JORGE EDUARDO DA SILVA GOMES

ESTUDO SOBRE FATORES QUE INFLUENCIAM
A ACURÁCIA DO MÉTODO DO PAPEL-FILTRO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia

- São Paulo -
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Gomes, Jorge Eduardo da Silva

**Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro / J.E.S. Gomes – São Paulo, 2007.
95 p.**

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

1. Mecânica dos Solos. 2. Solos não saturados. 3. Técnicas de medição de sucção 4. Método do papel-filtro I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações II.t.

Dedicatória

A Deus, cuja misericórdia tem-me sustentado até o presente.

À minha família, sem cujo apoio não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, aliado constante com quem posso contar. Um poderoso aliado Ele é.

“Bendize, ó minha alma, ao Senhor, e tudo que há em mim bendiga o Seu Santo Nome. Bendize, ó minha alma, ao Senhor, e não te esqueças de nenhum de Seus benefícios. É ele quem perdoa todas as tuas iniquidades e sara todas as tuas enfermidades; quem redime a tua vida da perdição e te coroa de benignidade e de misericórdia; quem enche a tua boca de bens, de sorte que a tua mocidade se renova como a águia (...)” [Salmo 103: 1 – 5]

Ao meu pai, o Major Engenheiro Jorge Gomes, pelo apoio ininterrupto que me tem oferecido ao longo da vida. Competente profissional, honrado chefe de família, um cristão-modelo. Suas pisadas quero sempre seguir.

À minha mãe, a Pedagoga Vera da Silva Gomes, pela presença de amor que me envolve e renova meu ser. Educadora eficaz, distinta mãe de família, uma cristã-modelo. Sua presença quero sempre fruir.

À minha irmã, Vivian Carla da Silva Gomes, pelo exemplo de conduta acadêmica e profissional. Estudante de Medicina da Universidade de São Paulo, é uma doce e jovial companheira. Quero tê-la sempre por perto, a animar-me e a alegrar meus dias.

Ao Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho, cuja orientação usufruí. Apoiou este projeto de pesquisa, e por todo tempo mostrou-se confiante quanto ao êxito da empreitada. Empreendedor arrojado, é um homem que constrói o futuro enquanto vive o presente. Sempre hei de lembrá-lo como importante agente participante da minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Dr. Carlos de Sousa Pinto, por meio de quem fui apresentado à Mecânica dos Solos. Ícone de sobriedade, age como um estadista, discursa como um filósofo e porta-se como um cavalheiro. Um modelo de intelectual e de cidadão. Sempre o terei em mente como um paradigma de comportamento.

Ao Prof. Dr. Marcos Massao Futai, pela amizade com que sempre me brindou. Jovem e prolífico pesquisador, seu entusiasmo pela Ciência e pela Técnica é contagiante. Hei de guardá-lo em minha memória com esmero.

Ao Srs. Antônio Carlos Heitzmann e Joaquim Costa Júnior, guardiães da ordem e da técnica no Laboratório de Mecânica dos Solos da EPUSP. Seu exemplo de dedicação e de seriedade sempre permeará meu caminho profissional.

Aos amigos: Prof. Dr. José Jorge Nader e Dr^a. Eng^a. Rosana Marília da Silva Silveira, pela companhia tão cara, tão enriquecedora. Considero-me privilegiado por tê-los conhecido.

Aos colegas de pós-graduação: Dr. Eng^o. Aderson Martha Vieira, Dr. Eng^o. Orlando Martini de Oliveira, MSc. Eng^a. Paula Fernanda Teixeira e MSc. Eng^o. Rodolfo Moreda Mendes. Obrigado pela convivência deveras agradável no cotidiano do Laboratório de Mecânica dos Solos da EPUSP.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	i
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais sobre solos não saturados	1
1.1.1. Percolação	1
1.1.2. Resistência ao cisalhamento	2
1.1.3. Alteração de volume	3
2. Solos não saturados e sucção	4
2.1. Comportamento do solo não saturado. Poro-pressão negativa (sucção).....	4
2.2. Os componentes da sucção em solos não saturados	5
3. Equipamentos e técnicas empregados para gerar e/ou medir sucção	7
3.1. Placa de sucção	7
3.1.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso da placa de sucção	9
3.2. Placa de pressão	9
3.2.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso da placa de pressão	11
3.3. Tensiômetro	11
3.3.1. Tensiômetro convencional	11
3.3.2. Tensiômetro de alta capacidade	12
3.3.3. Vantagens e desvantagens associadas ao uso do tensiômetro	13
3.4. Dessecador	14
3.4.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso do dessecador	17
3.5. Quadro Sinóptico	17
4. O método do papel-filtro	19
4.1. Breve histórico	19
4.2. Princípios do método	20
4.3. Conceitos de Termodinâmica	20
4.3.1. Sucção e energia livre da água do solo	20
4.3.2. A lei de Fick para o fluxo de vapor	23
4.3.3. Temperatura e variação da pressão de vapor (ou da umidade relativa)	24
4.3.4. Gradiente de densidade de vapor	26
4.3.5. Exemplo numérico	27
4.3.6. Estabilização da umidade relativa do ar contido em um ambiente fechado	29
4.3.7. Interpretação teórica de dados experimentais obtidos pelo método do papel-filtro	32
4.3.7.1. Síntese do equacionamento	32
4.3.7.2. Equilíbrio {atmosfera / meio poroso} <i>versus</i> equilíbrio {atmosfera / sensor}	34
4.4. Curvas de calibração	37
4.5. Efeito da deficiência de contacto	39

5. Investigação experimental – metodologia e ferramental	39
5.1. Concepção do experimento	39
5.2. Organização do experimento	41
5.3. Fabricação dos corpos-de-prova	44
5.4. Rotina de coleta de dados: protocolo laboratorial	47
6. Apresentação e avaliação de dados experimentais	48
6.1. Curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada	49
6.1.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais	49
6.1.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais	58
6.2. Curvas de retenção de areia fina resinada ($\phi = 0,15$ mm)	61
6.2.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais	61
6.2.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais	71
6.2.3. Efeito da resina sobre o comportamento da areia fina	75
6.3. Curvas de retenção de areia média resinada ($\phi = 0,60$ mm)	76
6.3.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais	76
6.3.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais	85
6.4. Avaliação comparativa das curvas de retenção	88
6.4.1. Susceptibilidade dos três materiais à variação do grau de deficiência de contacto	88
6.4.2. Susceptibilidade dos três materiais ao efeito do tempo	89
7. Conclusões	90
8. Recomendações para futuras pesquisas	91
9. Referências Bibliográficas	92

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 : Definição de energia livre	21
Equação 2 : Expressão da energia livre de um solvente em uma solução em termos da energia livre do mesmo solvente puro	21
Equação 3 : Relação entre umidade relativa e sucção, a 20°C	22
Equação 4 : Relação entre a molaridade de uma solução salina e a sucção por ela gerada em um dessecador	22
Equação 5 : Lei de Fick para o fluxo de vapor	23
Equação 6 : Lei dos gases perfeitos	24
Equação 7 : Relação empírica entre temperatura, pressão de vapor saturado e umidade relativa	25
Equação 8 : Expressão do gradiente de densidade de vapor como função dos gradientes de temperatura e de pressão	26
Equação 9 : Expressão do gradiente de pressão de vapor em função do gradiente de temperatura	26
Equação 10 : Expressão do fluxo difusivo de vapor	27
Equação 11 : Dedução da dependência entre a umidade relativa de estabilização e o tempo requerido para o alcance da estabilidade	29
Equação 12 : Síntese do equacionamento teórico	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras do Capítulo 2

Figura 1 : Sistema de forças associado à sucção (poro-pressão negativa) em solos não-saturados (Pinto, 2002)	5
--	---

Figuras do Capítulo 3

Figura 2 : Esquema geral da aparelhagem associada a uma placa de sucção (Oliveira, 2004)	8
Figura 3 : Vista pormenorizada da plataforma de apoio ao disco cerâmico de alta entrada de ar (Oliveira, 2004)	8
Figura 4 : Esquema ilustrativo de uma placa de pressão (Oliveira, 2004)	9
Figura 5 : Diagrama ilustrativo do conceito de referencial de pressão (Marinho, 2000)	10
Figura 6 : Esquema de um tensiômetro convencional	12
Figura 7 : Esquema de um tensiômetro de alta capacidade (Oliveira, 2004)	12
Figura 8 : Representação esquemática de um dessecador	14
Figura 9 : Representação gráfica da equação do erro experimental no dessecador	16

Figuras do Capítulo 4

Figura 10 : Representação gráfica da Equação 7 (Lu e Likos, 2004)	25
Figura 11 : Representação esquemática da montagem experimental elaborada por Costa (2003)	31
Figura 12 : Representação gráfica dos resultados experimentais obtidos por Costa (2003)	31
Figura 13 : Representação esquemática da montagem experimental elaborada para o estudo do tempo de equilíbrio entre o papel-filtro e o meio	35
Figura 14 : Representação gráfica dos resultados experimentais do estudo do tempo de equilíbrio do papel-filtro Whatman 42	35
Figura 15 : Demonstração experimental da diferença entre as taxas de absorção de vapor d'água do papel-filtro e da atmosfera de um dessecador	36
Figura 16 : Relação entre a umidade do papel-filtro e a sucção, mostrando o acréscimo da umidade com o tempo de equilíbrio para a medição de sucção total (Marinho, 1994)	38

Figuras do Capítulo 5

Figura 17 : Distribuições granulométricas dos materiais estudados	40
Figura 18 : Esboço de todo o elenco de corpos-de-prova empregado no experimento.....	43
Figura 19 : Fotografia de uma das três famílias de corpos-de-prova utilizadas no experimento	44
Figura 20 : Fabricação dos corpos-de-prova de argila caolinítica rosa sinterizada	45
Figura 21 : Fabricação dos corpos-de-prova de areia (fina e média)	46

Figuras do Capítulo 6

Figura 22 : Estruturação do processo de avaliação dos dados experimentais	48
---	----

Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro

Figura 23 : Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal	50
Figura 24 : Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (curvas de Van Genuchten sobrepostas aos pontos experimentais; teores de umidade selecionados para comparação: 0.4, 0.3 e 0.2)	50
Figura 25 : Representação gráfica dos desvios percentuais de aferição em função dos graus de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções semanais)	51
Figura 26 : Representação gráfica das curvas de retenção da argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal	52
Figura 27 : Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	52
Figura 28: Variação do desvio percentual de aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (argila caolinítica rosa sinterizada, inspeções quinzenais)	54
Figura 29: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal	55
Figura 30: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	55
Figura 31: Variação do acréscimo percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (argila caolinítica rosa sinterizada, inspeções mensais)	56
Figura 32: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,4$)	58
Figura 33: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,3$)	58
Figura 34: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,2$)	59
Figura 35: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)	60
Figura 36: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal	62
Figura 37 : Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	62
Figura 38 : Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções semanais)	64
Figura 39 : Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal	65

Figura 40 : Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	65
Figura 41: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções quinzenais)	67
Figura 42: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal	68
Figura 43: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	68
Figura 44: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções mensais)	70
Figura 45: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,34$)	71
Figura 46: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,30$)	72
Figura 47: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,20$)	72
Figura 48: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,17$)	73
Figura 49: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)	74
Figura 50: Representação gráfica da alteração de comportamento da areia fina resinada mediante a aplicação da resina laminar M como aglomerante. Ambas as curvas de retenção referem-se à sucção matricial plena para periodicidade semanal de inspeções, nos termos do presente trabalho	75
Figura 51: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal	77
Figura 52: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	77
Figura 53: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções semanais)	78
Figura 54: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal	79
Figura 55: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	80

Figura 56: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções quinzenais)	81
Figura 57: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal	82
Figura 58: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)	83
Figura 59: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções mensais)	84
Figura 60: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,25$)	85
Figura 61: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA ($\theta = 0,15$)).....	86
Figura 62: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA ($\theta = 0,10$)).....	86
Figura 63 : Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabelas do Capítulo 3

Tabela 1: Equipamentos e técnicas empregados para medir e/ou gerar sucção – quadro sinóptico	18
--	----

Tabelas do Capítulo 6

Tabela 2: Variáveis de caracterização dos materiais estudados	40
Tabela 3: Índices de vazios dos materiais empregados no experimento	40
Tabela 4: Informações sobre a conformação geométrica dos corpos-de-prova	41
Tabela 5: Elucidação do sistema taxonômico empregado na organização do experimento	44
Tabela 6: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada	49
Tabela 7: Registro das informações relativas ao procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção semanal)	51
Tabela 8: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada	52
Tabela 9: Registro das informações relativas ao procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção quinzenal)	53
Tabela 10: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada	54
Tabela 11: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção mensal)	56
Tabela 12: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – argila caolinítica rosa sinterizada (referencial: medidas de sucção matricial plena)	57
Tabela 13 : Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (argila caolinítica rosa sinterizada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)	60
Tabela 14: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada	61
Tabela 15 : Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção semanal)	63
Tabela 16: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada	64
Tabela 17: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção quinzenal)	66
Tabela 18: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada	67
Tabela 19: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção mensal)	69
Tabela 20: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – areia fina resinada (referencial: medidas de sucção matricial plena)	70

Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro

Tabela 21: Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (areia fina resinada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)	74
Tabela 22: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada	76
Tabela 23 : Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção semanal)	78
Tabela 24: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada	79
Tabela 25: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção quinzenal)	81
Tabela 26: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada	82
Tabela 27: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção mensal)	83
Tabela 28: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – areia média resinada (referencial: medidas de sucção matricial plena)	84
Tabela 29: Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (areia média resinada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)	87

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

- A : área da superfície de uma massa de líquido [m^2]
- B : constante presente na dedução da equação de Costa (2003) [s^{-1}]
- C : designação genérica para *corpo-de-prova* (a sigla $C_iF_jL_k$ refere-se ao i-ésimo corpo-de-prova, da j-ésima família, do k-ésimo lote)
- CR : compacidade relativa [adimensional]
- c : constante de integração [adimensional]
- D_v : coeficiente de difusão [m^2 / s]
- d : indicador de variação infinitesimal ($df(x) / dx$, a derivada na notação de Leibnitz)
- e : número de Neper ($\sim 2,71$) ; onde não houver indicações, *e* denota a grandeza física *índice de vazios*
- F : designação genérica de uma *família* de corpos-de-prova (define-se uma família como um conjunto de corpos-de-prova inspecionados segundo uma mesma periodicidade)
- f : energia livre [J]
- g : aceleração da gravidade [m / s^2]
- H : quantidade de calor [J]
- h : altura [m]
- IP : índice de plasticidade [%]
- i : número de ordem (define o i-ésimo elemento de uma sequência, como por exemplo em $C_iF_jL_k$)
- j : número de ordem (define o j-ésimo elemento de uma sequência, como por exemplo em $C_iF_jL_k$)
- k : número de ordem (define o k-ésimo elemento de uma sequência, como por exemplo em $C_iF_jL_k$);
constante caracterísitca de um líquido, relacionada à intensidade de fluxo de vapor a partir de uma solução. É inversamente proporcional à molaridade da solução [$\text{g} / \text{m}^2.\text{s}$]
- L : designação genérica de um *lote* de corpos-de-prova (define-se um lote como um conjunto de corpos-de-prova constituídos do mesmo material)
- LL : limite de liquidez [%]
- LP : limite de plasticidade [%]
- M : massa de vapor saturado [kg] ; molaridade de uma solução [mol / L]
- M_0 : molaridade inicial da solução do dessecador [mol / L]
- M_f : molaridade final da solução do dessecador [mol / L]
- m : massa de vapor não saturado [kg]; molaridade de uma solução salina [mol / L]
- P : pressão [kPa]
- ΔP_0 : pressão osmótica de uma solução [kPa]

Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro

p_{ext} : pressão externa a uma massa líquida confinada [kPa]

q_v : fluxo de vapor [kg / m².s]

R : constante universal dos gases perfeitos [atm.L / mol. K]

RH : umidade relativa [%]

s : sucção [kPa] – variável dada em termos genéricos, podendo designar tanto sucção total, como osmótica ou matricial

S : entropia [adimensional]

T : temperatura [°C ou K, conforme indicação]

t : tempo [s]

u_a : pressão sobre o ar intersticial de um meio poroso [kPa]

u_v : pressão de vapor de uma solução [kPa]

$u_{v,\text{sat}}$: pressão de vapor saturado de uma solução [kPa]

u_w : pressão sobre a água intersticial de um meio poroso [kPa]

V : indicação genérica de volume [m³]

V_{ar} : volume de ar [m³]

$V_{\text{água}}$: volume de água [m³]

V_{total} : volume total [m³]

x : proporção volumétrica entre ar e água em um dessecador ($V_{\text{ar}} / V_{\text{água}}$)

ALFABETO GREGO

$\mathcal{E}$: erro relativo [adimensional]

λ : calor latente de vaporização da água [J / kg . °C]

ν : volume específico de um líquido [m³ / kg]

π : sucção osmótica [kPa]

ρ_v : densidade do vapor d'água [kg / m³]

ϕ : diâmetro [cm ou mm, conforme indicação]

ψ : sucção total [kPa]

ω_w : peso molecular da água [gf / mol]

Δ : indicador de variação de grandezas unidimensionais (e.g. Δt , ΔT etc.)

∇ : operador matemático gradiente (variação de funções com mais de um argumento)

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é verificar a susceptibilidade do método do papel-filtro a variações em três parâmetros de ensaio: a rugosidade do meio poroso (estrutura da matriz porosa), a extensão do período de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo (tempo de equilíbrio) e o grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e a superfície do meio poroso.

Para o estudo da *rugosidade do meio poroso*, três materiais particulados foram empregados. Individualmente, esses materiais apresentam-se mal graduados. A diferença entre eles reside no tamanho médio dos grãos, que para cada um assume um valor característico. A pretexto de uma primeira descrição, seria possível classificá-los como argila (argila caolínica rosa), areia fina (areia IPT 100, $\Phi = 0,15$ mm) e areia média (areia IPT 30, $\Phi = 0,60$ mm). Vale notar que a peculiaridade destas distribuições granulométricas desqualifica esses materiais como elementos representativos para o estudo de solos que ocorrem em problemas reais de engenharia. De fato, para os propósitos do presente trabalho, os solos são instrumentos de investigação, ao passo que o método de aferição de sucção é objeto de estudo.

A fim de que o procedimento experimental abrangesse a um só tempo as observações concernentes aos três parâmetros de estudo, concebeu-se um elenco de corpos-de-prova que viabilizou o levantamento concomitante de todas as observações necessárias.

Visando a subsidiar as especulações acerca do *tempo de equilíbrio*, criaram-se grupos de corpos-de-prova (denominados famílias) a serem avaliados periodicamente segundo três intervalos de tempo: sete dias, quatorze dias e vinte e oito dias.

A fim de viabilizar a verificação concomitante da influência da rugosidade do meio poroso (ou seja, da *estrutura da matriz porosa*), previu-se que cada família de corpos-de-prova seria composta por três sub-grupos (designados lotes), representantes dos três materiais empregados na investigação.

E, com o intuito de avaliar a influência do grau de *deficiência de contacto* entre o papel-filtro e o solo, definiu-se cada lote como um conjunto de três corpos-de-prova, cada qual apresentando em uma de suas bases um sulco com diâmetro e profundidade definidos. De corpo-de-prova a corpo-de-prova, para um mesmo lote de uma mesma família, o diâmetro do sulco apresenta variações. Tais variações geram *deficits* de contacto que valem 20%, 50% e 80% da área do papel-filtro. A profundidade do sulco é a mesma para todos os corpos-de-prova, e é igual à espessura do espaçador empregado nas medições de sucção total ($esp = 2\text{mm}$).

Quanto à *rugosidade do meio poroso* (estrutura da matriz porosa), concluiu-se que o tamanho médio dos grãos, conjugado ao índice de vazios, constitui variável diretamente proporcional aos desvios percentuais de aferição. Ou seja, quanto menor o tamanho médio dos grãos e menor o índice de vazios do material, menores serão os desvios percentuais de aferição de sucção.

Quanto à extensão do período de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo (*tempo de equilíbrio*), concluiu-se que o aumento do tempo de interação entre o papel-filtro e o solo pode compensar eventuais dificuldades de acesso da água intersticial ao papel-filtro. Inicialmente, a água atinge o papel-filtro nas regiões onde há contacto efetivo. Então, de maneira progressiva, a água passa a migrar pelo papel-filtro, umedecendo-o uniformemente.

Quanto ao grau de *deficiência de contacto* entre o papel-filtro e a superfície do meio poroso, concluiu-se que a relação desta variável com o desvio percentual de aferição é de proporcionalidade direta. Ou seja, quanto maior a privação de contacto a que for submetido o papel-filtro, tanto mais afastado do valor de sucção matricial plena estará o valor de sucção aferido. Graficamente, isto se observa como um destacamento da curva de retenção levantada para contacto deficiente em relação à curva de retenção levantada para sucção matricial plena.

Observou-se também que o destacamento entre as curvas de retenção não ocorreu de maneira uniforme. Para baixos teores de umidade volumétrica, foram maiores os desvios percentuais de aferição. Deste modo, o afastamento entre as curvas deu-se como uma combinação de translação e distorção.

ABSTRACT

The purpose of this work is to verify the susceptibility of the filter-paper method to variations in three experimental parameters: roughness of porous medium (structure of porous matrix), period of exposition of the filter-paper to pore water (equilibration time) and degree of deficiency in contact between the filter-paper and the porous medium.

In order to study *roughness of porous medium* (structure of porous matrix), three particulate materials have been used. Individually considered, they present a poorly graduated grain size distribution. They differ one from another for their average grain size, which assumes specific values for each material. As a summary description, it would be possible to classify them as kaolin, fine sand ($\Phi = 0.15$ mm) and coarse sand ($\Phi = 0.60$ mm). Such peculiar grain size distribution may disqualify these materials as representative of soils which normally occur in engineering problems. In fact, for the purposes of the present work, soil samples are instruments of investigation, while the method of suction measurement is the object of study.

A set of samples was designed in order to make feasible simultaneous gauging of all relevant information. Thus, experimental procedure yielded at once data concerning all three parameters.

Three groups of samples (each one assembling 9 elements) were created so that remarks could be made on *equilibration time*. Each of them is called family, being inspected according to a determined periodicity (7 days, 14 days and 28 days).

On their turn, families are composed by smaller groups called branches (each branch gathers three samples, all made of the same material). Branches are intended to make possible the evaluation of the effect of *average grain size* on the accuracy of the filter-paper technique.

Finally, in order to evaluate the role of *deficient contact* between the filter-paper and the soil, samples of a single branch (thus made of the same material) were designed to present a circular perforation on one of their faces. Within each single branch, from sample to sample, perforation diameter increases to generate growing lack of contact between the filter-paper and the soil sample (lack of contact may assume three different values: 20%, 50% or 80% of the filter-paper surface). Perforation depth doesn't vary from sample to sample, always being equal to the thickness of the perforated disk used in total suction measurements (which is 2 mm).

As for *roughness of porous medium* (structure of porous matrix), it has been noticed that both average grain size and void ratio are directly proportional to percent measurement deviation. In other words, the smaller the average grain size and the void ratio, the smaller will be percent measurement deviations.

As for period of exposition of the filter-paper to pore water (*equilibration time*), it has been noticed that extending time for interaction between filter-paper and soil may compensate difficulties interstitial water might have to access filter-paper. At first, water reaches the filter-paper on regions where there is effective contact. Then, progressively, water tends to migrate through the filter-paper, wetting it uniformly.

As for *degree of deficiency in contact* between the filter-paper and the porous medium, it has been noticed that such variable is directly proportional to percent measurement deviations. In other words, the greater the lack of contact between the filter-paper and the soil, the further is suction measurement from its full matric suction equivalent. Graphically, it corresponds to a detachment between the retention curve associated with partial matric suction and the retention curve associated with full matric suction.

Additionally, it has been noticed that detachment between retention curves hasn't occurred uniformly. For lower volumetric water contents, percent measurement deviations were greater. Hence, detachment occurred as a combination of translation and distortion.

1. Introdução

1.1. Considerações gerais sobre solos não saturados.

A teoria clássica da Mecânica dos Solos ocupa-se da descrição do comportamento de solos arenosos, siltsos e argilosos em condição saturada, ou eventualmente de areias secas. Restringe-se, portanto, ao estudo de materiais bifásicos (sólido-líquido ou sólido-gás).

Ocorre que na Natureza é bastante comum a incidência de solos que apresentam seus vazios preenchidos por *água e ar*, e que por essa razão apresentam comportamento diverso daquele previsto para solos saturados. Agora, o objeto de estudo é um sistema trifásico (sólido-líquido-gás), e a interação interfásica dita o comportamento do conjunto. Trata-se dos *solos não saturados*.

O estudo dos solos não saturados tem aplicação em vários tipos de projetos de Engenharia, tais como: pavimentação, estabilidade de taludes naturais e aterros, fundações (especialmente em solos expansivos e colapsíveis), barreiras argilosas para proteção ambiental (e.g. depósitos de rejeitos industriais), etc. Dependendo do tipo de solo e do projeto de Engenharia que se analisa, o solo deverá reagir diferentemente em relação a perda ou ganho de umidade.

Apresentam-se a seguir alguns breves comentários sobre problemas que envolvem solos não saturados. Estes comentários, propostos por Fredlund (1997), estão agrupados de acordo com as categorias gerais de problemas de Geotecnia: percolação, resistência ao cisalhamento e variação volumétrica.

