliaram os fatores que interferem no tempo de equilíbrio do tensiômetro de alta capacidade (TAC). As amostras de solo foram compactadas abaixo do teor de umidade ótimo, no teor de umidade ótimo e acima deste. Além disso, foi avaliada a eficiência de três pastas de solo com características diferentes. Essas pastas têm a função de proporcionar a continuidade hidráulica entre a amostra de solo e a pedra porosa do tensiômetro. De acordo com os autores o equipamento se mostrou eficiente nas medidas de sucção e quanto a eficiência da pasta como ponte hidráulica entre o tensiômetro e o solo os autores concluíram que a pasta deveria ser usada entre o teor de umidade referente ao limite de plasticidade e o limite de liquidez, e que apesar do teor de umidade da pasta ter influência no tempo de equilíbrio do tensiômetro, um controle mais rigoroso do seu teor de umidade é desnecessário. Além disso, os autores concluem que o tempo de equilíbrio aumentou com o

aumento da sucção nos corpos de prova, ou seja, amostras compactadas no ramo seco da curva de compactação levaram mais tempo para equalizar a sucção junto ao tensiômetro de alta capacidade. Para garantir esse contato entre o tensiômetro e o solo, Jotisankasa (2005) e Soto (2004) obtiveram sucesso nas medidas utilizando para essa interface hidráulica uma pasta de caulim.

2.3.3.3. Cavitação do sistema de medidas de sucção

Segundo Ridley e Burland (1993), o TAC tem como principal vantagem permitir a medição direta de sucção tanto em laboratório quanto em campo até um valor de sucção de 1500kPa sem que haja cavitação. Para Ridley e Burland (1995), a água sob baixas tensões está em condição metaestável e essa condição pode ser destruída se ocorrer nucleação. A nucleação é conhecida como cavitação que nada mais é do que a formação de cavidade de vapor dentro do líquido ou no material de que é feito o tensiômetro.

A teoria de resistência à tração de líquidos puros afirma que haverá cavitação quando o líquido for submetido a tensões de tração muito altas, da ordem de 500MPa ou quando o líquido for superaquecido. Como nenhuma destas condições ocorrem dentro de um tensiômetro, a falha nas medidas de sucção para valores maiores que 100kPa não é devida à formação de uma cavidade de vapor dentro do líquido.

Ridley e Burland (1995) afirmam que as imperfeições que existem na superfície dos objetos até mesmo depois do melhor processo de polimento, se constituem em uma “armadilha” ideal para esconder uma minúscula quantidade de ar. Para Tarantino et al. (2000) a cavitação da água do tensiômetro pode ocorrer devido a imperfeições na parede interna do reservatório de água e reduzir o volume de água do reservatório reduz potenciais núcleos de cavitação. A Figura 2.11 mostra a seqüência do processo de cavitação, onde se observa a

presença de uma fenda microscópica capaz de armazenar o ar que sob tração se desprende e leva o sistema à cavitação.

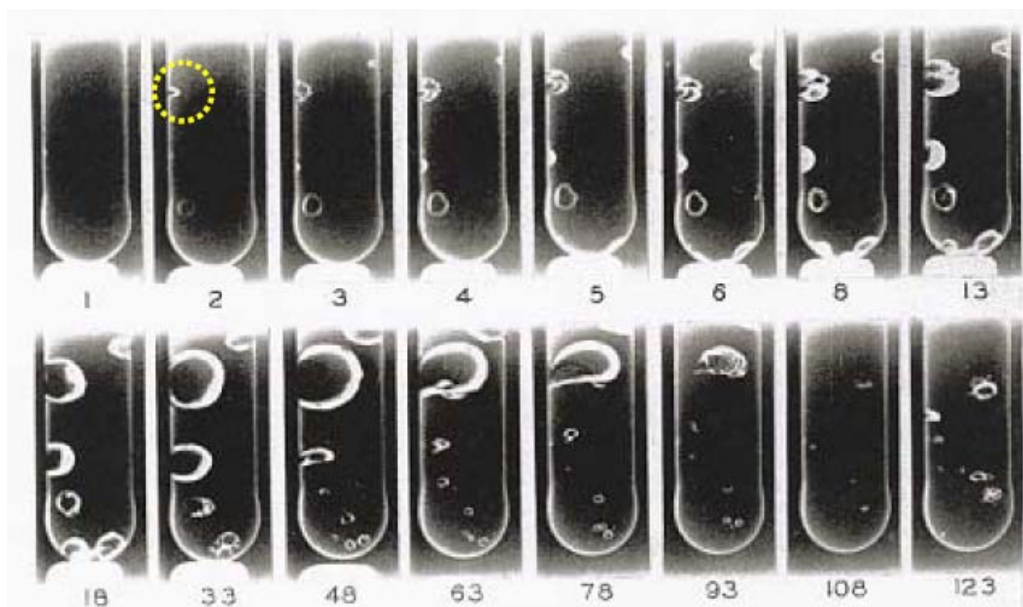


Figura 2.11 – Seqüência do mecanismo de cavitação em um tubo de vidro (Harvey et al., 1944)

Marinho e Chandler (1995) e Marinho (1997) apontam que o uso de um volume pequeno de água no sistema de medição de sucção é o caminho mais fácil para evitar a cavitação. Frisam, entretanto que o volume mínimo possível está limitado pelo deslocamento do diafragma do transdutor. A cavitação não ocorrerá se o sistema estiver livre de núcleos de cavitação, o que compreende, de forma resumida, o uso de água deaerada, superfícies extremamente lisas, puras e limpas, sistema sujeito a aplicação de vácuo, aplicação cíclica de pressões positivas e negativas e pré-pressurização do sistema a altas pressões para dissolver o ar livre.

De acordo com Marinho (1998), o acabamento da parede interna da cápsula de aço inox deve estar isento de imperfeições, para evitar a formação de potenciais núcleos de cavitação. O autor ainda afirma que deve-se cuidar para que a cápsula ou a pedra porosa não toquem na parte sensível do diafragma.

Quando a água no reservatório do tensiômetro é submetida a um estado de tração, o ar ocluído nas fendas pode facilmente ser puxado para fora da fenda e por consequência formar bolhas no reservatório o que leva o sistema à cavitação (Ridley; Burland, 1995). A Figura 2.12 apresentada por Marinho et al. (2005) mostra os estágios que levam à ocorrência desse fenômeno.

Ao aliviar a pressão, apesar de ocorrer novamente expansão do ar, parte dele sai dissolvido na água. São necessários diversos ciclos de pressão e decompressão para a saturação do tensiômetro. Tarantino et al. (2000) afirmam que ciclos de pressão melhoram o desempenho do tensiômetro, possibilitando a medição da sucção por um tempo maior. No entanto, Guan e Fredlund (1996) constataram que estes ciclos de pressão podem danificar a pedra porosa, sendo necessário que esta seja trocada.

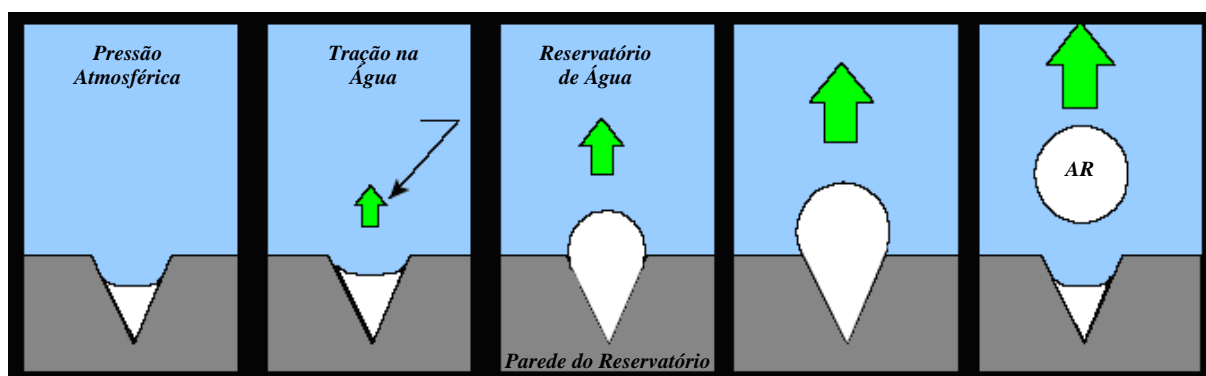


Figura 2.12 – Estágios do fenômeno de cavitação (Marinho et al., 2005).

Harvey et al (1944) afirmaram que exercendo pressão sobre a água, o ar ocluído nas fendas é dissolvido. Quando a alta pressão é reduzida à pressão atmosférica o ar dissolvido na solução encontra maior facilidade para sair desta e encontrar a atmosfera. Conseqüentemente, a interface ar-água é empurrada dentro da fenda. Na Figura 2.13, apresentada por Marinho et al. (2005) é ilustrado o comportamento do sistema após a aplicação de uma pressão positiva, quando o mesmo suporta sucções superiores a 100kPa

A água somente pode ser introduzida no interior da câmara através da placa porosa mediante alta pressão. Adicionalmente, após o enchimento da câmara, é necessário pressurização para eliminação das bolhas de ar no reservatório do tensiômetro. Ambos os processos de introdução de água na câmara e pressurização somente poderão ser feitos com auxílio de uma bomba hidráulica.

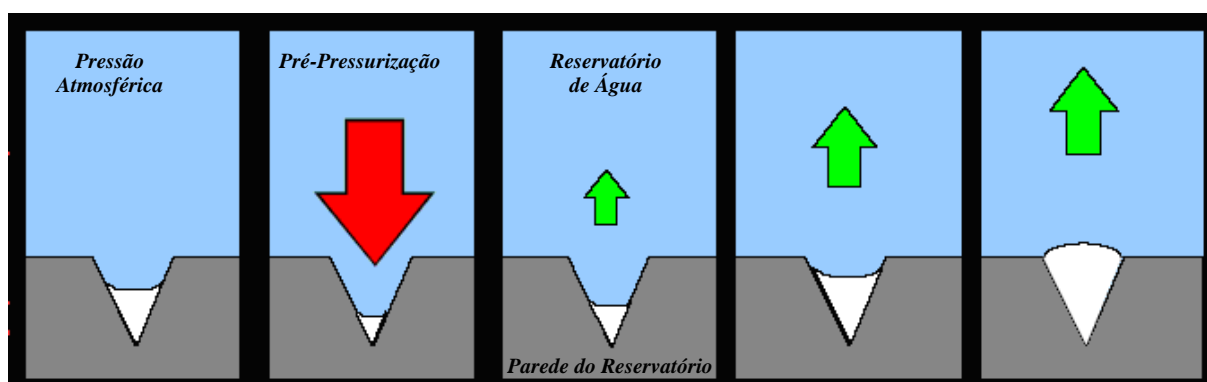


Figura 2.13 – Mecanismo desenvolvido para evitar a ocorrência da cavitação (Marinho et al., 2005).

2.3.3.4. Saturação do tensiômetro de alta capacidade (TAC)

Soto (2004) utilizou uma bomba em aço similar ao pistão usado em painéis de controle de ensaios de compressão triaxial. De acordo com Soto (2004), o que difere esta bomba das outras é possibilidade de aplicar pressões de até 7MPa, graças ao sistema de vedação nela embutido. A pressão aplicada na água é transmitida ao tensiômetro acoplado à bomba mediante uma conexão e registrada num manômetro. A Figura 2.14 apresenta o tensiômetro utilizado antes e após a aplicação o seu acoplamento à bomba.

Quanto à saturação do sistema de medidas, Ridley e Burland (1993), utilizaram uma bomba hidráulica com capacidade de aplicar pressão de cerca de 6MPa. A aplicação de altas pressões é necessária para dissolver o ar livre que pode levar o sistema à cavitação no decorrer das medidas de sucção. Desta forma ao final do ciclo de saturação deve-se garantir

que a pedra porosa esteja saturada e a parede interna da câmara, preenchida com água e não apresente micro-bolhas de ar.

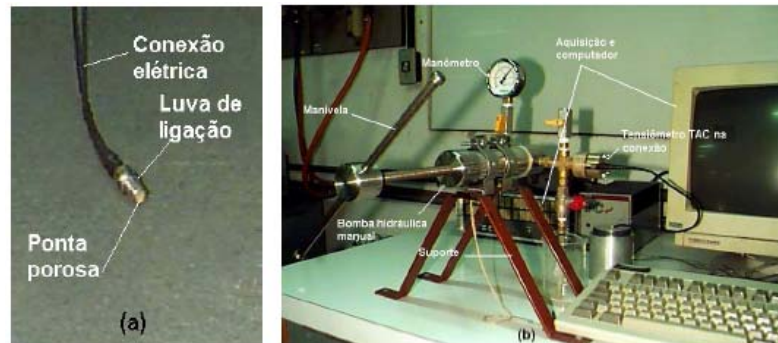


Figura 2.14 – Tensiômetro antes e após seu acoplamento a bomba hidráulica manual (Soto, 2004)

Take e Bolton (2002) saturaram o tensiômetro submetendo-o ao vácuo sendo em seguida imerso em água deaerada. Este procedimento é realizado em um cilindro contendo aproximadamente metade do volume de água. Primeiramente aplica-se o vácuo com o cilindro na posição horizontal conforme é possível observar na Figura 2.1. Em seguida o cilindro é colocado na posição vertical (Figura 2.16), fazendo com que o tensiômetro entre em contato com a água. Este procedimento é repetido várias vezes.

Oliveira (2004) sugere substituir a água na câmara pode ser substituída por uma solução de Lauril Sulfato de Sódio, com procedimento de saturação semelhante aos já descritos. Este artifício tem a função de diminuir a tensão superficial da água e auxiliar na eliminação das bolhas de ar presentes no tensiômetro.

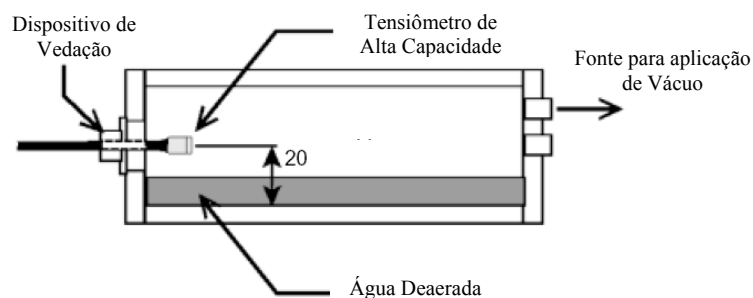


Figura 2.15 – Câmara de saturação dos poros da pedra porosa na posição horizontal (Take e Bolton, 2002)

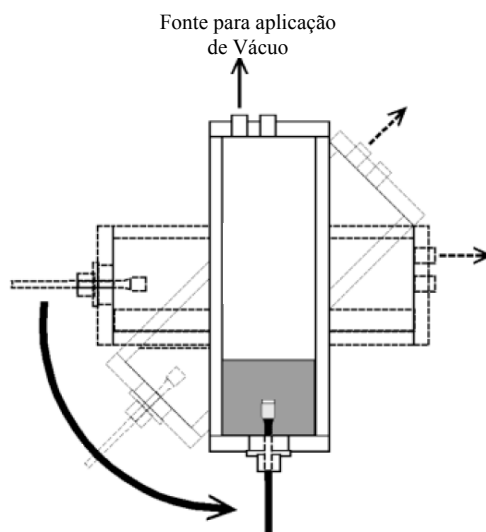


Figura 2.16 – Câmara de saturação dos poros da pedra porosa na posição Vertical (Take e Bolton, 2002)

A certeza da saturação do tensiômetro é obtida a pelo seu tempo de resposta a ciclos de variação de pressão positiva de água. Ao se aplicar uma pressão e em seguida reduzir este valor para zero (pressão atmosférica), o tensiômetro deve acompanhar esta redução instantaneamente. Kuwajima (2000) apresenta as respostas de dois tensiômetros ao se aplicar ciclos de pressão e descompressão hidráulica. Observa-se nos trechos correspondentes ao alívio de pressão que a resposta do tensiômetro saturado é imediata. Para o tensiômetro não saturado a resposta é mais lenta reduzindo sua pressão de forma gradativa (Figura 2.17).

Marinho (2003) adotou um critério para garantir a saturação da pedra porosa do tensiômetro que consiste em considerar saturado o sistema quando o decréscimo da pressão (ao liberar o sistema intempestivamente) denota uma redução instantânea, isto é, uma variação de pressão desde 6MPa até zero num intervalo de tempo próximo de zero segundos.

Soto (2004) aplicou ciclos repetitivos de pressão de 24 horas para posteriormente liberá-la subitamente até alcançar a pressão atmosférica, como mostrados na Figura 2.18.

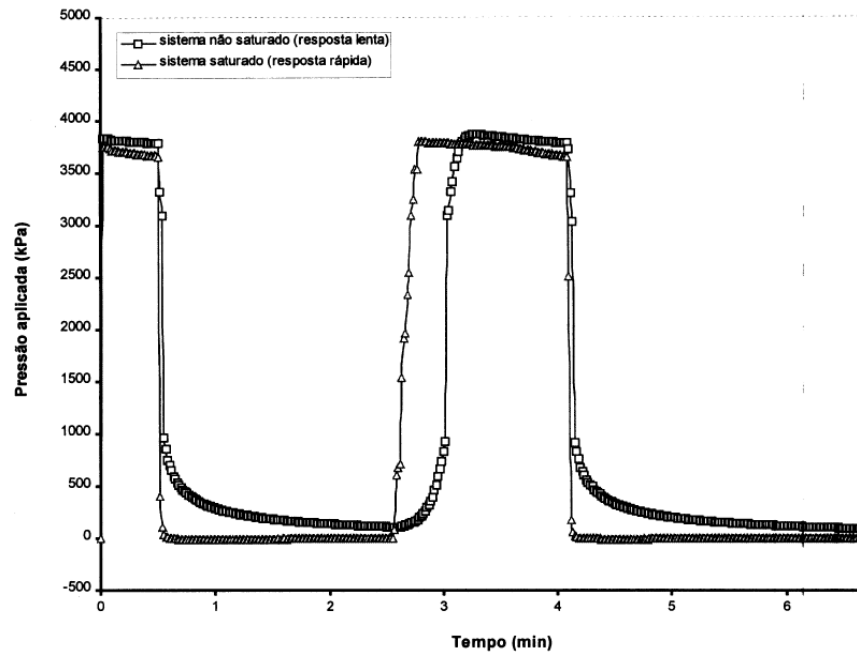


Figura 2.17 – Resposta do Tensiômetro a ciclos de pressurização Kuwajima (2000)

A velocidade de resposta do tensiômetro é um excelente indicador da sua saturação, (Take e Bolton, 2003). Meilane et al. (2002), apresenta outra forma de certificar-se da saturação do tensiômetro. Os autores indicam que esta certificação seja feita pelo acompanhamento das variações das leituras em função de pequenas flutuações nos valores de pressão de água aplicada.

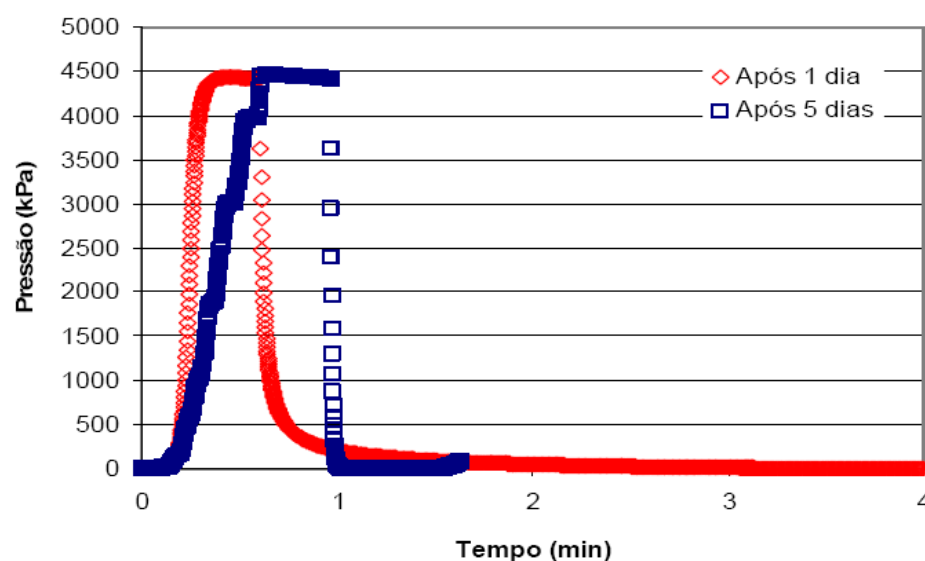


Figura 2.18 – Saturação do Tensiômetro de Alta Capacidade (Soto, 2004)

2.3.3.5. Calibração do tensiômetro de alta capacidade

A calibração tanto do transdutor quanto do tensiômetro completo é de fundamental importância para garantir que as leituras sejam convertidas para pressão corretamente.

Soto (2004) antes da montagem do tensiômetro tentou estabelecer se o transdutor reproduz a mesma relação pressão *versus* tensão elétrica tanto por compressão como por tração. Pressões conhecidas de compressão e tração foram aplicadas com um controlador de pressão e coluna de água respectivamente e as respectivas variações de tensão elétrica foram registradas na aquisição de dados.

Os resultados da calibração do transdutor por tração e compressão obtidos por Soto (2004) estão apresentados nas Figuras 2.19 e 2.20.

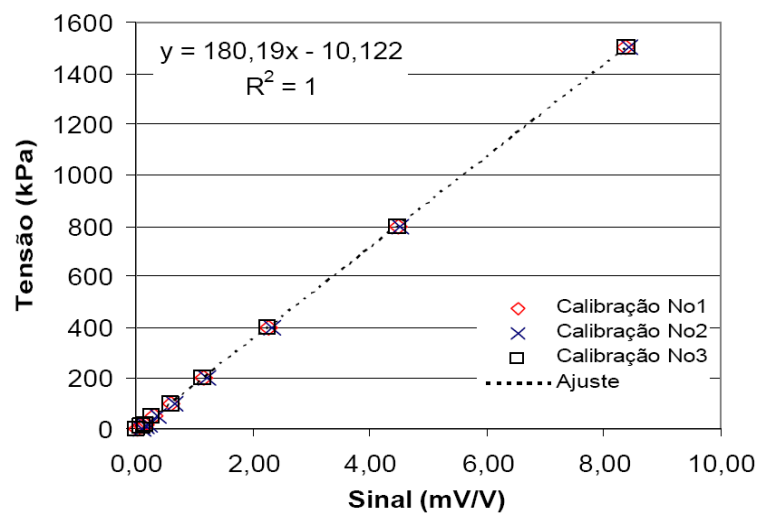


Figura 2.19 – Resultado da calibração do transdutor sob pressão de compressão (Soto, 2004)

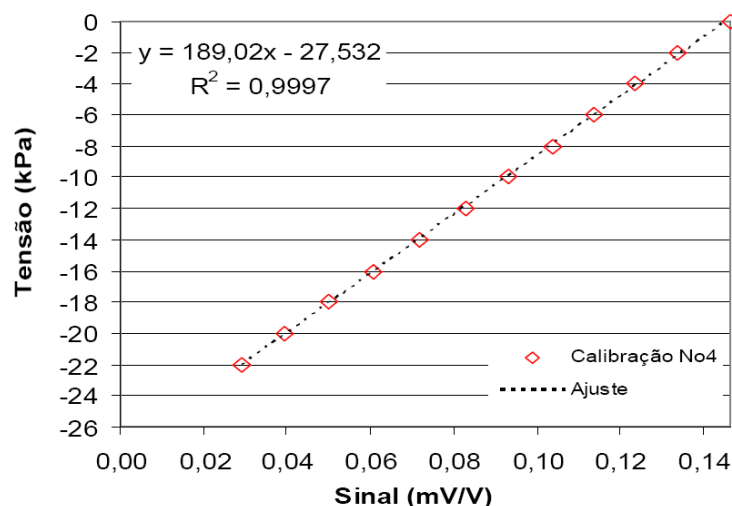


Figura 2.20 – Resultado da calibração do transdutor sob pressão de tração (Soto, 2004)

De acordo com o apresentado pelo autor, as calibrações mostraram-se muito próximas, pois as tangentes das curvas de ajuste foram de 0,00555 e de 0,00521 (mV/V)/(kPa) respectivamente. Os autores creditam a pequena diferença entre as calibrações à sensibilidade do diafragma e função da máxima magnitude de pressão aplicada. A proximidade entre as calibrações sugere que o tensiômetro seja calibrado por compressão, pois é uma forma mais viável na prática. A Figura 2.21 mostra a calibração do tensiômetro realizado por compressão. A tangente da curva de ajuste foi de 0,005213 (mV/V)/(kPa). Vale salientar que este valor é da mesma ordem de grandeza do valor obtido na calibração do transdutor.

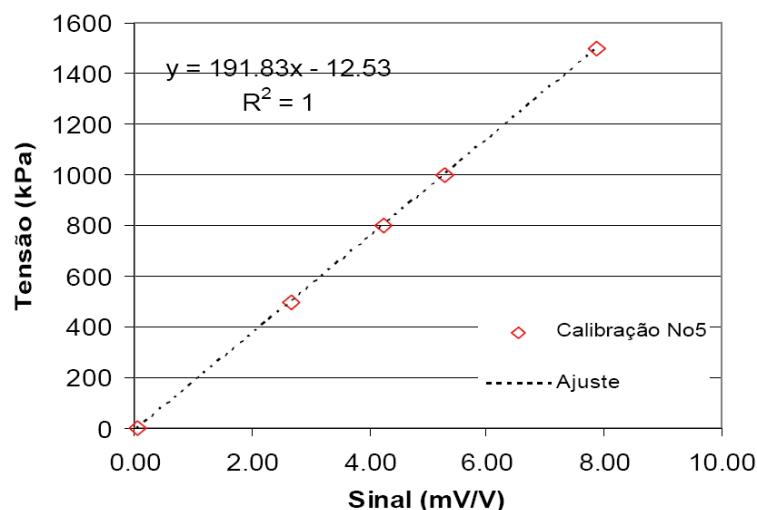


Figura 2.21 – Resultado da calibração do tensiômetro sob tensão de compressão (Soto, 2004)

Oliveira (2004) calibrou o tensiômetro utilizado em sua pesquisa através da aplicação de pressão positiva, extrapolando para valores negativos. Tarantino e Mongiovi (2002) constataram um erro em torno de 1 a 1,5% no valor da sucção medida, ao se utilizar uma calibração obtida pelo método da extrapolação, justificando assim este procedimento.

2.4. RESISTÊNCIA DOS SOLOS NÃO SATURADOS

O êxito obtido por Terzaghi (1936), ao definir a equação das tensões efetivas na previsão do comportamento dos solos saturados, levou inúmeros pesquisadores a tentar aplicar o mesmo modelo para os solos não saturados. Entretanto, o modelo aplicado a solos saturados, não conduzia os resultados a valores corretos de tensão efetiva, pois os problemas que envolvem os solos não saturados são mais complexos uma vez que os poros do solo são preenchidos por água e ar e não somente água (condição saturada).

De acordo com Toll (1990), num solo saturado, a estrutura inicial será destruída por determinados níveis tensões de cisalhamento ou compressão, já a estrutura do solo não saturado é suportada pela sucção e pode ser mantida até para valores elevados de tensão de cisalhamento ou compressão.

De acordo com Jennings e Burland (1962), o princípio das tensões efetivas de Terzaghi diz que todos os efeitos mensuráveis decorrentes de uma variação das tensões, tais como compressão, distorção e resistência ao cisalhamento de um solo, são devidos exclusivamente às alterações das tensões efetivas que é definida pela Equação 2.2. Nesta equação, caso a pressão de água seja negativa, a parcela da pressão neutra passa a contribuir para a tensão efetiva. Entretanto quando o solo passa do estado saturado para o não saturado a pressão na água não atua mais em todo o solo e a equação perde a validade.

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

Equação 2.2

Em que:

 σ' = Tensão efetiva σ = Tensão total u_w = Pressão neutra (pressão da água intersticial).

Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam algumas equações propostas para representar as tensões efetivas dos solos não saturados. A Tabela 2.2 mostra estas equações, onde a mais conhecida é formulada por Bishop (1959). Matyas e Radhakrishina (1968) consideraram praticamente impossível encontrar uma equação de tensões efetivas para a previsão do comportamento de um solo não saturado, sendo as mesmas limitadas por casos onde podem ser verificados experimentalmente.

Tabela 2.2 – Expressões para avaliação das tensões efetivas em solos não saturados

Expressão proposta	Parâmetros	Autores
$\sigma' = \sigma - \beta' \cdot u_w$	σ' = Tensão normal efetiva σ = Tensão normal total u_w = Pressão neutra β' = Fator de ligação, que é a medida do número de ligações sob tens	Croney et al.(1958)
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	u_a = Pressão de ar χ = Parâmetro relacionado com o grau de saturação	Bishop (1959)
$\sigma' = (\sigma \cdot a_m) + (u_a \cdot a_a) + (u_w \cdot a_w) + R + A$	a_a = Parte da área total ocupada por ar a_m = Área de contato ocupada pelos sólidos a_w = Parte da área total ocupada pela água R = Resultante das forças de repulsão A = Resultante das forças de atração	Lambe (1960)

Tabela 2.2 – Expressões para avaliação das tensões efetivas em solos não saturados

$\sigma' = \sigma + \psi \cdot p''$	p'' = Deficiência de pressão neutra ψ = Parâmetro que varia de 0 a 1	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta \cdot p''$	p'' = Pressão neutra negativa tomada como um valor positivo β = Fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m \cdot (h_m + u_a) + \chi(h_s + u_a)$	χ_m = Parâmetro de tensão efetiva para sucção mátrica h_m = Sucção mátrica χ_s = Parâmetro de tensão efetiva para a solução de soluto h_s = Solução de soluto	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma + \chi_m p_m'' + \chi_s p_s''$	p_m'' = Sucção mátrica p_s'' = Sucção de soluto χ_m e χ_s = Parâmetro que variam de 0 a 1 dependendo da trajetória de tensões	Aitchison (1973)

2.4.1. Proposta de Bishop (1959)

Ao aplicar o modelo proposto por Mohr-Coulomb na equação de tensões efetivas proposta por Bishop (1959), a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados pode ser apresentada conforme a Equação 2.3.

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad \text{Equação 2.3}$$

Em que:

τ = resistência ao cisalhamento do solo

c' = coesão efetiva;

σ' = tensão total;

u_a = pressão de ar;

u_w = pressão de água;

ϕ' = Ângulo de atrito interno efetivo;

χ = Parâmetro dependente do S_r , tipo de solo e efeitos da histerese decorrente da secagem ou do umedecimento do solo.

Bishop et al. (1960) apresentaram resultados de ensaios de compressão triaxial em que a resistência é analisada considerando essa equação e discutem as influências dos valores de χ que variam de 0, para o solo seco, a 1 para o solo saturado.

Jennings e Burland (1962) mostram que a equação das tensões efetivas apresentada por Bishop (1959) é válida apenas para expressar o comportamento de solos não saturados para graus de saturação altos, cerca de 20% para areias, 50% para siltes e areias finas e 85% para argilas. Para solos com graus de saturação inferiores a estes valores, denominados de críticos, a equação de Bishop (1959) não é capaz de expressar a relação entre o a variação volumétrica do solo em função do acréscimo ou diminuição da tensão efetiva atuante no solo. Estes autores ainda chamam a atenção a respeito do comportamento previsto para os solos não saturados baseados no conceito das tensões efetivas. Quando se adiciona água ao solo não saturado conseqüentemente a sucção reduz, ocorrendo também a redução das tensões efetivas. Espera-se que com esse alívio de tensões o solo aumente de volume, no entanto, em certos solos, pode ocorrer ao invés da expansão o colapso do solo, contrariando o princípio das tensões efetivas. Observa-se aí um problema conceitual na proposta de Bishop (1959).

Jennings e Burland (1962) mostram através da Figura 2.22 que a estrutura de um solo saturado, submetida a um acréscimo de pressão (a e b), e de sucção (c e d), apresenta variação volumétrica diferente. Segundo estes autores, um carregamento externo transmite em condições drenadas, forças normais e cisalhantes entre os grãos. Já os meniscos formados pelo aumento da sucção transmitem apenas força normal entre os grãos, o que aumenta a estabilidade da estrutura. Isso mostra que o princípio das tensões efetivas não se aplica para solos que apresentam fenômeno de colapso frente ao umedecimento.

Jennings e Burland (1962), afirmam que o princípio das tensões efetivas somente é válido quando uma variação do valor de tensão aplicada corresponde a variações de volume

e resistência equivalentes. A verificação da proposta de Bishop (1959) reside na correta determinação do parâmetro χ . Este parâmetro pode ser obtido através dos métodos que assumem a validade do princípio das tensões efetivas, logo pode ser obtido em termos de resistência ao cisalhamento e em termos de variação volumétrica. A Figura 2.23 mostra a variação do parâmetro χ em função do grau de saturação.

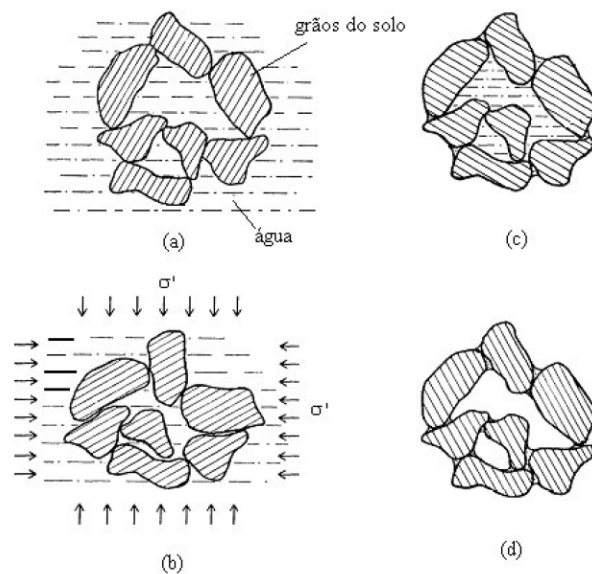


Figura 2.22 – Variação volumétrica frente ao mesmo incremento de pressão (a e b) e de sucção (c e d). (Jennings e Burland 1962)

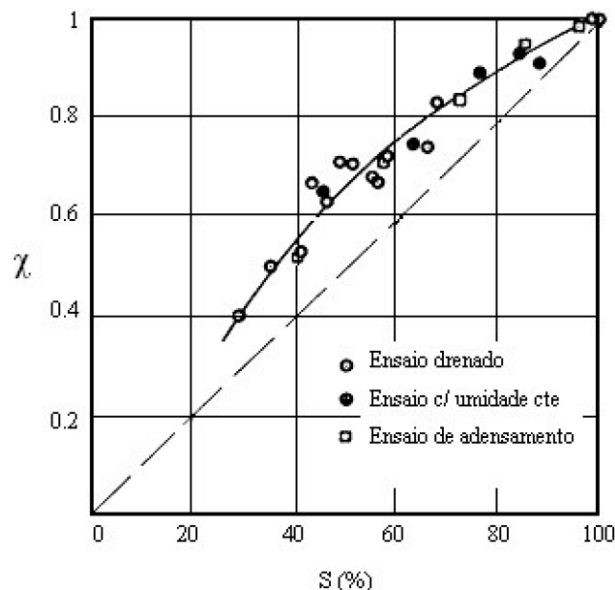
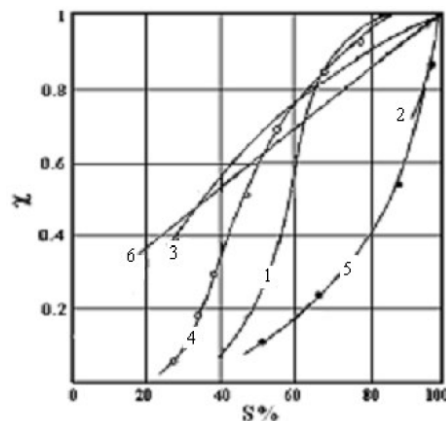


Figura 2.23 – Variação do parâmetro χ em função do grau de saturação (Bishop e Donald, 1961)

Na Figura 2.24 Jennings e Burland (1962) mostram a variação do parâmetro χ em função do grau de saturação de um solo argiloso compactado, um siltoso, uma argila siltosa e a curva teórica apresentada por Donald (1960). As curvas 1 e 2 foram obtidas através de ensaios de resistência ao cisalhamento. A curva 3 foi obtida tanto em termos de variação volumétrica quanto em termos de resistência. As curvas 4 e 5 foram obtidas através do método de variação volumétrica e a curva 6 é a curva teórica proposta por Donald (1960). Nessa figura nota-se que as curvas apresentadas são dispersas. Coleman (1962) justifica essa dispersão ao afirmar que a estrutura do solo tem influência significativa no parâmetro χ , logo, com solos diferentes e estruturas diferentes os valores tendem a divergir.



1. Argila Compactada ($-2\mu=4\%$) - Bishop et al (1960)
2. Argila Compactada ($-2\mu=22\%$)-Bishop et al (1960)
3. Silte - Bishop e Donald (1961)
4. Silte ($-2\mu=3\%$)
5. Argila Siltosa ($-2\mu=23\%$)
6. Curva teórica de Donald (1960)

Figura 2.24 – Variação do parâmetro χ em função do grau de saturação (Jennings e Burland 1962)

2.4.2. Proposta de Fredlund et al. (1978)

De acordo com Fredlund (1973), qualquer combinação de duas variáveis entre σ , u_a e u_w de é capaz de retratar a resistência e a compressibilidade de um solo não saturado. As combinações possíveis são as seguintes:

- $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$;
- $(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$;
- $(\sigma - u_a)$ e $(\sigma - u_w)$.

O uso das variáveis $(\sigma - u_a)$ denominada por tensão líquida e $(u_a - u_w)$, por sucção matricial, tem sido preferido porque variações na tensão total e na pressão da água podem ser avaliadas separadamente. Além disso, com frequência a pressão de ar corresponde à atmosférica, ou seja, é igual a zero. Fredlund e Morgenstern (1977) apresentam a definição de variável de estado de tensão como sendo aquela que não produz distorção ou variação em um elemento do solo quando seus componentes variam, mas o seu valor permanece inalterado. A Figura 2.25 apresenta o elemento de solo não saturado com as variáveis do estado tensional.

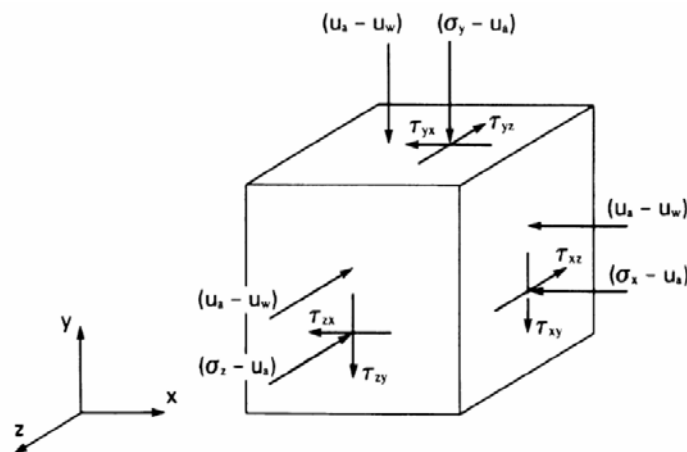


Figura 2.25 – Representação das variáveis do estado tensional no elemento de solo não saturado.

Fredlund et al. (1978) baseado no conceito de variáveis de tensões apresentou a formulação apresentada na Equação 2.4 para determinação da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi_b \quad \text{Equação 2.4}$$

Em que:

τ = resistência ao cisalhamento do solo

c' = coesão efetiva;

σ = tensão total;

u_a = pressão de ar;

u_w = pressão de água;

ϕ' = Ângulo de atrito interno efetivo relativo a variações na tensão líquida quando a sucção é mantida constante;

ϕ_b = Ângulo de atrito interno efetivo relativo a variações na sucção quando a tensão líquida é mantida constante.

O parâmetro ϕ_b é um ângulo que indica a razão do aumento da resistência em função da sucção em um solo não saturado.

Os círculos Mohr correspondentes à condição de ruptura são apresentados em um diagrama tridimensional. Caso a tensão líquida confinante seja mantida constante e a sucção seja variada durante os ensaios, as envoltórias de resistência são apresentadas conforme mostrado na Figura 2.26.

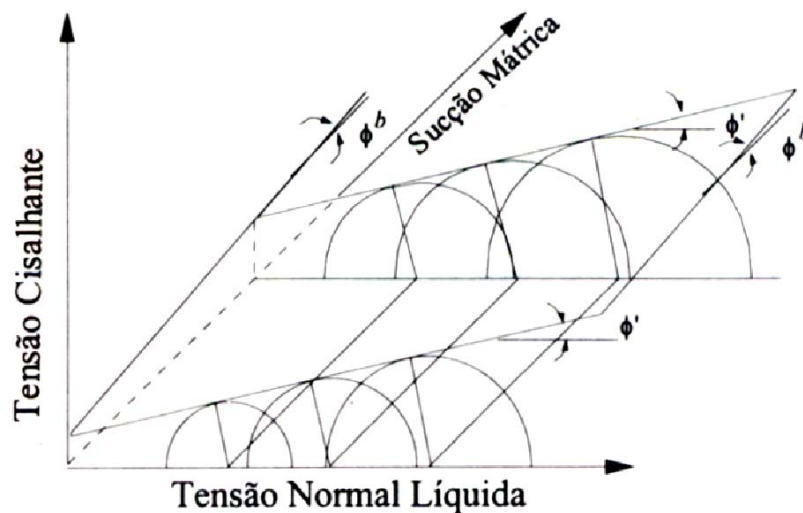


Figura 2.26 – Envoltórias de resistência para tensão confinante líquida constante (Fredlund e Rahardjo, 1993)

Na envoltória acima, o ângulo formado entre os pontos plotados nos planos tensão cisalhante e sucção é o denominado ϕ_b . De acordo com a proposta de Fredlund et al. (1978) o ϕ_b é constante, ou seja, a superfície que define a condição de ruptura é um plano, assim como

o ϕ' , que se mantém constante para níveis diferentes de sucção. Resultados semelhantes foram obtidos por Rahardjo et al. (1995) que obtiveram um ϕ' de cerca de $26,7^\circ$ para diferentes níveis de sucção e um ϕ_b de aproximadamente 26° . Gulhati e Satija (1981) e Ho e Fredlund (1982) obtiveram experimentalmente resultados que demonstram a linearidade da relação entre a sucção e a resistência ao cisalhamento.

Autores como Wood (1979) e Escario e Sáez (1986), Abramento e Carvalho (1989), De Campos e Carrillo (1995) e Röhm e Vilar (1995) não concordam com a proposta de linearidade do parâmetro ϕ_b . Wood (1979) mostra que comparando as equações de Bishop (1959) e Fredlund (1978) obtém-se a seguinte expressão:

$$\chi = \frac{tg\phi_b}{tg\phi'} \tag{Equação 2.5}$$

Conforme apresentado no decorrer desta revisão bibliográfica, o valor do parâmetro χ , proposto por Bishop (1959) não é constante, logo não há razão para que a tangente de ϕ_b seja. Escario e Sáez (1986) mostram que é difícil admitir que a tangente de ϕ_b seja constante. Os autores realizaram ensaios em solos argilosos e argilo-arenosos de Madri e chegaram aos resultados apresentados nas Figuras 2.27 e 2.28.

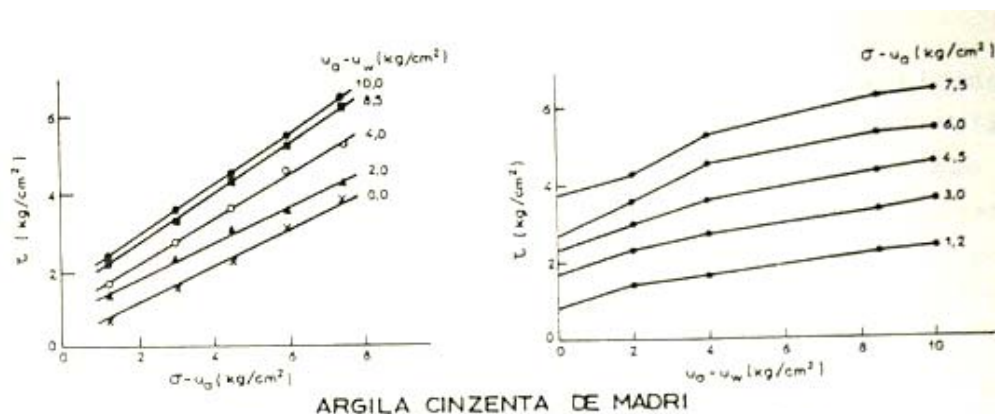


Figura 2.27 – Envoltórias de resistência da argila cinzenta de Madri (Escario e Sáez, 1986)

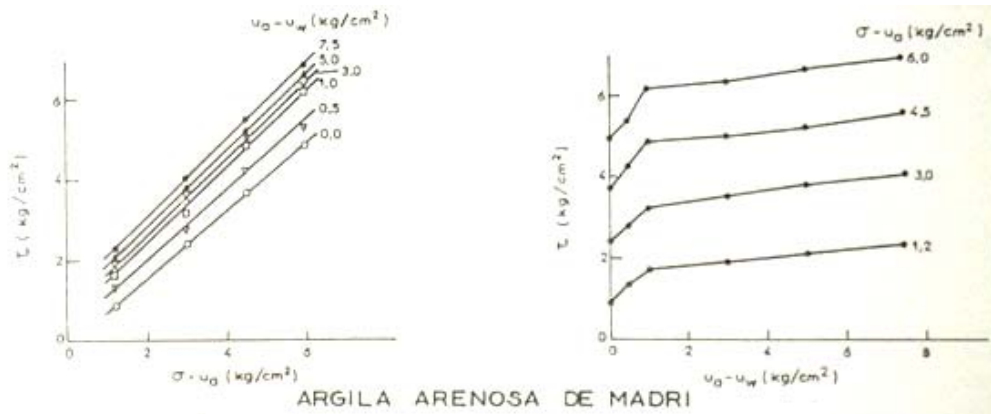


Figura 2.28 – Envoltórias de resistência da areia argilosa de Madri (Escario e Sáez, 1986)

Escario e Sáez (1987) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada. Os resultados obtidos por estes autores reforçam a teoria de que a proposta de Fredlund et al. (1978) poderia não refletir o comportamento real do solo. A Figura 2.29 apresenta os gráficos de tensão cisalhante *versus* sucção matricial obtidos nestes ensaios. Nestes resultados observa-se que a tangente na origem é igual à tangente do ângulo de atrito efetivo e que a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da sucção matricial até um valor máximo que é característico de cada solo.

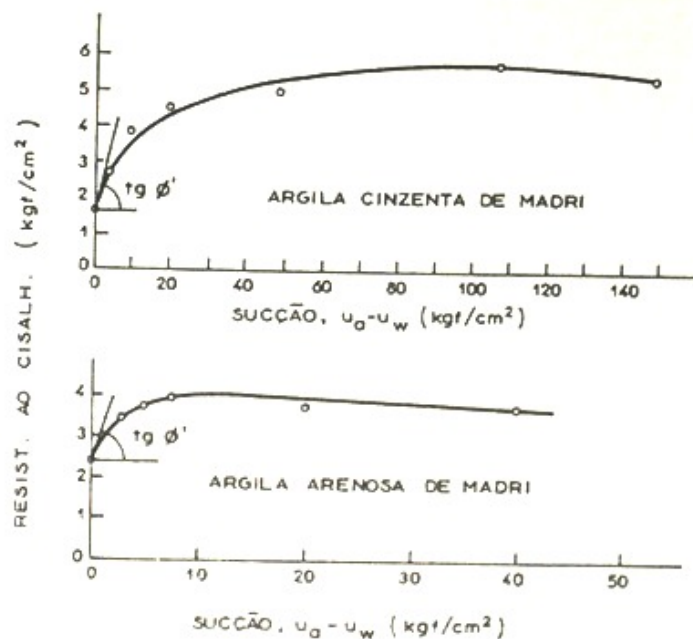


Figura 2.29 – Resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento direto com diferentes sucções matriciais (Escario e Sáez, 1987)

Fredlund et al. (1987) admitem a não linearidade da envoltória de resistência dos solos não saturados. Os autores concluem que a relação entre a resistência ao cisalhamento direto e a sucção matricial deve ser não linear. Para sucções matriciais baixas, o ϕ_b é aproximadamente igual ao ângulo de atrito. Após a sucção superar a pressão de entrada de ar do solo, o ângulo de atrito reduz a um valor constante. A nova envoltória de resistência proposta por Fredlund et al. (1987) pode ser representada através da Figura 2.30.

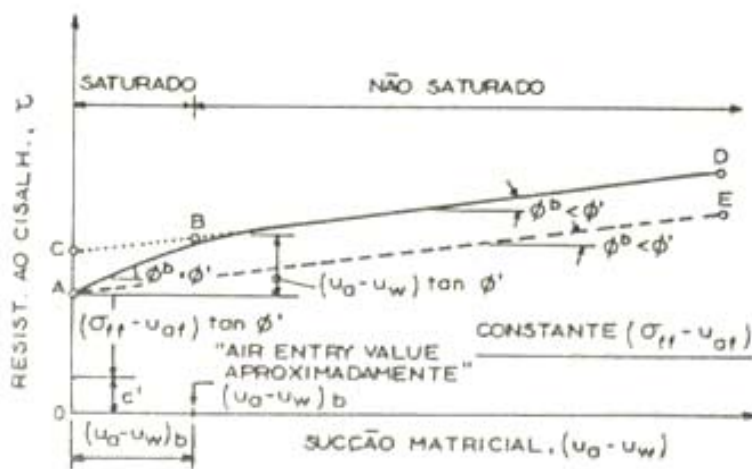


Figura 2.30 – Envoltória proposta por Fredlund et al. 1987

Gan et al. (1988) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento para a determinação dos parâmetros de resistência de um solo não saturado com controle de sucção em uma câmara de ensaios de cisalhamento direto com controle de sucção. Os autores constataram a não linearidade da relação entre resistência ao cisalhamento e sucção. Para o solo na condição saturada o ângulo ϕ_b é praticamente igual ao ϕ' . Para o solo não saturado os autores observaram que o ϕ_b corresponde a um valor inferior a ϕ' até tornar-se praticamente constante.

Carrillo et al. (1994) realizaram ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada e observaram a não linearidade das envoltórias obtidas. Além disso, os autores chamam a atenção que no valor de sucção zero a envoltória intercepta o eixo das ordenadas

em um valor próximo daquele obtido pela interpolação da envoltória de sucção igual a zero. A Figura 2.31 apresenta a envoltória obtida pelos autores. Esta envoltória foi ajustada considerando o valor de ϕ_b igual ao valor de ϕ' .

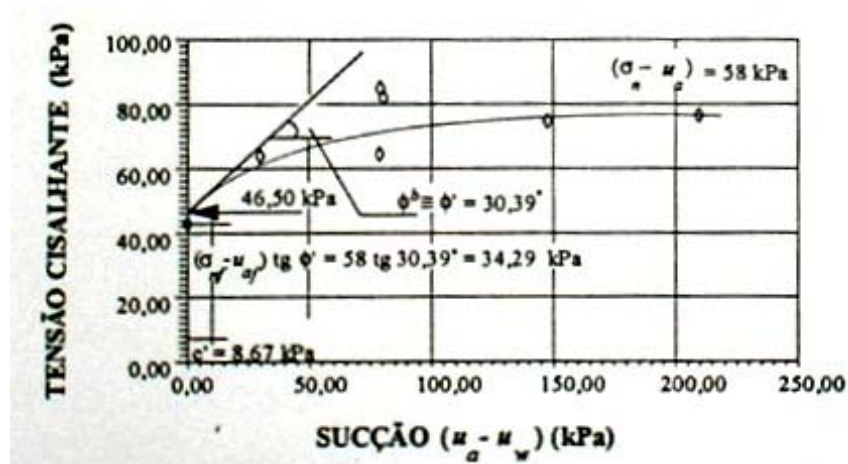


Figura 2.31 – Envoltória de resistência obtida por Carrillo et al. (1994)

A Figura 2.32 extraída de De Campos (1997) mostra as variações do ângulo de ϕ_b com a sucção em diferentes solos naturais brasileiros. A curva 1a é de um solo coluvionar, 1b de um solo residual de migmatito (Abramento e Carvalho, 1989), as curvas 2a e 2b são de solos saprolíticos de gnaiss (Fonseca, 1991) e por fim a curva 3 de um solo laterítico (Röhm e Vilar, 1995).

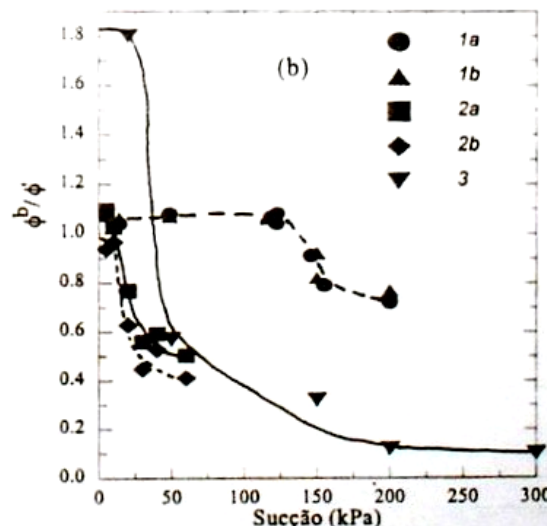


Figura 2.32 – Variação do ângulo de ϕ_b com a sucção em diferentes solos naturais brasileiros.

É possível observar que no início a relação ϕ_b / ϕ' permanece relativamente constante até um determinado nível de sucção. A partir de certo nível de sucção ocorre um decréscimo significativo de forma não linear. Em seguida os valores tornam a uma tendência de tornarem-se constantes. Na Figura 2.33 Delage et al. (1987) apresentam resultados experimentais que mostram que ϕ_b , a coesão e o ângulo de atrito interno variam com a sucção matricial.

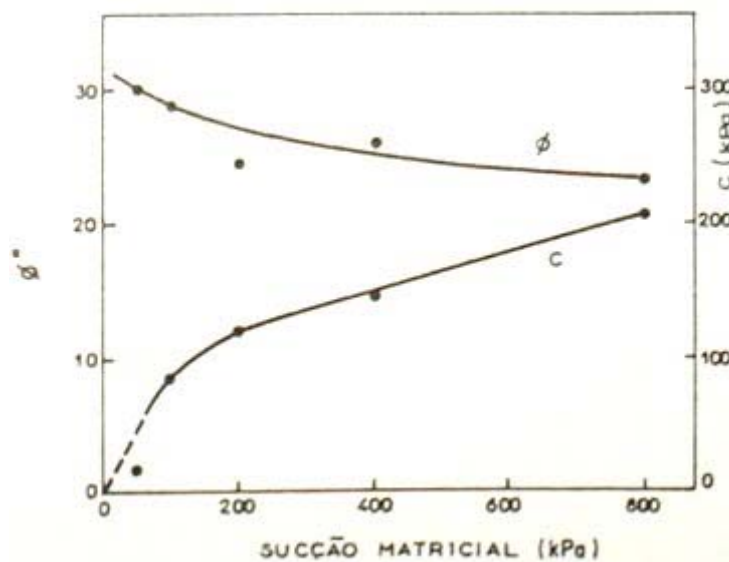


Figura 2.33 – Variação da coesão e ângulo de atrito interno em função da sucção. (Delage et al., 1987)

Fredlund et al. (1995) verificaram a relação entre os valores de resistência ao cisalhamento em função da sucção com a curva de retenção. Suas conclusões estão apresentadas na Figura 2.34, onde se observa que para valores de sucção menores que a entrada de ar, a sucção é tão efetiva quanto à tensão confinante na mobilização da resistência. Para valores de sucção maiores que a entrada de ar a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento decresce de forma não linear.

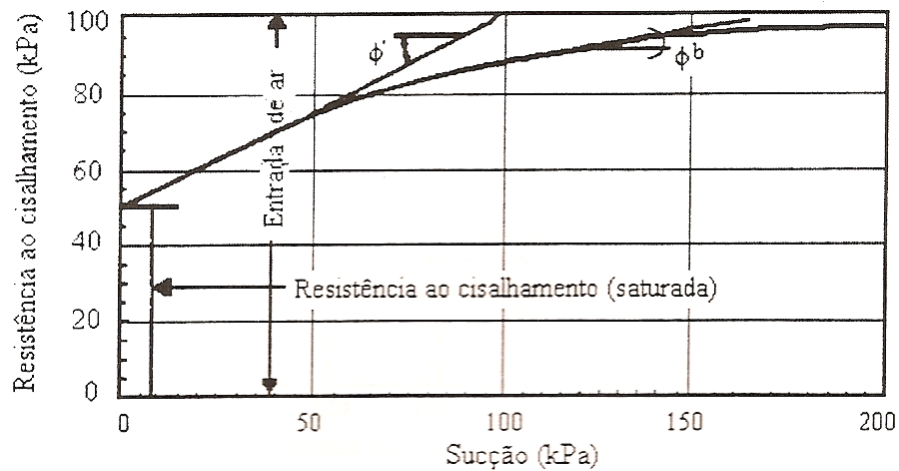


Figura 2.34 – Relação entre a resistência ao cisalhamento e a curva de retenção (Fredlund et al., 1995)

2.4.3. Ensaios de Resistência com Medida de Sucção

Jotisankasa et al. (2006) desenvolveram uma célula de ensaios de compressão triaxial para acoplar dois tensiômetros de alta capacidade desenvolvidos no Imperial College por Ridley e Burland (1993). Os ensaios de compressão triaxial realizados por este autor foram do tipo CW, onde o teor de umidade da amostra é mantido constante no decorrer do ensaio, em amostras de 5cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os tensiômetros utilizados na medida de sucção durante os ensaios foram dispostos conforme mostrado na Figura 2.35.

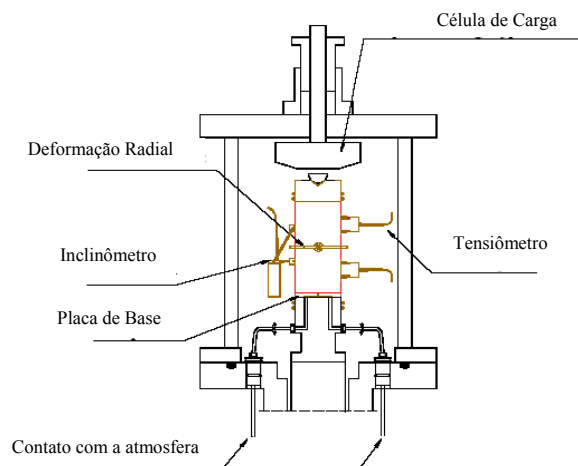


Figura 2.35 – Câmara triaxial adaptada com dois tensiômetros de alta capacidade (Jotisankasa et al., 2006)

Oliveira (2004) utilizou o tensiômetro de alta capacidade para medir sucção durante a realização de ensaios de compressão triaxial do tipo CW e ensaios de compressão simples. O tensiômetro foi colocado na base do corpo de prova conforme ilustra a Figura 2.36.

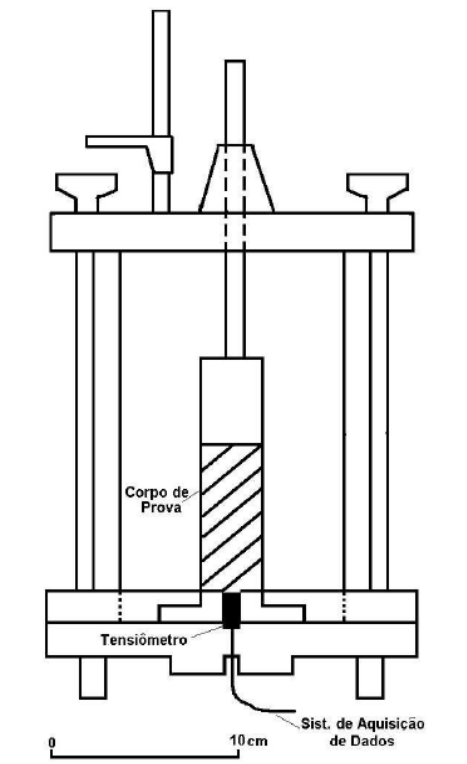


Figura 2.36 – Célula de cisalhamento adaptada (Oliveira, 2004).

Oliveira (2004) realizou ensaios de compressão simples com medida direta de sucção direta com o tensiômetro de alta capacidade. Nas Figuras 2.37, 2.38 e 2.39 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com os corpos de prova no teor de umidade ótimo, no ramo seco e no ramo úmido da curva de Proctor. Observa-se nessas figuras que para valores de sucção mais elevados a sucção tendeu a aumentar com o aumento das deformações axiais e para baixos valores de sucção a tendência se inverteu.

Toll (1990) apresentou resultados de resistência ao cisalhamento com medida de sucção e conforme apresentado na Figura 2.40, para os ensaios onde a sucção inicial era

inferior a 100kPa a sucção aumentou no decorrer do ensaio e para valores de sucção inicial mais elevados a evolução da sucção mostrou uma tendência inversa.

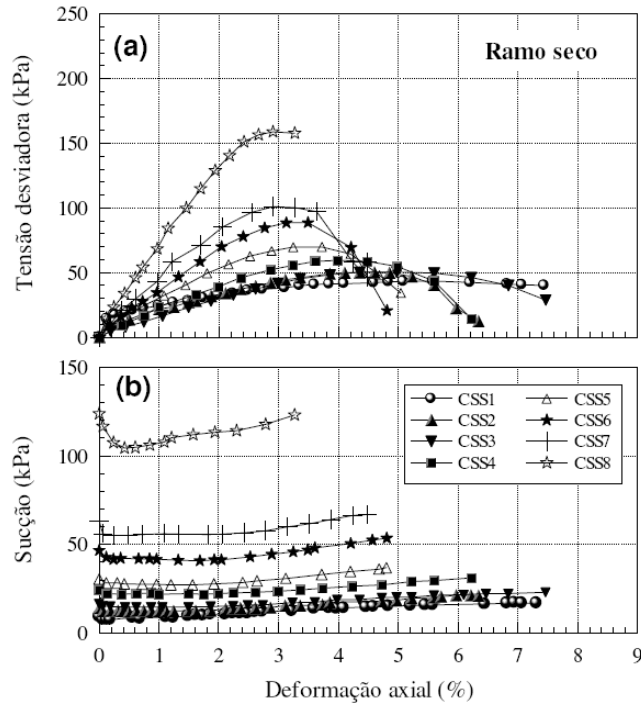


Figura 2.37 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no ramo seco da curva de Proctor (Oliveira ,2004).

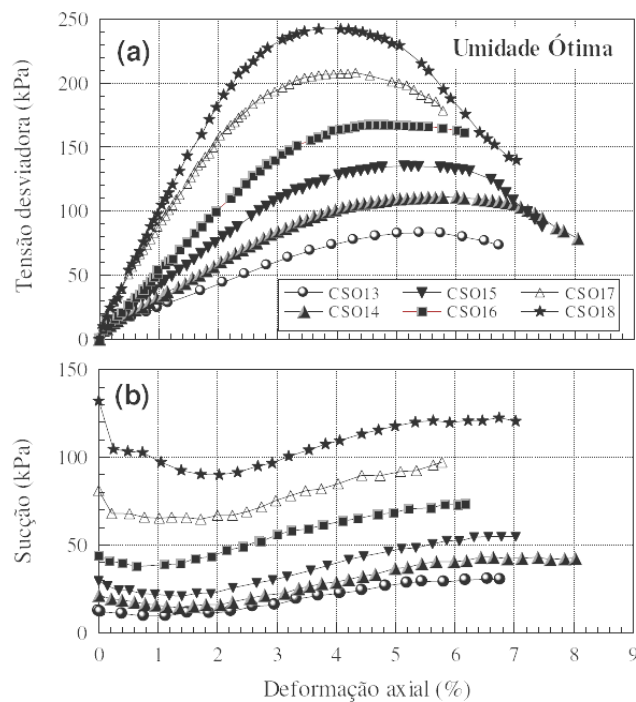


Figura 2.38 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no teor de umidade ótimo (Oliveira ,2004).

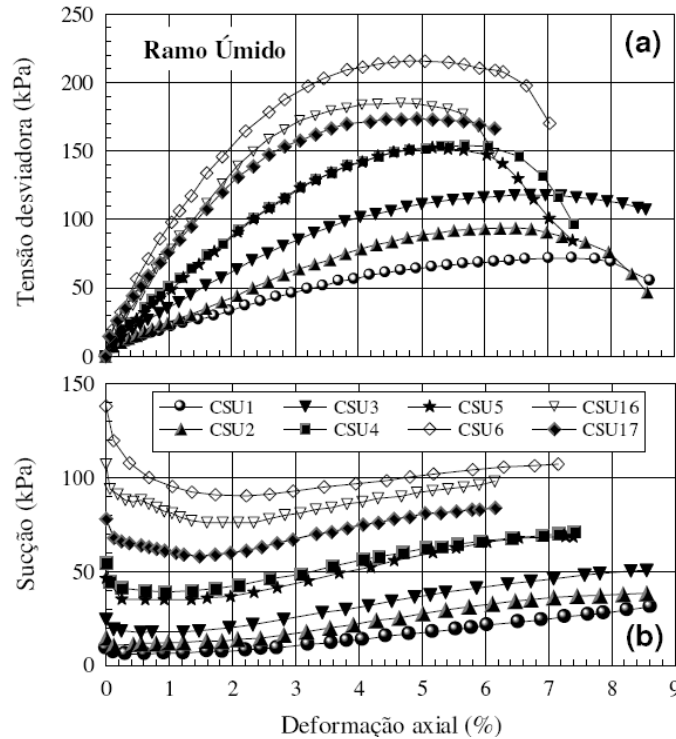


Figura 2.39 – Resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na amostra no ramo úmido da curva de Proctor (Oliveira, 2004).

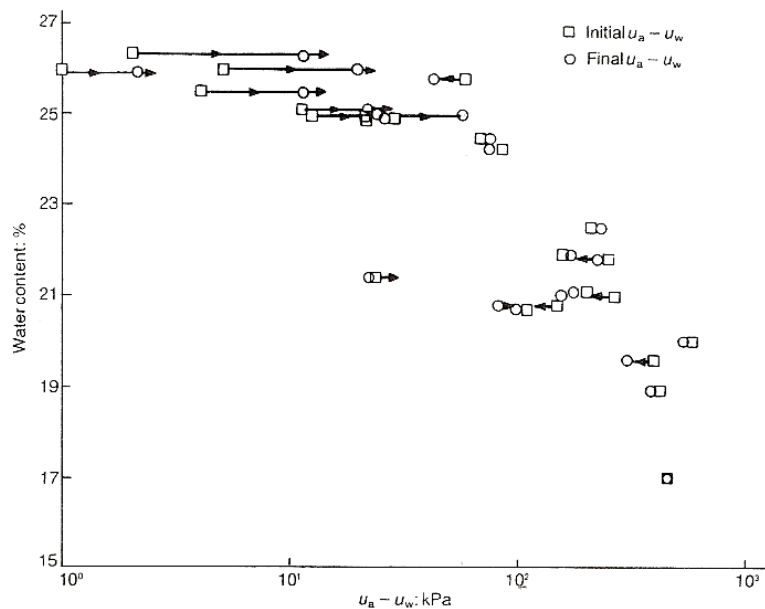


Figura 2.40 – Sucção no início e no final dos ensaios em amostras não saturadas com teor de umidade constante (Toll, 1990)

Colmenares e Ridley (2002) realizaram ensaios de resistência ao cisalhamento com medida de sucção observaram, conforme apresentado nas Figuras 2.41 e 2.42, um comportamento semelhante aos ensaios realizados por Toll (1990).

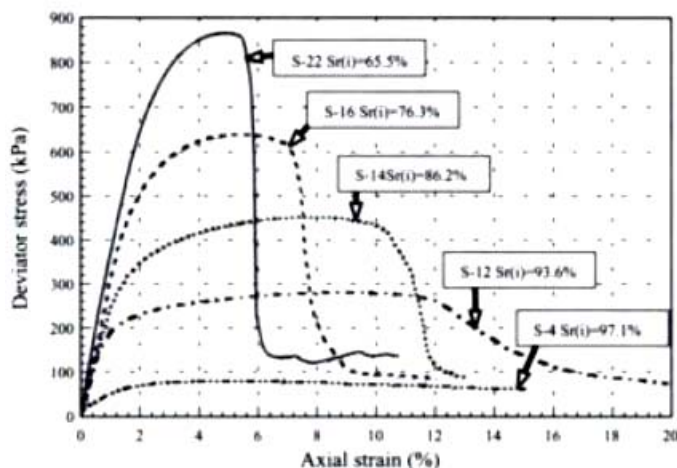


Figura 2.41 – Curvas tensão *versus* deformação axial para diferentes níveis de sucção (Colmenares e Ridley, 2002).

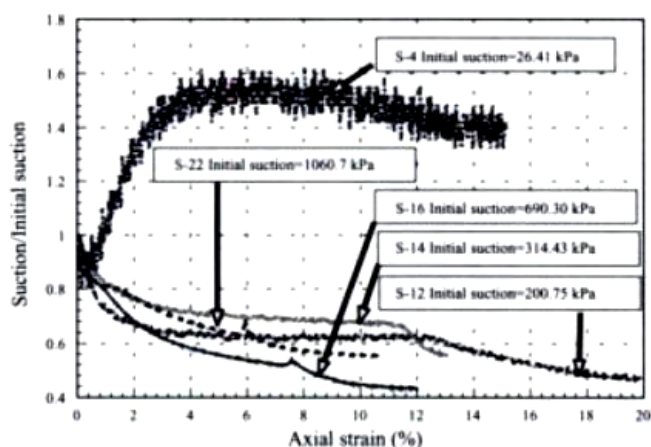


Figura 2.42 – Evolução da sucção com a deformação axial (Colmenares e Ridley, 2002).

Colmenares e Ridley (2002) ainda chamam a atenção para a linearidade entre a relação sucção *versus* teor de umidade. Na Figura 2.43 é mostrado o teor de umidade gravimétrico em função da sucção inicial e da sucção no pico de resistência dos ensaios de cisalhamento, onde é observada uma relação bi-linear entre o teor de umidade e a sucção inicial, assim como a relação entre o teor de umidade e a sucção na ruptura é linear.

Oliveira e Marinho (2002) analisaram a resistência não saturada de um solo residual compactado avaliada em ensaio de compressão simples com e sem medição de sucção através da Técnica de Papel Filtro e do Tensiômetro de Alta Capacidade. O TAC foi utilizado para medir a valores de sucção inferior a 500kPa durante a fase do cisalhamento e os

valores obtidos foram comparados com modelos de previsão da resistência que utilizam a curva de retenção.

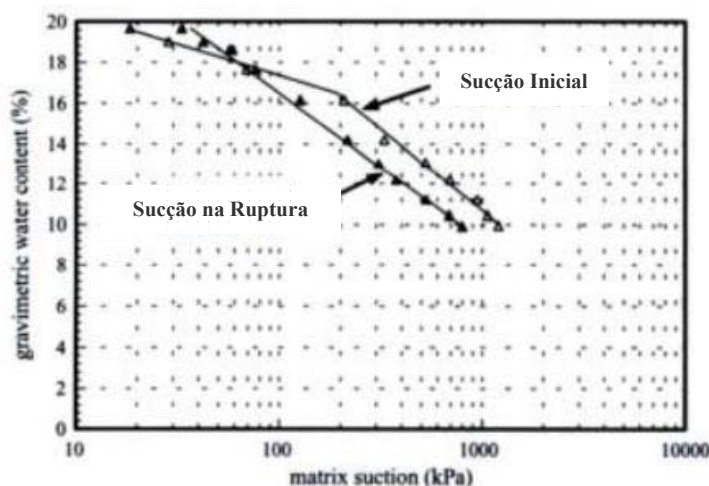


Figura 2.43 – Ajuste entre a sucção inicial e na ruptura em função do teor de umidade gravimétrica (Colmenares e Ridley .2002)

2.4.4. Previsão da Resistência em Solos Não Saturados

A obtenção das envoltórias de resistência do solo não saturado é de grande valia em numerosos problemas da engenharia geotécnica. A determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados em laboratório leva muito tempo e custa muito mais caro que os ensaios convencionais em solos saturados. Vanapalli et al. (1996), Fredlund et al. (1996), Khalili e Khabbaz (1998), propuseram métodos de previsão de resistência de forma alternativa com o auxílio da curva de retenção dos solo, valores de coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo determinados em ensaios de compressão triaxial saturados.

Vilar (2007) apresenta um ajuste matemático para a previsão de resistência ao cisalhamento de solos não saturados, que consiste no uso de uma função hiperbólica. Os parâmetros dessa função são obtidos com a realização de uma série de ensaios de compressão triaxial com o solo sob condição saturada e outra série de ensaios de compressão triaxial com a amostra sob condições de teor de umidade residual após secagem ao ar. Neste trabalho o

autor apresenta o ajuste para vários solos e mostra que para solos granulares o ajuste pode apresentar valores conservadores. Além dos solos granulares, o autor menciona que o modelo hiperbólico para os solos estudados por Röhm e Vilar (1995) e Soares e Campos (2005) reproduziu resultados conservadores ou até mesmo falhar. Em comum estes solos tem a natureza laterítica, com o valor de entrada de ar quase nula e que atinjam a condição residual em valores relativamente baixos de sucção. Entretanto o autor menciona que essas limitações e outras que possam surgir devem ser vistas como uma característica comum de todos os métodos empíricos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO, PROCTOR NORMAL E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Nesta pesquisa foi utilizado um solo típico do Centro Oeste do Estado de São Paulo. Neste foram realizados os ensaios de caracterização (Análise Granulométrica (NBR - 7181), Limite de Liquidez (NBR - 6459), Limite de Plasticidade (NBR - 7180) e Massa Específica dos Sólidos (NBR - 6508), além do ensaio de Compactação na Energia do Proctor normal (NBR - 7182).

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão triaxial, de compressão simples e nos ensaios para determinação da curva de retenção com o tensiômetro de alta capacidade foram compactados estaticamente em cinco camadas nas dimensões apresentadas na Tabela 3.1. As dimensões dos corpos de prova obedecem ao que preconiza a norma ASTM D 4767/95, onde a altura do corpo de prova deve ser de 2,0 a 2,5 vezes o seu diâmetro. Os parâmetros de compactação dos corpos de prova utilizados em todos os ensaios foram obtidos a partir da curva de compactação determinada no ensaio de compactação com Proctor normal. Foram compactados corpos de prova no teor de umidade nominal próximo ao teor de umidade ótimo para o grau de compactação de 95% do Proctor normal. Além disso, foram compactados corpos de prova também no teor de umidade ótimo, mas com graus de compactação de 92, 94, 97, 98 e 100% em relação à massa específica aparente seca máxima do ensaio de Proctor normal.

Tabela 3.1: Dimensões dos corpos de prova utilizados na pesquisa.

Ensaio	Diâmetro Médio (cm)	Altura Média (cm)
Triaxial e Compressão Simples	5,1	10,0
Curva de Retenção com o TAC	5,1	4,8
Técnica do Papel Filtro	5,0	1,1
Técnica do Funil de Pedra Porosa	4,4	1,6

3.2. MONTAGEM, SATURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TENSÍÔMETRO DE ALTA CAPACIDADE (TAC)

O tensiômetro utilizado nessa pesquisa é semelhante ao desenvolvido por Ridley e Burland (1993), o qual tem capacidade de medir valores de sucção da ordem de 1500kPa.

O tensiômetro é composto por um transdutor miniatura de fabricação da Entran modelo EPX-NO1 com escala de trabalho de 3500kPa (Figura 3.1). A este transdutor foi acoplada uma luva de aço inoxidável com uma pedra porosa de 500kPa de pressão de entrada de ar (Figura 3.2). Na Figura 3.3 é apresentada a configuração final do tensiômetro de alta capacidade. A abertura entre a pedra porosa e o transdutor de pressão (reservatório de água) é de 0,12cm o que equivale a um volume total de água livre no reservatório de aproximadamente 12mm³ (Figura 3.3). As pequenas quantidades de ar que possam ficar remanescentes em minúsculas fendas ou irregularidades nas paredes ou superfície do reservatório são retiradas com pressurização da água realizada com uma bomba hidráulica com capacidade de 6000kPa.