1.1.1. Percolação

- A contaminação de águas subterrâneas por vazamento de poluentes é um problema de grande importância. A migração de agentes contaminantes desde a superfície até o lençol freático é um processo que requer análise integrada do sistema composto pela atmosfera, pela zona vadosa¹ e pela região saturada, esta situada abaixo do lençol freático. A zona vadosa é o tampão que oferece proteção ao lençol freático. A percolação de agentes contaminantes através da zona vadosa é controlada pelas características de permeabilidade e retenção dos solos que se encontram nesta região.

¹ região de transição situada entre a superfície do solo e o lençol freático. Do latim, *vadosus* significa 'que dá vau (passagem) em vários lugares'. A zona vadosa é uma região de migração de água. Em passando por essa região, a água tem acesso à atmosfera (fluxo capilar, ascendente) ou ao lençol freático (fluxo gravitacional, descendente), segundo a direção e o sentido da percolação.

- Coberturas de argila compactada são usualmente empregadas como instrumentos de controle do fluxo d'água em aterros sanitários. O desempenho da cobertura é em grande medida controlado por sua permeabilidade e capacidade de retenção ao longo da superfície de fluxo a que está sujeita.

- Durante a fase de execução, uma barragem de terra consiste de solo não saturado compactado.

Na medida que o reservatório é preenchido, instaura-se fluxo d'água através do corpo da barragem. O coeficiente de permeabilidade (que varia em função da poro-pressão negativa) é empregado na modelagem do fluxo d'água através da região não saturada.

Uma vez preenchido o reservatório, é estabelecido o fluxo em regime permanente, sendo que a maior parte ocorre pela região saturada.

Infiltrações a partir da superfície da barragem podem deflagrar processos de instabilização. Neste caso, a água infiltra-se pela região não saturada acima da superfície freática.

- Previsões para o longo prazo concernentes à migração de efluentes de resíduos de mineração são em grande medida definidas pela avaliação das condições de contorno da superfície de fluxo. Isto é particularmente importante em se tratando do fechamento ou da desativação de uma mina.

1.1.2. Resistência ao cisalhamento

- Taludes naturais geralmente rompem após longos períodos de precipitação intensa. Embora o mecanismo associado à ruptura seja bem conhecido, existem poucas tentativas de modelagem do problema. Isso porque há dificuldades para modelar as condições de contorno do fluxo, bem como o próprio fluxo na região não saturada.

- A saturação iminente pode converter a estabilidade de aterros de solos não coesivos em movimentos de massa de alta velocidade. A estrutura do solo pode sofrer colapso pela transferência de carga da fase sólida para a fase líquida.

- A estabilidade de valas para o assentamento de tubulações envolve fenômenos relacionados a solos não saturados. Frequentemente ocorrem perdas de vidas humanas em consequência do

colapso de estroncas, que é causado pela perda de resistência de solos não saturados que são umedecidos.

- A avaliação da estabilidade de escavações temporárias em torno de canteiros de obras é uma tarefa complexa, geralmente delegada ao empreiteiro. No sudeste asiático é comum cobrir os taludes recém-escavados com membranas plásticas. A membrana plástica garante que a maior parte das precipitações seja escoada para o pé do talude. Trata-se de uma tentativa de manter as poro-pressões negativas no interior da massa de solo.

- O material granular utilizado como preeenchimento da retaguarda de uma estrutura de arrimo deve ser não coesivo. No entanto, muitas dessas estruturas têm suas retaguardas preenchidas com solos coesivos, os quais apresentam alterações de volume e de resistência em decorrência de absorção d'água. Em casos como esses, as pressões que atuam sobre o tardo do muro estão associadas à resistência ao cisalhamento de solos não saturados, bem como ao grau de umedecimento sofrido pela massa de solo.

- A capacidade de carga de fundações rasas é usualmente calculada a partir da resistência à compressão do solo de substrato. Em geral, as medidas de resistência são efetuadas em corpos-de-prova extraídos de regiões situadas acima do lençol frático, onde o solo apresenta poro-pressão negativa, podendo apresentar resistência superior à que ofereceria em condição de saturação. Tais medidas de resistência são tomadas como hipóteses de projeto, considerando-se que as condições no futuro permanecerão inalteradas. Esta pode não ser uma hipótese realista.

- Estradas, ferrovias e aeroportos estão entre os componentes primordiais de infraestrutura. O mau desempenho dessas estruturas está comumente associado à perda de suporte da sub-base em decorrência de infiltração d'água a partir da superfície. O resultado é uma ruptura por perda de capacidade de carga. A abordagem empírica do CBR (*California Bearing Ratio*) tem sido empregada como procedimento de projeto por ainda não se dispor de conhecimento suficiente acerca do comportamento de solos não saturados.

1.1.3. Alteração de volume

- Solos expansivos, em decorrência de infiltração de água, freqüentemente causam problemas para estruturas leves. Na medida que aumenta a poro-pressão positiva, o volume do solo aumenta.

- Alterações de volume de solos sob fundações rasas geralmente acontecem como resposta ao fluxo de umidade ao longo do perímetro da estrutura. Apesar de o fenômeno ser bem compreendido, ainda existe a necessidade de modelos numéricos bi e tridimensionais para simulá-los .

- A fissuração de coberturas de áreas de disposição de resíduos é um exemplo de problema de engenharia geotécnica/ambiental para cuja solução faz-se necessária uma análise de alteração de volume.

- A profundidade de fissuras em solos está relacionada aos fenômenos de alteração de volume desses materiais. A profundidade das fissuras influencia o empuxo de terra, e conseqüentemente as soluções de estabilidade de taludes. A aumentos de sucção correspondem aumentos na profundidade das fissuras. Ainda não se dispõe de uma análise completa do problema de fissuração de solos.

- Muitas vezes é necessário efetuar análises que permitam prever alterações de volume em aterros compactados como os que ocorrem em barragens e aterros. As mudanças de volume em solos não saturados podem ocorrer em função de alterações na tensão total ou matricial.

São estes, então, alguns exemplos comentados de problemas de Engenharia cujas soluções demandam a aplicação de conceitos de Mecânica dos Solos Não Saturados. A seguir, serão tratados assuntos relacionados ao comportamento destes solos .

2. Solos não saturados e sucção

2.1. Comportamento do solo não saturado. Poro-pressão negativa (sucção)

O fenômeno de ascensão capilar ocorre em condutos de reduzido diâmetro, em função da tensão superficial do líquido presente em seu interior. Na interface sólido / líquido / gás, forma-se uma superfície curva no líquido, denominada menisco capilar. Em se tratando do espaço intersticial da matriz sólida de um solo não saturado , é possível afirmar que os vazios intergranulares comportam-se como uma rede de canalículos em que é possível a instauração do fenômeno de ascensão capilar. Nessas condições, a água intersticial encontra-se submetida a pressão inferior à atmosférica, e os meniscos existentes entre os grãos exercem sobre estes uma força de aproximação. Tal força é definida como sucção, ou poro-pressão negativa. Ela é responsável pelo aumento da tensão efetiva do solo.

Este aumento de tensão efetiva confere ao solo uma coesão aparente, como a que permite a moldagem de esculturas com as areias da praia. ‘Aparente’ porque não permanece se o solo se saturar ou secar. A coesão aparente é freqüentemente referida às areias, pois estas podem se saturar ou secar

com facilidade. Entretanto, é nas argilas que ela atinge valores maiores e é mais importante. Muitos taludes permanecem estáveis devido a ela. Chuvas intensas podem reduzir ou eliminar a coesão aparente, razão pela qual as rupturas de encostas e de escavações ocorrem com muita frequência em épocas chuvosas. Na Figura 1 encontra-se ilustrado o fenômeno acima descrito.

Figura 1: Sistema de forças associado à sucção (poro-pressão negativa) em solos não saturados (Pinto, 2002)

T: tensão superficial da água; P: força de atração intergranular decorrente da tensão superficial

2.2. Os componentes da sucção em solos não saturados

Marinho (2000) analisa o fenômeno do ponto de vista da Termodinâmica, ao afirmar que a *sucção total* equivale à energia livre da água intersticial. Ela pode ser determinada pela medida da umidade relativa² da atmosfera que envolve o solo, ou pelo emprego de uma membrana semi-permeável. A sucção total pode ser desmembrada em dois componentes, denominados *sucção matricial* e *sucção osmótica*, os quais são apresentados a seguir.

A *sucção matricial* é a pressão negativa que se instaura na água do solo em virtude de forças capilares e de adsorção. É equivalente à diferença entre a pressão de vapor parcial da água quando está em equilíbrio com a água intersticial, e a pressão de vapor parcial da água quando está em equilíbrio com uma solução *livre*, que em sua composição é idêntica àquela contida nos vazios do solo (diz-se *livre* porque, apesar de ter a mesma composição da fase intersticial líquida, considera-se que esta solução esteja fora da estrutura sólida do solo). A sucção matricial está intimamente ligada à estrutura do solo. Representa a afinidade por água que o solo manifesta na ausência de gradiente de concentração de sais.

A *sucção osmótica* é a pressão que deve ser aplicada a uma solução para que seu solvente adquira o mesmo potencial químico do solvente puro à mesma temperatura. É a diferença entre a

² “Umidade relativa é o quociente entre a pressão *parcial* do vapor d’água presente no ar e a pressão *máxima* de vapor d’água, na mesma temperatura.” (Feltre, 2000)

*pressão de vapor em equilíbrio*³ com água pura e a pressão de vapor em equilíbrio com uma solução cuja composição é idêntica à da água do solo. Ela provém da quantidade de sais dissolvidos na água que ocupa o interstício da matriz sólida do solo.

A *sucção total* é o somatório das sucções matricial e osmótica. Ela corresponde à diferença entre as pressões que atuam sobre as faces de uma membrana semi-permeável que faz separação entre água pura e um solo que contenha uma solução.

Deste modo:

$$\text{sucção total} = \text{sucção matricial} + \text{sucção osmótica}$$

Se por um lado a sucção matricial denota conservação do estado líquido da água durante o fluxo entre o solo e um meio absorvente, por outro lado a sucção total envolve mudança de fase da água durante o fluxo, o que ocorre durante o estabelecimento do equilíbrio termodinâmico do sistema.

Em se medindo a sucção matricial, obtém-se o valor da resistência à tendência de escape ao ar das moléculas d'água segundo um componente dado exclusivamente por capilaridade. O cálculo da sucção osmótica, por sua vez, fornece o valor dessa resistência ao escape dada pela pressão de vapor⁴ do líquido (grandeza intimamente ligada à concentração de sais na água).

Uma analogia pode ser feita com um conceito da Eletricidade, o de resistências em série. Sabe-se que duas resistências R_1 e R_2 , quando dispostas em série, oferecem como conjunto uma resistência $R_{\text{equivalente}} = R_1 + R_2$. Semelhantemente, quando se mede sucção total, está-se obtendo um valor de resistência equivalente à soma daquela oferecida somente por capilaridade (sucção matricial) àquela oferecida pela pressão de vapor do líquido (sucção osmótica).

A função que relaciona quantidade de água de um meio poroso a valores de sucção é denominada *curva de retenção de água*. Essa curva pode ser determinada em laboratório ou em campo pelo emprego de um certo número de técnicas e aparelhos, dentre os quais é possível citar: placa de sucção, placa de pressão, tensiômetro, dessecador, e o método do papel-filtro.

O enfoque do presente trabalho está colocado sobre a acurácia do método do papel-filtro frente a três fatores: estrutura da matriz sólida do solo, tempo de interação entre o papel-filtro e o solo, e deficiência de contacto entre esses dois elementos.

³ “Pressão máxima de vapor de um líquido é a pressão exercida por seus vapores quando estes estão *em equilíbrio dinâmico com o líquido*.” (Feltre, 2000)

⁴ “Pressão exercida por um vapor quando o mesmo encontra-se em equilíbrio com os estados sólido e/ou líquido da mesma substância. Instaura-se quando existem condições para que a substância ocorra simultaneamente em duas ou três fases. A pressão de vapor é a medida da tendência de passagem ao estado gasoso.” (*Encyclopaedia Britannica*, 1994). Da tonoscopia, sabe-se que a pressão de vapor de uma solução aumenta com o acréscimo de temperatura, e diminui com o aumento de sua molaridade.

3. Equipamentos e técnicas empregados para gerar e/ou medir sucção

O método do papel-filtro integra um amplo rol de técnicas especialmente desenvolvidas para o estudo da sucção em solos não saturados. Uma noção sobre o conjunto destas técnicas pode ser útil para uma melhor compreensão do comportamento desses solos.

O presente trabalho trata exclusivamente do estudo da técnica do papel-filtro. Não obstante, neste ponto do texto, uma breve exposição será feita sobre os equipamentos e os métodos mais freqüentemente empregados para o estudo de solos não saturados.

Apresenta-se a seguir uma visão geral do ferramental básico para o estudo de solos não saturados, atualmente disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica da USP.