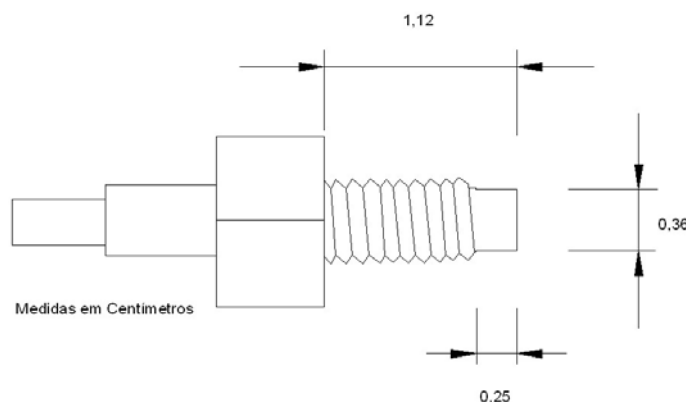


Figura 3.1 – Esquema do Transdutor em miniatura Entran modelo EPX-NO1.

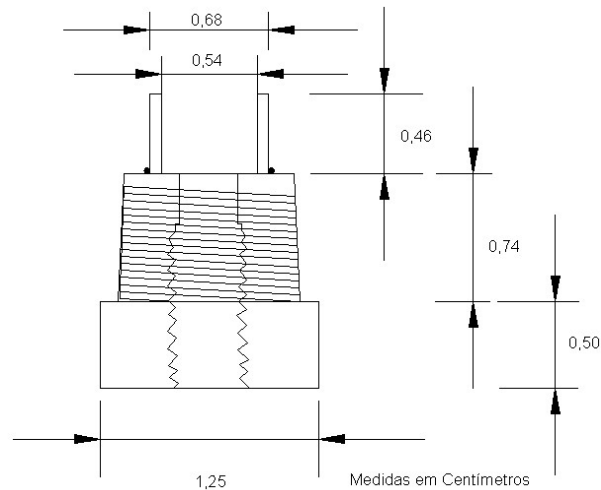


Figura 3.2 – Luva de acoplamento de aço inoxidável

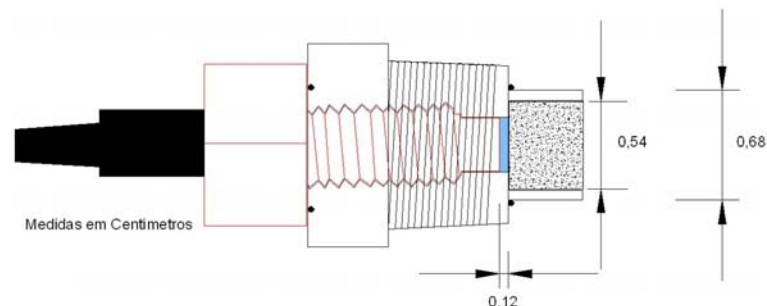


Figura 3.3 – Esquema do tensiômetro de alta capacidade

A saturação do transdutor configurou a etapa mais trabalhosa e demorada no desenvolvimento deste trabalho. Para tanto foi utilizada uma bomba hidráulica com capacidade de aplicar pressão de até 6MPa (Figura 3.4). Inicialmente foram aplicados ciclos de pressão com água destilada e deaerada, entretanto não foram eficientes no processo. Somente após o uso de uma solução à base do tensoativo Dodecil Sulfato de Sódio ($C_{12}H_{25}NaO_4S$) na concentração de 0,5g/litro de água destilada, com o objetivo de diminuir a tensão superficial da água, acompanhado do aumento do período de cada ciclo de pressurização para 72 horas foi observado aumento na velocidade de resposta do tensiômetro.

Para ter a certeza da saturação do tensiômetro foi adotado um critério proposto por Marinho (2003). Este consiste na aplicação de pressão de água no tensiômetro e em seguida

liberar a pressão repentinamente até que a mesma atinja a pressão atmosférica. O sistema foi considerado saturado quando o sistema atingiu a pressão atmosférica em menos de 1 segundo.



Figura 3.4 – Bomba hidráulica utilizada na saturação do tensiômetro de alta capacidade

Durante a realização dos primeiros testes com o tensiômetro, foi observado que o mesmo não apresentava medidas coerentes de valores de sucção. Após minuciosa investigação para detectar o problema, através de uma fotografia ampliada 52 vezes, foi detectada uma fissura na pedra porosa do tensiômetro (Figura 3.5). A pedra porosa foi substituída e o tensiômetro foi submetido a um novo ciclo de saturação. De acordo com Kuwajima (2000), depois de saturado, o tensiômetro deve ser mantido a uma pressão de água de no máximo 1500kPa para evitar danos à pedra porosa. A partir de então essa recomendação foi seguida e o êxito foi obtido. Após 3 meses de tentativas e aplicação de ciclos de pressão, o tensiômetro apresentou resposta satisfatória.

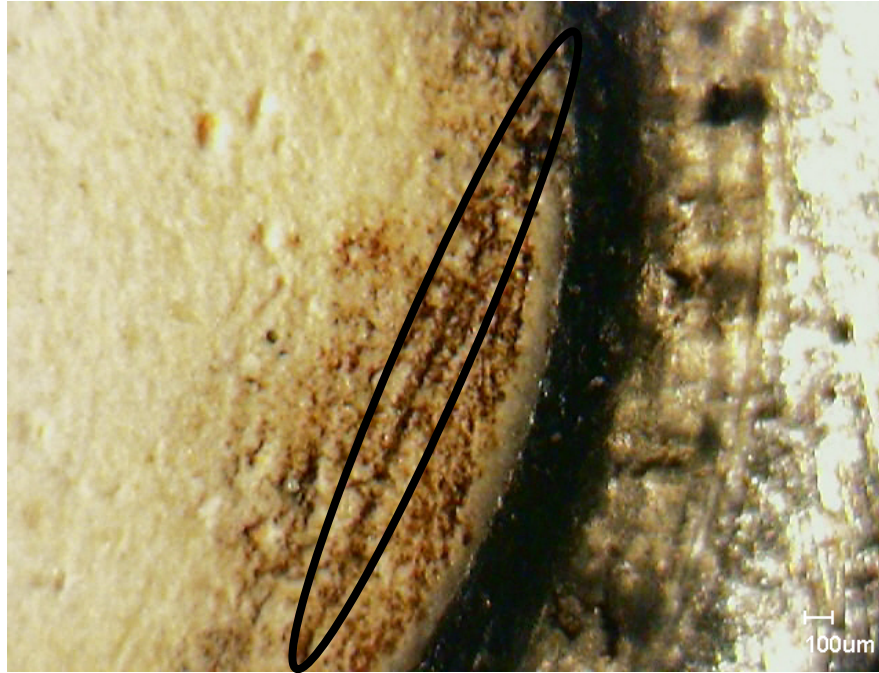


Figura 3.5 – Fissura na pedra porosa do tensiômetro (Fotografia ampliada 52 vezes)

A etapa seguinte à saturação foi a calibração do tensiômetro. Essa calibração pode ser realizada com a aplicação de pressão de compressão ou de tração. De acordo com Soto (2004), praticamente não há diferença entre calibrar o tensiômetro sob tração ou compressão. Como o esquema para a calibração sob compressão é mais simples e viável em laboratório, esta foi a opção. Assim foram aplicadas pressões crescentes a partir de 0kPa até 4000kPa com incrementos de 100kPa, conforme apresentado na Figura 3.6

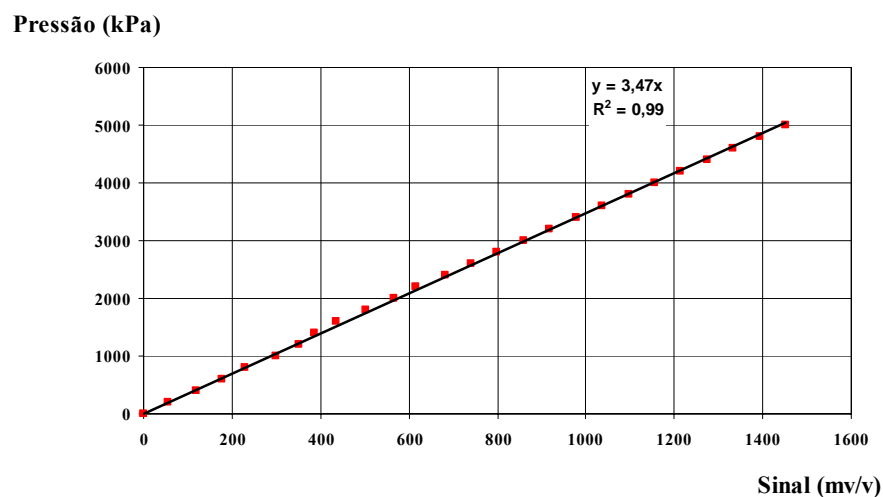


Figura 3.6 – Resultado da calibração do tensiômetro de alta capacidade

3.3. ADAPTAÇÃO DA CÂMARA DE ENSAIOS

Para a realização dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção na base do corpo de prova optou-se por adaptar uma câmara de ensaios de compressão triaxial. Essa adaptação teve como objetivo proporcionar o contato entre tensiômetro de alta capacidade ao corpo de prova.

Nesta adaptação foi feito um furo na base da câmara de ensaios. Este furo foi dimensionado de acordo com a luva de acoplamento de tal sorte a tornar possível o transpasse do tensiômetro (Figura 3.7).



Figura 3.7– Furo na base da câmara de ensaios.

Além do furo na base da câmara de ensaios foi projetado um pedestal de latão de forma que o tensiômetro pudesse ser acoplado e colocado em contato com o corpo de prova. Este pedestal foi projetado com precisão a fim de evitar folgas e por consequência possíveis vazamentos entre o mesmo e a parede do tensiômetro (Figura 3.8). Nas Figuras 3.9 e 3.10 são apresentados os desenhos esquemáticos do pedestal referente à vista inferior do pedestal e em

corde. A configuração final da base da câmara de ensaios pode ser observada em vista superior na Figura 3.11.

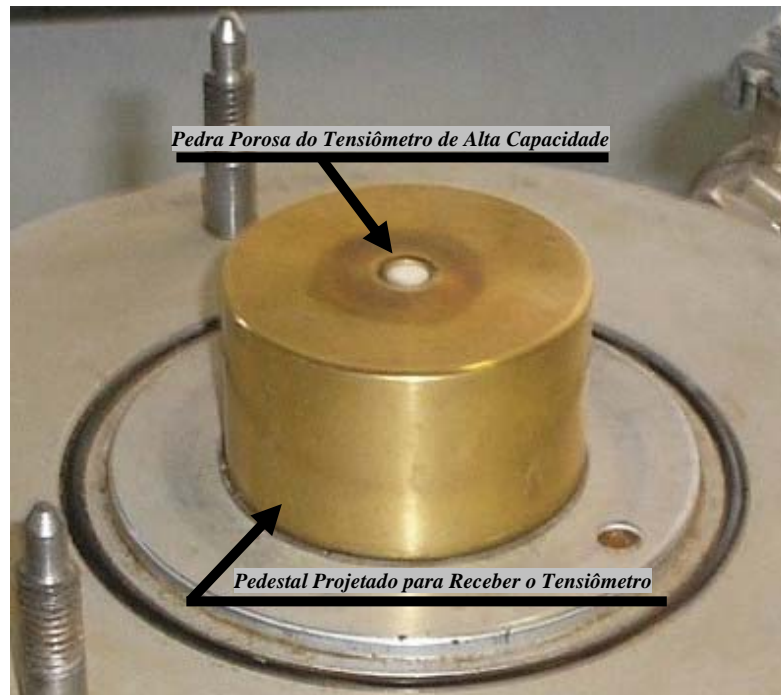


Figura 3.8– Pedestal acoplado a base da câmara de ensaios.

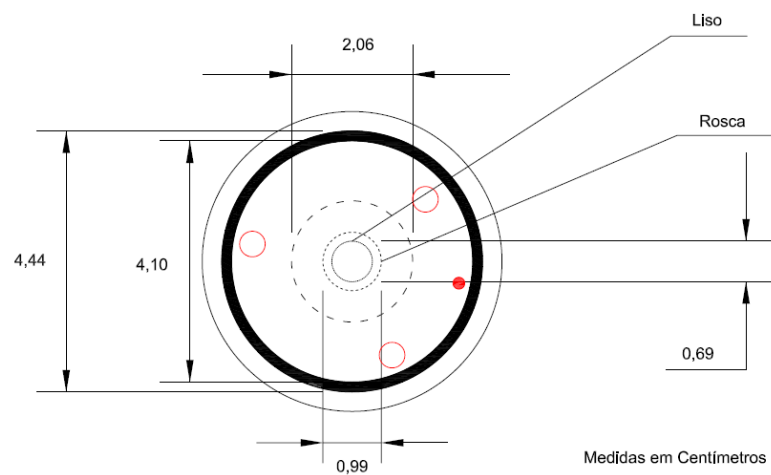


Figura 3.9 – Vista inferior do pedestal adaptado para acoplar o tensiômetro de alta capacidade.

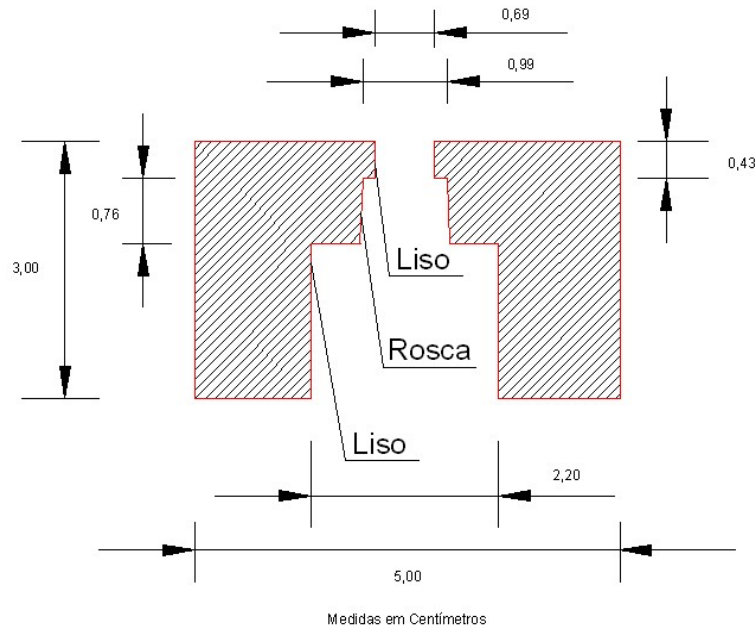


Figura 3.10– Vista em corte do pedestal adaptado para acoplar o tensiômetro de alta capacidade.

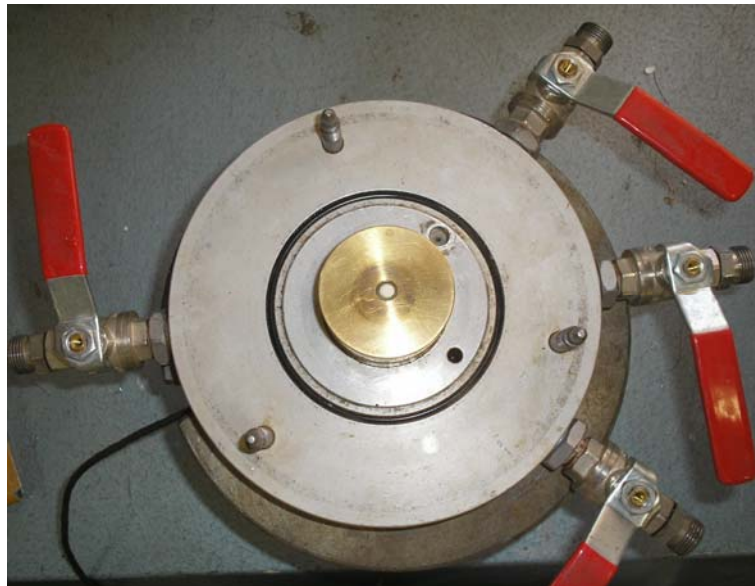


Figura 3.11– Configuração final da base da câmara de ensaios.

3.4. TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

Em paralelo a adaptação da câmara de ensaios, foram realizados ensaios para determinar a curva de retenção do solo analisado. Para tanto foram utilizadas as técnicas de funil de pedra porosa, para medir sucção até 13kPa e papel filtro com contato para medir

valores mais elevados de sucção matricial. Foram também realizadas determinações de curvas de retenção com o tensiômetro de alta capacidade para valores de sucção até o limite de operação que era de 500kPa.

3.4.1. Técnica do Funil de Pedra Porosa

O ensaio de funil de pedra porosa se caracteriza por ser rápido e de fácil execução. O princípio de funcionamento deste equipamento consiste na imposição da sucção através de uma haste flexível. Esta haste interliga a placa porosa que está em contato direto com o corpo de prova e um pequeno reservatório. Este reservatório tem a função de fornecer água ao corpo de prova no caso do seu potencial estar mais elevado ou receber água do mesmo no momento da imposição da sucção. Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram inicialmente saturados, colocando-os sobre uma placa porosa parcialmente submersa por um período não inferior a 24 horas.

Após a montagem da câmara e das hastes que configuram o equipamento são impostos os gradientes de altura criando um desnível entre o reservatório e a amostra de solo de modo que o potencial na amostra que inicialmente é igual ao do sistema se torne maior e o corpo de prova comece a ceder água. Isso faz com que o corpo de prova altere seu teor de umidade, que inicialmente era o de saturação e atinja após o equilíbrio um valor de teor de umidade referente à sucção imposta pelo desnível.

Após o equilíbrio, verificado a partir do momento em que cessa a drenagem de água da amostra para o reservatório, a amostra é retirada do funil e é determinado o seu teor de umidade. Com esse método buscou-se refinar o trecho de baixa sucção da curva de retenção obtida previamente com o papel filtro. Para a realização deste ensaio foram moldados 9 corpos de provas nos quais foram impostos valores de sucção de 1 a 9kPa. Para

tanto foram impostas cargas de sucção de 10 a 90cm. A Figura 3.12 mostra o esquema representativo deste ensaio apresentado por Libardi (1995).

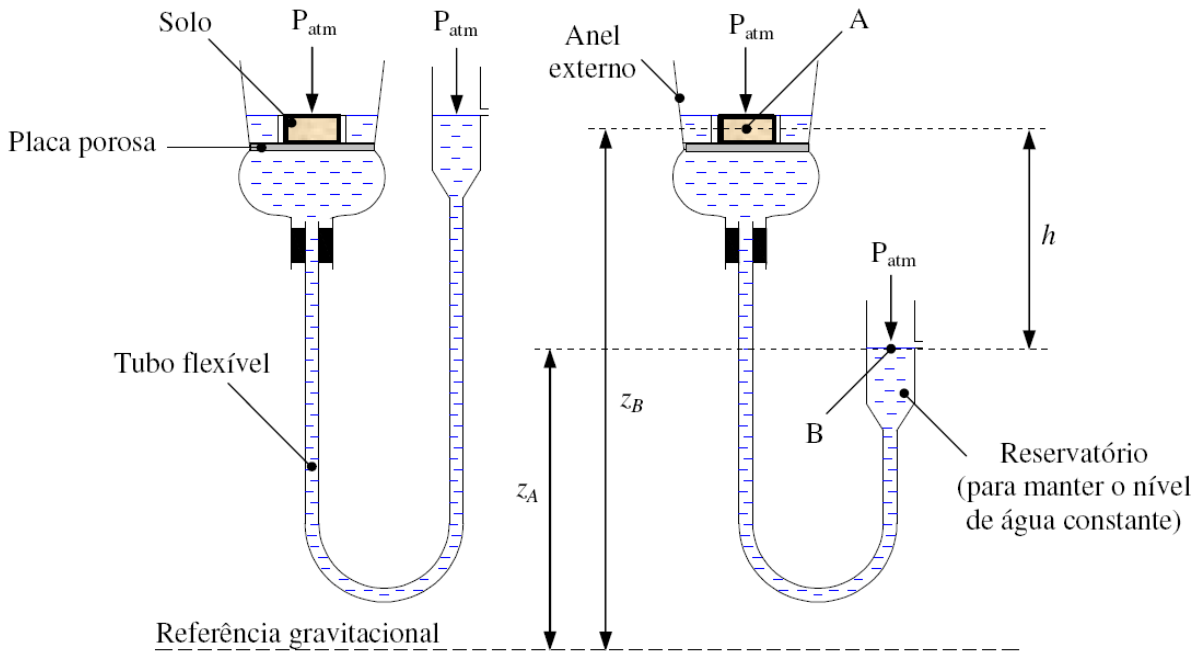


Figura 3.12– Esquema do funil de placa porosa adaptado de Libardi (1995).

3.4.2. Técnica de Papel Filtro

A técnica de Papel Filtro baseia-se no princípio de absorção de umidade e equilíbrio de potenciais que existe quando um material poroso, com diferença de teor umidade é colocado em contato direto ou não, com um papel filtro. A sucção do solo pode ser obtida referindo-se a curva de calibração do papel filtro.

O ensaio de papel filtro pode ser montado com duas configurações diferentes onde o papel pode estar em contato direto com o solo, onde o fluxo ocorre por adsorção e capilaridade ou sem contato, onde o fluxo ocorre na forma de vapor. Na pesquisa a configuração utilizada foi aquela em que há contato direto do corpo de prova com o papel Whatman n. 42, medindo-se, portanto, a sucção matricial do solo.

Para a execução deste ensaio, foram moldados 20 corpos de prova nas dimensões apresentadas anteriormente na Tabela 3.1. Foi determinada a massa total do conjunto que contempla solo e anel de moldagem. De posse dos valores de teor de umidade, massa específica do solo e massa específica dos sólidos foi possível determinar todos os índices físicos das amostras que foram utilizados para o cálculo do ensaio. Em seguida todos os corpos de prova foram colocados sobre uma placa porosa parcialmente submersa em água destilada e deaerada com o intuito de promover o umedecimento dos corpos de prova.

Completado o estágio de umedecimento, os corpos de prova foram colocados para secar até que os mesmos atingissem massas pré-determinadas que correspondessem a teores de umidade pré-determinados. Ao atingir essa massa, cada um dos corpos de prova foi envolvido cuidadosamente em contato com o papel filtro e colocado em isolamento dentro de uma caixa de isopor por um período não inferior a 7 dias e não superior a 10 dias. Posteriormente cada corpo de prova foi retirado da caixa de isopor e foi determinado o teor de umidade do papel bem como o do corpo de prova.

De posse dos valores de umidade do papel foi possível determinar sua sucção, que devido ao equilíbrio é igual a sucção no solo, pela equação de Chandler et al. (1992). A Equação 3.1 foi utilizada para o cálculo da sucção para teores de umidade inferiores a 47% enquanto a Equação 3.2 foi para cálculo referente a teores de umidade superiores a 47%. Com os pares de valores sucção e teor de umidade foi possível determinar a curva de retenção por este método.

$$\psi = 10^{4,84-0,0622 \cdot w_{PAPEL}} \longrightarrow (\text{kPa}) \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\psi = 10^{6,05-2,48 \cdot \log w_{PAPEL}} \longrightarrow (\text{kPa}) \quad \text{Equação 3.2}$$

3.4.3. *Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC)*

Para a determinação da curva de retenção com o TAC foram moldados nas dimensões apresentadas anteriormente na Tabela 3.1. Para promover a homogeneização dos corpos de prova, os mesmos foram envolvidos por um filme plástico e colocados por um período de 24 horas dentro de um ambiente que teve como objetivo minimizar a alteração do teor de umidade do corpo de prova, além de promover a homogeneização da umidade nos mesmos. A preparação dos corpos de prova seguiu o procedimento observado na técnica de papel filtro.

Posteriormente, conforme no ensaio de papel filtro, os corpos de prova foram colocados para secar, um a um, até que atingissem massas referentes a teores de umidade pré-determinados. A cada massa previamente determinada atingida pelo corpo de prova era determinada a sucção com o tensiômetro de alta capacidade e em seguida o corpo de prova era deixado secar até que atingisse um novo valor e fosse realizada uma nova medida de sucção. Para cada corpo de prova foram realizadas 7 medidas de sucção.

O procedimento utilizado nessas medidas foi o mesmo adotado por Soto (2004), utilizando-se uma pasta de caulim próximo ao teor de umidade referente ao limite de liquidez. Essa pasta é colocada sobre a pedra porosa do tensiômetro e tem como objetivo garantir o contato entre a pedra porosa e a base do corpo de prova.

3.5. AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO

Para ajustar os dados experimentais obtidos nos ensaios de papel filtro e de funil de placa porosa foi utilizada a função de Van Genuchten (1980) (Equação 3.3). Para esse ajuste foi utilizado o software SWRC (Soil Water Retention Curve), desenvolvido por Dourado Neto et al. (2001).

$$W = W_r + \frac{W_s - W_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad \text{Equação 3.3}$$

Em que:

W = Teor de umidade gravimétrico

W_r = Teor de umidade residual

W_s = Teor de umidade de saturação

α , m e n = Parâmetros de ajuste da curva de retenção

Na equação 3.3 os parâmetros m e n são interdependentes. O parâmetro m é responsável pelas alterações no início da curva de retenção, onde as sucções são baixas e o teor de umidade alto. Já o parâmetro n é responsável pela forma no final da curva de retenção, região onde são obtidos altos valores de sucção e baixo teor de umidade.

O modelo proposto por Van Genuchten (1980) tem como limitação a capacidade de ajustar curvas que apresentam uma entrada de ar. Entretanto, é comumente observado que os solos compactados apresentam duas entradas de ar. A primeira referente aos macroporos do solo e a segunda referente aos seus microporos. Para realizar esse ajuste foi utilizado um artifício onde foram realizados dois ajustes isoladamente, seguida da combinação dos mesmos. Para tanto foi considerado que o teor de umidade residual bem como a referente sucção do primeiro ajuste foi o teor de umidade de saturação e a respectiva sucção do segundo ajuste.

3.6. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de resistência com o solo na condição saturada e não saturada. Na condição saturada foram realizados ensaios de compressão triaxial consolidados drenados, denominados CD. Na condição não saturada foram realizadas duas séries de ensaios de compressão triaxial consolidados não drenados à água e drenados ao ar, com uma amostra no teor de umidade ótimo e outra com amostra no teor de umidade residual.

Com os resultados destes ensaios, foi possível utilizar um ajuste matemático proposto por Vilar (2007) o qual permite avaliar a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado. O método consiste na aplicação de uma função hiperbólica, apresentada na Equação 3.4, cujos parâmetros são determinados a partir de um conjunto de ensaios de compressão triaxial saturados e outro conjunto de ensaios de compressão triaxial não saturados com a amostra no teor de umidade residual.

$$c = c' + \frac{S}{a + b \cdot s} \quad \text{Equação 3.4}$$

Em que:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} c = c_{ult} = c' + \frac{1}{b} = \text{Coesão Máxima ou Última}$$

c' = Coesão Efetiva

S = Sucção.

a e b = Parâmetros de ajuste.

Foram realizados ensaios de compressão simples sob três condições. A primeira delas buscou validar o equipamento com ensaios de repetibilidade, onde foram realizados 16 ensaios com os corpos de prova moldados nas mesmas condições. Na segunda série de ensaios foi variada a massa específica aparente seca dos corpos de prova e na terceira e última série de ensaios foram moldados corpos de prova com diferentes teores de umidade.

3.6.1. Ensaios de Resistência à Compressão Triaxial

Nos ensaios drenados com solo saturado, para a saturação do corpo de prova foi utilizada a técnica de contra-pressão. Durante esse procedimento tanto a contra-pressão quanto a tensão confinante eram incrementadas em 50kPa, mantendo-se a contra-pressão 10kPa menor que a confinante.

O critério adotado para a determinação da saturação do corpo de prova foi o parâmetro de Skempton (B) que varia de 0, para o solo seco, até 1, valor que corresponde ao solo saturado. O corpo de prova foi considerado apto para a realização do ensaio quando o parâmetro B foi superior a 0,96. A partir daí foi aplicada a respectiva tensão de adensamento.

Depois de adensado o corpo de prova, com gráfico de variação volumétrica em função da raiz do tempo, foi definida a velocidade a qual o corpo de prova seria submetido ao cisalhamento. O critério adotado para determinar a velocidade de cisalhamento foi o proposto por Head (1986). A velocidade determinada para o ensaio de compressão triaxial consolidado drenado foi através desse método foi de 0,03mm/min. Essa velocidade foi utilizada para os outros ensaios utilizados nessa pesquisa e corresponde a menor das velocidades utilizadas por Oliveira (2004).

3.6.1.1. Ensaio de resistência à compressão triaxial consolidado drenado – (CD) – Solo Saturado

Este é um tipo de ensaio convencional que foi realizado para caracterizar a resistência saturada do solo estudado e subsidiar a aplicação do ajuste matemático proposto por Vilar (2007), previamente descrito.

3.6.1.2. Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade constante (CW_{PN}) - Solo não saturado compactado e ensaiado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal

Essa série de ensaios foi realizada com o solo compactado no teor de umidade ótimo e com o grau de compactação de 95% do Proctor normal. Este ensaio é semelhante ao ensaio de compressão triaxial consolidado não drenado e tem como característica preservar o teor e umidade da amostra desde início até o final do ensaio. A fase de consolidação deste ensaio é semelhante à empregada aos ensaios triaxiais convencionais, com solo saturado, sendo que nessa série de ensaios, as válvulas de drenagem de ar permaneceram abertas e as de drenagem de água foram fechadas.

De acordo com Fredlund (1993), as curvas tensão *versus* deformação dos ensaios tipo CW são semelhantes às apresentadas nos ensaios tipo CD. Estes ensaios foram realizados a fim de verificar a influência da tensão de confinamento nos corpos de prova sob condições de compactação, e assim avaliar o aumento de resistência do mesmo se comparado com os ensaios de compressão simples com os corpos de prova sob condições semelhantes.

3.6.1.3. Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade residual ($CW_{residual}$) - Solo não saturado compactado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal e ensaiado com teor de umidade residual

Esta série de ensaios foi realizada em condições semelhantes aos ensaios tipo CD e CW_{PN} . A diferença é que os corpos de prova, após moldados foram deixados secar até que os mesmos atingissem o teor de umidade residual, na qual permaneceu até o final do ensaio. A garantia que o corpo de prova atingiu a condição de teor de umidade residual se deu pelo controle da massa do corpo de prova, onde foi considerado que o corpo de prova atingiu essa condição, a partir do momento em que a massa do corpo de prova mostrou-se constante em condições ambiente. O tempo necessário para que os corpos de prova atingissem o teor de

umidade residual foi da ordem de 12 dias. Os corpos de prova foram consolidados e em seguida cisalhados com a drenagem aberta para o ar.

3.6.2. Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Conforme já mencionado, os ensaios de compressão simples foram realizados com medida direta de sucção na base do corpo de prova. Para complementar a aparelhagem convencional foram utilizados:

- Um tensiômetro de alta capacidade (TAC);
- Uma câmara de ensaios de compressão triaxial adaptada;
- Pasta de caulim com teor de umidade próximo ao limite de liquidez;

Depois de compactado foram determinados os índices físicos dos corpos de prova. O tensiômetro foi retirado da bomba hidráulica utilizada para mantê-lo saturado, transpassado pela base da câmara de ensaios triaxial adaptada e por rosqueamento foi acoplado ao pedestal da câmara de ensaios, sempre com a preocupação de evitar a secagem da pedra porosa. Em seguida uma pasta de caulim, previamente preparada, foi colocada sobre a pedra porosa do tensiômetro de alta capacidade. Essa pasta tem como objetivo promover a continuidade hidráulica e garantir o contato entre o tensiômetro e a base do corpo de prova.

Envolveu-se o corpo de prova por um filme plástico a fim de minimizar a perda de teor de umidade do corpo de prova para o ambiente (Figuras 3.13). Além disso, a câmara foi fechada semelhante ao que é feito nos ensaios de compressão triaxial (Figuras 3.14). A partir daí esperou-se a estabilização das leituras registradas pelo transdutor, condição que

demonstrava o equilíbrio entre a pasta de caulim e o tensiômetro. Este tempo de equilíbrio não superou o tempo de 15 minutos em nenhum dos ensaios. Durante a realização dos mesmos foi possível observar que o tempo de equilíbrio era maior quanto maior fosse a massa da pasta de caulim adicionado sobre a pedra porosa. Uma vez atingido o equilíbrio, os instrumentos eram zerados e o corpo de prova era posicionado na câmara. O TAC começava a registrar leituras, pois a pasta de caulim que estava em equilíbrio com o tensiômetro começava a perder água para o corpo de prova em busca do novo equilíbrio de potencial. O equilíbrio entre o corpo de prova e o sistema foi em média de 50 minutos. Atingido o novo equilíbrio iniciava-se o cisalhamento, que duravam cerca de 5 horas.



Figura 3.13 – Corpo de prova envolto por plástico para reduzir a perda de umidade para o ambiente.



Figura 3.14 – Ensaio de compressão simples montado.

3.6.2.1. Ensaio de resistência à compressão simples – Série de repetibilidade

Nesta série de ensaios foram moldados 16 corpos de prova em condições de compactação semelhantes. O objetivo desta série de ensaios era validar o equipamento, pois

se esperava que sob condições semelhantes, os valores de sucção deveriam ser pouco variáveis. Nessa série de ensaios os corpos de prova foram moldados com grau de compactação do ensaio de Proctor normal e teor de umidade ótimo de 95% e 15,5% respectivamente.

3.6.2.2. Ensaio de resistência à compressão simples – Série com variação da massa específica aparente seca do solo (Grau de compactação)

Nesta etapa o objetivo foi avaliar a influência do grau de compactação na sucção do solo. Foram avaliados desde a sucção inicial, sucção na ruptura até a sucção referente ao trecho de resistência residual. Foram moldados corpos de prova com graus de compactação de 92, 94, 97, 98 e 100% do grau de compactação com teor de umidade ótimo do ensaio de Proctor normal (15,3%).

3.6.2.3. Ensaio de resistência à compressão simples – Série com variação do teor de umidade após aplicação de trajetória de umedecimento.

Nessa série de ensaios os corpos de prova foram compactados com massa específica referente a 95% do grau de compactação do ensaio de Proctor normal e no teor de umidade ótimo. Em seguida os corpos de prova foram submetidos ao umedecimento por ascensão capilar da mesma forma que no ensaio de papel filtro e no ensaio de determinação da curva de retenção com o tensiômetro de alta capacidade. Em seguida os corpos de prova foram deixados secar até atingirem massas pré-determinadas para teores de umidade pré-determinados. Foram realizados ensaios com medida de sucção na base dos corpos de prova que após a trajetória de umedecimento apresentavam teores de umidade de 14, 15, 16, 17 e 20% de teor de umidade.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A curva granulométrica obtida para o solo estudado está apresentada na Figura 4.1. Na Tabela 4.1 é apresentado o resumo do gráfico de análise granulométrica, bem como os resultados dos ensaios de limites de Atterberg e massa específica dos sólidos.

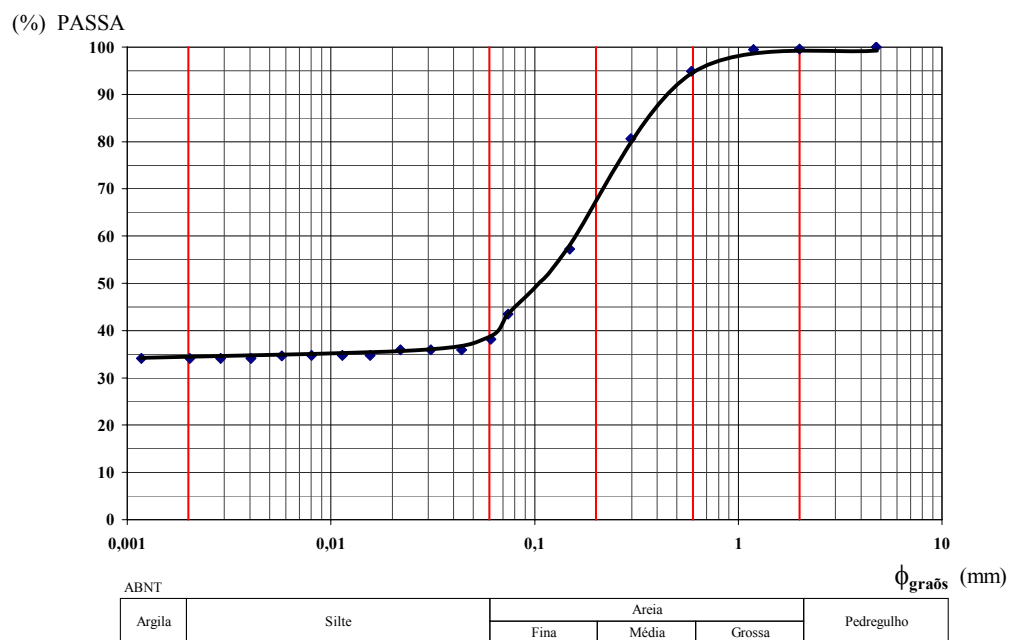


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo estudado

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização

Granulometria Conjunta	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
	0%	5%	28%	29%	4%	34%
Limites de Atterberg	w_L (%)		w_P (%)		I_P (%)	
	42		22		20	
Massa Específica dos Sólidos (g/cm^3)						
2,69						

4.2. ENSAIO DE PROCTOR NORMAL

O resultado do ensaio de compactação pode ser observado na Figura 4.2, onde é apresentado um gráfico de massa específica aparente seca em função do teor de umidade. Adicionalmente são apresentadas as curvas de grau de saturação referentes a 80%, 90% e 100%.