3.1. Placa de sucção

Aparato experimental cujo funcionamento baseia-se no princípio dos vasos comunicantes. A amostra de solo é disposta sobre um disco cerâmico de alta entrada de ar, que por sua vez apóia-se sobre uma plataforma de altura regulável. O disco cerâmico permanece hidraulicamente conectado a um reservatório d'água, que está sempre posicionado em uma cota inferior à da plataforma.

A fonte de sucção é a diferença de potencial gravitacional estabelecida entre a amostra e o reservatório d'água. Para cada desnível imposto entre o disco cerâmico e o reservatório d'água, mede-se um valor de sucção no corpo-de-prova. Variações de desnível de 10 centímetros equivalem a variações de sucção de 1 kPa.

Nas Figuras 2 e 3 encontram-se ilustrações deste equipamento.

Figura 2: Esquema geral da aparelhagem associada a uma placa de sucção (Oliveira, 2004)

Figura 3: Vista pormenorizada da plataforma de apoio ao disco cerâmico de alta entrada de ar (Oliveira, 2004)

É preciso saturar a pedra porosa antes de proceder à tomada de medidas pela placa de sucção.

De acordo com Oliveira (2004), para a saturação da pedra porosa, o conjunto apresentado na Figura 3 é colocado no interior de um dessecador contendo água destilada para aplicação de vácuo, que é mantido até que não seja observada saída de ar pela pedra porosa. Após esta primeira etapa, a placa de sucção é retirada do dessecador e hidráulicamente conectada a um reservatório d'água. Mais uma vez, imerge-se a placa porosa em água para o procedimento de deaeração. Para que isto ocorra, o reservatório d'água deve estar em cota inferior à da pedra porosa.

3.1.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso da placa de sucção

Como um aspecto vantajoso do uso da placa de sucção, é possível citar a simplicidade da técnica, que dispensa o emprego de compressores de ar e de câmaras herméticas. Além disso, as aferições de sucção realizadas por meio deste equipamento não apresentam problemas quanto à estabilização dos valores de poro-pressão medidos (fato problemático em se tratando de medidas efetuadas pelo emprego da placa de pressão, como será afirmado adiante).

Como um aspecto negativo do uso da placa de sucção, deve ser mencionada a limitação dos valores mensuráveis pelo equipamento face à possibilidade de ocorrência de cavitação no sistema.

3.2. Placa de pressão

A placa de pressão é um equipamento que se destina a impor valores de sucção matricial em solos não saturados. Compõe-se por uma câmara hermética conectada a uma tubulação de ar pressurizado e a um reservatório de água deaerada. No interior da câmara, sobre um disco cerâmico de alta entrada de ar, dispõe-se o corpo-de-prova. Impõe-se pressão de ar sobre a atmosfera interna do equipamento, sendo permitida a interação entre o corpo-de-prova e o disco cerâmico saturado. Ocorre troca de água entre esses dois elementos, e o manômetro do reservatório d'água indica variação de pressão. A diferença entre a pressão de ar imposta e a pressão hidráulica medida é tida como o valor de sucção matricial do corpo-de-prova. Na Figura 4 encontra-se um esquema ilustrativo de uma placa de pressão.

Figura 4: Esquema ilustrativo de uma placa de pressão (Oliveira, 2004)

O emprego da placa de pressão está comumente associado à técnica de *translação de eixos*. Marinho (2000) explica o conceito que subsidia essa técnica, ao apontar que a pressão neutra negativa em uma massa de solo é dada pela diferença entre a pressão do ar circundante e a pressão da água que está em seu interior. Na pressão atmosférica, a sucção registrada pelo sistema de aferição

não pode assumir valores muito altos, sob risco de cavitação. No entanto, se for aumentada a pressão do ar, o referencial ‘zero’ de pressão (i.e. pressão atmosférica) é deslocado, de modo que a água do equipamento fica submetida a pressões positivas. Encontra-se na Figura 5 um diagrama que ilustra o conceito de referencial de pressão.

Figura 5: Diagrama ilustrativo do conceito de referencial de pressão (Marinho, 2000)

Ridley & Burland (1993) corroboram o acima exposto, quando explicam que o fluxo d'água em um meio poroso saturado ocorre entre pólos com distintos potenciais hidráulicos, segundo um gradiente negativo de pressões. O fluxo acontece até que esses pólos apresentem um mesmo potencial hidráulico, valor este situado entre os dois extremos de pressão originalmente observados nos terminais do movimento.

Em equipamentos como a placa de pressão e o tensiômetro, as pressões na água e no ar são inicialmente atmosféricas. Quando o corpo-de-prova é posicionado sobre a pedra porosa, a pressão neutra negativa do solo acarreta um fluxo d'água do equipamento para a amostra. A mais alta sucção que pode ser sustentada no reservatório d'água fica entre 60 kPa e 100 kPa, dependendo da pureza da água utilizada. Para sucções mais altas, formam-se bolhas de ar dentro do reservatório. Uma vez que bolhas de ar estejam presentes, a continuidade do fluxo causa a expansão ou contração dessas bolhas, em função da direção segundo a qual se dá o fluxo. Concomitantemente, a sucção deixa de ser transmitida ao aparelho de medição.

É possível coibir a formação de bolhas de ar no interior do sistema de medição. Isto se faz pela elevação da pressão neutra negativa até valores positivos. Hilf (1956) mostrou que o aumento da pressão do ar que envolve uma massa de solo acarreta o aumento de sua pressão neutra em igual valor. Portanto, se a pressão de ar for aumentada de uma quantidade superior ao valor da sucção da amostra, a pressão neutra tornar-se-á positiva e mensurável.

Este é o princípio adotado pela placa de pressão. Aumentando-se a pressão do ar da câmara, eleva-se a pressão da água do reservatório a um valor superior ao da sucção a ser medida. Conseqüentemente, a pressão neutra negativa da amostra é magnificada até um valor positivo, ainda inferior à pressão da água do reservatório. Instaura-se, então, um fluxo d'água do reservatório para o corpo-de-prova, até que o equilíbrio seja atingido.

Se, imediatamente após a pressurização da câmara, o reservatório d'água for submetido a pressão atmosférica, a pressão neutra do corpo-de-prova será superior à pressão da água do equipamento, e o fluxo ocorrerá do solo para a pedra porosa.

3.2.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso da placa de pressão

Como aspectos vantajosos desta técnica, é possível apontar a possibilidade de se medir ou controlar a sucção. Além disso, o método pode ser incorporado a diversos tipos de equipamentos de ensaio (e.g. câmaras triaxiais, anéis edométricos, caixas de cisalhamento direto, etc.).

Como aspectos desvantajosos desta técnica, é possível enumerar: o risco de se obterem valores superestimados de sucção para amostras com grau de saturação superior a 80% (ou para corpos-de-prova que contenham bolhas de ar oclusas); a possibilidade de se obterem valores subestimados de sucção em virtude de difusão de ar através da pedra porosa ; e a possibilidade de ocorrer osmose, em função da qualidade da pedra porosa e do tipo de solo ensaiado.

3.3. Tensiômetro

3.3.1. Tensiômetro Convencional

O tensiômetro convencional é um dispositivo utilizado para medir valores de sucção matricial em solos não saturados. É constituído por uma ponteira permeável (cálice de matriz porosa) hidraulicamente conectada a um sistema de medição de pressões (e.g., um manômetro de mercúrio, um transdutor eletrônico ou um aferidor a vácuo). Presta-se a medir sucções que variam entre zero e -90 kPa⁵ (valores em módulo maiores do que este podem causar cavitação no interior do aparelho). Na Figura 6, encontra-se esquematizado um tensiômetro convencional.

Uma vez atingido o equilíbrio entre o solo e o tensiômetro, a água que ocupa o interior do dispositivo encontra-se submetida à mesma pressão negativa a que está sujeita a água intersticial do solo. Se a pressão no ar dos poros for atmosférica, a pressão negativa medida será numericamente igual à sucção matricial (i.e., u_a = pressão nula no aferidor). Se a pressão no ar dos poros for maior do que a pressão atmosférica, à leitura do tensiômetro deve-se adicionar o valor da pressão no ar ambiente para que seja obtida a sucção matricial do solo.

⁵ Tensiômetros de alta capacidade (*high capacity tensiometers*) chegam a aferir sucções da ordem de 10⁰ MPa.

A sucção matricial medida não pode exceder o valor de entrada de ar⁶ do cálice de matriz porosa. O componente osmótico da sucção não é medido por tensiômetros, uma vez que ocorre livre trânsito de sais solúveis através da ponteira.

Figura 6: Esquema de um tensiômetro convencional

3.3.2. Tensiômetro de alta capacidade (*high capacity tensiometer*)

O tensiômetro de alta capacidade é um equipamento que possibilita a medição de sucções tão altas quanto 1 MPa. Consiste de um transdutor, uma pedra porosa e água. O transdutor é acoplado a uma cápsula de aço inoxidável. Esta cápsula é composta por uma câmara com pequeno volume d'água, posta em contacto com uma pedra porosa de alta entrada de ar, e um diafragma. Na Figura 7, encontra-se esquematizado um tensiômetro de alta capacidade.

Figura 7 : Esquema de um tensiômetro de alta capacidade (Oliveira, 2004)

Para medir o valor de sucção de um corpo-de-prova por meio de um tensiômetro, é preciso garantir que a água do solo tenha continuidade hidráulica com a água da pedra porosa. A fim de que

⁶ Valor de entrada de ar é a pressão negativa que não deve ser ultrapassada a fim de que seja mantida a estanqueidade ao ar de um elemento poroso.

isto seja garantido, faz-se uso de uma pasta preparada com o solo da amostra, levada a um teor de umidade próximo do limite de liquidez. Coloca-se a pasta sobre a pedra porosa, e o corpo-de-prova é posto em contacto com o tensiômetro. A pasta passa a perder água para o corpo-de-prova, até que ambos apresentem o mesmo valor de sucção (Marinho e Pinto, 1997). Como a pasta está em contacto com a pedra porosa, a pressão negativa da água do solo é transmitida ao diafragma do transdutor. O valor da resistência elétrica do diafragma varia com a sua flexão. A variação da voltagem é transmitida para o sistema de aquisição de dados, pelo qual é convertida em unidades de pressão (Oliveira, 2004).

Para que o tensiômetro meça valores elevados de sucção, é preciso garantir que a pedra porosa esteja saturada, e que inexistam bolhas de ar junto à parede da câmara que contém água. O pequeno volume d'água no interior do tensiômetro, aliado à regularidade do acabamento interno da cápsula, reduz a possibilidade de formação de potenciais núcleos de cavitação.

Satura-se o tensiômetro submetendo-o a vácuo e imergindo-o em solução de lauril sulfato de sódio. A complementação da saturação é feita por ação cíclica de pressão hidráulica sobre o tensiômetro. Sob pressões elevadas (4 MPa), o ar presente na pedra porosa dissolve-se na água. Ao ser aliviada a pressão, o ar se expande e parcialmente sai dissolvido em água. São necessários diversos ciclos de compressão e descompressão para a saturação do tensiômetro.

A confirmação da saturação do tensiômetro é obtida pela avaliação de seu tempo de resposta a ciclos de variação de pressão hidráulica. Ao longo do processo de carregamento e descarregamento, o tensiômetro deve apresentar respostas em tempo real às variações de pressão.

A não ocorrência de cavitação no aparelho deve-se ao condicionamento do sistema. A técnica de condicionamento estabiliza ou elimina os núcleos de cavitação (Marinho e Pinto, 1997).

3.3.3. Vantagens e desvantagens associadas ao uso do tensiômetro

Como aspectos vantajosos do uso do tensiômetro, é possível apontar o tempo relativamente curto requerido para o atingimento do equilíbrio, a facilidade de interpretar os dados adquiridos, a versatilidade do equipamento (pode ser empregado tanto em campo como em laboratório) e a possibilidade de incorporá-lo a diversos equipamentos de ensaio.

Como aspectos desvantajosos do emprego do tensiômetro *convencional*, é possível apontar a limitação do espectro de valores mensuráveis de sucção (de zero a aproximadamente -1 atm), além da possibilidade de ocorrer osmose na interface entre a ponteira e o solo.

3.4. Dessecador

O dessecador é um aparato experimental que se destina ao levantamento de curvas de retenção⁷ de meios porosos. Seu emprego permite a aferição (e também a geração) de amplo espectro de valores de sucção (desde 0,5 MPa até 30 MPa, segundo Marinho, 1994). Constitui-se de uma câmara hermética onde se dispõe uma solução salina a concentração pré-estabelecida (deste modo, o equipamento possibilita que se imponham valores de sucção às amostras). O corpo-de-prova é colocado no interior da câmara, sem contacto direto com a solução. Uma vez atingido o equilíbrio entre os elementos do sistema (i.e. solução, vapor do solvente e corpo-de-prova), mede-se a umidade da amostra. A sucção gerada pelo vapor do solvente, juntamente com a umidade do corpo-de-prova, forma um par ordenado da curva de retenção do material estudado. O ensaio descrito no item 4.3.6 baseia-se no princípio de operação de um dessecador.