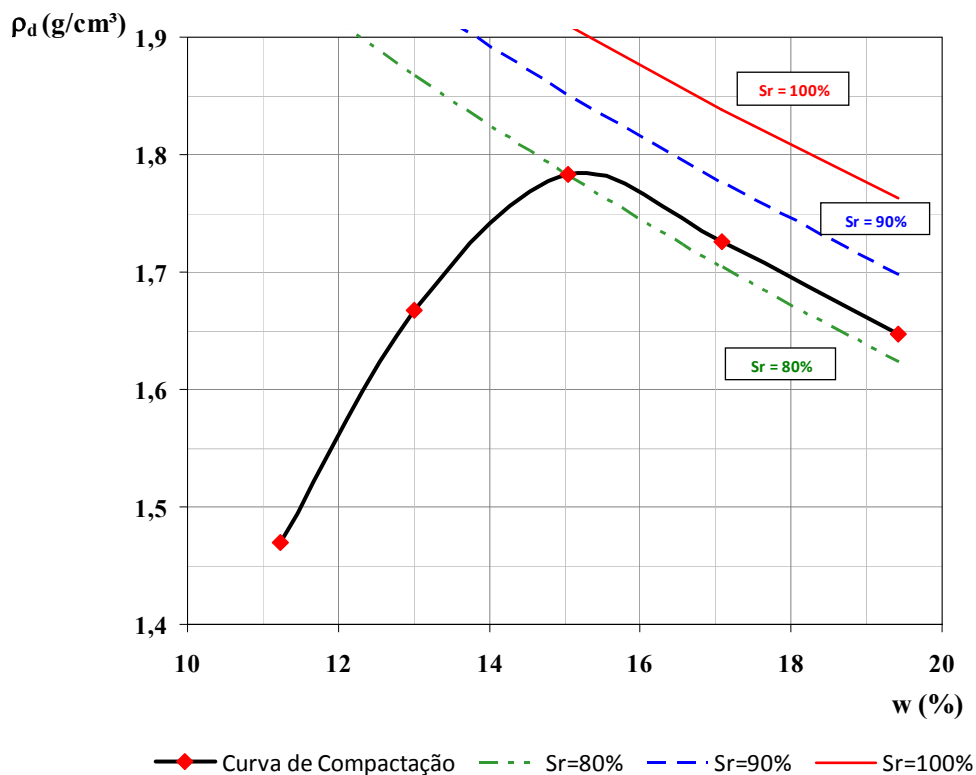


Figura 4.2 – Curva de compactação do Proctor normal

4.3. SATURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TENSIOMETRO DE ALTA CAPACIDADE (TAC)

Na Figuras 4.3 é apresentado o resultado de dois ciclos de pressurização para a saturação do tensiômetro de alta capacidade, sendo que o primeiro corresponde ao comportamento do tensiômetro antes da saturação e o segundo, correspondente ao comportamento do tensiômetro saturado.

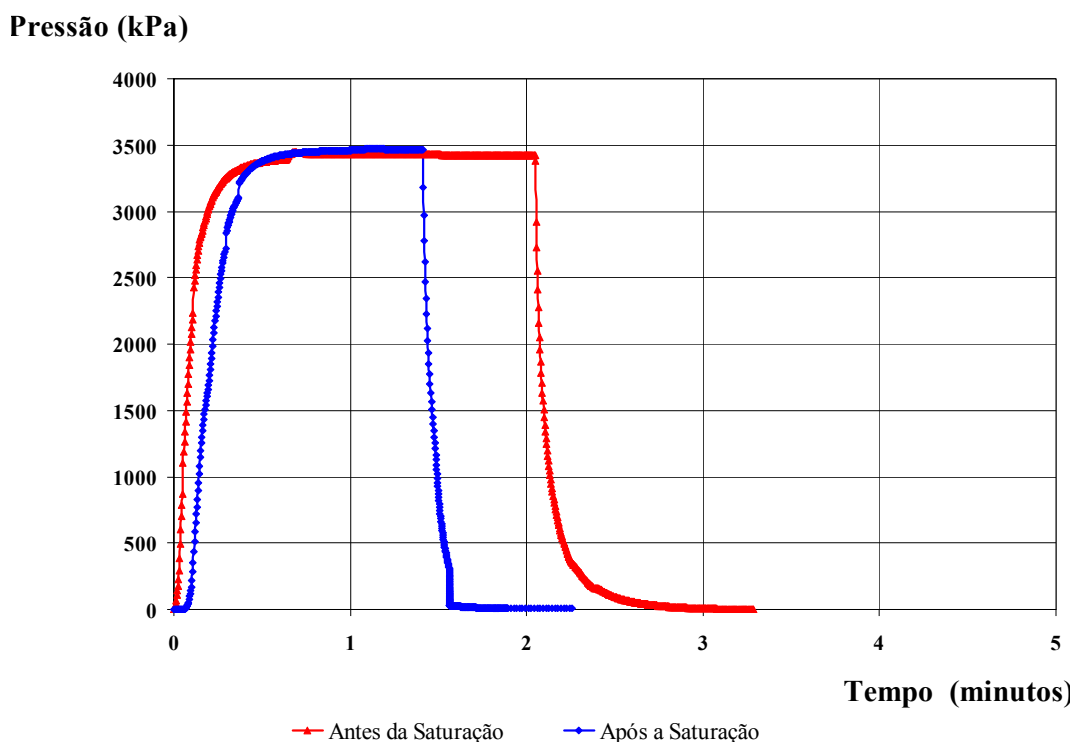


Figura 4.3 – Verificação da saturação do tensiômetro de alta capacidade.

4.4. CURVA DE RETENÇÃO

Os pontos experimentais obtidos pelas técnicas de papel filtro (PF) e de funil de pedra porosa (FPP) bem como os ajustes desses pontos estão apresentados na Figura 4.4. O primeiro trecho da curva, denominado VG1 é válido para valores de sucção até 2000kPa. O ajuste VG2, complementa a curva de retenção e refere-se a valores de sucção de 2000kPa até

cerca de 40000kPa. Na Tabela 4.2 estão apresentados os parâmetros utilizados para ajustar a curva de retenção.

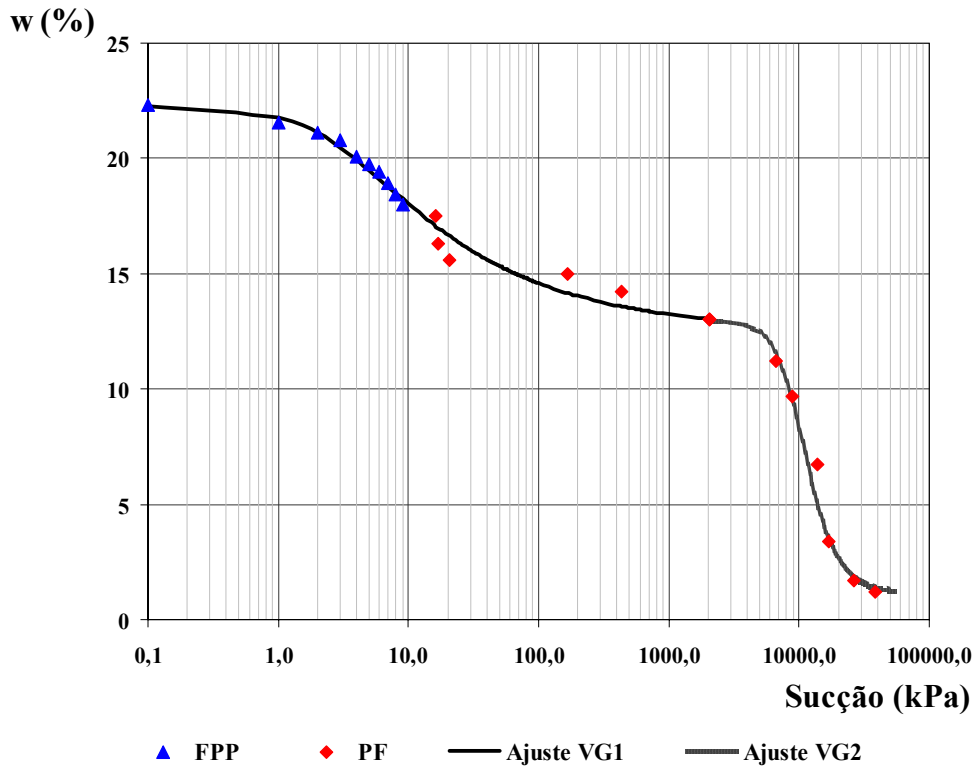


Figura 4.4 – Ajuste dos valores experimentais da curva de retenção obtidos pelos métodos do funil de placa porosa e papel filtro.

Tabela 4.2– Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água pelo método de Van Genuchten (1980).

Ajuste	α	n	m	R^2	w_s	w_r
VG1	0,3218	1,45	0,31	0,97	22,3%	13,0%
VG2	0,0001	3,98	0,75	0,99	13,0%	1,2%

Na Tabela 4.3 estão apresentados os valores de sucção medidos em cada uma das determinações com o tensiômetro de alta capacidade (TAC), bem como os seus referentes valores de teor de umidade e grau de saturação. No cálculo do grau de saturação admitiu-se que o corpo de prova não sofreu variação volumétrica. Na Figura 4.5 apresentam-se esses valores obtidos nas determinações com o tensiômetro de alta capacidade, sobrepostos na curva de retenção apresentada na Figura 4.4.

Tabela 4.3– Determinações da sucção com o Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC).

Determinação 1			Determinação 2			Determinação 3			Determinação 4			Determinação 5		
Sr (%)	w (%)	Ψ (kPa)	Sr (%)	w (%)	Ψ (kPa)	Sr (%)	w (%)	Ψ (kPa)	Sr (%)	w (%)	Ψ (kPa)	Sr (%)	w (%)	Ψ (kPa)
87,2	19,1	13,0	91,5	20,0	15,0	90,0	19,7	17,0	97,2	21,2	15,0	91,9	20,1	20,0
83,7	18,3	21,0	87,9	19,2	18,0	86,0	18,8	25,0	89,0	19,4	19,0	86,9	19,0	52,0
78,3	17,1	48,0	83,3	18,2	37,0	77,7	17,0	89,0	86,4	18,9	28,0	84,8	18,5	86,0
75,1	16,4	122,0	77,3	16,9	109,0	73,7	16,1	149,0	80,1	17,5	65,0	79,8	17,5	100,8
70,0	15,3	144,0	70,0	15,3	163,0	71,7	15,7	155,0	70,9	15,5	158,0	77,8	17,0	115,9
67,3	14,7	388,0	65,0	14,2	355,0	68,1	14,9	248,0	65,0	14,2	410,0	72,2	15,8	165,0
60,3	13,2	522,0	59,6	13,0	507,0	64,0	14,0	429,0	61,3	13,4	509,0	68,1	14,9	275,0

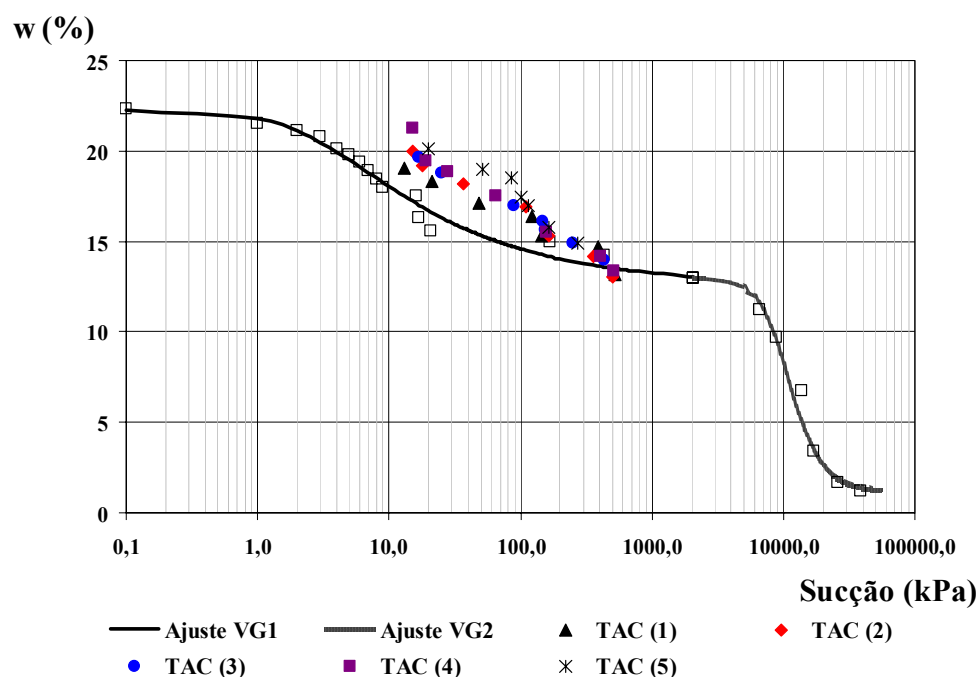


Figura 4.5 – Curva de retenção e pontos experimentais obtidos com o tensiômetro de alta capacidade.

4.5. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

4.5.1. Ensaios de Resistência à Compressão Triaxial

Na Tabela 4.4 são apresentadas as características dos ensaios, como tensão de confinamento e características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de triaxiais como volume, massa, teor de umidade inicial e final (Pós-Ensaio), bem como o grau de

compactação utilizado. Já na Tabela 4.5 são apresentados os índices físicos referente aos corpos de prova, como também os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4.4 – Características dos ensaios e dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão triaxial.

Ensaio	Confinante (kPa)	Vcp (cm ³)	Mcp. (g)	W _{inicial} (%)	W _{Final} (%)	GC _{Mold.} (%)
CD	50	202,7	401,5	15,5	20,2	96,1
CD	100	204,9	402,7	15,5	19,3	95,3
CD	200	204,9	400,4	15,3	19,5	94,9
CW _(PN)	50	205,2	400,4	15,3	15,8	94,8
CW _(PN)	100	204,6	403,1	15,3	15,7	95,7
CW _(PN)	200	203,9	398,0	15,3	15,9	94,9
CW _(residual)	50	205,3	400,8	15,4	1,2	94,8
CW _(residual)	100	205,5	401,4	15,4	0,9	94,8
CW _(residual)	200	204,7	399,0	15,3	1,2	94,7
	Média	204,8	401,0	15,4		95,1
	DP	0,89	1,64	0,084		0,45
	CV (%)	0,43	0,41	0,55		0,5

Tabela 4.5 – Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão triaxial e suas respectivas média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Ensaio	e	n (%)	Sr (%)	$\rho_{d95\%}$ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	θ_w (%)
CD	0,59	37,09	69,80	1,69	1,96	25,9
CD	0,59	37,29	69,68	1,69	1,95	26,0
CD	0,59	37,26	69,77	1,69	1,95	26,0
CW _(PN)	0,60	37,32	69,12	1,69	1,95	25,8
CW _(PN)	0,57	36,43	72,75	1,71	1,98	26,5
CW _(PN)	0,59	36,93	71,22	1,70	1,97	26,3
CW _(residual)	0,59	37,26	69,30	1,69	1,95	25,8
CW _(residual)	0,58	36,67	71,09	1,70	1,97	26,1
CW _(residual)	0,59	37,23	69,38	1,69	1,95	25,8
	Média	37,07	70,17	1,69	1,96	26,0
	DP	0,30	1,15	0,008	0,01	0,23
	CV (%)	0,8	1,6	0,5	0,5	0,9

4.5.1.1. Ensaio de resistência à compressão triaxial consolidado drenado – Solo saturado

Os resultados dos ensaios de compressão triaxial do tipo CD, estão apresentados na Figura 4.6 que mostra o gráfico tensão *versus* deformação dos ensaios com tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 200kPa. Na Figura 4.7 são mostrados os gráficos de variação volumétrica *versus* deformação. Na Figura 4.8, é apresentada a envoltória de resistência referente a essa série de ensaios.

O resumo dessa série de ensaios está apresentado na Tabela 4.6, onde são apresentados os valores de diferença de tensões principais, deformação na ruptura, bem como os respectivos parâmetros de resistência do solo nessas condições.

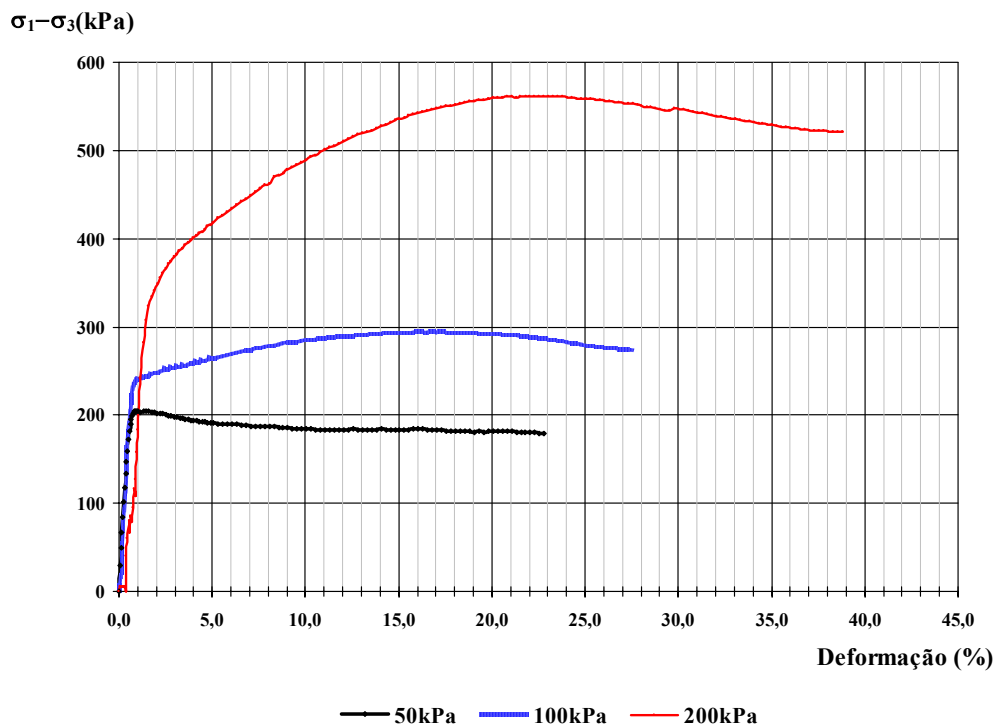


Figura 4.6 – Gráfico com curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios “CD”

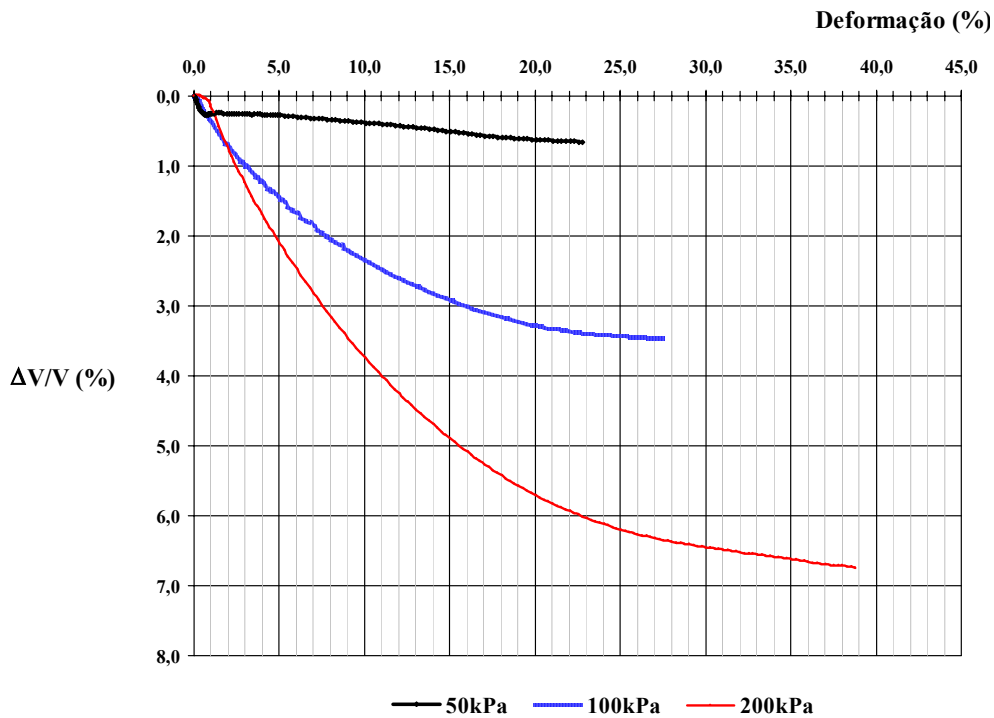


Figura 4.7 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação resultantes dos ensaios “CD”

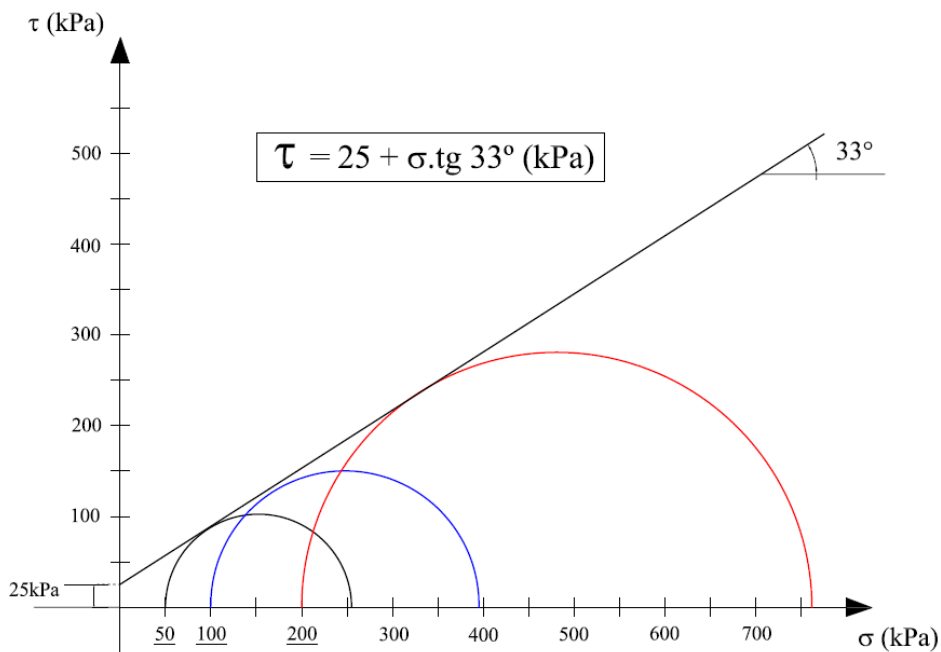


Figura 4.8 – Envoltória de resistência referente à série de ensaios de compressão triaxial do tipo “CD”.

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão triaxial tipo CD.

Confinante (kPa)	$\epsilon_{ruptura}$ (%)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
50	1,6	204,1
100	16,8	295,2
200	22,6	561,8
Parâmetros de Resistência do Solo		
Intercepto de Coesão Efetiva	25kPa	
Ângulo de Atrito	33°	

4.5.1.2. Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade constante – (CW_{PN})
– Solo não saturado compactado e ensaiado com teor de umidade ótimo do Proctor normal

Os resultados dos ensaios de triaxiais do tipo CW_{PN} , estão apresentados na Figura 4.9 a qual mostra os gráficos de tensão *versus* deformação. Na Figura 4.10 são mostrados os gráficos de variação volumétrica *versus* deformação e na Figura 4.11, é apresentada a envoltória de resistência referente a essa série de ensaios.

O resumo dessa série de ensaios está apresentado na Tabela 4.7, onde são apresentados os valores de diferença de tensões principais, deformação na ruptura bem como os respectivos parâmetros de resistência do solo nessas condições.

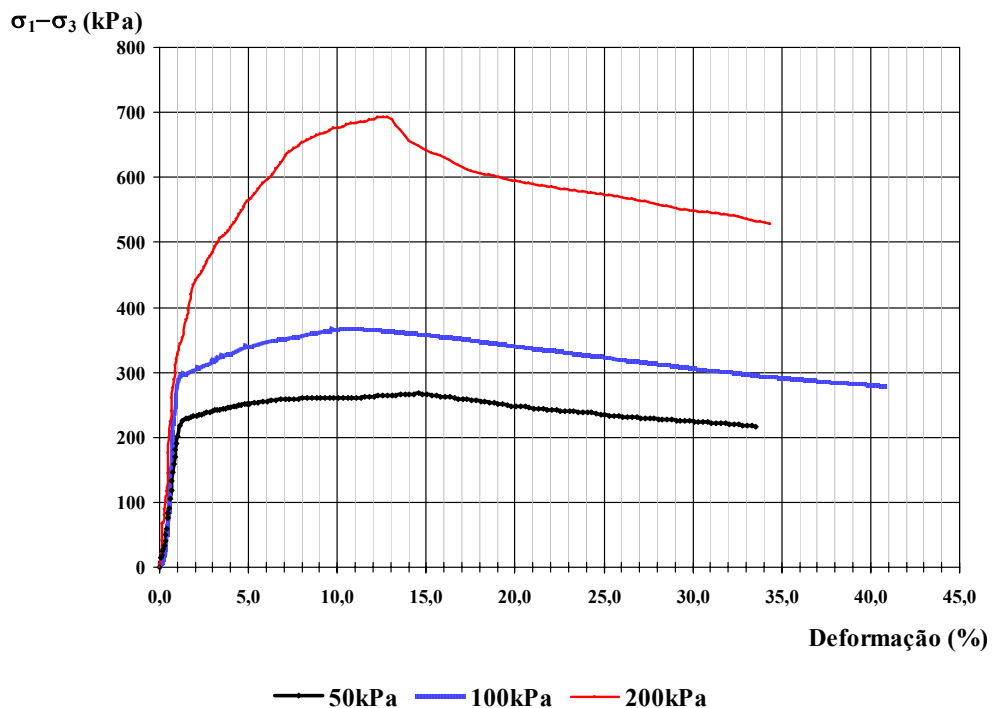


Figura 4.9– Gráfico com curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios “ CW_{PN} ”.

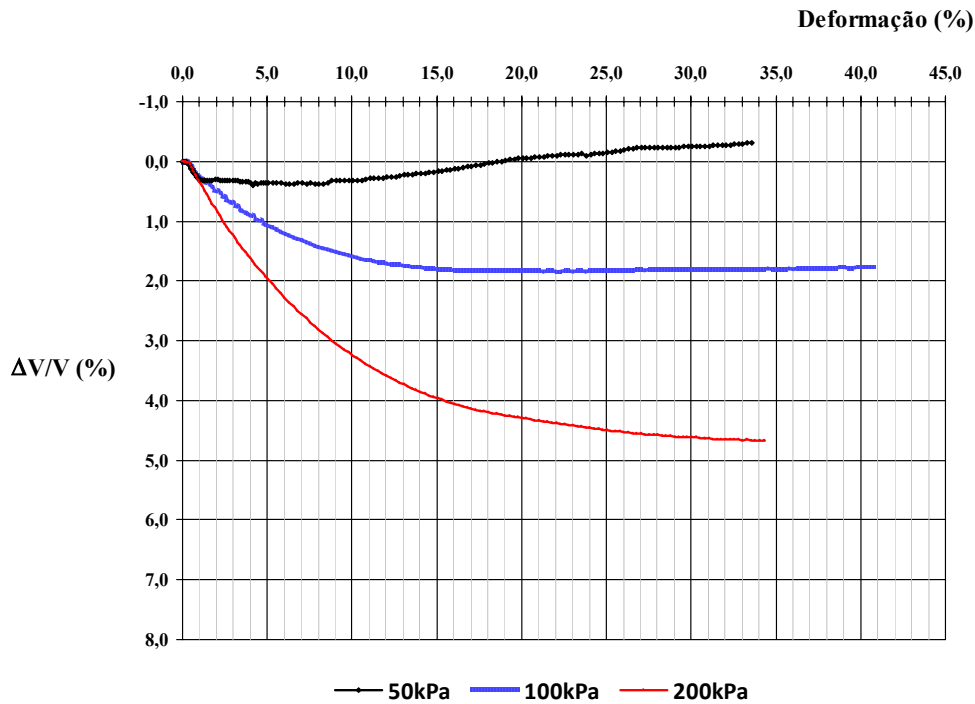


Figura 4.10 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação resultantes dos ensaios “CW_{PN}”.

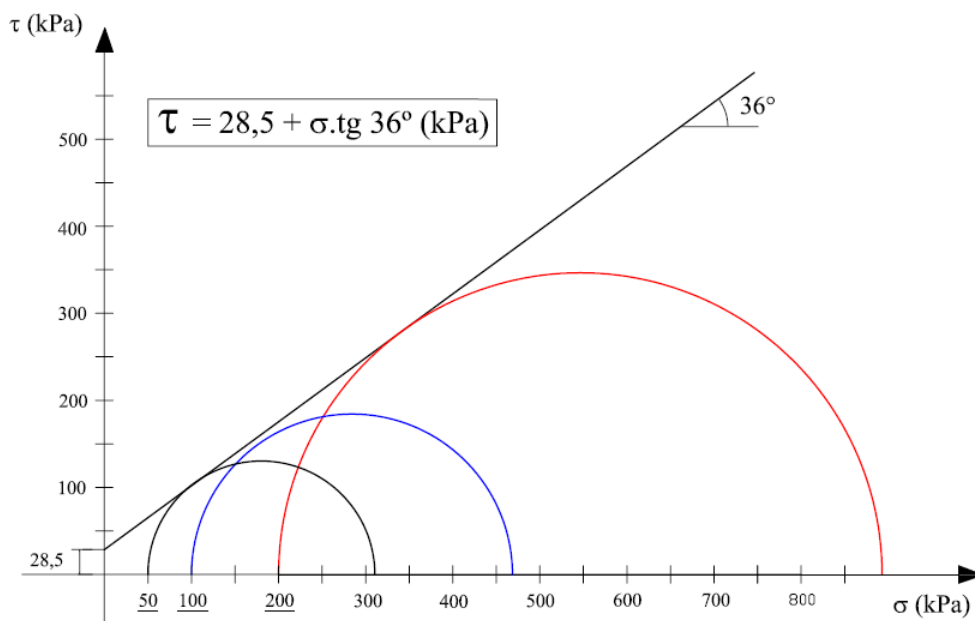


Figura 4.11 – Envoltória de resistência referente à série de ensaios de compressão triaxial do tipo “CW_{PN}”.

Tabela 4.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão triaxial tipo “CW_{PN}”.

Confinante (kPa)	$\epsilon_{ruptura}$ (%)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
50	14,6	267,2
100	10,8	368,6
200	12,6	693,0
Parâmetros de Resistência do Solo		
Intercepto de Coesão Efetiva	28,5kPa	
Ângulo de Atrito	36°	

4.5.1.3. Ensaio de resistência à compressão triaxial com teor de umidade residual (CW_{residual}) - Solo não saturado compactado com teor de umidade ótimo do Proctor Normal e ensaiado com teor de umidade residual

Na Figura 4.12 são mostrados os gráficos de tensão *versus* deformação referente aos ensaios de compressão triaxial realizados com a amostra compactada e seca ao ar até que atingissem o teor de umidade residual. Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados os gráficos referentes à variação volumétrica *versus* deformação e a envoltória de resistência referente à respectiva série de ensaios. Conforme mencionado anteriormente são apresentados os resultados dos ensaios realizados com tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 200kPa.

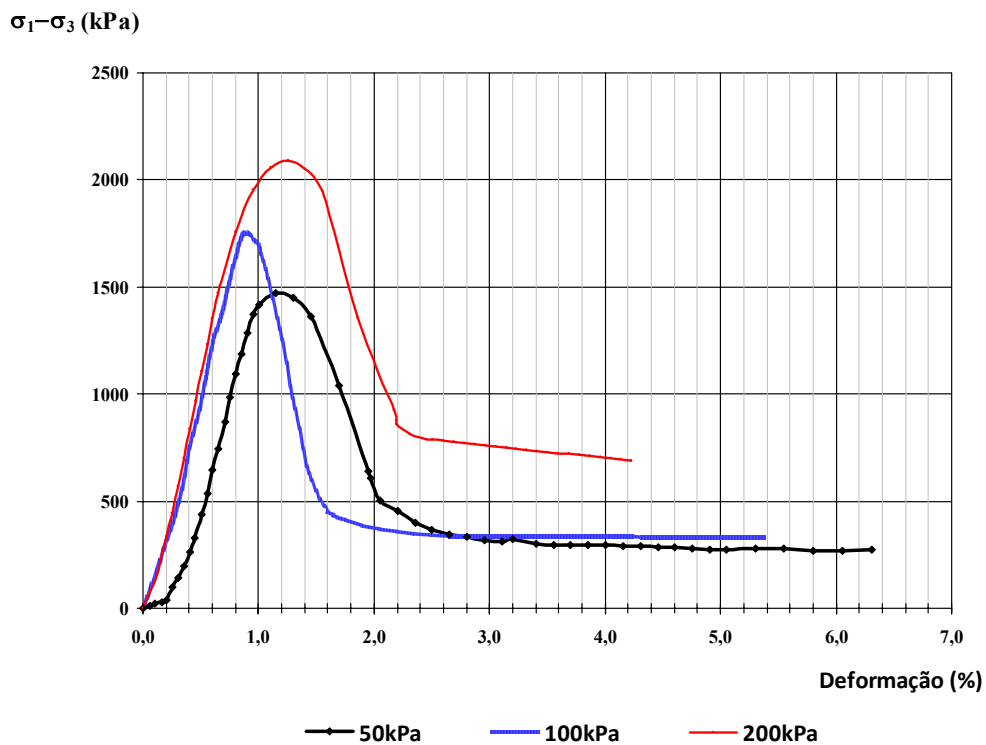


Figura 4.12 – Gráfico com curvas Tensão x Deformação da série de ensaios “ CW_{residual} ”.

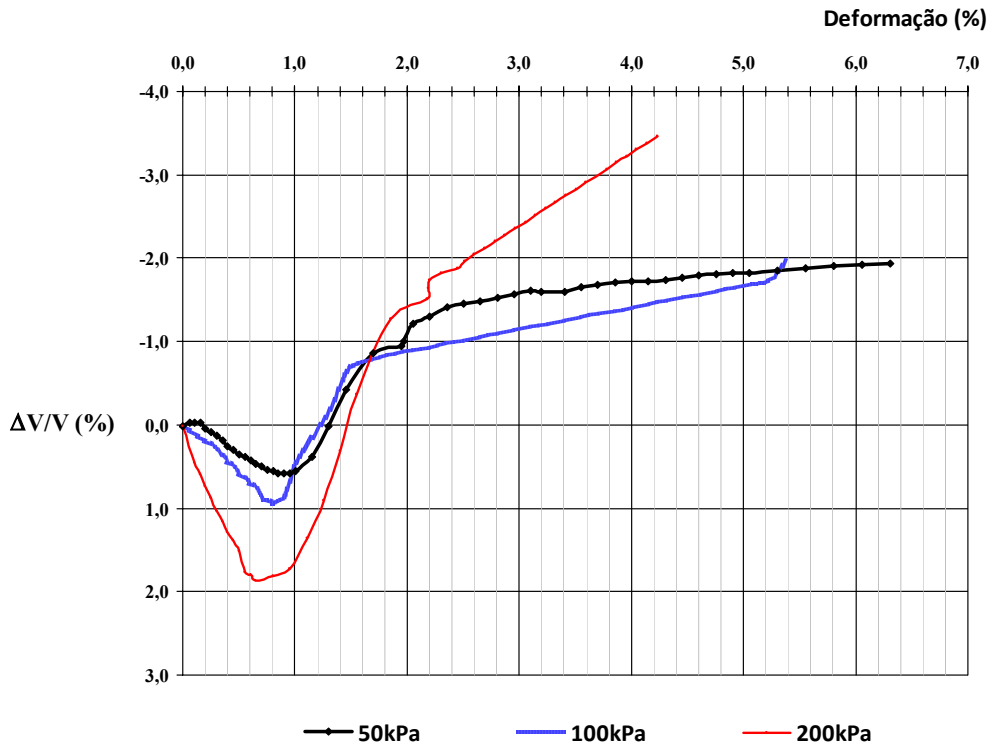


Figura 4.13 – Gráfico com curvas Deformação Volumétrica x Deformação da série de ensaios “CW_{residual}”.

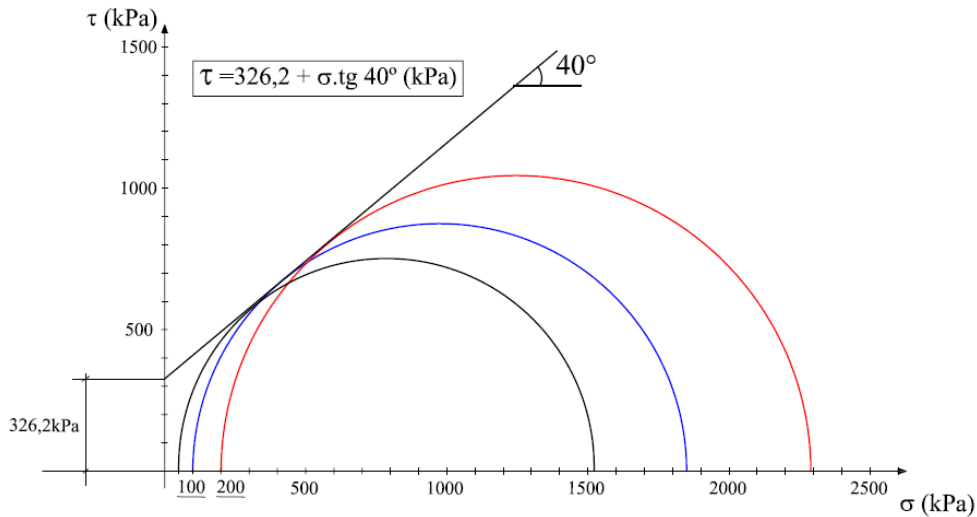


Figura 4.14 – Envoltória de resistência referente à essa série de ensaios “CW_{residual}”.

O resumo dessa série de ensaios está apresentado na Tabela 4.8, onde são apresentados os valores de diferença de tensões principais, deformação na ruptura bem como os respectivos parâmetros de resistência do solo nessas condições.

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados ensaios de compressão triaxial tipo CW_{residual}.

Confinante (kPa)	$\epsilon_{ruptura}$ (%)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)
50	1,2	1472,0
100	0,9	1750,0
200	1,3	2090,1
Parâmetros de Resistência do Solo		
Intercepto de Coesão Efetiva	326,2kPa	
Ângulo de Atrito	40°	

4.5.2. Ensaios de Resistência à Compressão Simples com Medida direta de Sucção

4.5.2.1. Ensaios de resistência à compressão simples – Série de repetibilidade

Na Tabela 4.9 são apresentadas as características dos corpos de prova utilizados nessa série de ensaios. Já na Tabela 4.10 são apresentados os índices físicos dos corpos de prova, com os respectivos valores médios, coeficientes de variação e desvio padrão.

Tabela 4.9 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples na série de repetibilidade.

Ensaio	Vcp (cm ³)	Mcp. (g)	W _{inicial} (%)	W _{Final} (%)	GC _{Mold.} (%)
CS1	204,28	400,99	15,8	15,2	94,9
CS2	205,06	401,10	15,8	15,1	94,6
CS3	205,04	401,00	15,8	15,1	94,6
CS4	204,89	400,07	15,8	15,1	94,4
CS5	205,12	401,50	15,8	15,1	94,7
CS6	204,81	400,05	15,3	14,9	94,9
CS7	204,52	399,28	15,3	14,8	94,9
CS8	205,79	400,33	15,5	14,9	94,4
CS9	205,35	400,48	15,5	14,8	94,6
CS10	204,93	400,50	15,5	14,9	94,8
CS11	206,19	401,87	15,5	14,9	94,5
CS12	205,24	401,45	15,5	14,8	94,9
CS13	205,08	400,98	15,5	15,0	94,8
CS14	204,96	401,11	15,5	15,1	94,9
CS15	204,64	400,12	15,5	15,1	94,8
CS16	206,66	403,50	15,5	15,0	94,7
Média	205,16	400,84	15,6	15,0	94,7
DP	0,61	0,98	0,19	0,13	0,27
CV (%)	0,30	0,24	1,20	0,87	0,28

Tabela 4.10 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples na série de repetibilidade

Ensaio	e	n (%)	Sr (%)	$\rho_{d95\%}$ (g/cm³)	ρ (g/cm³)	θ_w (%)
CS1	0,59	37,00	72,5	1,69	1,96	26,8
CS2	0,59	37,22	71,8	1,69	1,96	26,7
CS3	0,59	37,23	71,8	1,69	1,96	26,7
CS4	0,60	37,33	71,5	1,69	1,95	26,7
CS5	0,59	37,18	72,0	1,69	1,96	26,8
CS6	0,59	37,02	70,0	1,69	1,95	25,9
CS7	0,59	37,05	69,9	1,69	1,95	25,9
CS8	0,60	37,39	69,8	1,68	1,95	26,1
CS9	0,59	37,23	70,3	1,69	1,95	26,2
CS10	0,59	37,10	70,7	1,69	1,95	26,2
CS11	0,59	37,27	70,2	1,69	1,95	26,2
CS12	0,59	37,04	70,9	1,69	1,96	26,3
CS13	0,59	37,07	70,8	1,69	1,96	26,2
CS14	0,59	37,01	71,0	1,69	1,96	26,3
CS15	0,59	37,07	70,8	1,69	1,96	26,2
CS16	0,59	37,16	70,5	1,69	1,95	26,2
Média	0,59	37,19	70,8	1,69	1,95	26,3
DP	0,003	0,12	0,8	0,003	0,004	0,29
CV (%)	0,50	0,32	1,13	0,19	0,20	1,15

Nas Figuras 4.15, 4.17 e 4.19 são apresentados os gráficos de resistência à compressão *versus* deformação dos corpos de prova da série de ensaios de repetibilidade. Já nas Figuras 4.16, 4.18 e 4.20 são apresentados os gráficos que mostram a evolução da sucção no decorrer dos ensaios. Na Tabela 4.11 é apresentado o resumo dos resultados dessa série de ensaios.

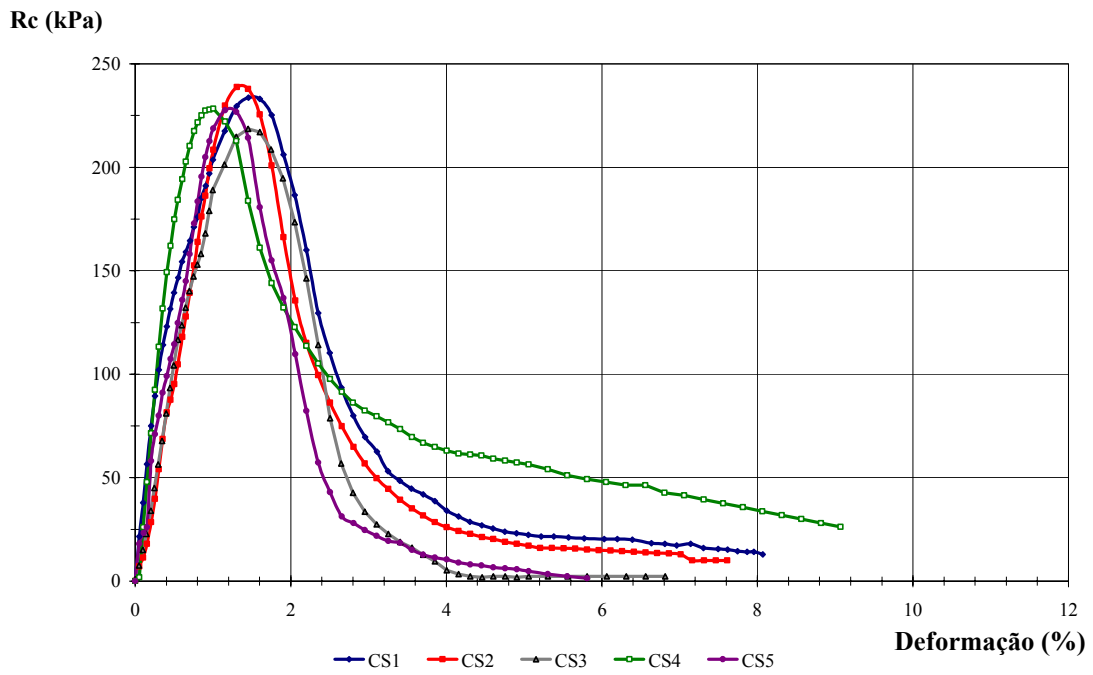


Figura 4.15 – Gráficos de Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS1 a CS5 da série de ensaios de repetibilidade.

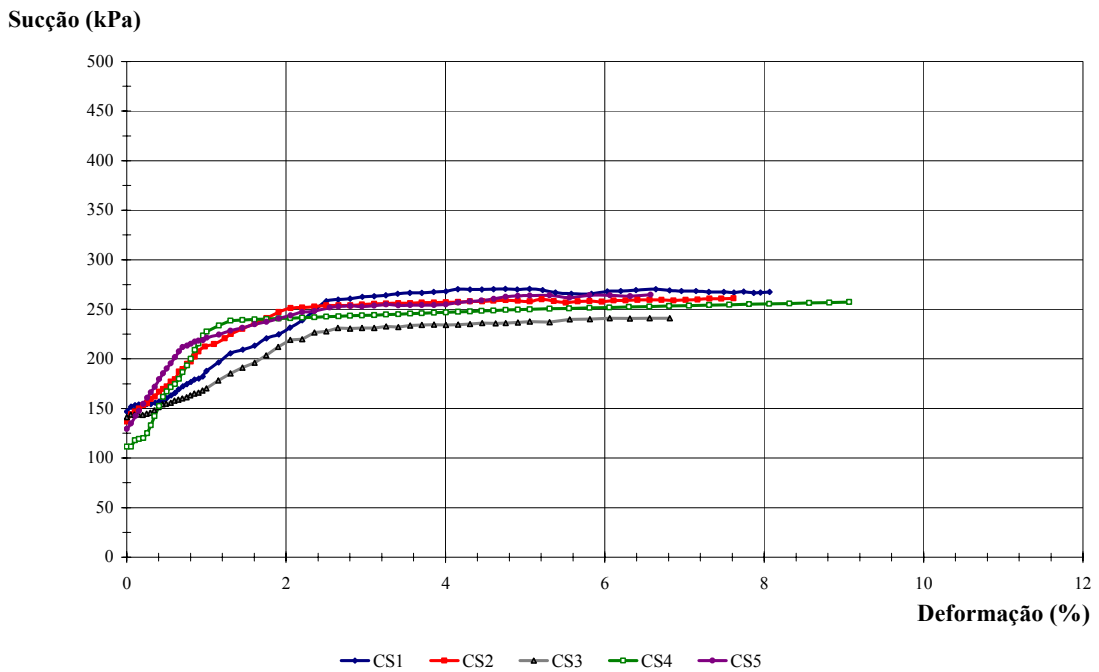


Figura 4.16 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS1 a CS5 da série de ensaios de repetibilidade.

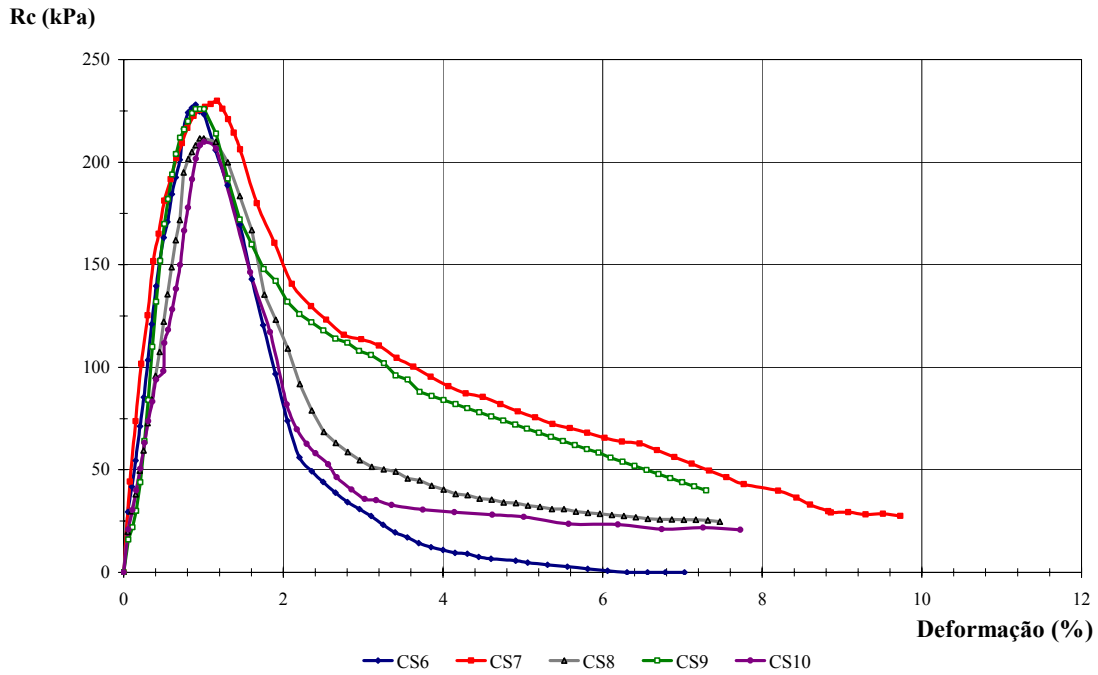


Figura 4.17 – Gráficos Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS6 ao CS10 da série de ensaios de repetibilidade.

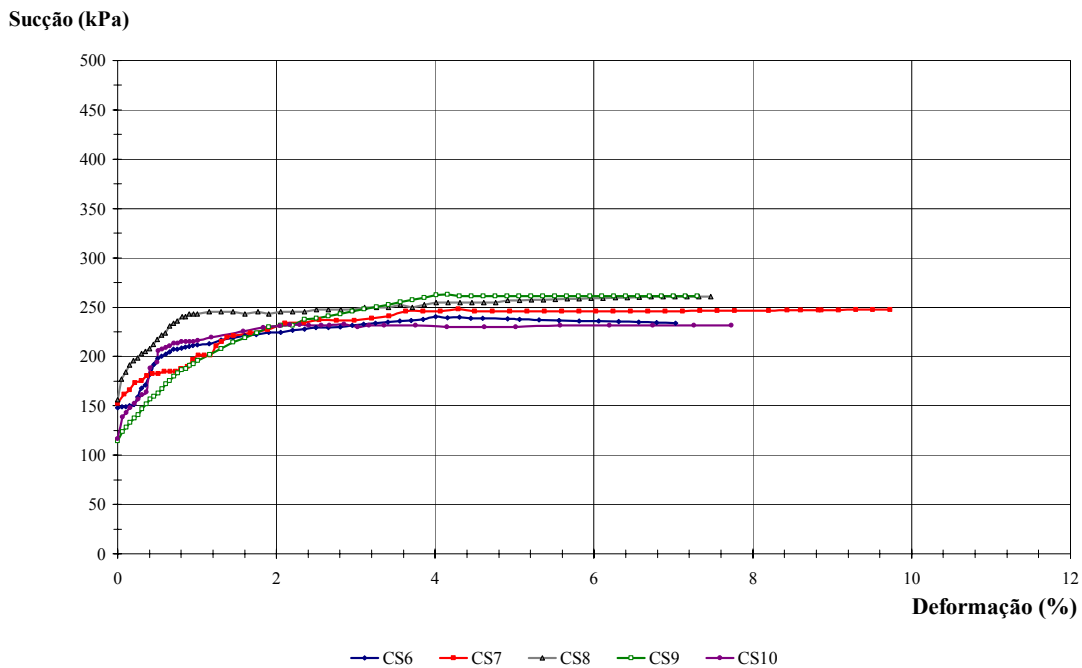


Figura 4.18 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS6 ao CS10 da série de ensaios de repetibilidade.

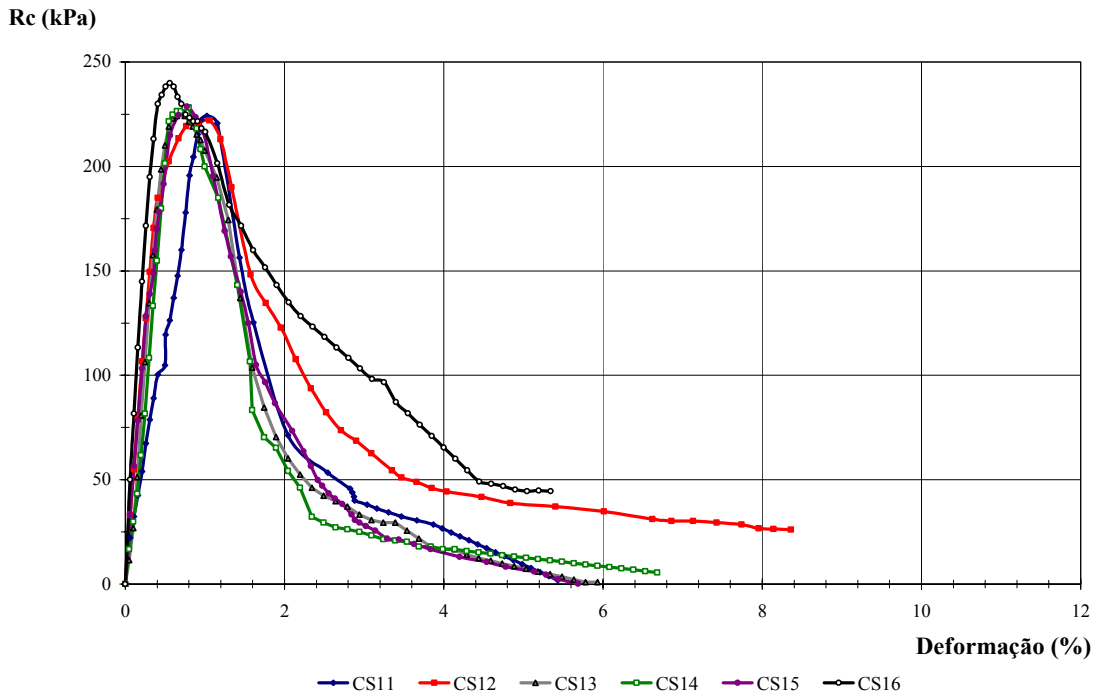


Figura 4.19 – Gráficos Resistência à Compressão x Deformação dos ensaios CS11 ao CS16 da série de ensaios de repetibilidade.

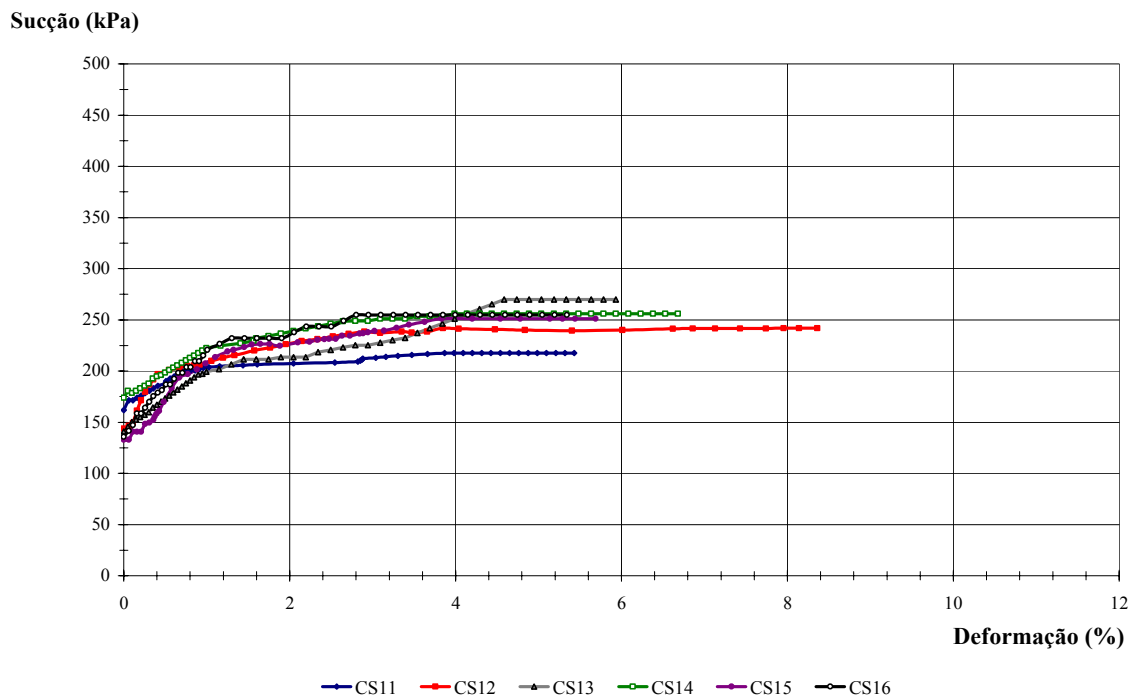


Figura 4.20 – Gráficos de Sucção x Deformação dos ensaios CS11 ao CS16 da série de ensaios de repetibilidade.

Tabela 4.11 – Resumo dos resultados da série de repetibilidade dos ensaios de compressão simples

Ensaio	Rc (kPa)	ϵ_{rupt} (%)	ϵ_{Final} (%)	$\Psi_{Inicial}$ (kPa)	$\Psi_{Ruptura}$ (kPa)	Ψ_{Final} (kPa)
CS1	233,7	1,5	8,1	146,7	209,4	267,4
CS2	238,8	1,3	7,6	136,6	225,1	261,1
CS3	218,6	1,5	6,8	141,4	191,3	241,2
CS4	228,3	1,0	9,1	111,3	227,4	257,3
CS5	227,5	1,2	5,8	129,4	224,5	264,8
CS6	228,1	0,9	7,0	148,0	210,0	233,9
CS7	229,9	1,2	9,7	152,2	201,5	247,6
CS8	211,6	1,0	7,5	156,1	242,9	260,5
CS9	225,9	1,0	7,3	114,0	195,6	261,4
CS10	209,9	1,0	7,7	116,4	216,4	229,9
CS11	224,2	1,0	5,4	162,0	203,7	217,5
CS12	222,1	1,1	8,4	143,7	210,0	223,0
CS13	225,5	0,7	5,9	140,9	184,9	269,9
CS14	228,2	0,8	6,7	173,7	212,8	255,9
CS15	228,7	0,8	5,7	132,8	197,0	250,9
CS16	239,9	0,6	5,4	135,8	186,8	254,7
Média	226,3	1,0		140,1	208,7	249,8
DP	8,1	25,0		17,1	16,0	16,2
CV (%)	3,6	24,4		12,2	7,7	6,5

4.5.2.2. Ensaios de resistência à compressão simples – Série de ensaios com umidade constante e diferentes valores de massa específica aparente seca

Na Tabela 4.12 são apresentadas as características dos corpos de prova utilizados nessa série de ensaios, bem como medidas, desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 4.12 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação.

Ensaio	Vcp (cm³)	Mcp. (g)	W_{Inicial} (%)	W_{Final} (%)	GC_{Mold.} (%)
GC1 – 92	206,67	391,55	15,4	15,1%	92,0
GC2 – 94	206,51	399,90	15,4	15,0%	94,0
GC3 – 97	207,52	414,50	15,4	15,0%	97,0
GC4 – 98	206,60	416,50	15,4	14,9%	97,9
GC5 – 100	206,69	425,33	15,4	14,9%	99,9
Média	206,75		15,4	15,0	
DP	0,38		0,02	0,1	
CV (%)	0,18		0,11	0,59	

Na Tabela 4.13 são apresentados os índices físicos dos corpos de prova utilizados nessa série de ensaios.

Tabela 4.13 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação.

Ensaio	e	n (%)	Sr (%)	ρ_d (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	θ_w (%)
GC1 – 92	0,64	39,1	64,4	1,64	1,89	25,2
GC2 – 94	0,61	37,8	68,2	1,68	1,94	25,8
GC3 – 97	0,56	35,8	74,2	1,73	2,00	26,6
GC4 – 98	0,54	35,2	76,1	1,75	2,02	26,8
GC5 – 100	0,51	33,9	80,9	1,79	2,06	27,4

Na Figura 4.22 são apresentados os gráficos de resistência a compressão *versus* deformação dos ensaios realizados em corpos de prova moldados com diferentes graus de compactação. Já na Figura 4.23 são apresentados os gráficos que mostram a evolução da sucção no decorrer dos ensaios. Na Tabela 4.14 é apresentado o resumo dos resultados referente a essa série de ensaios.

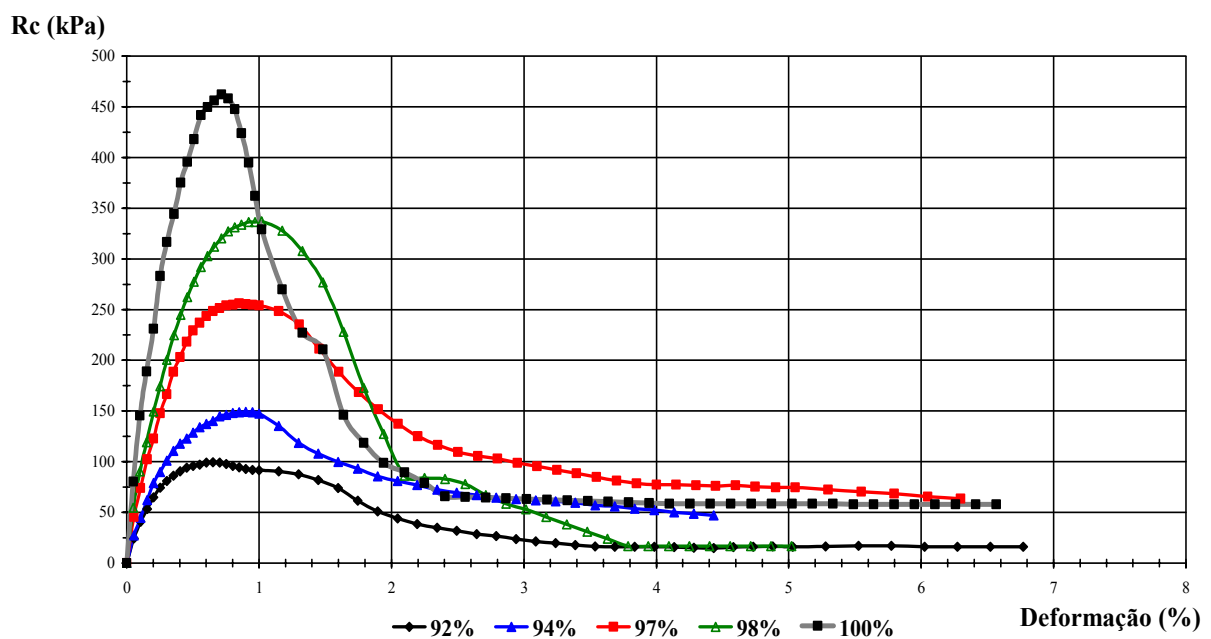


Figura 4.21 – Resistência a compressão dos corpos de prova na série de ensaios com variação do grau de compactação e mesmo teor de umidade.

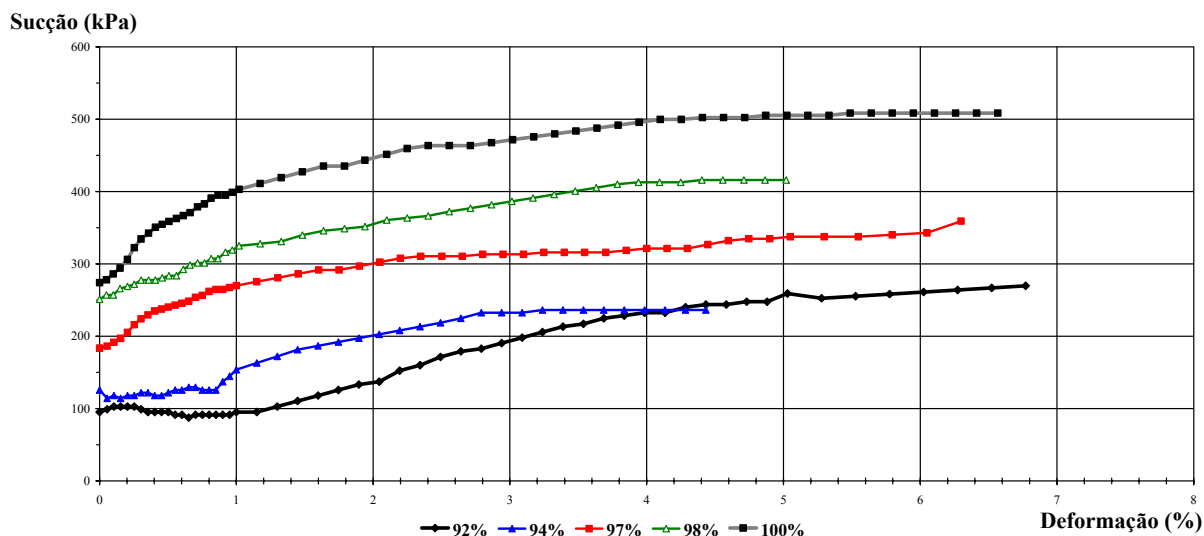


Figura 4.22 – Evolução da sucção, medida com o TAC, no decorrer dos ensaios de compressão simples em corpos de prova com diferentes graus de compactação e mesmo teor de umidade

Tabela 4.14 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples com variação do grau de compactação dos corpos de prova.

Ensaio	Rc (kPa)	ϵ_{rupt} (%)	ϵ_{Final} (%)	$\Psi_{Inicial}$ (kPa)	$\Psi_{Ruptura}$ (kPa)	Ψ_{Final} (kPa)
GC1 – 92	99,4	0,7	6,8	95,3	91,4	269,7
GC2 – 94	149,1	0,9	4,5	125,7	144,8	236,2
GC3 – 97	255,4	0,9	6,5	183,8	261,9	359,1
GC4 – 98	366,3	1,0	5,0	251,4	325,0	416,0
GC5 – 100	462,1	0,7	6,6	274,0	394,9	508,4

4.5.2.3. Ensaios de resistência à compressão simples – Série de ensaios com variação do teor de umidade dos corpos de prova e massa específica aparente seca do solo constante

Na Tabela 4.15 são apresentadas as características dos corpos de prova utilizados na série de ensaios de compressão simples onde se variou o teor de umidade dos corpos de prova, mantendo-se a massa específica aparente seca do solo constante. Nessa tabela são apresentados os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das características físicas dos corpos de prova. Na Tabela 4.16 são apresentados os índices físicos antes de submeter os corpos de prova à trajetória de umedecimento e secagem. Na Tabela 4.17 são

apresentados os índices físicos dos corpos de prova após terem experimentado umedecimento e secagem, até o teor de umidade de interesse.

Tabela 4.15 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.

Ensaio	Vcp (cm ³)	Mcp. (g)	Mcp-Pós Traj. (g)	W _{inicial} (%)	W _{Pós Traj} (%)	W _{Final} (%)	GC _{Mold.} (%)
W1 – 20	202,03	400,3	416,0	15,4	20,0	18,9	95,1
W2 – 17	206,31	402,3	408,1	15,4	17,0	15,9	94,8
W3 – 16	206,92	403,3	404,2	15,4	16,0	15,0	94,9
W4 – 15	207,03	403,5	400,5	15,4	15,0	14,2	94,7
W5 – 14	205,02	401,8	394,7	15,4	14,0	13,2	95,2
Média	205,40	402,2		15,4			94,9
DP	2,1	1,3		0,04			0,2
CV (%)	1,0	0,3		0,3			0,2

Tabela 4.16 – Índices físicos de moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.

Ensaio	e	n (%)	Sr (%)	$\rho_{d95\%}$ (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	θ_w (%)
W1 – 20	0,59	37,1	70,4	1,69	1,96	26,1
W2 – 17	0,59	37,3	69,7	1,69	1,95	26,0
W3 – 16	0,59	37,2	69,9	1,69	1,95	26,0
W4 – 15	0,60	37,3	69,5	1,69	1,95	26,0
W5 – 14	0,59	37,0	70,4	1,69	1,96	26,1
Média	0,59	37,2	70,0%	1,69	1,96	26,0
DP	0,00	0,14	0,41	0,004	0,004	0,06
CV (%)	0,6	0,4	0,6	0,2	0,2	0,2

Tabela 4.17 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples após o ajuste da umidade obtido numa trajetória de umedecimento e secagem.

Ensaio	e	n (%)	Sr (%)	ρ_d (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	θ_w (%)
W1 – 20	0,59	37,1	91,3	1,69	2,04	33,8
W2 – 17	0,59	37,2	77,0	1,69	1,98	33,8
W3 – 16	0,60	37,4	72,0	1,68	1,96	33,7
W4 – 15	0,60	37,6	67,0	1,68	1,94	33,6
W5 – 14	0,60	37,4	63,1	1,68	1,93	33,7
Média	0,60	37,3		1,686		33,7
DP	0,005	0,19		0,005		0,1
CV (%)	0,8	0,5		0,3		0,3

Na Figura 4.24 são apresentados os gráficos de resistência a compressão *versus* deformação dos ensaios realizados em corpos de prova com diferentes teores de umidade. Já na Figura 4.25 são apresentados os gráficos que mostram a evolução da sucção no decorrer desses ensaios. Na Tabela 4.18 é apresentado o resumo dos ensaios realizados nessa série.

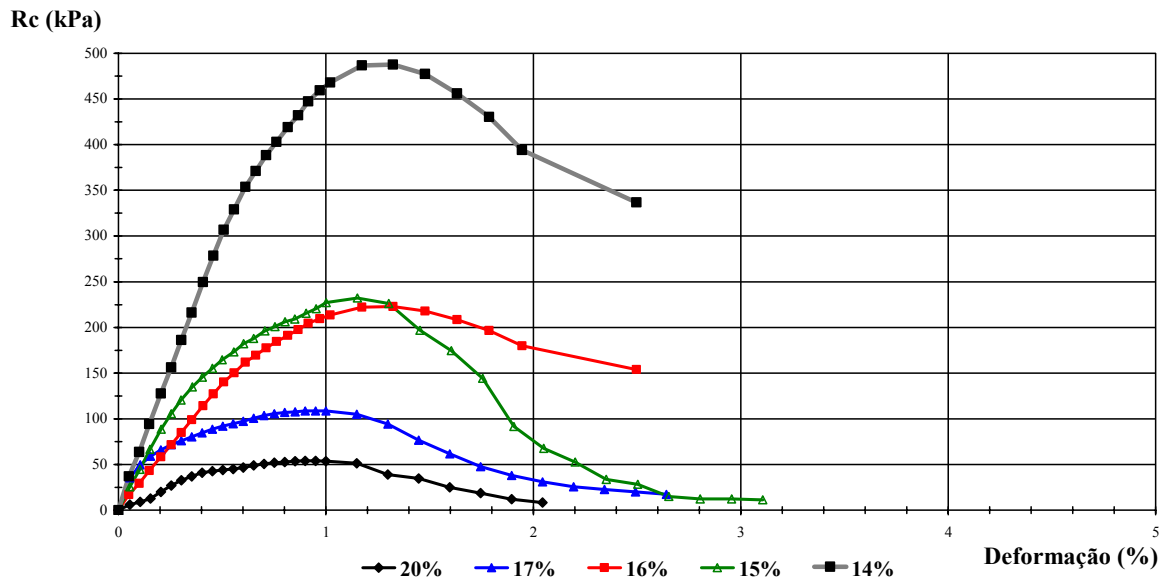


Figura 4.23 – Resistência a compressão dos corpos de prova na série de ensaios em corpos de prova com diferentes teores de umidade.

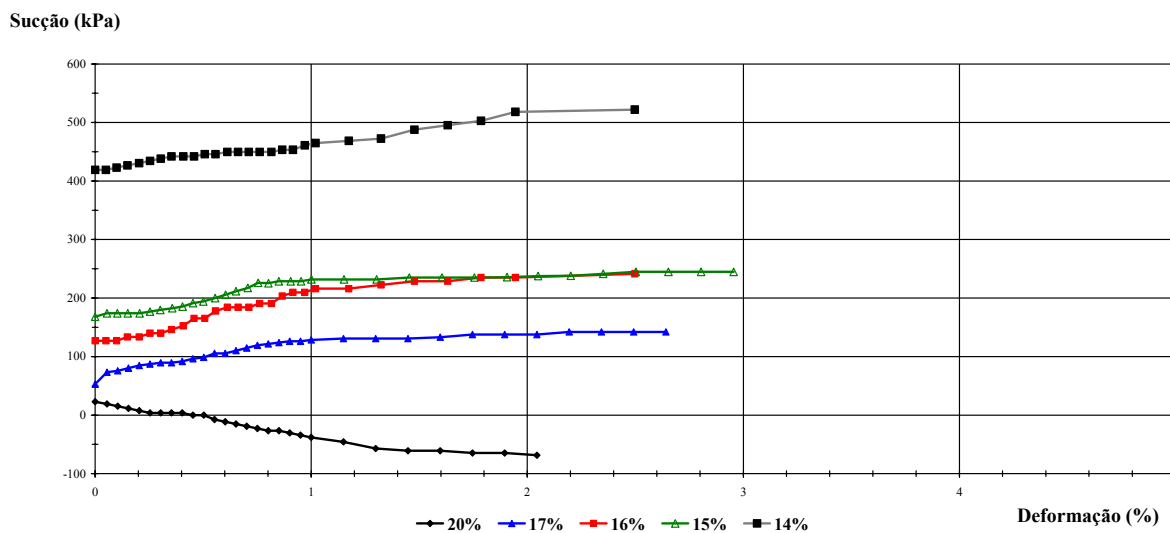


Figura 4.24 – Evolução da sucção, medida com o TAC, no decorrer dos ensaios de compressão simples em corpos de prova com diferentes teores de umidade.

Tabela 4.18 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples com variação do teor de umidade dos corpos de prova.

Ensaio	Rc (kPa)	ε_{rupt} (%)	ε_{Final} (%)	$\Psi_{Inicial}$ (kPa)	$\Psi_{Ruptura}$ (kPa)	Ψ_{Final} (kPa)
W1 – 20*	55,0	0,9	2,5	22,9	-38,0*	-68,6*
W2 – 17	110,0	1,0	2,6	52,8	126,0	142,0
W3 – 16	222,0	1,2	2,5	127,1	216,0	241,0
W4 – 15	232,2	1,2	3,1	168,1	231,8	244,0
W5 – 14	485,0	1,3	2,5	419,1	468,0	520,0

* Neste corpo de prova foram registradas pressões positivas na água.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E CURVA DE RETENÇÃO

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Figura 4.1 e na Tabela 4.1 dos ensaios de caracterização, o solo estudado pode ser classificado como uma areia argilosa que de acordo com o sistema de classificação unificado é denominado por SC (Areia Argilosa).

Na etapa de saturação do tensiômetro não foi observada eficácia na utilização de água destilada e deaerada. Somente após o uso de uma solução de Dodecil Sulfato de Sódio na concentração de 0,5g/l e a aplicação de longos ciclos de pressurização observou-se eficácia no processo. Após a saturação e a realização dos primeiros testes não foi observada coerência nas medidas de sucção. Após minuciosa investigação foi detectada uma fissura na pedra porosa a qual impedia as medidas do tensiômetro. Essa fissura pode ter sido provocada, devido ao fato do tensiômetro ter sido permanecido submetido a uma pressão de 4MPa mesmo após a sua saturação, quando de acordo com Kuwajima (2000) o TAC deveria estar submetido a uma pressão de no máximo 1,5MPa.

Conforme apresentado na Figura 4.2, o ponto ótimo da curva de compactação está aproximadamente com 80% do grau de saturação. O resultado obtido nesse ensaio aponta que a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo foram de 1,79g/cm³ e 15,3% respectivamente. Todos os corpos de prova utilizados para realização dos ensaios dessa pesquisa foram moldados com referência a esses valores.

De posse dos resultados do ensaio de papel filtro e de funil de placa porosa foi realizado o ajuste da curva de retenção pela função de Van Genuchten (1980). Este método não contempla o ajuste de curvas de retenção que possuem duas entradas de ar, ou seja, curva bimodal. Desta forma os valores experimentais foram ajustados em duas curvas distintas de sorte que a umidade de saturação da curva 2 foi à umidade residual da curva 1. Os parâmetros utilizados para o traçado das curvas estão apresentados na Tabela 4.2. O resultado obtido nesse ajuste, apresentado na Figura 4.4 foi considerado satisfatório visto que para a curva 1 o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,97 e para a curva 2 foi de 0,99. No que diz respeito aos valores de entrada de ar pode-se observar que a primeira entrada de ar, referente à drenagem dos macroporos, está a aproximadamente 2kPa. Esta primeira entrada de ar está relacionada à presença da fração do solo composta por areia, que é corresponde à 62% da massa do solo. Já a segunda entrada de ar, que corresponde à drenagem dos microporos, está a aproximadamente 4000kPa. A segunda entrada de ar está relacionada à fração fina do solo, composta predominantemente por argila, com valor que corresponde à 34% da massa do solo.

Observa-se na curva de retenção que mesmo impondo uma sucção de 1000kPa o solo ainda retém aproximadamente 60% da água presente em seus vazios e que uma vez vencida a segunda entrada de ar o solo drena a água abruptamente até atingir seu teor de umidade residual.

Na Figura 4.5 é comparada a curva de retenção obtida com o papel filtro e o funil de placa porosa, com as determinações feitas com o Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC). Para os valores de sucção entre 10kPa e 20kPa, o TAC superestimou os valores de sucção. Para sucções da ordem de 150kPa o TAC registrou em média, valores 10% menores. Já para valores de sucção próximos de 500kPa o TAC registrou valores 3% maior que os obtidos pelos outros dois métodos utilizados na determinação da curva de retenção. Assim o desempenho do tensiômetro de alta capacidade nessa pesquisa pode ser considerado como

satisfatório. Oliveira (2004) utilizou o TAC para realizar medidas de sucção em amostras denominadas como Lama #10 e Lama #40. O autor impôs sucção nas amostras com as placas de sucção (Funil de Placa Porosa) e placas de pressão (Panela de Richards) e em seguida realizou determinações de sucção diretamente com o tensiômetro de alta capacidade. Os resultados obtidos pelo autor mostram uma diferença de valores de sucção entre os métodos chegou até mais de 50%.