Campbell e Gee (1986) descrevem o princípio de funcionamento do dessecador, ao explicarem que por meio de agentes osmóticos, mantém-se constante o potencial hidráulico (i.e. sucção) da fase de vapor que envolve uma amostra de solo, segundo um valor pré-determinado. O solo absorve água do meio ou a ele cede água, até que seja alcançado o equilíbrio com a fase de vapor. No equilíbrio, a amostra encontra-se com o mesmo potencial hidráulico da solução osmótica. Calculam-se as umidades da amostra para diversos valores de sucção, obtendo-se deste modo uma curva de retenção de água que pode ser utilizada para inferir valores de sucção a partir de valores medidos de umidade (curva característica). Na Figura 8 encontra-se uma representação esquemática de um dessecador.

Figura 8 : Representação esquemática de um dessecador

Também é possível determinar de forma direta o potencial hidráulico de uma amostra de solo, se se conduzirem concomitantemente diversos corpos-de-prova ao equilíbrio com soluções osmóticas a concentrações gradativamente crescentes. Por interpolação, determina-se o potencial osmótico que corresponde à ausência de troca d'água entre o solo e o meio.

⁷ Curva característica é outra denominação possível para a função que relaciona umidade e sucção

A estabilização da pressão de vapor da atmosfera do dessecador envolve troca d'água entre o ar do recipiente e a solução salina. Na situação de equilíbrio, a umidade relativa da atmosfera interna corresponderá a uma distribuição uniforme de massa d'água por toda a massa de ar contida no recipiente. Para um valor qualquer de RH, quanto maior for a quantidade de ar contida no dessecador, maior será a quantidade de soluto a evaporar-se até o estabelecimento do equilíbrio.

Por outro lado, quanto maior for o volume de solvente evaporado, tanto mais será aumentada a molaridade da solução contida no recipiente, uma vez que o denominador do quociente $\frac{V_{SOLUTO}}{V_{SOLVENTE}}$ será reduzido.

Surge então a questão: em um dessecador, quanto a proporção volumétrica entre ar e solução pode alterar a molaridade desta última? Qual seria, em função dessa proporção volumétrica, a diferença entre a molaridade teórica (intencionada durante planejamento do experimento) e a molaridade experimental (a que é efetivamente verificada quando do atingimento do equilíbrio do sistema)?

Apresenta-se a seguir a resposta a essa questão. Trata-se de uma quantificação da susceptibilidade da precisão da técnica a alterações em uma das condições de ensaio. Define-se como erro relativo (ε) o quociente $\frac{M_{CORRIGIDA}}{M_{TEÓRICA}}$.

Dedução da equação para o cálculo do erro relativo nas medidas de sucção em dessecadores.

Simbologia:

M_o : molaridade inicial da solução do dessecador (ou *molaridade teórica*) [mol/l]

M_f : molaridade final da solução do dessecador (ou *molaridade corrigida*) [mol/l]

ΔM : variação de molaridade da solução do dessecador [mol/l]

ε : erro relativo referente à molaridade experimental [adimensional]

n : número de mols de soluto [adimensional]

V_o : volume inicial de solvente [l]

V_f : volume final de solvente [l]

V_{ar} : volume de ar no sistema [l]

$V_{H_2O, evap}$: volume d'água que evapora e passa a ocupar a atmosfera interna do dessecador [l]

$\rho_{v, sat}$: massa específica do vapor d'água saturado [g/l] (a 21° C, $\rho_{v, sat} = 0,02$ g/l)

ρ_{H_2O} : massa específica da água no estado líquido [g/l] (a 21° C, $\rho_{H_2O} = 1000$ g/l)

$x = \frac{V_{ar}}{V_{água}}$: proporção entre volume de ar e volume de água (no estado líquido) no dessecador [adimensional]

Hipóteses:

1. O sistema é hermeticamente fechado (não ocorrem trocas com o meio externo)
2. A temperatura do sistema é constante e igual a 21°C ;
3. A umidade relativa inicial da atmosfera interna do dessecador é nula (ar completamente seco)
4. A umidade relativa final da atmosfera interna do dessecador vale 100%

Dedução:

- $V_f = V_0 - V_{H_2O, evap}$ (i)

- $V_{H_2O, evap} = \frac{\rho_{v, sat} \cdot V_{ar}}{\rho_{H_2O}}$; a 21° C, $V_{H_2O, evap} = \frac{0,02 \cdot V_{ar}}{10^3} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ar}$ (ii)

- De (i) e (ii), vem: $V_f = V_0 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ar}$ (iii)

- $\Delta M = M_f - M_0 = \frac{n}{V_f} - \frac{n}{V_0} = \frac{n}{V_0 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ar}} - \frac{n}{V_0} = \frac{n}{\frac{V_0}{V_0} \cdot (V_0 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ar})} - M_0 \Rightarrow$

$$\Rightarrow \Delta M + M_0 = \frac{n}{V_0 \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot x)} \Rightarrow \Delta M + M_0 = \frac{M_0}{1 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot x} \Rightarrow \frac{\widehat{\Delta M}}{M_0} + 1 = \frac{1}{1 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{1 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot x} - 1 \quad (iv) \quad C.Q.D.$$

Na Figura 9, encontra-se representada a função matemática que descreve a dependência entre as variáveis supracitadas.

Figura 9 : Representação gráfica da equação do erro experimental no dessecador

Se o volume de ar contido no dessecador for metade do volume de água, a molaridade da solução na situação de equilíbrio (molaridade *final* ou *corrigida*) será igual a 1,001% da molaridade inicial (ou *teórica*).

Se o volume de ar no dessecador for o quádruplo do volume de água, a molaridade final será igual a 1,008% da molaridade inicial.

A partir destas observações, percebe-se que o emprego do dessecador para a medição e/ou geração de sucção é um método pouco susceptível à proporção volumétrica entre volume de ar e volume d'água em seu interior.

3.4.1. Vantagens e desvantagens associadas ao uso do dessecador

Como vantagens associadas ao emprego da técnica, é possível citar:

- simplicidade da montagem experimental;
- cobertura de um amplo espectro de valores mensuráveis de sucção;
- pequena susceptibilidade a variações em parâmetros de ensaio (e.g. proporção volumétrica ar/água)

Como desvantagens associadas ao emprego da técnica, é possível citar:

- tempo para estabilização superior ao requerido pelos demais equipamentos;
- oscilações na umidade relativa para baixos valores de sucção.

3.5. Quadro Sinóptico

Na Tabela 1, encontram-se listadas as principais características dos equipamentos e métodos descritos ao longo desta seção. Incluem-se neste quadro algumas observações sobre o método do papel-filtro. Apesar de não haver sido descrito até este ponto do texto, optou-se por incluí-lo neste rol de técnicas a fim de situá-lo no contexto da tecnologia atualmente disponível para a aferição de sucção em solos não saturados.

Tabela 1: Equipamentos e técnicas empregados para medir e/ou gerar sucção – quadro sinóptico

Técnica / Equipamento		Espectro de valores mensuráveis de sucção	Modo de tomada	Vantagens	Desvantagens
Placa de sucção		0 – 90 kPa	Medição direta Absorção capilar	- Simples operação. Não demanda equipamentos complementares (e.g. compressores de ar); - Leitura fácil e direta	- limitações quanto ao espectro de valores mensuráveis de sucção; - a atualização das cotas da plataforma regulável é uma atividade que envolve certo risco de acidente, principalmente nas maiores alturas.
Placa de pressão		0 – 1,5 MPa	Medição direta Absorção capilar	- O equipamento permite impor e controlar a sucção; - versatilidade (pode ser acoplado a diversos tipos de equipamentos de ensaio).	- risco de se obterem valores superestimados de sucção para amostras com grau de saturação superior a 80% (ou para corpos-de-prova que contenham bolhas de ar oclusas) - possibilidade de difusão de ar pela pedra porosa, com subestimativas de valores de sucção.
Tensiômetro		0 – 90 kPa (convencional) 0 – 1 MPa (de alta capacidade)	Medição direta Absorção capilar	- versatilidade (pode ser empregado tanto em campo como em laboratório; pode ser acoplado a diversos tipos de equipamentos de ensaio); - rapidez para obtenção dos resultados (tempo de equilíbrio da ordem de alguns minutos)	- em tensiômetros convencionais, a água do sistema cavita para sucções próximas de 1 atm. - em função do tipo de material constituinte do cálice de matriz porosa, bem como do tipo de solo ensaiado, existe a possibilidade de ocorrência de osmose no cálice.
Dessecador		0,5 kPa – 30 MPa	Medição indireta Absorção de vapor	- cobre um amplo espectro de valores mensuráveis de sucção; - montagem experimental bastante simples; - pouco susceptível a variações em parâmetros do arranjo experimental (proporção ar / água)	- tempo para estabilização superior ao requerido pelos demais equipamentos; - oscilações na umidade relativa para baixos valores de sucção.
Papel-filtro		0 kPa – 30 MPa	Sucção matricial: medição indireta por absorção capilar Sucção total: medição indireta por absorção de vapor	- cobre um amplo espectro de valores mensuráveis de sucção; - simples aplicação; permite a tomada concomitante de múltiplas medidas; - permite a aferição de valores de sucção total e matricial	- tempo de equilíbrio alto em relação aos demais procedimentos (pelo menos 7 dias);

4. O método do papel-filtro

4.1. Breve histórico

De acordo com Marinho (1994), é provável que Shull, em 1916, tenha sido o primeiro pesquisador a utilizar o fenômeno de absorção como ferramenta para medição de sucção. Baseando-se em descobertas sobre membranas semipermeáveis em sementes (contribuições de Brown em 1907, e de Schröder, em 1911), Shull empregou sementes selecionadas como material absorvente. Sua intenção era medir ‘a força com que partículas de solo de diversos tamanhos retêm umidade em diferentes graus de sequidão.’

A calibração das sementes era feita pela medição da umidade de equilíbrio de sementes secas ao ar que foram dispostas sobre soluções de ácido sulfúrico em diversas concentrações. O sistema atingia o equilíbrio em um período menor ou igual a quinze dias.

Uma vez estabelecido o equilíbrio entre as sementes e o solo, mediam-se os pesos dessas sementes, e eram calculadas suas umidades. Pelo emprego de uma curva de calibração (que relaciona valores de umidade a valores de pressão de vapor), fazia-se conhecida a sucção a que estava sujeito o solo sob determinadas condições.

Empregando o conceito de absorção, Hansen, em 1926, serviu-se de papéis-filtro para obter a sucção do solo. Saturados em solução de açúcar com pressão de vapor previamente conhecida, os papéis-filtro eram dispostos em um ambiente fechado juntamente com a amostra de solo, porém sem contacto direto com a mesma. Decorrido o tempo necessário ao atingimento do equilíbrio, os papéis teriam ganho ou perdido peso. A perda ou ganho d’água indicava, respectivamente, que a sucção da amostra era maior ou menor do que a pressão de vapor da solução de açúcar. O método não levava em conta o efeito da capilaridade no papel-filtro, assumindo que a sucção seria dada exclusivamente pela pressão de vapor da solução, medida em relação a uma interface plana ar / solução.

É possível que Gardner, em 1937, tenha sido o primeiro pesquisador a utilizar o papel-filtro como material absorvente, sem embebê-lo em qualquer solução. O método de Gardner é, em essência, o mesmo de Shull. O uso do papel-filtro como material absorvente conferiu maior confiabilidade às medições, uma vez que o processo industrial envolvido na produção do papel garante que suas características absorventes sejam essencialmente as mesmas, e independentes da caixa ou lote empregado.

4.2. Princípios do método

O papel-filtro pode ser empregado para medir sucção total ou matricial. O método baseia-se na hipótese de que o papel-filtro alcança equilíbrio com relação ao fluxo de umidade que ocorre em um solo com um valor qualquer de sucção. Quando o papel-filtro é colocado em contacto direto com o solo, instaura-se um fluxo d'água do solo para o papel, até que se atinja o equilíbrio. Quando o papel-filtro não é posto em contacto direto com o solo, apenas fluxo de vapor d'água ocorrerá. Em havendo contacto direto (método de absorção capilar), mede-se sucção matricial. Em não havendo contacto direto (método de absorção de vapor), mede-se sucção total. O método do papel-filtro mede sucção de maneira indireta, por meio de curvas de calibração (e.g. Chandler e Gutierrez, 1986).

O método consiste em posicionar um disco de papel-filtro contra a amostra de solo em estudo, selando o conjunto para evitar evaporação. O papel-filtro umedece até apresentar o conteúdo d'água associado à sucção da amostra. A medição da umidade do papel-filtro permite a obtenção do valor de sucção procurado, pelo emprego de uma correlação previamente estabelecida (a curva de calibração do papel-filtro).

O objetivo do presente trabalho é verificar a susceptibilidade do método do papel-filtro a variações em três parâmetros de ensaio, quais sejam: o diâmetro médio dos grãos, o grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e a superfície do meio poroso, e a extensão do período de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo (tempo de equilíbrio).