5.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

5.2.1. Ensaios de Resistência à Compressão Triaxial

5.2.1.1. Ensaios de resistência à compressão triaxial em solo saturado (CD)

Quanto à série de ensaios de compressão triaxial consolidados drenados (CD), conforme é apresentado na Figura 4.6, observa-se que o pico de resistência para o ensaio com tensão confinante de 50kPa é definido em aproximadamente 1% de deformação. Já os ensaios com 100kPa e 200kPa apresentaram a diferença de tensões principais máxima com 17% e 22,6% de deformação respectivamente. De acordo com esses gráficos observa-se o considerável aumento das diferenças de tensões principais até cerca de 1% a 2% de deformação que corresponde ao trecho elástico dos gráficos. Em cada um dos ensaios foi observado que a resistência de pico não se difere significativamente das suas respectivas resistências residuais.

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas de variação volumétrica em função das deformações dos corpos de prova para os ensaios com 50kPa, 100kPa e 200kPa. Em todas as

curvas observou-se redução de volume dos corpos de prova. Ao comparar as curvas referentes aos ensaios de 50, 100 e 200kPa, os corpos de prova apresentaram deformação volumétrica de 0,7%, 3,3% e 6,0%, mostrando que principalmente após o pico de resistência, quanto maior foi a tensão de confinamento empregada maior foi a deformação volumétrica para a mesma deformação axial.

Os resultados obtidos nesses ensaios foram ajustados por envoltórias de Mohr-Coulomb apresentadas na Figura 4.8. Em termos de tensões efetivas, o intercepto de coesão foi de 25kPa e o ângulo de atrito de 33°. Visto que os corpos de prova não foram instrumentados para deformações locais, pode-se apresentar apenas uma primeira estimativa para o módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson, que foram de 20MPa e 0,3 respectivamente, não sendo observada variação módulo de deformabilidade com o incremento da tensão confinante.

Diante dos resultados dessa série de ensaios, que podem ser visualizados na Tabela 4.6, é importante destacar que o incremento da tensão confinante foi responsável pelo incremento de 44,6% da diferença de tensões principais máxima no ensaio realizado com 100kPa de tensão confinante se comparado com os resultados obtidos no ensaio com 50kPa. Já comparando o ensaio realizado com 200kPa de tensão confinante com o realizado com 100kPa o valor de diferença de tensões principais obtido no de 200kPa foi 90,3% superior.

5.2.1.2. Ensaios de resistência à compressão triaxial em solo não saturado com teor de umidade ótimo (CW_{PN})

No que diz respeito aos ensaios do tipo consolidado com umidade constante, com as amostras ensaiadas no teor de umidade de ótimo (CW_{PN}), conforme apresentado na Figura 4.9 pode-se observar que o pico de resistência para os ensaios realizados sob tensões

confinantes de 50kPa, 100kPa e 200kPa foi obtido para as deformações de 14,6%, 10,8% e 12,6% respectivamente.

As tensões desviatória obtidas para os ensaios realizados com 50kPa, 100kPa e 200kPa foram respectivamente 267,2kPa, 368,6kPa e 693,0kPa. Estes valores representam acréscimo de 30,9%, 24,9% e 23,3% se comparados com os obtidos nos ensaios de compressão triaxial CD, com as amostras saturadas, sob as mesmas condições de confinamento.

Com exceção do ensaio realizado com 200kPa de tensão confinante, onde a tensão residual foi aproximadamente 150kPa menor que a diferença de tensões principais de pico, não houve variação significativa da tensão de pico para a residual. Após ajustar os resultados por uma envoltória de Mohr-Coulomb, conforme apresentado na Figura 4.11, observou-se o aumento tanto do intercepto de coesão quanto do ângulo de atrito, se comparado com o obtido para a série de ensaios de compressão triaxial CD, com o solo saturado.

O incremento das tensões confinantes provocou um incremento de 37,9% da diferença de tensões principais máxima do ensaio realizado com 100kPa de tensão confinante se comparado com os resultados obtidos no ensaio com 50kPa. Já comparando o ensaio realizado com 200kPa de tensão confinante com o realizado com 100kPa, o valor de diferença de tensões principais obtido no de 200kPa foi 88,0% superior.

Em todos os ensaios dessa série foi observada apenas redução de volume dos corpos de prova, com exceção do ensaio realizado com 50kPa, onde a partir dos 20% de deformação foi observado dilatância. Na curva referente ao ensaio com confinante de 100kPa, observou-se que a partir de 15% de deformação axial, a deformação volumétrica tornou-se constante. Já na curva referente ao ensaio com 200kPa de tensão confinante, isso foi observado a partir dos 30% de deformação axial. (Figura 4.10).

Novamente foram estimados o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson. Para essa série de ensaios, os valores foram aproximadamente de 20MPa e 0,3 respectivamente, valores semelhantes aos obtidos na série de ensaios saturados.

5.2.1.3. Ensaios de compressão triaxial não saturados com teor de umidade residual (CW_{residual})

Os ensaios com umidade constante (CW_{residual}), com as amostras ensaiadas no teor de umidade residual, conforme apresentado na Figura 4.12, mostram que os picos de resistência para tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 200kPa correm nas deformações de 1,2%, 0,9% e 1,3% respectivamente. A resistência residual obtida para essa série de ensaios está entre 450kPa e 750kPa. Esses valores correspondem aproximadamente às resistências de pico encontradas nos ensaios tipo CD e CW_{PN} .

As diferenças de tensões principais obtidas para os ensaios realizados com 50kPa, 100kPa e 200kPa foram respectivamente, 1472kPa, 1750kPa e 2090,1kPa. Estes valores foram substancialmente superiores se comparados com os resultados obtidos nos ensaios saturados e nos ensaios com a amostra no teor de umidade ótimo.

Nesta série de ensaios, o incremento das tensões confinantes se mostrou menos significativa no acréscimo de diferença de tensões principais do que nas outras duas séries de ensaios. Para esta série o aumento de 50kPa de confinante para 100kPa e de 100kPa para 200kPa originaram um acréscimo na diferença de tensões principais de 18,9% e 19,4% respectivamente. Nota-se, portanto, que a resistência de um solo sob condições de teor de umidade residual parece ser mais influenciada pela sucção presente no mesmo e menos pelo nível de confinamento nele aplicado, não se descartando a interferência de outros mecanismos, como o desenvolvimento de alguma cimentação no processo de secagem. A propósito, a origem do solo estudado é laterítica, e a respeito disso, Vilar et al. (1995) citam

que fenômenos de cimentação ocorrem nos sedimentos cenozóicos da região central do estado de São Paulo quando expostos e se destacam pela rapidez com que se desenvolvem. Detalhes sobre a evolução da resistência de um solo laterítico pode ser encontrado em Paraguassu e Röhlm (1992). Vilar (2007) menciona que o desenvolvimento de qualquer tipo de cimentação durante o processo de instalação da sucção, especialmente quando a amostra foi secada e umedecida, não deve ser excluída como uma das razões possíveis que justificam esse comportamento.

Após o ajuste dos resultados dos ensaios triaxiais por Mohr-Coulomb, conforme apresentado na Figura 4.14, o intercepto de coesão obtido foi doze vezes superior ao comparar com os resultados obtidos nos ensaios tipo CD e CW_{PN} . Já no ângulo de atrito foi verificado um aumento de 7° se comparado com o ensaio tipo CD.

Na Figura 4.13 são apresentadas as curvas de variação volumétrica em função das deformações dos corpos de prova para os ensaios com 50kPa, 100kPa e 200kPa. Em todos os ensaios dessa série foi observada compressão nos corpos de prova (Deformação positiva) até aproximadamente 0,8% de deformação, em seguida os corpos de prova apresentaram a tendência de aumento de volume (dilatância) e com essa tendência permaneceram até o final dos ensaios.

Nessa série de ensaios a estimativa do módulo de deformabilidade foi 200MPa, que é dez vezes superior se comparados com os resultados obtidos na série de ensaios saturados e também para a série de ensaios com o solo no teor de umidade ótimo.

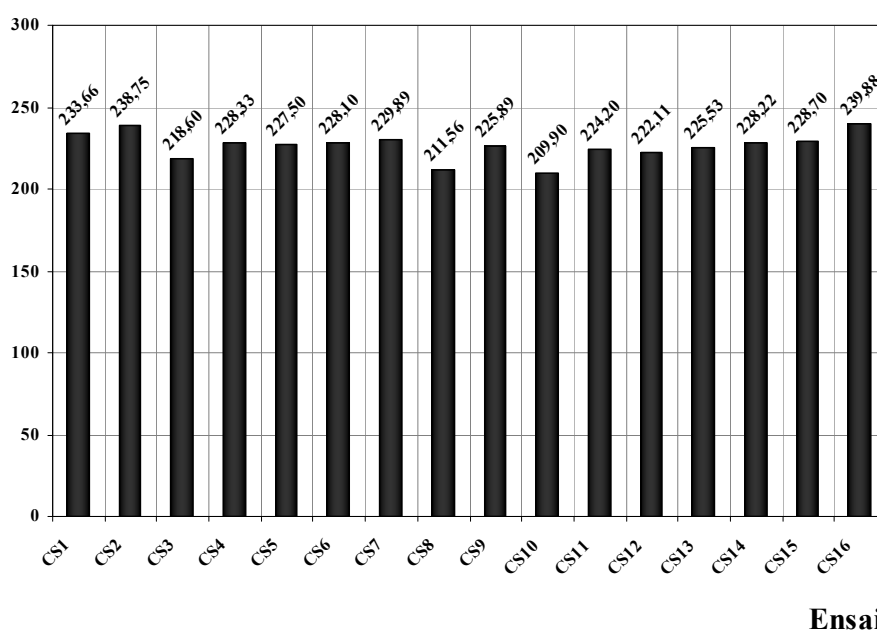
5.2.2. Série de Repetibilidade dos Ensaios de Compressão Simples

No tocante à série de repetibilidade dos ensaios de compressão simples, a tensão de ruptura média foi de 226,3kPa para uma deformação média de 1,0%. O desvio padrão e o

coeficiente de variação da resistência a compressão para essa série de ensaio foram 8,1kPa e 3,6% respectivamente. Esses valores podem ser considerados satisfatórios visto que a tentativa foi de moldar os corpos de prova em condições semelhantes, para o caso das medidas de sucção fossem discrepantes, essas discrepâncias não fossem creditadas às diferenças de moldagem dos corpos de prova. Na Figura 5.1 é apresentado um gráfico com os respectivos valores de resistência para melhor visualização da homogeneidade dos resultados obtidos.

Conforme apresentado na Tabela 4.11, o desvio padrão das medidas de sucção foi da ordem de 16kPa com coeficientes de variação de 6,5%, 7,7% e 12,2% para a sucção no final dos ensaios, na instante da ruptura e no início dos mesmos respectivamente. A Figura 5.2 apresenta o comportamento da sucção no decorrer dessa série de ensaios. Os resultados obtidos nessa série de ensaios podem ser considerados satisfatórios, visto que o desvio padrão e coeficientes de variação são relativamente baixos em se tratando de solos e principalmente de medidas de sucção em solos não saturados.

Rc (kPa)



Ensaio

Figura 5.1 – Resistência à compressão dos corpos de prova da série de ensaios de repetibilidade.

A respeito da evolução da sucção com o aumento das deformações pode-se observar nas Figuras 4.16, 4.18 e 4.20 que a partir de cerca de 3% de deformação a sucção tendeu à estabilização. De acordo com Toll (1990) o comportamento volumétrico e por consequência as variações de sucção sob cisalhamento pode ser explicado pela compreensão da estrutura do solo. O autor realizou ensaios de resistência ao cisalhamento e observou que a sucção tendeu a aumentar quando os valores de sucção inicial eram até cerca de 100kPa e a tendência se inverteu à medida que os ensaios foram iniciados com valores de sucção mais elevados. O autor credita esse comportamento à estrutura do solo não saturado, que permite a ocorrência de dilatância, originada pelo deslizamento de uma partícula de solo sobre a outra e a compressão, resultando no incremento da pressão na água no solo.

Assim, o fato de em todos os ensaios ter sido observado acréscimo da sucção com o aumento das deformações, poderia ter relação com o valor da sucção inicial as quais os corpos de prova foram ensaiados. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira (2004) nos ensaios que foram iniciados com baixos valores de sucção.

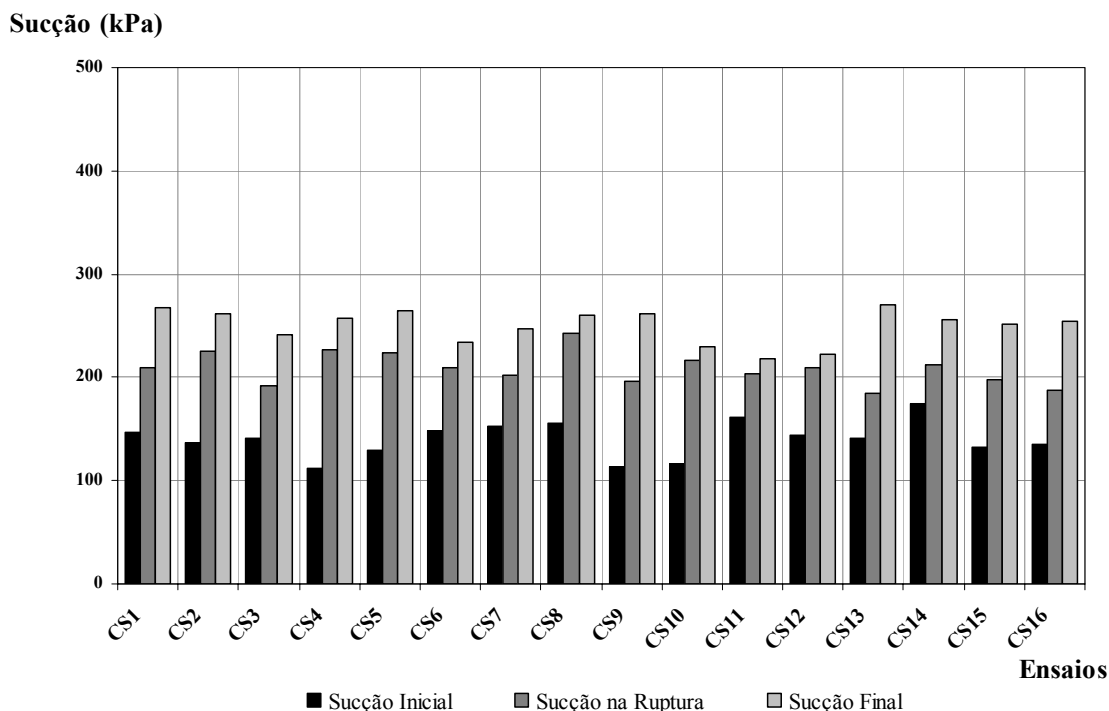


Figura 5.2 – Evolução da sucção, medida com o TAC, na série de repetibilidade dos ensaios de compressão simples.

5.2.3. Ensaios de Resistência à Compressão Simples - Série com Variação do Grau de Compactação e Teor de Umidade Constante

A Figura 5.3 apresenta as condições de moldagem dos corpos de prova ensaiados com mesmo teor de umidade diferentes massas específica seca referentes aos graus de compactação de 92, 94, 97, 98 e 100%, todos com teor de umidade nominal próximo ao teor de umidade ótimo.

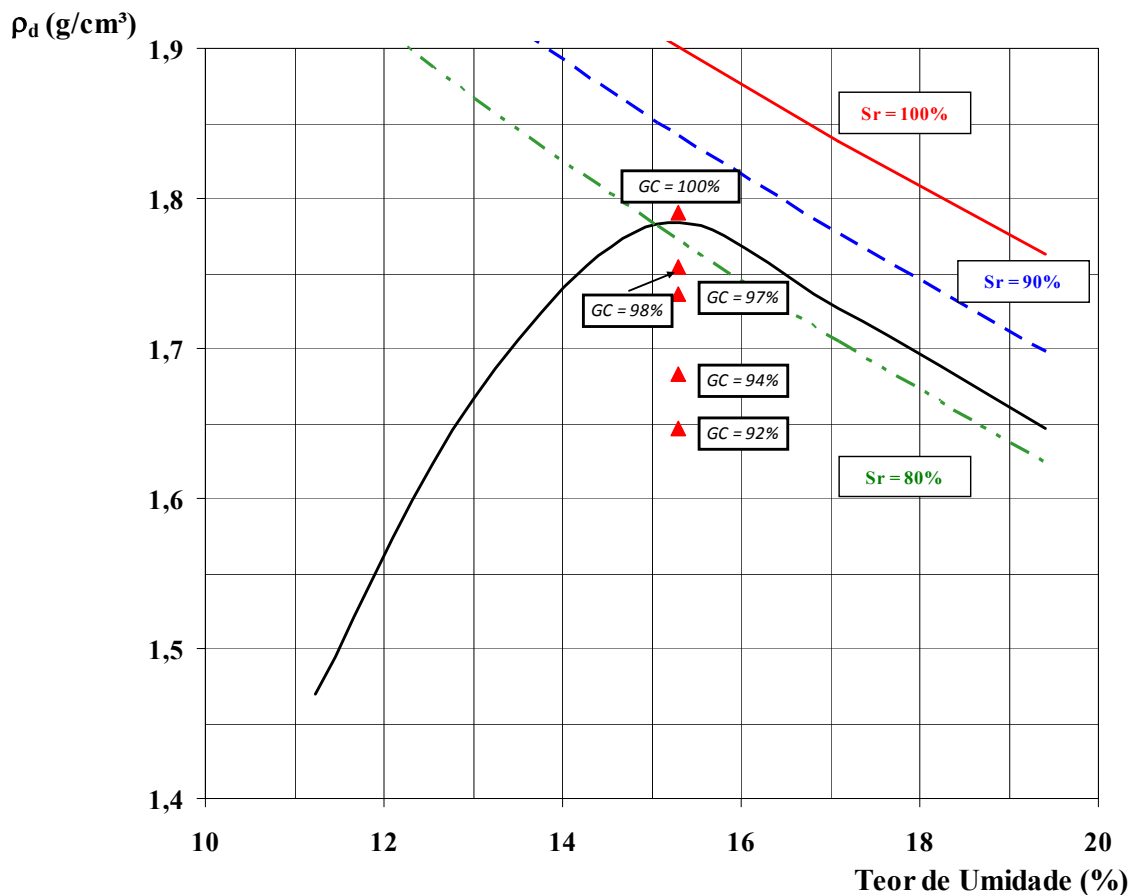


Figura 5.3 – Características de compactação dos corpos de prova utilizados na série de ensaios com variação do grau de compactação.

De acordo com o esperado e conforme apresentado na Figura 4.21, a resistência a compressão dos corpos de prova aumentou com o acréscimo do grau de compactação da amostra. Na Figura 4.22 pode-se observar a tendência de acréscimo da sucção com o aumento

das deformações dos corpos de prova, para todos os graus de compactação. Além disso, observa-se que após o pico da curva tensão *versus* deformação ocorreu uma leve tendência de estabilização da sucção, mais acentuada a partir dos 3% de deformação.

O pico de resistência ocorreu, em média, num tempo aproximado de 33 minutos. Durante a montagem dos ensaios, observou-se que o tempo de equilíbrio entre o corpo de prova e o tensiômetro foi, em média, de 50 minutos. Devido a essa diferença, cogita-se que o TAC possa não estar medindo corretamente a sucção que efetivamente atuava nos corpos de prova, no instante em que os mesmos atingiam o pico de resistência das curvas de tensão *versus* deformação. Isto remete à velocidade de ensaio que provavelmente deveria ser menor, de sorte que o pico de resistência fosse atingido num tempo compatível com o tempo de resposta do TAC. Ensaio adicionais com diferentes velocidades de cisalhamento poderiam ajudar a diminuir essas dúvidas.

Com relação ao comportamento da sucção frente à variação da massa específica aparente seca do solo, é mostrado na Figura 5.4 que quanto maior o grau de compactação maior a sucção registrada pelo tensiômetro. Esta figura mostra um comportamento homogêneo para a sucção inicial e final, mas não no pico de resistência. Provavelmente, para se obter a sucção no pico de resistência fosse necessário realizar ensaios com velocidade ainda menor que 0,03mm/min.

Esse acréscimo de sucção com o aumento do grau de compactação pode ser creditado à redução do índice de vazios. Conforme apresentado na Figura 5.4, essa tendência somente não se repetiu para os valores de sucção final obtido para o grau de compactação de 94%, onde foi registrado um valor de sucção 12,4% inferior ao obtido com grau de compactação de 92%.

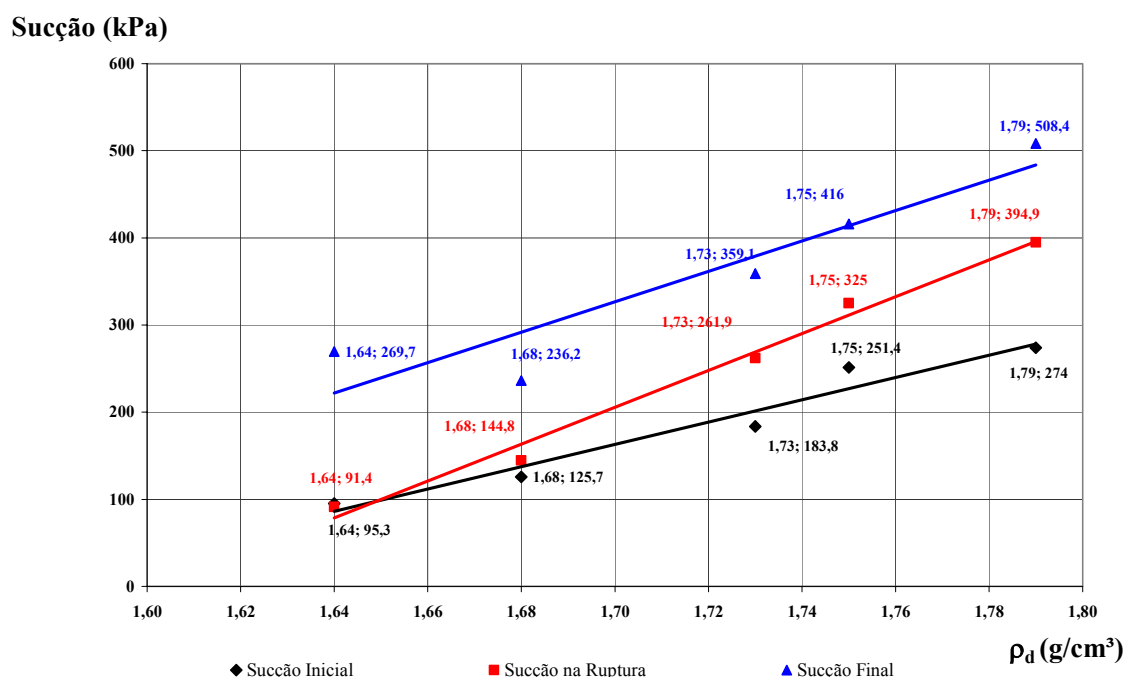


Figura 5.4 – Evolução da sucção com o acréscimo da massa específica aparente seca dos corpos de prova.

Na Tabela 5.1 apresenta-se o acréscimo de resistência à compressão simples em função do aumento do grau de compactação e conseqüentemente da sucção. Pode-se observar que o ganho mínimo de resistência à compressão que foi observado nessa série de ensaios foi de 26,1% referente ao valor obtido para o ensaio com corpo de prova moldado com 100% do grau de compactação, quando comparado com o ensaio realizado com 98% do grau de compactação. Esse comportamento pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 5.5.

Tabela 5.1 – Acréscimo da resistência com o aumento do grau de compactação.

Ensaio	ρ_d (g/cm ³)	Rc (kPa)	GC _{i+1} / GC _i
GC1 – 92	1,64	99,4	
GC2 – 94	1,68	149,1	1,50
GC3 – 97	1,73	255,4	1,71
GC4 – 98	1,75	366,3	1,43
GC5 – 100	1,79	462,1	1,26

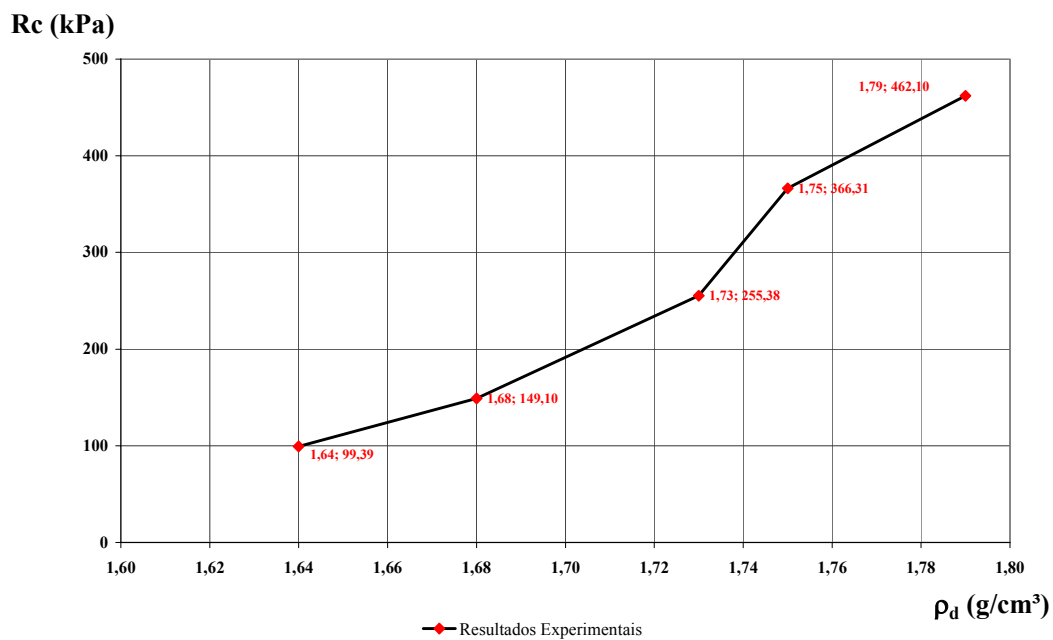


Figura 5.5 – Evolução da resistência à compressão com o aumento do grau de compactação na série de ensaios com variação do grau de compactação.

Na Figura 5.6 é mostrada a tendência de evolução da sucção na série de ensaios com variação da massa específica aparente seca do solo para o mesmo teor de umidade. Nesse gráfico, observa-se que houve acréscimo de sucção para o solo compactado independentemente do grau de compactação. De acordo com Toll (1990) o comportamento da sucção no decorrer dos ensaios pode estar ligado à sucção inicial dos corpos de prova. Assim os resultados com tendências diferentes poderiam ser obtidos caso a sucção inicial dos corpos de prova fossem mais elevados.

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 estão apresentados respectivamente, os gráficos que correlacionam tensão cisalhante com a massa específica aparente seca do solo e os valores de sucção registrados no início dos ensaios, no instante da ruptura do corpo de prova e a sucção final. A partir dos pontos experimentais foi realizado o ajuste de um plano e por regressão linear com o plano passando pela origem foram obtidas as Equações 5.1, 5.2 e 5.3 que fornecem, para o intervalo dos valores de sucção e massa específica aparente seca do solo apresentados, um valor numericamente igual à resistência ao cisalhamento do solo. Essas equações podem servir como uma previsão inicial, para esse intervalo de valores, da

resistência ao cisalhamento do solo analisado sob as condições de já apresentadas, desde que se tenha a massa específica aparente seca do solo e principalmente a sucção que opera no corpo de prova. Esse ajuste pode ser considerado satisfatório, visto que o coeficiente de determinação (R^2) foi em média de 0,96.

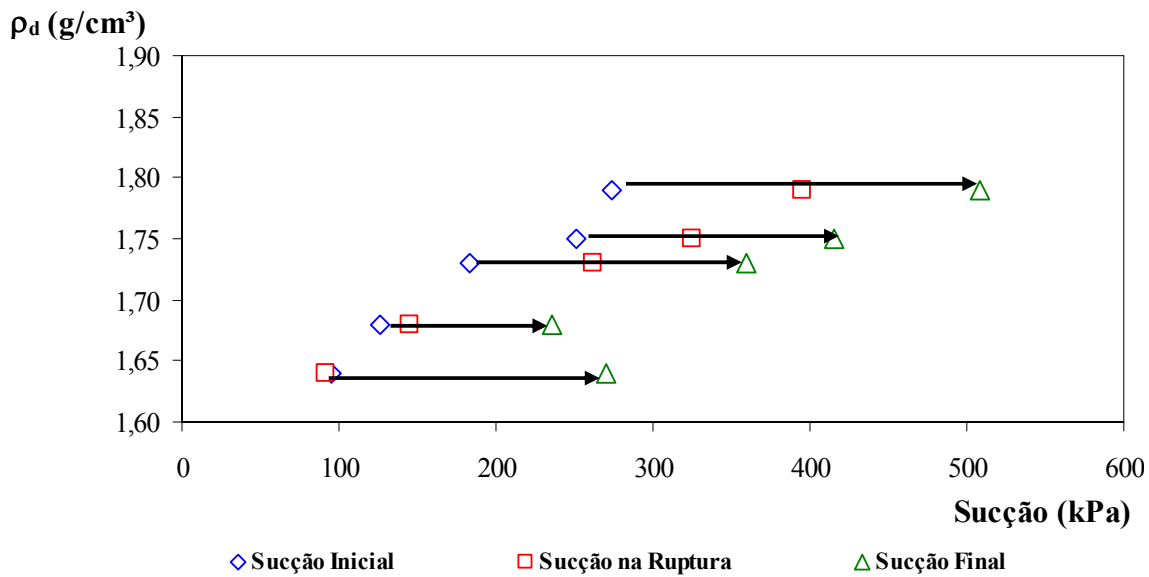


Figura 5.6 – Evolução da sucção na série ensaios com variação do grau de compactação para o mesmo teor de umidade.

$$\tau = 0,98 \cdot \psi_{Inicial} - 28,4 \cdot \rho_d \quad R^2 = 0,95 \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\tau = 0,60 \cdot \psi_{Ruptura} - 7,1 \cdot \rho_d \quad R^2 = 0,96 \quad \text{Equação 5.2}$$

$$\tau = 0,69 \cdot \psi_{Final} - 65,4 \cdot \rho_d \quad R^2 = 0,97 \quad \text{Equação 5.3}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

ρ_d = Massa específica aparente seca do solo (g/cm^3)

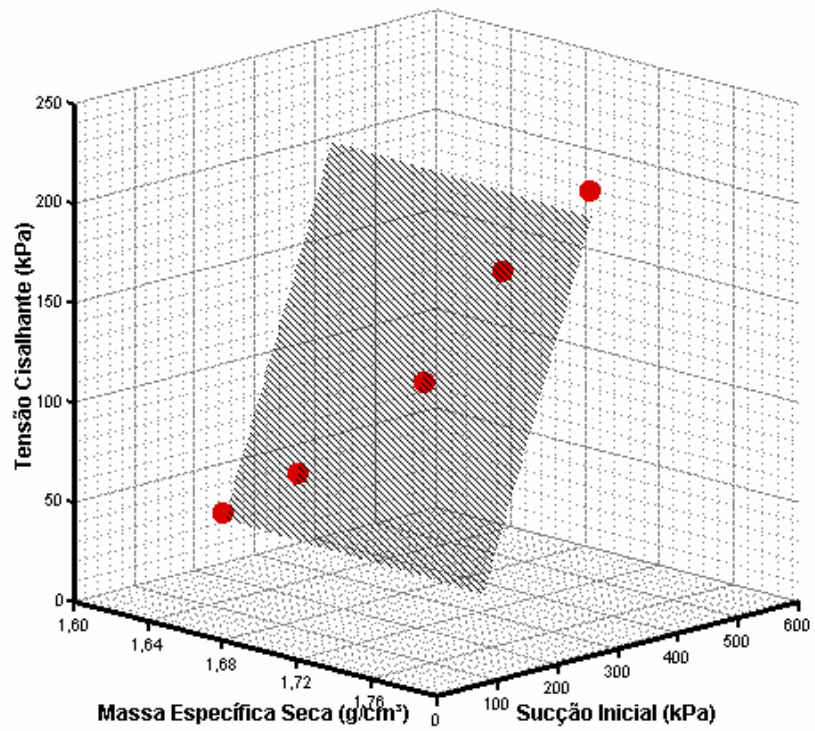


Figura 5.7 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção inicial, com o plano passando pela origem.

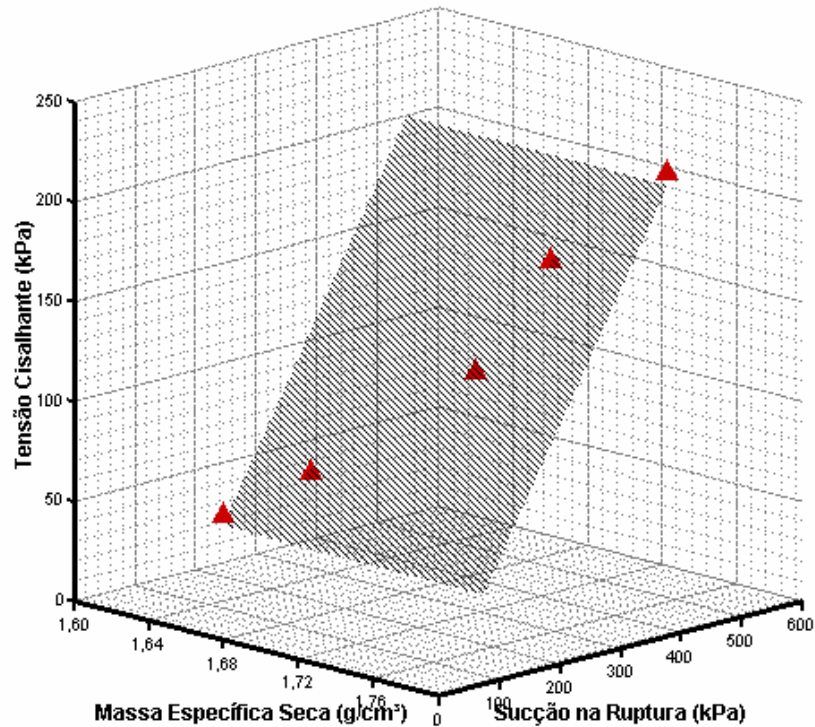


Figura 5.8 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção na ruptura, com o plano passando pela origem.

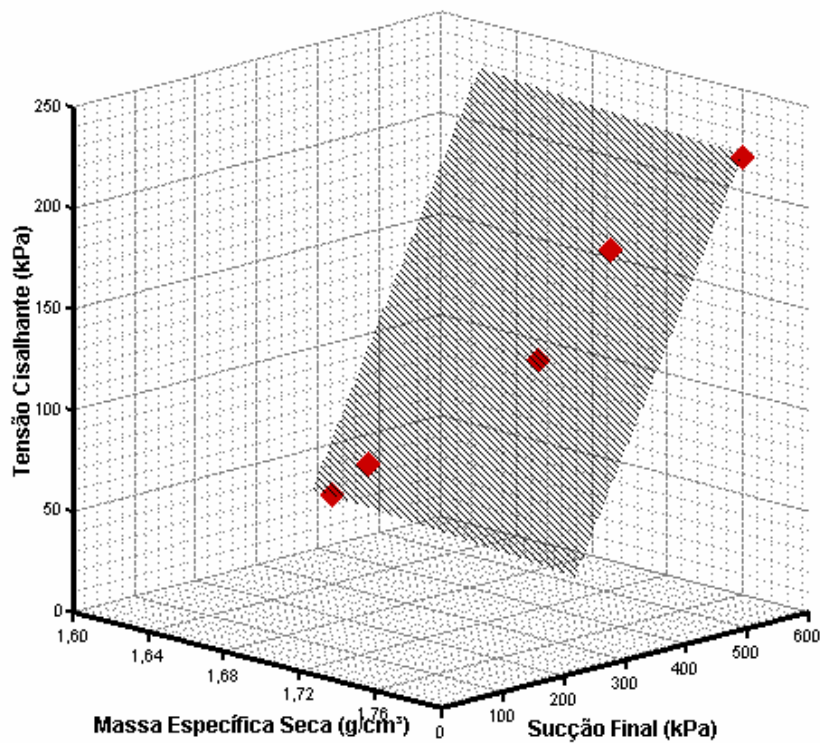


Figura 5.9 – Tensão cisalhante em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção final, com o plano passando pela origem.

As equações 5.4, 5.5 e 5.6 foram obtidas, a partir dos mesmos pontos experimentais que deram origem as equações 5.1, 5.2 e 5.3, entretanto, nas suas obtenções, o ajuste foi realizado sem que o plano interceptasse a origem dos eixos. Vale chamar a atenção que estas equações são restritas para a determinação numérica da resistência ao cisalhamento deste solo especificamente, nas características físicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios. Além disso, as equações se restringem a faixa de massa específica e de sucção que lhes deu origem, pois caso contrário, poderiam ocorrer situações em que a tensão cisalhante fosse apresentada numericamente negativa.

$$\tau = 0,61 \cdot \psi_{Inicial} + 500,8 \cdot \rho_d - 841,54 \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.4}$$

$$\tau = 0,81 \cdot \psi_{Ruptura} - 496,5 \cdot \rho_d + 789,02 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 5.5}$$

$$\tau = 0,24 \cdot \psi_{Final} + 877,3 \cdot \rho_d - 1477,08 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 5.6}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

ρ_d = Massa específica aparente seca do solo (g/cm^3)

5.2.4. Ensaios de Compressão Simples - Série com Variação do Teor de Umidade

A Figura 5.9 apresenta as condições de moldagem dos corpos de prova ensaiados com mesma massa específica aparente seca e diferentes teores de umidade. Todos os corpos de prova foram inicialmente moldados com ρ_d igual a $1,7\text{g}/\text{cm}^3$ e teor de umidade de 15,3%. Em seguida foram deixados secar até que cada um atingisse um teor de umidade pré-determinado.

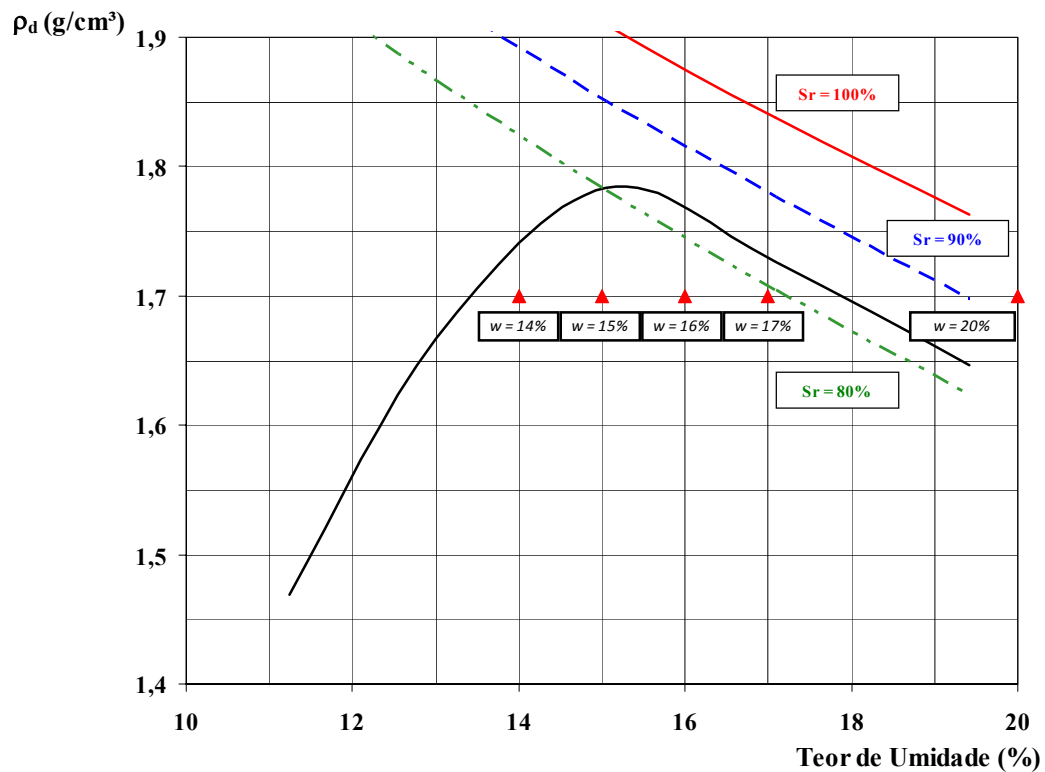


Figura 5.10 – Características de compactação dos corpos de prova utilizados na série de ensaios com trajetória de umedecimento e secagem.

Na Figura 4.23 conforme esperado, observa-se que a resistência à compressão dos corpos de prova aumentou com o decréscimo do teor de umidade dos corpos de prova.

Na Figura 4.24 pode-se observar a evolução da sucção com o aumento das deformações dos corpos de prova. Foi possível constatar no ensaio com teor de umidade de 20%, que corresponde a 90% de grau de saturação, que a evolução da sucção registrada no decorrer deste ensaio, diferentemente dos demais, reduziu com o aumento das deformações até que pressões neutras positivas foram registradas, provavelmente devido à condição de elevada saturação do corpo de prova.

Quanto à tendência de estabilização das leituras, observa-se que após a ruptura dos corpos de prova, ocorreu uma leve tendência de estabilização da sucção que foi acentuada a partir dos 2% de deformação.

O pico de resistência, em média, ocorreu num tempo aproximado de 37 minutos, que corresponde a um valor 13 minutos menor do que o tempo de equilíbrio observado durante a montagem dos ensaios. Conforme as outras séries de ensaios, acredita-se que o TAC, não esteja medindo sucção que efetivamente atuava no corpo de prova no mesmo instante que a sucção era alterada pelo acréscimo das deformações.

Conforme apresentado na Figura 5.11, nos corpos de prova com massa específica aparente seca constante e variação do teor de umidade, observou-se um aumento da sucção com a redução do teor de umidade, como esperado.

A Figura 5.12 mostra as medidas obtidas no decorrer dessa série de ensaios de compressão simples com massa específica constante e teor de umidade variável, superpostas na curva de retenção do solo. Nota-se que, os pontos experimentais estão situados em uma região semelhante aos pontos obtidos nas determinações experimentais com o TAC apresentadas na Figura 4.6.

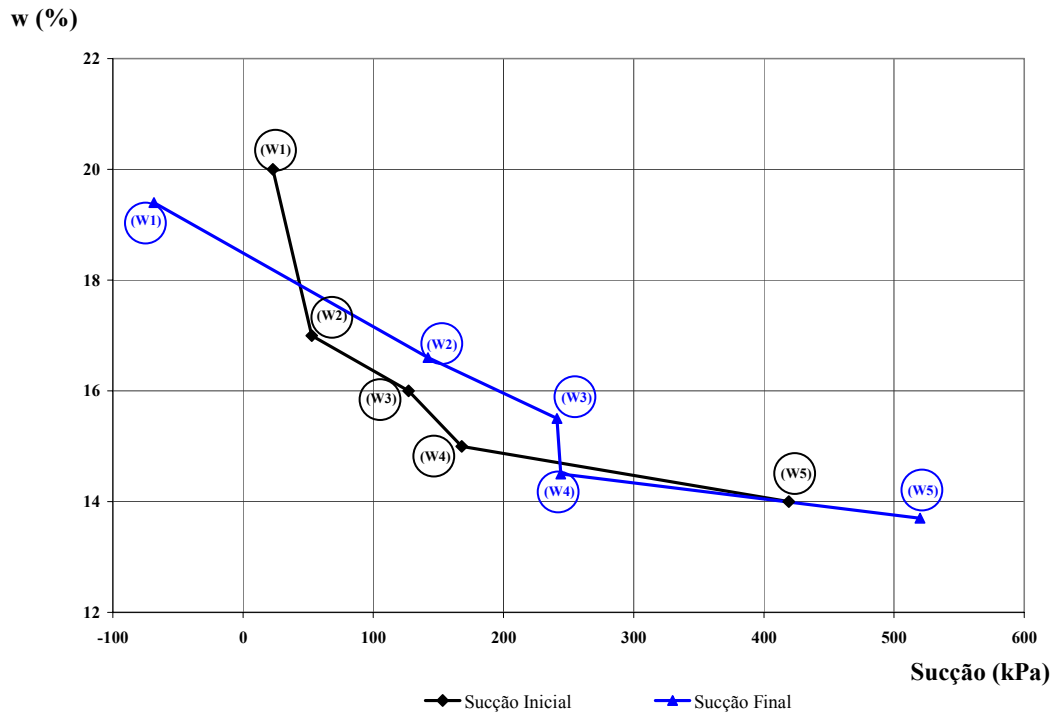


Figura 5.11 – Teor de umidade *versus* sucção inicial e final no decorrer do ensaios de compressão simples da série com variação de teor de umidade e massa específica aparente seca do solo constante.

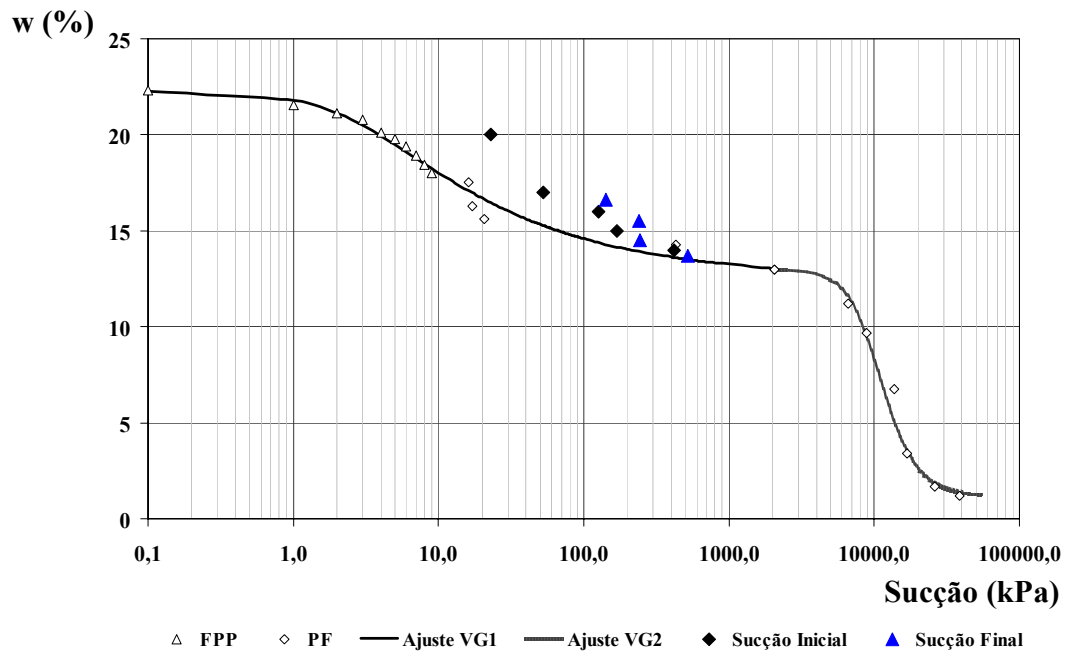


Figura 5.12 – Medidas de sucção superpostas na curva de retenção do solo.

Na Figura 5.13 é apresentado o gráfico que relaciona a resistência à compressão simples em função do teor de umidade do solo. Conforme esperado, observa-se o aumento de resistência relacionado com redução do teor de umidade do solo.

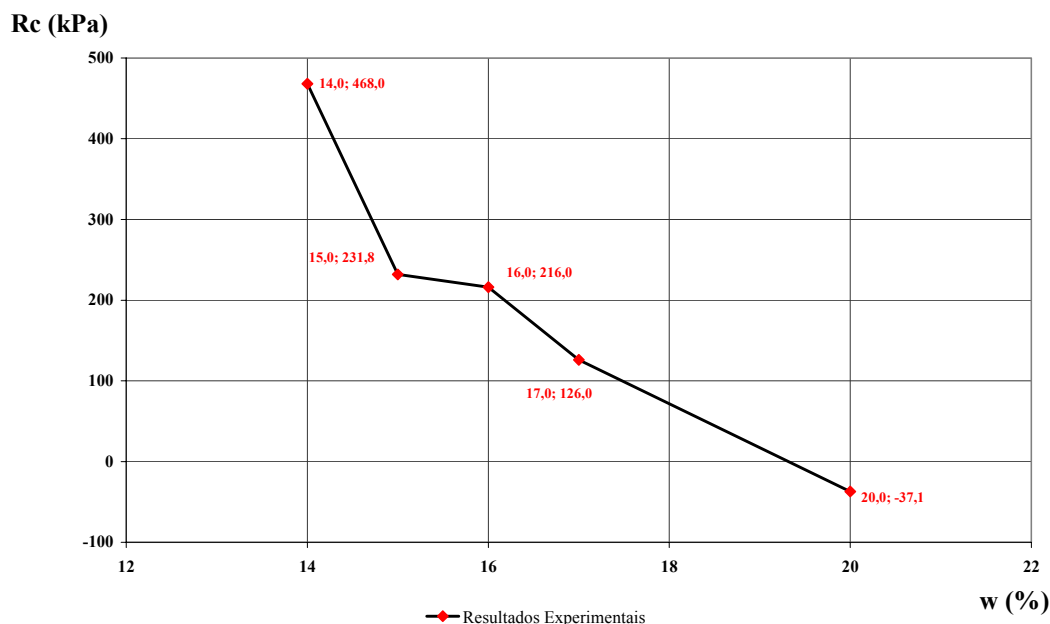


Figura 5.13 – Evolução da resistência à compressão simples com o teor de umidade – Corpos de prova moldados com massa específica aparente seca correspondente a 95% do grau de compactação do Proctor normal.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de resistência bem como o acréscimo obtido com a redução do teor de umidade da amostra. Assim observa-se que o ganho mínimo de resistência a compressão que foi observado com a variação do grau de compactação foi de 10kPa, cerca de 5%, referente ao valor obtido para o ensaio com corpo de prova ensaiado com 15% de teor de umidade, quando comparado com o ensaio realizado com 16% de teor de umidade.

Tabela 5.2 – Valores de resistência à compressão simples para diferentes teores de umidade.

Ensaio	Rc (kPa)	W_{i+1} / W_i
W1 – 20	55,0	
W2 – 17	110,0	2,00
W3 – 16	222,0	2,02
W4 – 15	232,2	1,05
W5 – 14	485,0	2,09

Sabe-se que a resistência de um solo não saturado é comandada pela sucção que atua no mesmo. O fato da sucção final do ensaio realizado com 15% de teor de umidade ser

praticamente igual à sucção final do ensaio realizado com 16% do teor de umidade, e os valores de resistência a compressão também serem semelhantes, pode reforçar a hipótese de que a sucção que operava no corpo de prova no instante das leituras do tensiômetro não ser efetivamente a sucção registrada pelo tensiômetro, pois para valores semelhantes de sucção espera-se que a resistência dos corpos de prova sejam semelhantes.

Na Figura 5.14 foi traçado um gráfico de teor de umidade *versus* sucção que opera no início, na ruptura e no final do ensaio. Para isso foi considerado que as variações de teor de umidade no decorrer do ensaio são desprezíveis.

Observa-se que com exceção do ensaio realizado com 20% do teor de umidade, que corresponde a cerca de 90% do grau de saturação, a sucção tendeu a aumentar no decorrer do ensaio. Resultado semelhante foi obtido por Toll (1990), onde conforme apresentado na Figura 2.42, a sucção tendeu a aumentar quando a sucção no início do ensaio era inferior a 100kPa. A partir desse valor o autor registrou um comportamento inverso na evolução da sucção no decorrer do ensaio. Diante do apresentado por Toll (1990), poderia elucubrar a hipótese de que caso fossem realizados ensaios com valores de sucção inicial mais altos, a tendência na evolução da sucção com o incremento das deformações poderiam inverter.

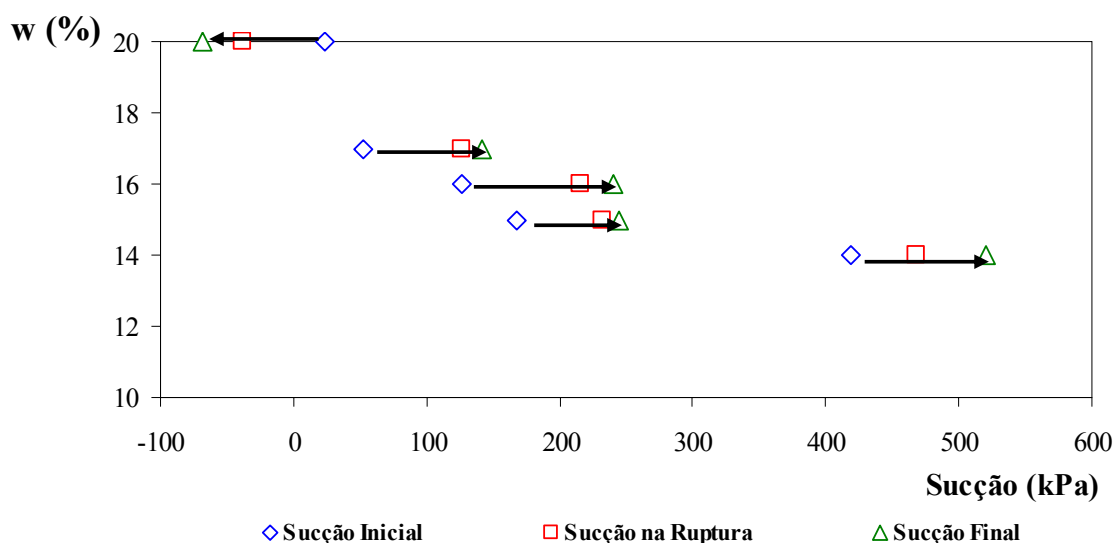


Figura 5.14 – Evolução da sucção na série ensaios com variação do teor de umidade para o mesmo grau de compactação da amostra.

Observa-se que com exceção do ensaio realizado com 20% do teor de umidade, que corresponde a cerca de 90% do grau de saturação, a sucção tendeu a aumentar no decorrer do ensaio. Resultado semelhante foi obtido por Toll (1990), onde conforme apresentado na Figura 2.42, a sucção tendeu a aumentar quando a sucção inicial do solo era inferior a 100kPa. A partir desse valor o autor registrou um comportamento inverso na evolução da sucção no decorrer do ensaio. Desta forma, acredita-se que caso fossem realizados ensaios com valores de sucção inicial mais elevados, a tendência na evolução da sucção com o incremento das deformações poderia inverter.

Na Figura 5.15 é apresentado o gráfico que relaciona a resistência ao cisalhamento ou resistência não drenada ($\tau = Su = Rc/2$) com a sucção dos corpos de prova registrada pelo tensiômetro de alta capacidade no início, no pico de resistência e no final dos ensaios. Foram ajustadas envoltórias retilíneas para a estimativa dos ângulos ϕ_b que foram respectivamente 27,8°, 23,6° e 20,8°. Para este ajuste foi considerado que a coesão para o solo saturado, ou seja, sucção igual a zero foi de 25kPa.

Outra alternativa de tratamento dos resultados de avaliação da resistência com a sucção, consiste na possibilidade de utilização da proposta de Fredlund (1978) aos dados experimentais. Para a aplicação deste método é necessário conhecer o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e o intercepto de coesão do solo saturado, obtido por ensaios triaxiais convencionais. Para a utilização desse método, foi suposto que para diferentes níveis de sucção o ângulo de atrito efetivo é constante. Vanapalli et al. (1996) afirma que para fins práticos é aceitável assumir que o ângulo de atrito efetivo é praticamente constante para níveis de sucção entre 0 e 500kPa. As envoltórias obtidas para os ensaios de compressão triaxial saturado, com sucção igual a zero e com a amostra no teor de umidade ótimo, com sucção de cerca de 170kPa podem estar seguindo essa afirmativa, pois apontaram uma diferença de apenas 3° no ângulo de atrito efetivo.

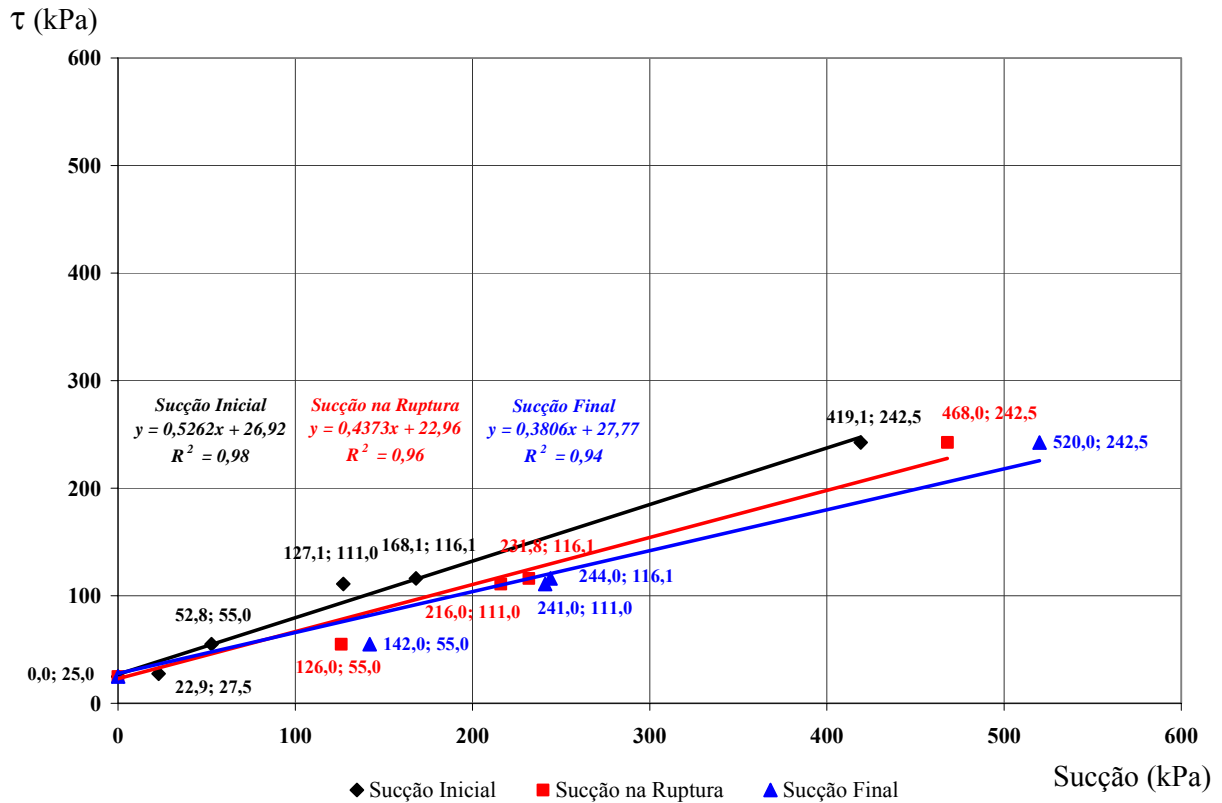


Figura 5.15 – Determinação do ϕ_b para os valores obtidos a partir da resistência não drenada ($S_u = R_c / 2$) para a série de ensaios com variação do teor de umidade.

Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentados os gráficos que relacionam a tensão cisalhante e a tensão normal nas diferentes sucções registradas pelo tensiômetro de alta capacidade, admitindo-se que o ângulo de atrito não varia para os níveis de sucção nos corpos de prova. Nessas figuras, a tensão cisalhante e a tensão normal, são relacionadas com a sucção no início do ensaio, no instante da ruptura e no final dos mesmos.

Na Figura 5.19 é apresentada a relação entre a tensão cisalhante e a sucção dos corpos de prova, donde foram determinados os ângulos ϕ_b referentes à sucção inicial, na ruptura e no final dos ensaios que foram $15,4^\circ$, $13,6^\circ$ e $12,3^\circ$ respectivamente.

A Tabela 5.3 mostra o resumo dos resultados de ϕ_b obtidos diretamente pela relação entre a resistência não drenada (S_u) em função da sucção e também os valores de ϕ_b obtidos pela proposta de Fredlund (1978).

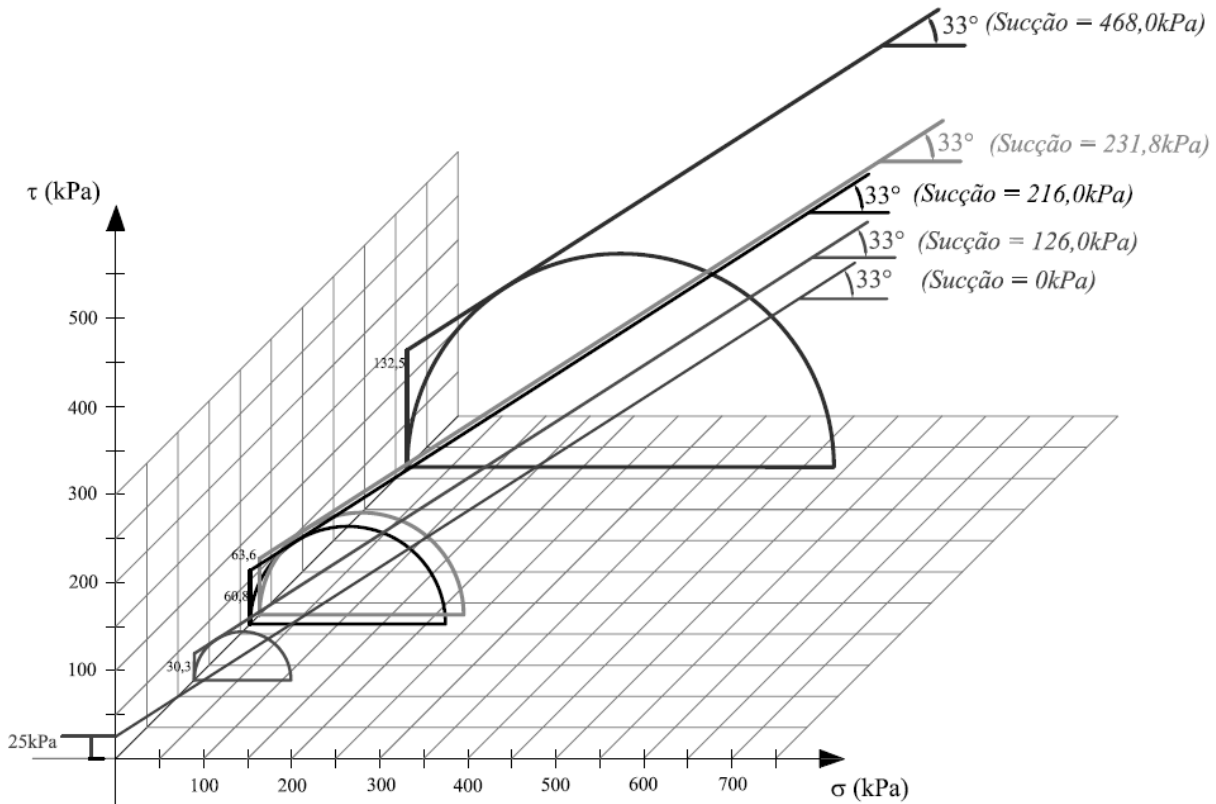


Figura 5.16 – Envoltórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no início dos ensaios.

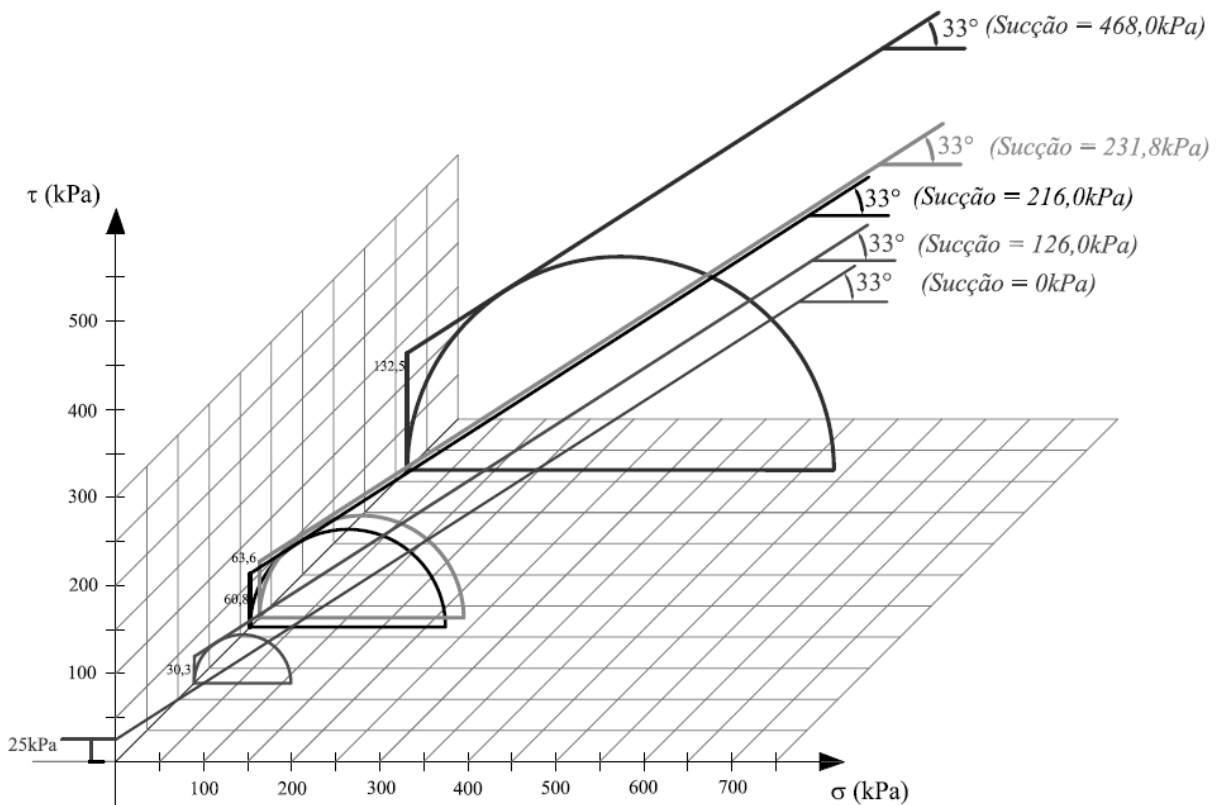


Figura 5.17 – Envoltórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no pico de resistência dos ensaios.

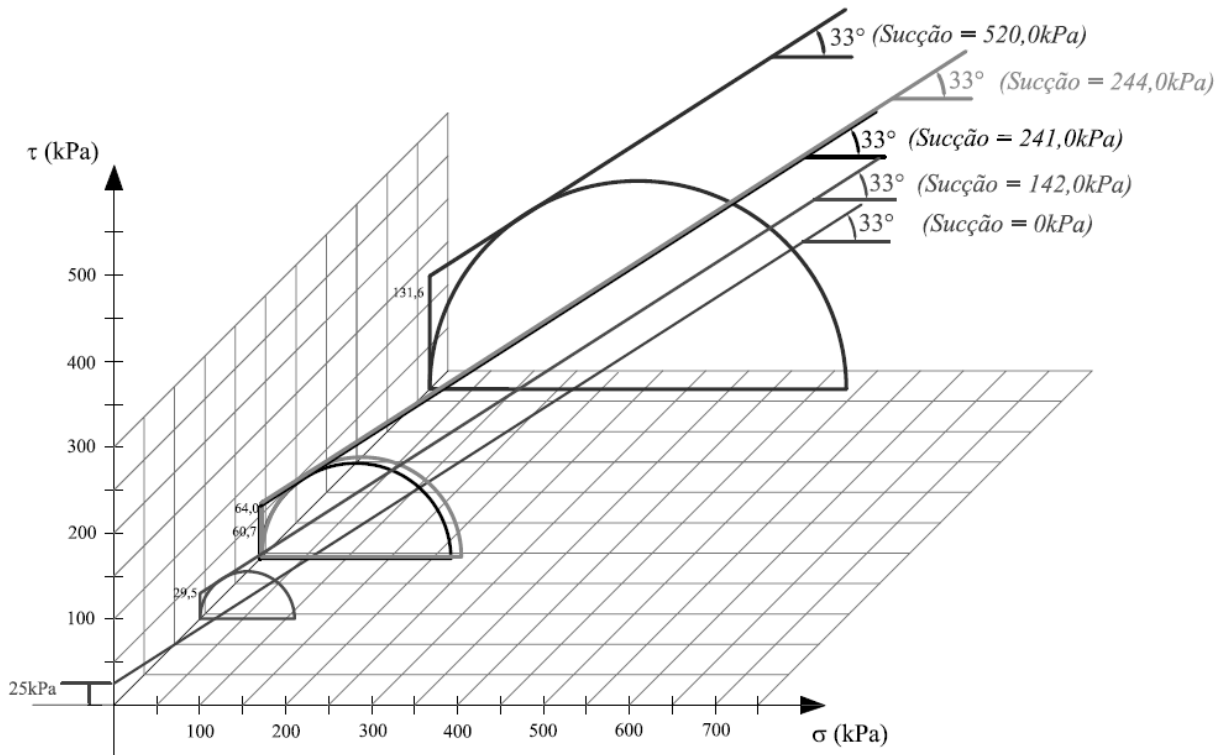


Figura 5.18 – Envolvórias de resistência para a série de ensaios com variação do teor de umidade com a sucção registrada no final dos ensaios.

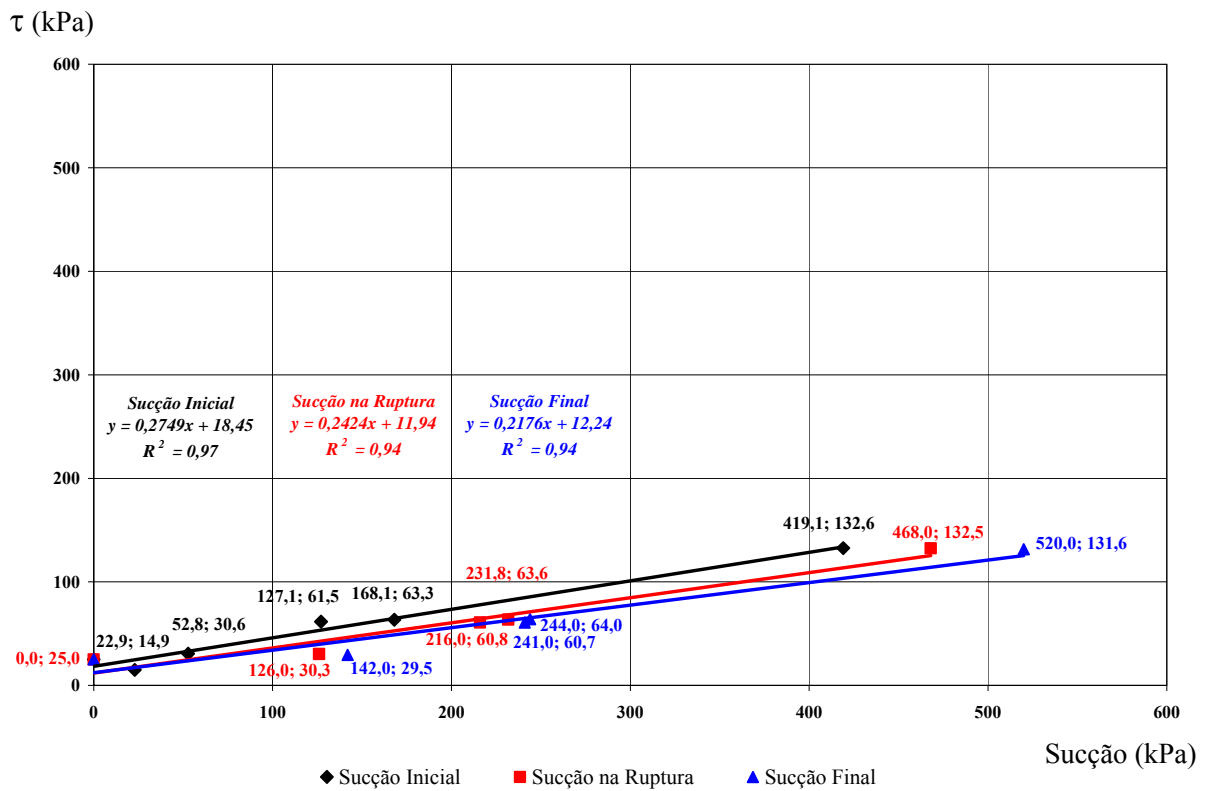


Figura 5.19 – Determinação do ϕ_b para os valores obtidos a partir da proposta de Fredlund et al (1978) para a série de ensaios com variação do teor de umidade.

Tabela 5.3 – Resumo dos valores de ϕ_b obtidos para a série de ensaios com variação do teor de umidade.

Condição	ϕ_b (Determinação Direta)	ϕ_b (Fredlund et al., 1978)
Sucção Inicial	27,8°	15,4°
Sucção na Ruptura	23,6°	13,6°
Sucção Final	20,8°	12,3°

Observa-se então que o ϕ_b obtido pelo método de Fredlund (1978) ao considerar no eixo da sucção os valores de sucção iniciais obtidos com o TAC foi 12,4° menor do que o obtido na Figura 5.15. Ao considerar a sucção na ruptura, por este método o ϕ_b foi 10,0° menor que o ângulo obtido pelo método apresentado na Figura 5.15 e ao considerar a sucção final a diferença foi de 8,5°.

Diante do apresentado, foi observado que na série de ensaios onde foi variado o grau de compactação da amostra a diferença entre as duas formas de determinar o ϕ_b foi maior, chegando até 14,2°. Para a série de ensaios com variação do teor de umidade da amostra a maior diferença foi 2,4°. Em ambas as situações essa diferença foi observada ao se considerar no eixo da sucção as medidas de sucção inicial.

Nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 estão apresentados respectivamente, os gráficos que correlacionam resistência ao cisalhamento, correspondente a metade do valor de resistência a compressão, com o teor de umidade do solo e os respectivos valores de sucção registrados com o TAC no início, no instante da ruptura do corpo de prova e no final de cada um dos ensaios.

Conforme feito na série de ensaios de variação do grau de compactação para um único teor de umidade, os pontos experimentais foram plotados no espaço formado pelos eixos de resistência ao cisalhamento, sucção e teor de umidade do solo. Em seguida foi realizado o ajuste de um plano e por regressão linear com o plano passando pela origem que resultou nas Equações 5.7, 5.8 e 5.9, que fornecem para o intervalo dos valores de sucção e

teor de umidade apresentados, um valor numericamente igual à resistência ao cisalhamento do solo. Essas equações podem servir como uma previsão inicial, para esse intervalo de valores, da resistência ao cisalhamento do solo analisado sob as condições de já apresentadas, desde que se tenha o teor de umidade do solo e a sucção que opera no corpo de prova. Esse ajuste pode ser considerado satisfatório, visto que o coeficiente de determinação (R^2) foi em média de 0,97.

$$\tau = 0,54 \cdot \psi_{Inicial} - 1,45 \cdot w \quad R^2 = 0,95 \quad \text{Equação 5.7}$$

$$\tau = 0,45 \cdot \psi_{Ruptura} - 1,24 \cdot w \quad R^2 = 0,97 \quad \text{Equação 5.8}$$

$$\tau = 0,39 \cdot \psi_{Final} - 1,61 \cdot w \quad R^2 = 0,97 \quad \text{Equação 5.9}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

w = Teor de Umidade (%)

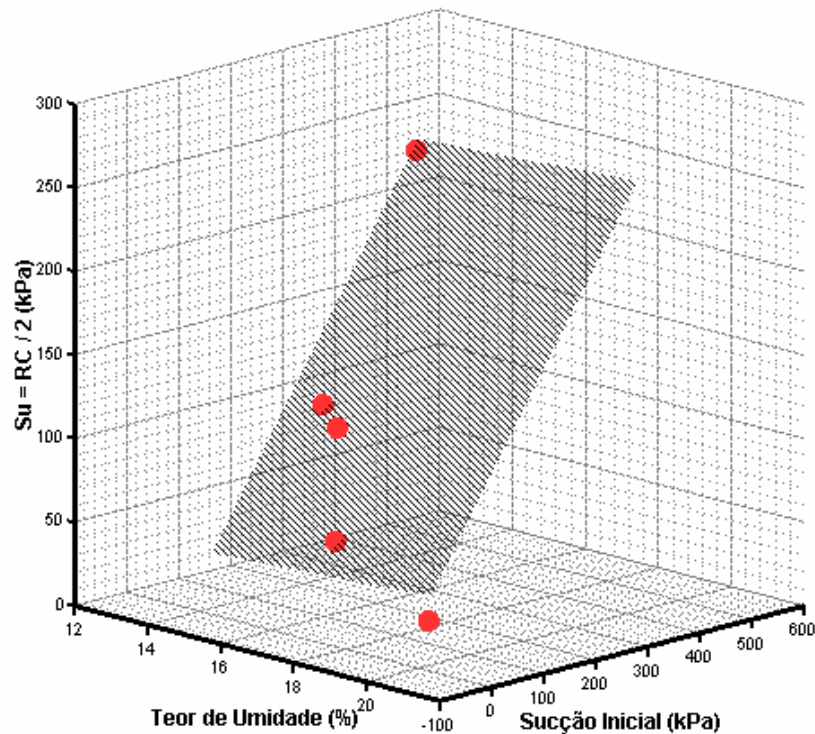


Figura 5.20 – Resistência não drenada (RC/2) em função do teor de umidade do solo e da sucção inicial.