4.3. Conceitos de Termodinâmica

Alguns conceitos de termodinâmica são importantes para o entendimento das técnicas de medição de sucção em geral.

4.3.1. Sucção e energia livre da água do solo

De acordo com Edlefsen e Anderson (1943), *Energia livre* (f) é a grandeza da termodinâmica que está associada à sucção no solo. É a medida da resistência à tendência de escape das moléculas d'água para o ar. Define-se conforme a Equação 1:

$$f = \overbrace{e + P \cdot v}^H - T \cdot S = H - T \cdot S \quad (1)$$

Em que:

f: energia livre $\left[\frac{L^2}{T^2} \right]$

e: energia interna $\left[\frac{L^2}{T^2} \right]$

P: pressão $\left[\frac{M}{L \cdot T^2} \right]$

v : volume específico $\left[\frac{L^3}{M} \right]$

T: temperatura [K]

S: entropia [adimensional]

H: quantidade de calor $\left[\frac{L^2}{T^2} \right]$

O referencial para a energia livre do solo é a água pura com superfície plana no contacto água / ar. Isto significa que a energia livre da água intersticial é medida em relação à energia livre da água pura (com superfície plana no contacto água / ar).

A energia livre absoluta da água contida em um solo não saturado é menor do que a da água pura, assim como a energia livre absoluta da água de um solo ressecado é menor do que a energia livre absoluta da água de um solo úmido. A energia livre da água dos solos não saturados é negativa. Se o solo estiver saturado, a energia livre pode ser no máximo zero.

A presença de sais dissolvidos reduz a tendência de escape das moléculas do solvente. Tal tendência é quantificada pela grandeza pressão de vapor.

A energia livre do solvente de uma solução, em relação ao solvente puro, é dada por:

$$\Delta f = -v \cdot \Delta P_0 \quad (2)$$

Em que:

Δf : variação de energia livre (com relação à água pura);

v : volume específico do solvente (no caso da água, $v = 0,001 \text{ m}^3 / \text{kg}$)

ΔP_0 : pressão osmótica da solução

Em geral, a energia livre do solo é determinada pela quantidade de soluto, pela pressão hidrostática sobre a água do solo e pelo campo de adsorção de sua matriz sólida. É inviável o cálculo isolado das contribuições parciais destes fatores para energia livre total da água. A fim de determinar a energia livre total da água do solo para um valor específico de umidade, basta determinar a energia livre da fase de vapor em equilíbrio com a água do solo. Faz-se necessária a medição da umidade relativa para o cálculo da energia livre da fase de vapor. De acordo com Marinho (1994), a 20°C, é válida a relação:

$$\Psi = -135055 \cdot \ln(RH) \quad (\Psi \text{ em kPa}) \quad (3)$$

Em que:

Ψ : sucção total (kPa) ;

RH: umidade relativa (%).

Para a obtenção de valores específicos de umidade relativa, costumam-se empregar soluções ácidas ou salinas. Para garantir segurança, em geral utiliza-se solução de NaCl.

Denomina-se molaridade de uma solução a proporção entre as quantidades de soluto e de solvente (uma solução com molaridade 1 contém o peso molecular do sal, em gramas, diluído em 1 litro de água pura). Variações na concentração do soluto redundam em mudanças na pressão osmótica.

Existe uma relação direta entre a concentração de solutos e a umidade relativa. A equação abaixo (Marinho, 1994) pode ser empregada para estimar a sucção de uma solução de NaCl cuja molaridade esteja compreendida entre 0 e 1:

$$\Psi = 4598,95 \cdot m^{1,00122} \quad (\Psi \text{ em kPa}) \quad (4)$$

Em que:

Ψ : sucção (kPa) ;

m: molaridade.

4.3.2. A lei de Fick para o fluxo de vapor

O fluxo de vapor d'água em um meio poroso não saturado é gerado e mantido por uma grandeza física: o *gradiente da densidade do vapor d'água* ($\nabla \rho_v$). Por sua vez, esta grandeza é influenciada por duas outras: o gradiente de temperatura (∇T) e o gradiente de umidade relativa (∇RH). Esquematicamente:

$$\left. \begin{array}{l} \nabla RH \\ \nabla T \end{array} \right\} \nabla \rho_v \Rightarrow \text{fluxo}$$

A fim de quantificar as contribuições destas grandezas para a geração do fluxo d'água em um solo não saturado, passamos a expor equações que descrevem estes fenômenos. A Lei de Fick estabelece a primeira relação entre fluxo e gradiente de densidade de vapor.

O principal mecanismo responsável pelo fluxo de vapor em um solo não saturado é a concentração ou densidade de vapor. Uma descrição quantitativa do fluxo de vapor em regime permanente (q_v em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) é feita pela primeira lei de Fick:

$$q_v = -D_v \cdot \nabla \rho_v \quad (5)$$

Em que:

$$q_v : \text{fluxo de vapor em regime permanente} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

$$D_v : \text{coeficiente de difusão para transporte de vapor d'água em solo não saturado} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s} \leq D_v \leq 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \cdot \text{É}$$

função da tortuosidade e da porosidade do meio, bem como da temperatura e da pressão)

$$\rho_v : \text{densidade do vapor d'água intersticial} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\nabla \rho_v : \text{gradiente de densidade do vapor d'água intersticial} \left[\frac{1}{\text{m}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right]$$

4.3.3. Temperatura e variação da pressão de vapor (ou da umidade relativa)

Gradientes de temperatura e de pressão de vapor (umidade relativa) são os dois principais mecanismos associados ao fluxo de vapor em um solo não saturado. Variações destas grandezas implicam gradientes na densidade do vapor que, segundo a Equação 5, define o fluxo.

O fluxo de vapor pode acontecer através da interface solo/atmosfera em sentido ascendente ou descendente, bem como no interior da massa de solo, de um ponto qualquer a outro. O transporte de vapor freqüentemente é o principal mecanismo de transporte de água intersticial em solos não saturados relativamente secos.

Em se tratando do método do papel-filtro, o fluxo de vapor acontece quando se mede sucção total. O sentido do fluxo se dá da atmosfera intersticial do solo para o papel-filtro, que em princípio encontra-se com umidade inferior à da atmosfera interna do solo.

O impacto de variações de temperatura e de pressão de vapor sobre a densidade do vapor pode ser avaliado quantitativamente por meio da lei dos gases perfeitos:

$$\rho_v = \frac{\omega_w}{R \cdot T} \cdot u_v \quad (6)$$

Em que:

ρ_v : densidade do vapor d'água intersticial $[\frac{kg}{m^3}]$

ω_w : peso molecular da água $[\frac{g}{mol}]$

u_v : pressão de vapor [kPa]

R: constante universal dos gases $[0,082 \frac{atm \cdot l}{mol \cdot K}]$

T: temperatura [K]

De acordo com Lu e Likos (2004), a dependência entre pressão de vapor e temperatura é empiricamente demonstrada pela equação 7, que relaciona pressão de vapor às grandezas: temperatura, pressão de vapor saturado e umidade relativa:

$$u_v = u_{v,sat} \cdot RH = \left[0,611 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T - 273,2}{T - 36} \right)} \right] \cdot RH \quad (7)$$

Em que:

u_v : pressão de vapor [kPa]

$u_{v,sat}$: pressão de vapor saturado [kPa]

RH : umidade relativa

e: número de Neper ($\sim 2,71$)

T: temperatura [K]

A observação da Figura 10 permite notar uma sensibilidade razoavelmente alta da pressão de vapor com relação à temperatura. Por exemplo, a 20° C a pressão de vapor saturado (RH = 100%) vale aproximadamente 2,3 kPa, aumentando para 3,3 kPa a 25° C. As temperaturas em que normalmente se dão os ensaios de laboratório (e.g. aferições de sucção pelo método do papel-filtro) situam-se nesta faixa de valores de temperatura.

Figura 10: Representação gráfica da Equação 7. Pressão de vapor (u_v) e densidade do vapor (ρ_v) como funções da temperatura e da umidade relativa. (Lu & Likos, 2004)

4.3.4. Gradiente de densidade de vapor

A sucção está associada à ocorrência de fluxo d'água no interstício do meio poroso não saturado. Conforme visto alhures, esse fluxo é gerado por gradientes de temperatura e/ou umidade relativa. Lu e Likos (2004) desenvolveram equacionamento teórico para descrever matematicamente a relação entre sucção e umidade relativa.

A seqüência de deduções que segue abaixo visa a demonstrar o equacionamento teórico proposto por Lu e Likos. Como se verá adiante (seção 4.3.6.), existe também uma proposta de equacionamento empírico para a descrição matemática do mesmo fenômeno. De autoria de Costa (2003), tal equacionamento prova ser em essência a mesma expressão teórica de Lu e Likos (vide seção 4.3.7.1.).

O gradiente de densidade de vapor que resulta dos gradientes de temperatura e de pressão pode ser obtido por diferenciação da Equação 6, pelo emprego da ‘regra da cadeia’:

$$\begin{aligned}\rho_v &= \frac{\omega_w}{R \cdot T} \cdot u_v \Rightarrow \nabla \rho_v = \frac{\omega_w \cdot u_{v,sat}}{R \cdot T} \cdot \nabla RH + \frac{\omega_w \cdot RH}{R} \cdot \nabla \frac{u_{v,sat}}{T} = \\ &= \frac{\omega_w \cdot u_{v,sat}}{R \cdot T} \cdot \nabla RH - \frac{\omega_w \cdot RH}{R} \cdot \left(u_{v,sat} \cdot \frac{\nabla T}{T^2} - \frac{\nabla u_{v,sat}}{T} \right) \quad (8)\end{aligned}$$

Montieth e Unsworth (1990) mostraram que o gradiente de pressão de vapor saturado da Equação 8 pode ser expresso como:

$$\nabla u_{v,sat} = \frac{\lambda \cdot \omega_w \cdot u_{v,sat}}{R \cdot T^2} \cdot \nabla T \quad (9)$$

Em que:

λ : calor latente⁸ de vaporização da água ($\sim 2,48 \frac{kJ}{g}$ a 10°C)

(as demais grandezas encontram-se já definidas)

⁸ Se um líquido for aquecido a pressão constante, ele se transformará em vapor ao atingir a temperatura de vaporização. Durante a mudança de estado físico, a temperatura da substância é constante. De fato, nessas condições, todo o calor absorvido pela substância é consumido na superação de forças de atração intermolecular, e não reflete um aumento no grau de agitação das partículas do meio (sendo a temperatura uma medida do grau de agitação das partículas, decorre que durante o processo de mudança de fase não será observada qualquer alteração da temperatura da substância). *Calor latente* é a quantidade de energia absorvida pela substância em mudança de fase, energia que é empregada exclusivamente para superar forças de atração intermolecular.

Semelhantemente, o fluxo difusivo de vapor pode ser deduzido a partir das Equações 5,8 e 9.

$$q_v = -D_v \cdot \rho_{v,sat} \cdot \left(\frac{\nabla RH}{RH} - \frac{\nabla T}{T} + \frac{\lambda \cdot \omega_w \cdot \nabla T}{R \cdot T^2} \right) \quad (10)$$

Os sinais negativos que precedem o primeiro e o terceiro termos do membro direito da Equação 10 denotam o sentido do fluxo de vapor d'água, que se dá de regiões de alta umidade relativa para regiões de baixa umidade relativa, e de regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura. O sinal positivo que precede o segundo termo denota um contrafluxo instaurado de regiões de baixa temperatura para regiões de alta temperatura. Este termo de compensação vem do fato de que temperaturas baixas fazem com que o ar se comprima, resultando em maior densidade de vapor, enquanto que altas temperaturas fazem com que o ar se expanda, resultando em menor densidade de vapor.

4.3.5. Exemplo numérico

A seguir, será apresentado um exemplo numérico que envolve a aplicação dos conceitos apresentados nas seções anteriores. Proposto por Lu e Likos (2004), esse exemplo é uma tentativa de representar uma situação de campo.

O referido exemplo aborda o fluxo gerado por gradiente de umidade relativa. Em realidade, o que se instaura é um *gradiente de densidade de vapor d'água*, sendo isto o fato gerador do fluxo.

O cenário do problema envolve uma massa de solo não saturado situada dez centímetros abaixo da superfície (0,1 metro de profundidade). Admite-se que a temperatura não apresenta variação significativa do subsolo para a superfície. De fato, para efeito de cálculo, considera-se um valor médio de temperatura ($\bar{T}$).

O objetivo deste exemplo numérico é evidenciar de maneira individualizada e quantitativa os efeitos de ∇RH sobre o fluxo d'água em solos não saturados.

Paralelamente ao exemplo que retrata uma situação de campo, apresenta-se um exemplo numérico que representa as condições de contorno do experimento referente ao presente trabalho.