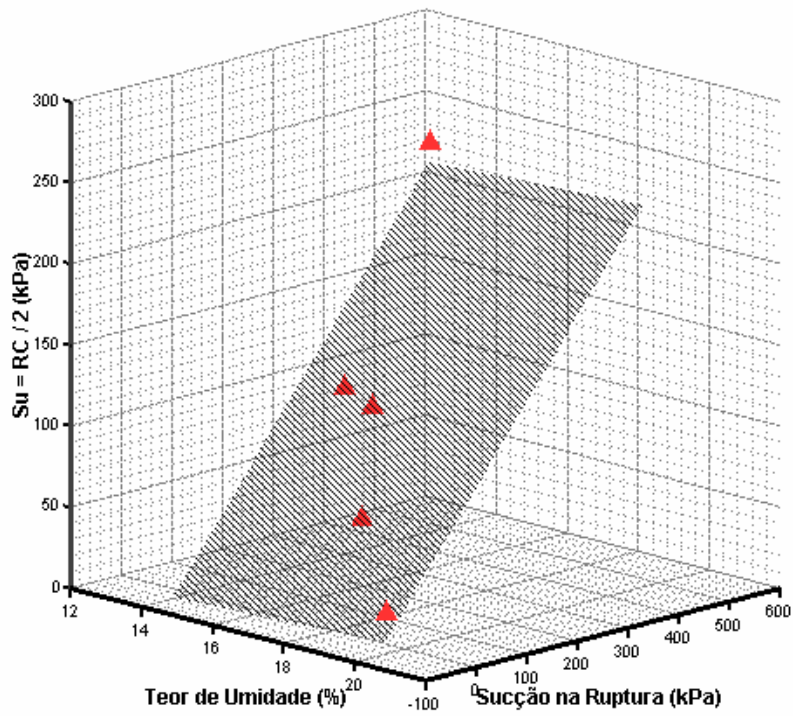


Figura 5.21 – Resistência não drenada (RC/2) em função do teor de umidade do solo e da sucção na ruptura.

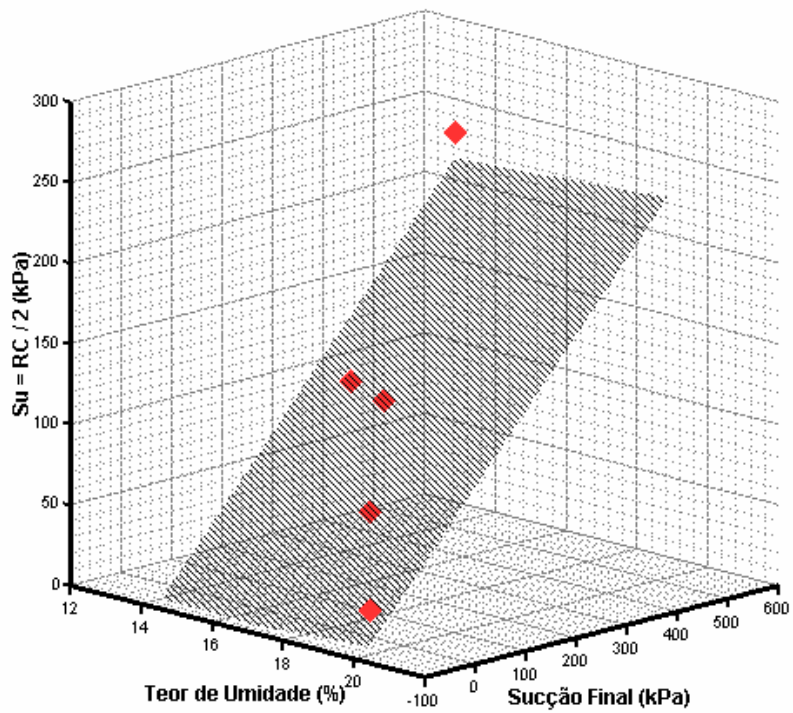


Figura 5.22 – Resistência não drenada (RC/2) em função do teor de umidade do solo e da sucção final.

As equações 5.10, 5.11 e 5.12 foram obtidas, a partir dos mesmos pontos experimentais que originaram as equações 5.7, 5.8 e 5.9, entretanto, o ajuste foi realizado sem que o plano interceptasse a origem dos eixos. Vale chamar a atenção que estas equações são restritas para a determinação numérica da resistência ao cisalhamento deste solo especificamente, nas características físicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios. Além disso, as equações se restringem a faixa de sucção e teor de umidade lhes originou, pois caso contrário, poderiam ocorrer situações em que a resistência ao cisalhamento fosse apresentada numericamente negativa.

$$\tau = 0,45 \cdot \psi_{Inicial} - 5,72 \cdot w + 132,36 \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.10}$$

$$\tau = 0,66 \cdot \psi_{Ruptura} + 18,61 \cdot w - 327,06 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 5.11}$$

$$\tau = 0,56 \cdot \psi_{Final} + 17,77 \cdot w - 301,62 \quad R^2 = 0,96 \quad \text{Equação 5.12}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

w = Teor de Umidade (%)

Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 estão apresentados respectivamente, os gráficos que correlacionam resistência ao cisalhamento, obtida com o método de Fredlund (1978), com o teor de umidade do solo e os respectivos valores de sucção registrados com o TAC no início, na ruptura e no final de cada um dos ensaios. Novamente os pontos experimentais foram plotados no espaço formado pelos eixos de resistência ao cisalhamento, sucção e teor de umidade do solo. O resultado da regressão linear com o plano passando pela origem resultou nas Equações 5.13, 5.14 e 5.15 que fornecem, para o intervalo dos valores de sucção e teor de

umidade apresentados, um valor numericamente igual à resistência ao cisalhamento do solo. Conforme as outras equações apresentadas, estas podem servir como uma previsão inicial da resistência ao cisalhamento, para a faixa de valores de teor de umidade e sucção, do solo analisado sob as condições de já apresentadas, desde que se tenha os valores de teor de umidade do solo e a sucção no solo. Esse ajuste pode ser considerado satisfatório, visto que o coeficiente de determinação (R^2) foi em média de 0,99.

$$\tau = 0,28 \cdot \psi_{Inicial} - 1,22 \cdot w \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.13}$$

$$\tau = 0,25 \cdot \psi_{Ruptura} - 0,67 \cdot w \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.14}$$

$$\tau = 0,22 \cdot \psi_{Final} - 0,68 \cdot w \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.15}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

w = Teor de Umidade (%)

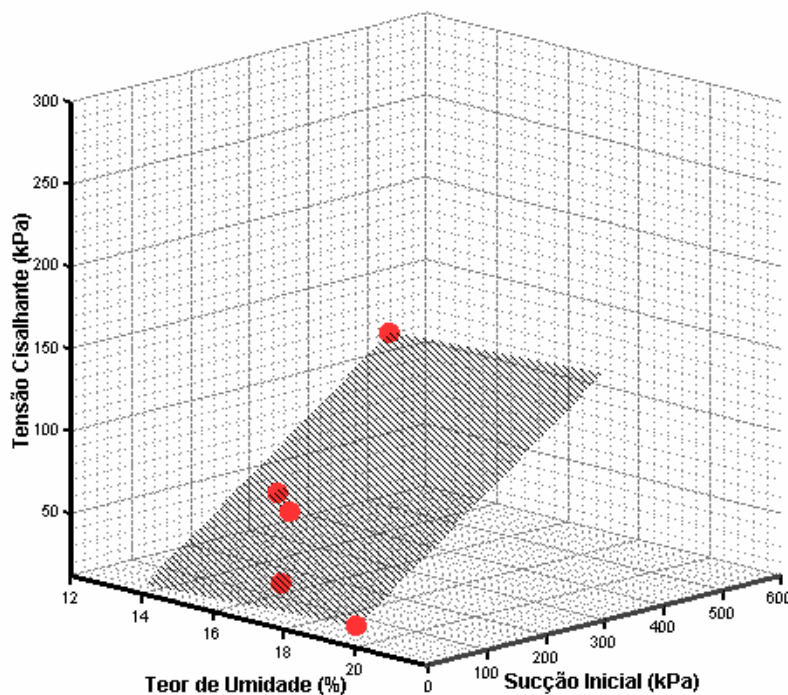


Figura 5.23 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção inicial.

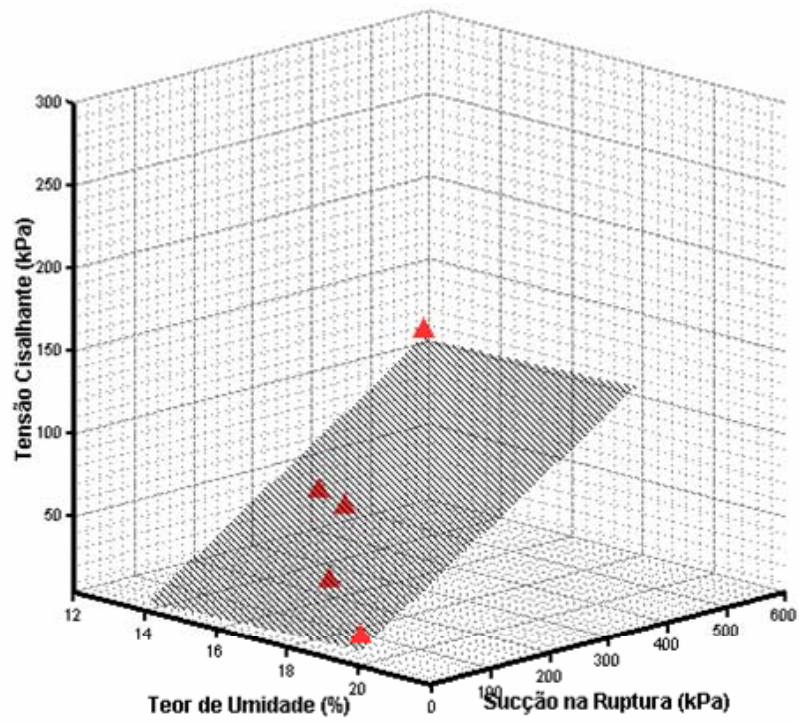


Figura 5.24 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção na ruptura.

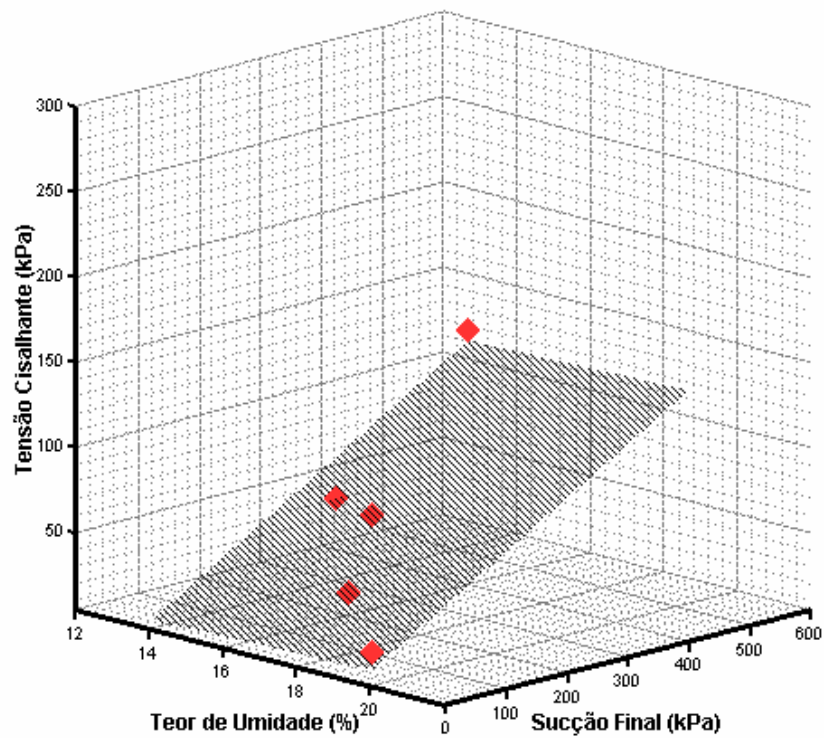


Figura 5.25 – Tensão cisalhante, obtida pela proposta de Fredlund (1978) em função do teor de umidade do solo e da sucção final.

As equações 5.16, 5.17 e 5.18 foram obtidas, a partir dos mesmos pontos experimentais que originaram as equações 5.13, 5.14 e 5.15, entretanto, o ajuste foi realizado sem que o plano interceptasse a origem dos eixos. Conforme já mencionado, estas equações são restritas para a determinação numérica da resistência ao cisalhamento do solo estudado nas características físicas dos corpos de prova utilizados nos ensaios, além das limitações das faixas de faixa de sucção e teor de umidade lhes originou.

$$\tau = 0,28 \cdot \psi_{Inicial} - 1,31 \cdot w - 1,65 \quad R^2 = 0,99 \quad \text{Equação 5.16}$$

$$\tau = 0,36 \cdot \psi_{Ruptura} + 9,46 \cdot w - 167,66 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 5.17}$$

$$\tau = 0,30 \cdot \psi_{Final} + 7,46 \cdot w - 128,91 \quad R^2 = 0,97 \quad \text{Equação 5.18}$$

Em que:

τ = Resistência ao Cisalhamento (kPa)

$\psi_{Inicial}$ = Sucção Inicial (kPa)

$\psi_{Ruptura}$ = Sucção na Ruptura (kPa)

ψ_{Final} = Sucção Final (kPa)

w = Teor de Umidade (%)

5.2.5. Ajuste Hiperbólico

Com os resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados com a amostra saturada e no teor de umidade residual foram registrados os parâmetros de resistência do solo em ambas as condições e implementados na equação de previsão da resistência em função da sucção, proposta por Vilar (2007). Na Tabela 5.4 estão apresentados os parâmetros utilizados no ajuste. Já na Figura 5.1 é apresentado o resultado desse ajuste.

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados no ajuste hiperbólico.

c' (kPa)	c_{ult} (kPa)	ϕ' (°)	ϕ_{ult} (°)	$\phi_{médio}$ (°)	a	b (1/kPa)
25,0	326,2	33,0	40,0	36,5	1,351	0,003

Nesse ajuste a coesão aumenta até aproximadamente 325kPa, que corresponde à sucção de 8000kPa e a partir daí tende a estabilização.

Na Figura 5.26 foram superpostos ao ajuste, os resultados de resistência ao cisalhamento e os respectivos valores de sucção das séries de repetibilidade e com variação do teor de umidade dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção. A resistência ao cisalhamento (S_u) indicada na figura corresponde à metade da resistência à compressão simples.

Nessa superposição observou-se que os valores de resistência ao cisalhamento em função da sucção registrada pelo TAC se mostraram coerentes com o ajuste hiperbólico.

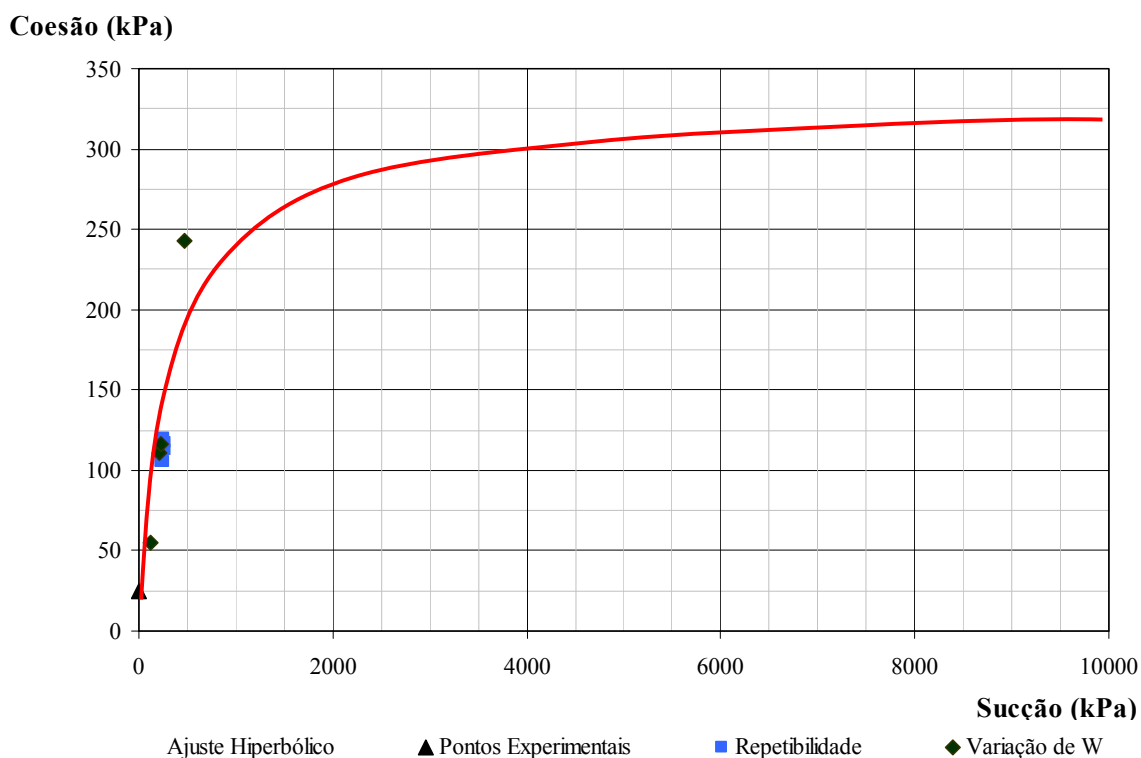


Figura 5.26 – Resistência ao cisalhamento prevista pelo ajuste hiperbólico proposto por Vilar (2007) com os resultados das séries de ensaios de resistência a compressão simples superpostos.

6. CONCLUSÃO

A curva de retenção obtida com o funil de placa porosa e com o papel filtro mostrou que o solo apresentou duas entradas de ar, referentes, provavelmente, à drenagem de água dos macroporos e dos microporos respectivamente. Quanto às determinações realizadas com o TAC pode-se afirmar que o equipamento se apresenta como uma ferramenta que oferece redução do tempo para realização dos ensaios, em face do tempo de equilíbrio característico do equipamento e de custos se comparado com outros métodos à disposição. Nas determinações experimentais de retenção de água, realizadas com o tensiômetro de alta capacidade, foi observado que para baixos valores de sucção o tensiômetro superestima as medidas de sucção, enquanto para valores mais altos, os resultados foram mais próximos dos obtidos nos métodos do papel filtro e funil de placa porosa. De maneira geral o tensiômetro apresentou um desempenho satisfatório visto que apresentou leituras com mesma tendência e ordem de grandeza.

Na série de ensaios de resistência com a amostra seca ao ar, com o teor de umidade de cerca de 1,0%, os parâmetros de resistência obtidos foram sensivelmente superiores aos do solo saturado e do solo ensaiado no teor de umidade ótimo. Esse aumento pode ter ligação com algum processo de cimentação desenvolvido durante a instalação da sucção nos corpos de prova.

Os registros de sucção obtidos na série de repetibilidade foram satisfatórios, visto que o desvio padrão e o coeficiente de variação medidos foram relativamente baixos em se tratando de medidas de sucção em solos não saturados.

Em todos os ensaios de resistência à compressão realizados nessa pesquisa, observou-se que a sucção aumentou até cerca de 2% de deformação axial nos corpos de prova. Na velocidade de cisalhamento utilizada, esta deformação corresponde a 66 minutos de ensaio, e a partir daí a sucção tendeu a estabilização. Durante a montagem dos ensaios observou-se que o tempo de equilíbrio entre os corpos de prova e o tensiômetro foi em média 50 minutos e o pico de resistência dos ensaios ocorreram com cerca de 1% de deformação que corresponde a 33 minutos de ensaio. Diante disso, é levantada a hipótese de que a sucção registrada pelo tensiômetros no instante da ruptura, não é a sucção que operava no corpo de prova naquele momento, sendo indicado, em pesquisas futuras, a realização de ensaios com velocidades mais baixas, a fim de compatibilizar o instante da ruptura dos corpos de prova com o tempo de equilíbrio para os registros de sucção pelo tensiômetro, além de aperfeiçoar a sistema de controle de teor de umidade na amostra no decorrer do ensaio.

De uma maneira geral, e como esperado, notou-se que as sucções tenderam a aumentar com o grau de compactação do solo (massa específica aparente seca do solo), o mesmo ocorrendo com a resistência à compressão simples. Os resultados experimentais puderam ser ajustados por uma equação de regressão múltipla, com a coesão em função da massa específica aparente seca do solo e da sucção.

A redução do teor de umidade, para corpos de prova moldados com mesma massa específica aparente seca do solo, resultou num aumento da sucção e conseqüentemente da resistência à compressão. Também foi possível relacionar a resistência ao cisalhamento, sucção e teor de umidade.

Ao se retratar a variação da resistência com a sucção, verificaram-se diferentes ângulos ϕ_b , a depender da forma como os resultados foram tratados. A proposta de Fredlund et al. (1978) resultou nos menores valores ϕ_b , valores que tenderam a ser cerca de 1,80 vezes

superior do que quando se analisou os resultados diretamente, isto é, relacionando a resistência não drenada ($S_u = Rc/2$) e a sucção.

O ajuste hiperbólico, proposto por Vilar (2007), realizado para o solo utilizado nessa pesquisa, é considerado satisfatório. A superposição dos resultados dos ensaios de compressão simples com medida direta de sucção pode servir como um indicador positivo da coerência, tanto do ajuste hiperbólico quanto, principalmente, dos valores de sucção registrados pelo tensiômetro de alta capacidade nos ensaios de compressão simples.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M.; CARVALHO, C. S. Geotechnical parameters for study of natural slopes instabilization at Serra do Mar, Brazil. In: 12th INT. CONF. ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Rio de Janeiro: Balkema, 1982, v.2, p. 1599-1602.
- AGUILAR, S. A. S. **Deformabilidade de uma argila colapsível não saturada sob compressão isotrópica com sucção controlada**. 1990. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- AITCHISON, G. D. **Relationships of moisture stress and effective stress functions on unsaturated soils: Pore pressure and Suction in Soils**. Butterworths: London, 1961.
- AITCHISON, G. D. The quantitative description of the stress deformation behavior of expansive soils - Preface to set of papers, In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS. **Proc. 3rd International Conference on Expansive Soils**. Haifa, Israel, 1973, v. 2, p.79-82.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4767: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils**. ASTM International: West Conshohocken, USA, p. 13, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459 – **Solo**: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508 – **Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,9mm**: Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180 – **Solo**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181 – **Solo**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182 – **Solo**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, ABNT, 1986.
- BARDEN, L. (1965). Consolidation of Compacted an Unsaturated Clays. **Geotechnique**, London, v. 15, n. 3, p. 267-286, 1965.
- BISHOP A. W.; ALPAN I.; BLIGHT G. E.; DONALD I. B. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. In: RES. CONF. ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS, **Proc. of the Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils**. Boulder, 1960, p. 503-532.
- BISHOP, A.W. The principle of effective stress. **Technisk Ukeblad**, v. 106, n. 39, p. 859-863, 1959.
- BISHOP, A.W.; DONALD, I.B. The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. In: 5TH INTERNATIONAL CONF. SOIL MECHANICS FOUNDATION ENGINEERING, **Proc. of the 5th International Conf. Soil Mechanics Foundation Engineering**. Paris, 1961, v. 1, p. 13-22.
- BLIGHT, G. E. Aspects of the capillary model for unsaturated soils. In: 7th ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proc. of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Haifa, 1983, p. 3-7.
- BOCKING, K. A.; FREDLUND, D. G. (1980). Limitation of the axis translation technique. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS. **Proc. of**

- the Fourth International Conference on Expensive Soils.** Denver, 1980, v. 1, p. 117 – 135.
- BOTELHO, F. V. C.; CARVALHO, J. C.; REZENDE, L. R. Influência da variação da umidade de compactação na curva característica de um solo fino laterítico. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32. **Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação.** Brasília: ABPV, 2000, v. 1, p 86-95.
- CARRILLO, C. W.; FONSECA, E. C.; CAMPOS, T. M. P. Equipamentos de cisalhamento direto com sucção controlada. In: 2º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS. **Anais do 2º Simpósio sobre solos não saturados.** Recife-PE, 1994, p. 67-77.
- CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. Sample disturbance in London clay. **Geotechnique**, v. 42, n. 4, p. 577-585, 1992.
- COLEMAN, J. D. Stress strain relations for partly saturated soil. **Geotechnique**, v. 12, n. 4, p. 348-350, 1962.
- COLMENARES, J. E.; RIDLEY, A. M. Stress-Strain and strength relationships for a reconstituted clayey silt. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. **Proc. of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils**, Recife, Brazil, 2002, v. 2, n. 10-13, p. 481-484.
- CRONEY, D.; COLEMAN, J. D.; BLACK, P. M. Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. In: H.F. Winterkorn (Ed.). Water and its Conduction in Soils. **Highway Research Board Special Report**, v. 40, p. 226–252, 1958.
- DE CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados.** Rio de Janeiro, 1997, v. 2, p. 399-417.
- DE CAMPOS, T. M. P.; CARRILLO D, C.W. Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: 1st International Conference on Unsaturated Soil. **Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated Soils.** Paris, 1995, v. 1, p. 31-38.

- DELAGE, P.; SURAJ DE SILVA, G.P.R.; DE LAURE, E. Un nouvel appareil triaxial pour les soils non saturés. In: 9th EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Balkema, Dublin, 1987, v. 1, p.26-28.
- DONALD, I. B. Discussion – **Proceedings of Conference on Pore Pressure and Suction in Soils**. Butterworth, London, 1960.
- DOURADO NETO, D.; NILSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P.. **Programa computacional para modelagem da curva de retenção de água no solo. Versão 3.00**. Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz” – ESALQ, 2001.
- ESCARIO, V. e SÁEZ, J. The shear strenght of partly saturated soils. **Geotechnique Journal**, v. 36, n. 3, p. 453-456, 1986.
- ESCARIO, V.; SÁEZ, J. Shear strength of partly saturated soils versus suction. In: 6th International Conference on Expansive Soils. **Proc. of the 6th International Conference on Expansive Soils**. New Delhi, 1987, v.2, p. 141-143.
- FONSECA, E. C. **Ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada em solos não saturados**. 1991, 169f. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Civil – Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN N. R.; WIDGER R. S. The shear strength of unsaturated soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, p. 313-321, 1978.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division. ASCE.**, v. 103, gt. 5, p.447-466, 1977.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; GAN, J. K. M. Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. In: 6th International Conference on Expansive Soils. **Proc. of the 6th International Conference on Expansive Soils**. New Delhi, 1987, v.2, p. 49-54.
- FREDLUND, D. G.; VANAPALLI, S. K.; XING, A.; PUFAHAL, D. E. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOIL. **Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soil**. Paris, France, 1995, v.1, p. 63-69.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p.521-532, 1994.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. I. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 3, p. 440-448, 1996.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability functions for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533 - 546, 1994.
- FREDLUND, D.G. **Volume change behaviour of unsaturated soils**. 1973. Ph.D. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta.
- GAN, J. K. M.; FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 25, n. 3, p. 500-510, 1988.
- GREACEN, E. L.; WALKER, G. R.; COOK, P. G. Evaluation of the filter paper method form measuring soil water suction. In: **International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status**, Logan, U.S.A, 1987, p. 137-143
- GUAN, Y. G.; FREDLUND, D. G. Direct measurement of high soil suction. In: 3^o SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. **Proc. of the 3^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. Rio de Janeiro, 1997, v.2, pp. 543-550.

- GUAN, Y.G.; FREDLUND, D.G. Use of the tensite strength of water for direct measurement of high soil suction. **Geotechnical Journal for Review**, v. 34, p. 604-614, 1996.
- GULHATI, S. K.; SATIJA, D. J. Shear Strength of Partially Saturated Soils. In: 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Proc. of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Stockholm, Sweden, 1981., Rotterdam: A. A. Balkema, 1981, p. 609-612.
- HARVEY, E.N.; BARNES, D. K.; McELROY, W. D.; WHITELEY, A. H.; PEASE, D. C.; COOPER, K. W. Bubble formation in animals, 1 - Physical factors. **Journal of Cellular and Comparative Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-22, 1944.
- HEAD, K. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech press, v.3, 1986.
- HILF, J. W. **An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils**. 1956, 109f. Ph.D. Thesis - Faculty of the Graduate Scholl of the University of Colorado, Denver.
- HILLEL, D. **Soil water**: Physical principles and processes. New York: Academic Press, 1971.
- HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. Strain Rates for Unsaturated Soil Shear Strength Testing. In: 7th Southeast Asian Geotechnical Conference. Hong Kong, China, 1982. **Proc. of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conference**. Hong Kong, 1982, p. 787-803.
- JENNINGS, J.E.B. **A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils**. Pore Pressure and Suction in Soils. Butterworths, London, p. 26-30, 1961.
- JENNINGS, J.E.B; BURLAND, J.B. Limitations to the use of effetive stresses in partly saturated soils. **Geotechnique**, v. 12, n. 84, (SM5), p. 125-144, 1962.
- JIMÉNEZ SALAS S. J. Hacia una mecánica de suelos no saturada. **Revista Ingeniería Civil**, v. 88, n. 1, p. 145-164, 1993a.
- JOTISANKASA, A. **Collapse behavior of a compacted silty clay**. 2005, 422f. Ph.D. Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London.

- JOTISANKASA, A.; COOP, M.; RIDLEY, A. The development of a suction control system for a triaxial apparatus. **Geotechnical Testing Journal**, v. 30, n. 1, p. 1-7, 2006.
- KHALILI, N; KHABBAZ, M. H. A unique relationship for c for the determination of the shear strength of unsaturated soil - Technical Note. **Geotechnique**, v. 48, n. 5, p. 681-687, 1998.
- KUWAJIMA, R. M. (2000). **Determinação da sucção “in situ” em solo residual compactado utilizando-se o parâmetro B e a Medição Direta da Sucção**. 2000, 198f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.
- LAMBE, T. W. A mechanistic picture of shear strength in clay. **Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils**, Boulder, Colorado, p. 555-580, 1960.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, Depto. de Física e Meteorologia, 1995.
- LIER, Q. J.; MORAES, S. O.; LIBARDI P. L.; MIRANDA J. H. **Potenciais da água no solo**. 2004, 8f. Notas de aula da disciplina Física do ambiente agrícola (LCE-0200). Departamento de Ciências Exatas - LCE - ESALQ – USP, Piracicaba – SP.
- MARINHO F. A. M; PEREIRA J. H. F. Mini-curso de solos não saturados In: 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Apostila do 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Brasília: ABMS, 1998, p. 1-67.
- MARINHO, F. A. M. **Comunicação pessoal**, 2003.
- MARINHO, F. A. M. Introdução ao comportamento dos solos não saturados. **Mini curso ministrado durante o XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, Brasília, 1998.
- MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. Foz do Iguaçu, PR, 1994, v.2, p.515-522.

- MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Rio de Janeiro 1997, v. 2, 373-398.
- MARINHO, F. A. M.; CHANDLER, R. J. Cavitation and the direct measurement of soil suction. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. **Proc. of the 1st International Conference on Unsaturated Soils**. Paris, France, 1995, v.2, p. 623-630.
- MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 3, p.1-9, 2006.
- MARINHO, F. A. M.; PINTO, C. S. Soil suction measurement using a tensiometer. **International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics**. Rio de Janeiro, Brazil, 1997, p. 249-254.
- MARINHO, F. A. M.; TAKE, W. A.; TARANTINO, A. measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques. **Geotechnical and Geological Engineering**. The original paper published online May, 06, 2008. Disponível em <http://www.springerlink.com/content/h2536x2834483807>. Acesso: 20 de maio de 2008.
- MARINHO, F. A. M.; TAKE, W. A.; TARANTINO, A. State of art on tensiometers and translation technique. **International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics**. Trento, Italy, 2005, p.1-54.
- MARSHALL, T. J.; HOLMES, J. W. **Soil physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- MATYAS, E.L. Air and water permeability of compacted soils: Permeability and Capillarity of Soils. **American Society for Testing and Materials**, Philadelphia, USA, Special Technical Publication, n. 417, 1966.
- MATYAS, E.L.; RADHAKRISHNA, H.S. Volume change characteristics of partially saturated soil. **Geotechnique**, v. 18, n. 4, p. 432-448, 1968.
- McQUEEN, I.S.; MILLER, R.F. Calibration and evaluation of wide-range gravimetric method for measuring soil moisture stress. **Soil Science**, v. 10, p. 521-527, 1968

- MEILANI, I.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; FREDLUND, D. G. Mini suction probe for matric suction measurements. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, p. 1427-1432, 2002.
- OLIVEIRA, M. O.; MARINHO, F. A. M. Resistência não saturada de um solo residual compactado avaliada em ensaios de compressão simples. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, São Paulo, 2002.
- OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência de um solo residual compactado não saturado**. 2004, 330f. Tese de Doutorado da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.
- OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Suction equilibration time for a high capacity tensiometer. **Geotechnical Testing Journal**, v. 31, n. 1, p. 1-5, 2008.
- OLSON, R. E.; LANGFELDER, L. J. Pore water pressures in unsaturated soils. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, New York, v. 91, (Sm4), 1965.
- PARAGUASSU, A. B.; RÖHM, S. A. Evolução da resistência da superfície de taludes em sedimentos cenozóicos provocada pela cimentação natural. **Geociências**, Rio Claro-SP, v. 11, n. 2, p. 181-190, 1992.
- PRESA, E. P. **Indeformabilidad de las arcillas expansivas bajo succion controlada**. 1982. Tesis doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid.
- RAHARDJO, H.; CHANG, F. M.; LIM, T. T. Shear Strength in situ matric suction of a residual soil. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. **Proc. of the 1st International Conference on Unsaturated Soils**. Paris, France, 1995, v.2, p. 637-643.
- RAHARDJO, H.; LEONG, E.C. Suction measurements. Keynote lecture. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS CONFERENCE. **Proceedings of 4th International Conference on Unsaturated Soils Conference**. Geo Institute, Phoenix, Arizona, U.S.A., 2006, v. 2-5 April, p. 81-104.

- RICHARDS, B. G. **The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soil in relation to the design of engineering structure built on shallow foundation in Australia.** In: SYMPOSIUM ON PERMEABILITY AND CAPILLARITY, American Society for Testing and Materials, Atlantic City, N. J., 1966. In: FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, 1993, p. 41.
- RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A pore pressure probe for in situ measurement of a wide range of soil suction. **Proc. Int. Conf. Advances in Site Investigation Practice I.C.E.**, London, 1995.
- RIDLEY, A. M.; BURLAND, J.B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Geotechnique**, v. 44, n. 2, p. 321-324, 1993.
- RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático.** 2007, 262f. Tese de Doutorado – Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP.
- RÖHM, S. A. **Resistência ao cisalhamento de um solo arenoso laterizado não saturado da região de São Carlos.** 1992. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- RÖHM, S. A.; VILAR, O. M. Shear strength of an unsaturated sandy soil. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOIL. **Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soil**, Recife-PE, 1995, v.1, p.189-193.
- SOARES, R. M.; DE CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não saturado da cidade do Rio de Janeiro. In: IV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. **Anais do IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas.** Salvador, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2005, v. 1, p. 165-172.
- SOTO, M. A. A. **Comparação entre os métodos de imposição de controle de sucção em ensaios com solo não saturados.** 2004, 206f. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

- SOTO, M. A. A.; VILAR, O. M. Desempenho de um tensiômetro de alta capacidade na medição da sucção de solos não saturados. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Curitiba-PR, 2006, v. 1, p.447-452.
- SWARBRICK, G. E. Measurement of soil suction using the filter paper method. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. **Proc. of the 1st International Conference on Unsaturated Soils**. Paris, France, 1995, v. 2, p. 653-658.
- TABOR, D. **Gases, liquids and solids**. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- TAKE, W. A.; BOLTON, M. D. Tensiometer saturation and the reliable measurement of matric suction. **Geotechnique**, v. 53, n. 2, p. 159-172, 2003.
- TAKE, W.A.; BOLTON, M.D. A new device for the measurements of negative pore water pressure in centrifuge models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PHYSICAL MODELLING GEOTECHNICS, 2002, St. John's. **Proc. of the International Conference Physical Modelling Geotechnics**. Rotterdam, A. Balkema, 2002. p.89-94.
- TARANTINO, A.; BOSCO G.; MONGIOVÌ L. Response of the IC tensiometer with respect to cavitation. In: ASIAN CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 2000, Singapore. **Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils**. Rotterdam, A. Balkema, 2000, p. 309-314.
- TARANTINO, A.; MONGIOVÌ, L. Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS. **Proc. of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils**. Recife, 2002, p.319-324.
- TERZAGHI, K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proc. of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering** - International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1936, v. 1, p. 54-56.

- TIBANA, S.. **Condutividade hidráulica de solos saprolíticos de clorita-xisto e de um solo coluvionar compactados no campo e em laboratório**. 1991, 175f. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Civil – Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ.
- TOLL, D. G. A framework for unsaturated soil behaviour. **Geotechnique**, v. 40, n. 1, p. 31-44, 1990.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUF AHL, D. E.; CLINF TON, A. W. Model a form the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, p. 379-392, 1996.
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUF HAL, D.E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Geotechnique**, v. 49, n. 2, p. 143-159, 1999.
- VILAR, O. M. An expedite method to predict the shear strength of unsaturated soils. **Soils and Rocks**, v. 30, p. 51-61, 2007.
- VILAR, O. M.; CINTRA, J. C. A.; PARAGUASSU, A. B.; MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; CARNEIRO, B. J. I. Ensaio s de Campo e de Laboratório em Solos não Saturados. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS. **Anais do Encontro sobre Solos Não Saturados**. Porto Alegre, Brasil, 1995. v. 1. p. 184-201.
- VILAR, O.M. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. 2006. Notas de Aula da disciplina Resistência ao cisalhamento nos solos (SGS 5846) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- WOOD, D. M. **The behaviour of partly saturated soils: a review**. Report CUED/D-Soils/TR69. Cambridge: Cambridge University Engineering Department Technical, 1979.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)