Dados:

$$RH_{atmosfera} = 40\% \quad (\text{umidade relativa na atmosfera})$$

$$RH_{subsolo,0.1m} = 95\% \quad (\text{umidade relativa no subsolo a 10 centímetros de profundidade})$$

$$\overline{RH} = \frac{RH_{atmosfera} + RH_{subsolo,0.1m}}{2} \quad (\text{valor médio de umidade relativa})$$

$$\bar{T} = 25^\circ\text{C} \text{ (ou } 298 \text{ K)} \quad (\text{valor médio de temperatura})$$

$$D_v = 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s} \quad (\text{coeficiente de difusão})$$

$$\rho_v = 20 \text{ g} / \text{m}^3 \quad (\text{densidade do vapor d'água})$$

Calcular o fluxo de vapor (q_v) devido à diferença de umidade existente entre a atmosfera e o subsolo.

Solução:

O fluxo de vapor é expresso pelo primeiro termo do membro direito da Equação 10:

$$\begin{aligned} q_v &= -D_v \cdot \rho_{v,sat} \cdot \frac{\nabla RH}{RH} = -\left(10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) \cdot \left(20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right) \cdot \frac{-0,55}{(0,1\text{m}) \cdot \underbrace{(0,68)}_{\overline{RH}}} = \\ &= 162 \cdot 10^{-7} \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

O valor positivo do fluxo indica que o movimento acontece de uma região de alta pressão de vapor para uma região de baixa pressão de vapor (i.e. do solo para a atmosfera).

É importante notar que o gradiente de umidade relativa não é constante ao longo do processo de interação entre o solo e atmosfera. No instante inicial da interação ($t=0$), $\nabla RH = 0,95 - 0,40 = 0,55$. No entanto, em um instante posterior a $t = 0$, a diferença entre os valores de RH do solo e da atmosfera será menor do que 0,55, em decorrência do fluxo de vapor d'água que ocorre no sistema. Ao final do processo, $\nabla RH = 0$, e o fluxo de vapor terá cessado.

Aplicando os valores do exemplo numérico ($RH_{atmosfera}$, $RH_{subsolo,0.1m} = RH_{int.erno}^{C.P.}$, $\overline{RH}$, $\bar{T}$, D_v e ρ_v) a um corpo-de-prova cilíndrico com altura igual a 7,5 centímetros e diâmetro igual a 7,5 centímetros (dimensões típicas dos corpos-de-prova empregados no presente trabalho), suporíamos um fluxo de vapor d'água de intensidade $162 \cdot 10^{-7} \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$, que multiplicado pela área do papel-filtro ($0,0038 \text{ m}^2$), resulta em uma taxa de troca d'água de $6,16 \cdot 10^{-8} \text{ g/s}$. Ou seja, em sete dias (tempo sugerido para o atingimento do equilíbrio entre o papel-filtro e uma amostra de solo), haveria perda d'água de 0,037 gramas-força.

Considerando que o peso médio de um papel-filtro seco (Whatman 42) vale 0,35 gf, conclui-se que o papel-filtro do exemplo apresentaria, ao fim de sete dias, umidade gravimétrica igual a $\frac{0,037}{0,35} = 10,57\%$. Este valor de umidade, se introduzido na curva de calibração⁹ do papel-filtro, resulta em um valor de sucção matricial igual a 8774 kPa. Tal valor de sucção, se introduzido na Equação (3), resulta em um valor de umidade relativa igual a 93,71%, bastante próximo de $RH_{int.erno}^{C.P.}$ (admitido no exemplo como 95%).

4.3.6. Estabilização da umidade relativa do ar contido em um ambiente fechado

Costa (2003) apresenta uma proposta de dependência funcional entre tempo e umidade relativa em um sistema fechado. De acordo com esta proposta, a massa que evapora na unidade de tempo (taxa de evaporação) é dada por:

$$\frac{dm}{dt} = k \cdot \frac{A \cdot (u_{v,sat} - u_v)}{p_{ext}} \quad (11)$$

Em que:

m: massa de vapor d'água existente na atmosfera do sistema fechado (g)

t: tempo (s)

k: constante característica do líquido, relacionada à intensidade do fluxo de vapor a partir de uma solução. É inversamente proporcional à molaridade da solução. Unidade: $g / m^2 \cdot s$

A: área da superfície livre do líquido (m²)

p_{ext}: pressão externa ao líquido (kPa) [pressão absoluta]

A temperatura é diretamente proporcional à pressão máxima de vapor $u_{v,sat}$. Sendo assim, quanto maior a temperatura, maior a taxa de evaporação.

Durante a evaporação, a concentração de vapor (pressão de vapor u_v) junto à fonte (e.g. solo, solução salina, etc.) cresce e, como consequência, diminui a taxa de evaporação.

Vamos considerar a evaporação da água em um ambiente cuja pressão externa é constante. Valendo-se da proporcionalidade direta entre a pressão e a massa de vapor, a Equação 11 torna-se:

$$\frac{dm}{dt} = \overbrace{\left(\frac{A \cdot k}{p_{ext}} \right)}^B \cdot (M - m) = B \cdot (M - m)$$

⁹ Para o lote de papéis-filtro empregado no presente experimento (Whatman 42, Lote 920071), empregou-se a curva de calibração proposta por Oliveira (2004), que é dada por: $S = 10^{4,83-0,0839 \cdot w}$, para $w < 33\%$, e $S = 10^{2,57-0,0154 \cdot w}$, para $w \geq 33\%$.

B é constante; M é a massa de vapor saturado. Podemos escrever:

$$\frac{dm}{(M - m)} = B \cdot dt$$

Por integração, obtém-se :

$$-\ln(M - m) = B \cdot t + C$$

Vamos considerar a umidade relativa do ar inicial, tal que a massa de vapor d'água em $t = 0$ é m_0 . Assim,

$$-\ln(M - m_0) = C$$

Deste modo,

$$\ln\left(\frac{M - m}{M - m_0}\right) = -B \cdot t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m = M - (M - m_0) \cdot e^{-B \cdot t}$$

Por exemplo, se a evaporação ocorrer em um ambiente cuja umidade relativa do ar inicial for igual a 0,62 ($m_0 = 0,62M$), então a equação acima torna-se:

$$RH = 1 - 0,38 \cdot e^{-B \cdot t}$$

A equação acima mostra que a umidade relativa do ar cresce exponencialmente com o tempo.

Costa (2003) realizou experimentos que envolveram medições do tempo necessário para que o vapor d'água presente em um ambiente fechado sob temperatura constante torne-se saturado. A representação gráfica de um dos experimentos realizados por Costa encontra-se na Figura 11. Os resultados por ele obtidos encontram-se na Figura 12 (em que se observa uma representação gráfica da dependência funcional entre a umidade relativa do ar situado acima de um fonte de vapor e o tempo necessário para o atingimento da saturação) .

Figura 11 : Representação esquemática da montagem experimental elaborada por Costa (2003)

Figura 12 : Representação gráfica dos resultados experimentais obtidos por Costa (2003).

No contexto do método do papel-filtro, o experimento de Costa seria descrito como uma medição de sucção total. Trata-se de um método de absorção de vapor, exigindo que o equilíbrio entre o sensor e a fonte de sucção ocorra pela mudança de estado físico da água do sistema.

A informação oferecida pelo gráfico da Figura 12 permite afirmar que, para uma massa de solo não saturado cuja sucção equivalha à umidade relativa de 98%, o tempo necessário para que a atmosfera intersticial do solo adquira umidade relativa uniforme é vinte minutos. Contudo, isso não significa que vinte minutos sejam o intervalo de tempo suficiente requerido pelo papel-filtro para atingir equilíbrio com o potencial do solo, posto que a sucção total engloba o efeito de capilaridade (sucção matricial), que não está contemplado no experimento acima descrito.

4.3.7. Interpretação teórica de dados experimentais obtidos pelo método do papel-filtro

4.3.7.1. Síntese do equacionamento

Observa-se que, para sistemas fechados nos quais há constância de temperatura, as Equações 10 e 11 são, em verdade, idênticas. De fato:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_v = -D_v \cdot \rho_{v,sat} \cdot \left(\frac{\nabla RH}{RH} - \frac{\nabla T}{T} + \frac{\lambda \cdot \omega_w \cdot \nabla T}{R \cdot T^2} \right) \Rightarrow q_v = -D_v \cdot \rho_{v,sat} \cdot \frac{\nabla RH}{RH} \quad (12.a.)^{10} \\ \frac{\overbrace{dm}^{q_v}}{dt} = k \cdot \frac{A \cdot \left(\overbrace{u_{v,sat}}^{\nabla RH} - u_v \right)}{\underbrace{p_{ext}}_{RH}} \Rightarrow q_v = \overbrace{k \cdot A}^{\approx -D_v \cdot \rho_{v,sat}} \cdot \frac{\nabla RH}{RH} \quad (12.b.) \end{array} \right.$$

A seguir, será estudada uma situação hipotética de fluxo de vapor d'água. Às grandezas do fenômeno (T, RH, A etc) serão associados valores tipicamente observados em laboratório. Empregar-se-á, então, a Equação 12.a para o cálculo do tempo total transcorrido ao longo de todo o processo de interação entre o papel-filtro e um corpo-de-prova.

Esse intervalo de tempo será comparado ao tempo de estabilização da massa de ar do experimento de Costa (2003). Isto possibilitará que se adquira uma noção clara a respeito da diferença entre as taxas de absorção d'água do papel-filtro e do ar, evidenciando a diferença entre o equilíbrio {sensor / meio} e o equilíbrio {atmosfera / meio}.

Seja um corpo-de-prova de argila caolínica, cilíndrico, com altura e diâmetro iguais a 7,5 cm. Admita-se que a atmosfera intersticial deste corpo-de-prova apresente umidade relativa igual a 98%.

Deseja-se medir a sucção total deste corpo-de-prova pelo emprego do método do papel-filtro. Para tanto, toma-se um papel da caixa, cuja umidade inicial vale 2%, colocando-o em interação com o corpo-de-prova (sem contacto direto). Sabe-se que o peso seco do papel-filtro é 0,35 gf.

Quanto tempo terá transcorrido até que o papel-filtro, suspenso sobre a superfície do corpo-de-prova, atinja o equilíbrio?

¹⁰ Conforme já salientado, é importante notar que o gradiente de umidade relativa não é constante ao longo do processo de interação entre o solo e atmosfera. No instante inicial da interação ($t=0$), $\nabla RH = x$, tal que $x \neq 0$. No entanto, em um instante posterior a $t=0$, a diferença entre os valores de RH do solo e da atmosfera será menor do que x , em decorrência do fluxo de vapor d'água que ocorre no sistema. Ao final do processo, $x=0$, e o fluxo de vapor terá cessado. Este fato está bem evidenciado no numerador da equação 12.b, onde ∇RH é igual à diferença entre $u_{v,sat}$ (constante) e u_v (variável e crescente). O processo de interação entre o solo e o ar progride na medida que esta diferença diminui, até anular-se. Ou seja, a massa d'água evaporada por unidade de tempo decai até estabilizar-se, descrevendo uma assíntota.

SOLUÇÃO:

$$w_{\text{papel-filtro}}^{\text{inicial}} = 2\%$$

$$RH_{\text{corpo-de-prova}} = 98\% \text{ (i.e. 2728 kPa, pela Equação 3)}$$

Ao atingir o equilíbrio, o papel-filtro apresentará umidade correspondente à sucção gerada pela atmosfera intersticial do corpo-de-prova (i.e. 2728 kPa). A curva de calibração do papel-filtro indica que este valor de sucção é verificado quando o papel apresenta 16,6% de umidade.

Então: $w_{\text{papel-filtro}}^{\text{final}} = 16,6\%$. Portanto, $\Delta w_{\text{papel-filtro}} = 14,6\%$. Considerando que o peso seco de um papel-filtro Whatman 42 vale aproximadamente 0,35 gf, o peso total de água a ser absorvido durante o processo de interação entre o papel e o corpo-de-prova vale 0,0511 gf.

O fluxo de vapor d'água que emana da atmosfera intersticial do corpo-de-prova pode ser calculado por meio da Equação 12.a., desde que estejam disponíveis as informações seguintes:

$$\bar{T} = 25^\circ\text{C} \text{ (ou 298 K) temperatura média;}$$

$$RH_{\text{laboratório}}^{\text{inicial}} = 65\%$$

$$D_v = 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\rho_v = 20 \text{ g} / \text{m}^3$$

$$\Delta L = \frac{H_{\text{corpo-de-prova}}}{2} = 0,035 \text{ m}$$

$$q_v = -D_v \cdot \rho_{v,\text{sat}} \cdot \frac{\nabla RH}{RH} = -\left(10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) \cdot \left(20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right) \cdot \frac{-0,33}{(0,035 \text{ m}) \cdot \underbrace{(0,82)}_{RH}} = 2,30 \cdot 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Considerando a superfície do papel-filtro ($0,0038 \text{ m}^2$), tem-se que o fluxo de vapor d'água vale $2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0038 = 8,74 \cdot 10^{-8} \text{ g} / \text{s}$.

São conhecidos, portanto, o valor do fluxo de vapor d'água que emana da atmosfera intersticial do corpo-de-prova, e a quantidade total de água que o papel-filtro absorverá até que alcance o equilíbrio com o solo. Uma vez dispondo dessas informações, é possível calcular o tempo de equilíbrio.

$$\text{Assim: } \Delta t = \frac{0,0511 \text{ g}}{8,74 \cdot 10^{-8} \text{ g} / \text{s}} = 584668 \text{ s} = 9744 \text{ min (aproximadamente 7 dias}^{11}\text{)}.$$

Portanto, para medir sucção de 6927 kPa ($RH = 95\%$), o papel-filtro leva 9744 minutos.

¹¹ O período de 7 dias é o tempo de equilíbrio adotado na prática internacional de aferição de sucção efetuada pelo método do papel-filtro. Neste sentido, o exemplo numérico apresentado vale como confirmação teórica a esta prática.

Pelo experimento de Costa, foi possível perceber que uma massa de ar alcançou a mesma umidade relativa em apenas 20 minutos. Isso mostra que o papel-filtro foi $\frac{9744}{20} \approx 487$ vezes mais lento do que o ar no tocante à absorção de vapor d'água.

É importante notar que a estabilização da leitura do papel-filtro ocorre em função de dois fenômenos, quais sejam:

1. atingimento do equilíbrio interno do corpo-de-prova (i.e. homogeneização da umidade relativa da atmosfera interna do corpo-de-prova ;
2. atingimento do equilíbrio entre a umidade relativa da atmosfera interna do corpo-de-prova e a umidade do papel-filtro.

O intervalo de 9744 minutos calculado acima diz respeito ao segundo fenômeno de estabilização. A determinação do tempo total requerido para a obtenção de leituras estáveis do papel-filtro depende do cálculo do tempo associado ao segundo fenômeno, o qual diz respeito à taxa de absorção d'água do papel-filtro.

É fundamental discernir entre o equilíbrio {sensor / solo} e o equilíbrio {solo / meio} (Marinho, 2000 ; Leong et al, 2002).

4.3.7.2. Equilíbrio {atmosfera / meio poroso} versus equilíbrio {atmosfera / sensor}

Dois aspectos devem ser lembrados quando da consideração do *tempo de equilíbrio*.

O primeiro diz respeito ao tempo de equilíbrio entre a atmosfera e o meio poroso (i.e. pólo gerador de sucção). Por exemplo, em um contêrmino com solução salina ou uma amostra de solo, algum tempo terá transcorrido até que o vapor d'água presente no ar atinja o equilíbrio com o pólo gerador de sucção.

O segundo está relacionado ao tempo de equilíbrio entre a atmosfera e o sensor. Se um disco de papel-filtro for colocado em um contêrmino com solução salina, o vapor d'água presente no ar alcançará o equilíbrio com a solução, e então o papel-filtro alcançará o equilíbrio com o vapor d'água.

Nas seções 4.3.2 a 4.3.7, estudou-se o tempo de equilíbrio entre o pólo gerador de sucção (solo ou solução) e o meio (atmosfera). Agora, com o intuito de avaliar o tempo de equilíbrio entre o sensor (o papel-filtro) e o meio, apresenta-se uma montagem experimental semelhante à de Costa, com a diferença de que, suspenso sobre a solução, um papel-filtro foi usado em vez de um psicrômetro digital. O papel foi mantido suspenso sobre a água do contêrmino, e pendurado em uma

balança eletrônica de precisão. A intervalos regulares¹², tomaram-se as medidas do papel-filtro umedecido. Uma vez encerrado o procedimento experimental, o papel foi submetido a estufa e teve seu peso seco determinado. De posse desses valores de peso, calcularam-se os valores de umidade do papel-filtro em todos os instantes de inspeção, o que permitiu a obtenção dos dados apresentados na Figura 14.

Na Figura 13 encontra-se uma representação esquemática desta montagem experimental. Na Figura 14 encontra-se a representação gráfica dos resultados experimentais.

Figura 13: Representação esquemática da montagem experimental elaborada para o estudo do tempo de equilíbrio entre o papel-filtro e o meio

Figura 14: Representação gráfica dos resultados experimentais do estudo do tempo de equilíbrio do papel-filtro Whatman 42

¹² Em princípio, a cada 1 minuto; após a primeira hora, a cada 15 minutos; decorrida a segunda hora, a cada 30 minutos; ao longo da terceira hora, a cada 60 minutos; e, até que seja alcançada a constância de peso, a cada 12 horas

Na Figura 15 encontra-se uma ilustração da diferença entre a velocidade de absorção de vapor d'água do papel-filtro e da atmosfera em um dessecador. A Figura 15 apresenta, sobre um mesmo plano, a curva obtida por Costa (2003) e uma outra relativa à taxa de absorção de vapor do papel-filtro.

Figura 15 : Demonstração experimental da diferença entre as taxas de absorção de vapor d'água do papel-filtro e da atmosfera de um dessecador.

Os resultados do experimento de Costa (2003) indicam que o tempo requerido para a estabilização da umidade da atmosfera interna do recipiente de estudo é de aproximadamente 20 minutos. Por outro lado, os resultados experimentais obtidos mediante o ensaio descrito acima apontam que o tempo necessário para a estabilização da umidade do papel-filtro suspenso sobre a água contida em um recipiente fechado é de aproximadamente 1500 minutos. Isto indica que a taxa de absorção d'água do papel-filtro é bem menor que a do ar (*desconsiderando a influência de qualquer estrutura porosa*, o papel-filtro mostrou-se 75 vezes mais lento do que o ar para absorver vapor d'água¹³).

Esse contraste evidencia a diferença entre os processos de equilíbrio {sensor/ atmosfera} e {atmosfera / pólo gerador de sucção}.

Por meio da curva de calibração do papel-filtro, verifica-se que a umidade de estabilização observada no ensaio de taxa de absorção do papel-filtro (aproximadamente 25%) equivale à sucção de 2728 kPa. E pelo emprego da Equação 3 (função que relaciona valores de umidade relativa do ar a valores de sucção), nota-se que a sucção medida pelo papel equivale à umidade relativa de 98%, que é a umidade de estabilização da atmosfera no ensaio de Costa.

Portanto, é possível afirmar que os ensaios foram realizados em condições semelhantes e fornecem informações que se complementam.

4.4. Curvas de calibração

Dentre os métodos de aferição de sucção de solos não saturados, o do papel-filtro figura como um método indireto. É classificado desta maneira porque os valores de poro-pressão mensurados não são imediatamente colhidos do ensaio. Para obtê-los, é necessário empregar uma função matemática que associa valores de umidade do papel-filtro aos valores de sucção mensurados. Tal função é denominada *curva de calibração*.

A curva de calibração é um elemento de fundamental importância para a precisão do método do papel-filtro. Ela tem sido levantada em laboratórios de todo o mundo, pelo emprego de diversos equipamentos (e.g. placa de sucção, placa de pressão, dessecador, etc.). Diferentes pesquisadores têm sugerido diferentes curvas de calibração para o mesmo tipo de papel-filtro. As diferenças entre essas curvas são devidas ao tipo de gerador de sucção empregado na calibração, bem como ao tempo de equilíbrio adotado. Argumenta-se que a distância entre o papel-filtro e a fonte de sucção também representa uma fonte de divergência entre as curvas de calibração propostas. Marinho e Oliveira (2006) apresentam uma completa revisão sobre as curvas de calibração do papel-filtro.

¹³ É importante distinguir o tempo de estabilização de 9.744 minutos (verificado no exemplo numérico da página 33) do tempo de estabilização de 1.500 minutos (verificado no experimento da seção 4.3.7.2). No primeiro caso, foi considerada a contribuição da estrutura porosa do solo, além da atmosfera. No segundo caso, a interação entre o papel-filtro e a água aconteceu somente via atmosfera, sem influência de qualquer estrutura porosa.

Teoricamente, a curva de calibração do papel-filtro é uma relação biunívoca. De fato, sendo a sucção uma medida da energia livre da água intersticial, para cada grau de saturação do meio poroso existe um valor definido de poro-pressão negativa.

No entanto, alguns pesquisadores (e.g. Leong et al, 2002) sugerem que devam existir duas curvas de calibração: uma para a medição de sucção total e outra para a medição de sucção matricial.

Marinho e Oliveira (2006) demonstram que os dois tipos de sucção podem ser medidos pelo emprego de uma mesma curva de calibração. De fato, os que advogam a dupla calibração não consideram que o tempo de equilíbrio do sistema varia em função do nível de sucção medido. Se os tempos de equilíbrio forem adequados aos níveis de sucção medidos, as curvas por eles propostas fazem uma aproximação assintótica a uma única curva de calibração. Na Figura 16, encontra-se ilustrado o acima exposto.

Figura 16 : Relação entre a umidade do papel-filtro e a sucção, mostrando o acréscimo da umidade com o tempo de equilíbrio para a medição de sucção total (Marinho, 1994)

À parte do questionamento da validade de uma ou duas curvas de calibração, o presente trabalho ocupa-se de uma averiguação experimental que objetiva avaliar a influência de outros fatores sobre a confiabilidade das medições feitas pelo método do papel-filtro. Deficiências de contacto entre o papel-filtro e a amostra, o tempo de equilíbrio, e o diâmetro médio dos grãos do solo são os objetos do presente estudo.

4.5. Efeito da deficiência de contacto

Um dos pontos estudados no presente trabalho é o efeito da deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo sobre a acurácia das medidas de sucção. De fato, em se tratando de medidas de sucção matricial, o contacto deficiente entre o papel-filtro e o solo pode ser um fator gerador de desvios de medição, uma vez que o arranjo de tomada de sucção matricial fica assemelhado àquele correspondente à medida de sucção total, em que a troca d'água se dá via vapor, e não por capilaridade.

Colocam-se, então, as seguintes questões: pode a deficiência de contacto gerar desvios de medição? Em caso positivo, a partir de que grau de deficiência os valores medidos podem ser prejudicados?

Além dessas perguntas, ainda vale questionar se o contacto deficiente entre o papel-filtro e o solo tem a mesma capacidade de influenciar resultados para todos os tipos de solo (i.e. uma areia é tão susceptível de alterações como uma argila?) As respostas a estes questionamentos constituem o objetivo do presente trabalho.

5. Investigação experimental - metodologia e ferramental

5.1. Concepção do experimento

O procedimento experimental visa a esclarecer como a acurácia dos valores de sucção aferidos pelo método do papel-filtro pode ser afetada por três fatores, a saber: deficiência de contacto entre o papel-filtro e a amostra de solo, estrutura da matriz porosa do solo e tempo de contacto entre o papel-filtro e a amostra de solo.

Para que este objetivo fosse alcançado, foi concebido um conjunto de vinte e sete corpos-de-prova, organizados de modo a viabilizar avaliações independentes e concomitantes dos efeitos dos fatores supramencionados sobre a acurácia do método. Na Tabela 2 encontram-se as informações sobre a conformação geométrica dos corpos-de-prova. Nas Figura 18 e 19, encontram-se respectivamente as representações esquemática e fotográfica dos corpos-de-prova.

Objetivando o estudo do efeito da *estrutura da matriz porosa do solo* sobre a qualidade das medições, optou-se pelo emprego de três materiais (cada material corresponde ao que se definiu como um *lote*): argila caolinítica rosa, areia fina (areia IPT 100; $\bar{\Phi} = 0,15 \text{ mm}$) e areia média (areia IPT 30; $\bar{\Phi} = 0,60 \text{ mm}$).

Os dados de caracterização destes materiais são os que constam da Figura 17 e das Tabelas 2 e 3.

Figura 17: Distribuições granulométricas dos materiais estudados

Tabela 2: variáveis de caracterização dos materiais estudados¹⁴

	argila caolínica	areia fina	areia média
e máx		1,03	1,01
e mín		0,75	0,74
LL	28,9 %		
LP	21,8 %		

Tabela 3: Índices de vazios dos materiais empregados no experimento

Material	γ_s (gf/cm ³)	ID	H (cm)	ϕ (cm)	V _{bruto} (cm ³)	V _{ranhura} (cm ³)	V _{efetivo} (cm ³)	Peso seco (gf)	γ_d (gf/cm ³)	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$	$\bar{e}_{lote}$
Lote 1: argila caolínica rosa sinterizada	2,996	C1F1L1	6,787	7,487	298,609	0,620	297,989	420,640	1,412	1,122	1,087
		C2F1L1	7,045	7,497	310,804	1,950	308,854	449,300	1,455	1,059	
		C3F1L1	7,052	7,492	310,684	3,180	307,504	474,860	1,544	0,940	
		C1F2L1	7,057	7,465	308,694	0,620	308,074	429,900	1,395	1,147	
		C2F2L1	7,060	7,483	310,359	1,950	308,409	431,660	1,400	1,141	
		C3F2L1	7,030	7,503	310,694	3,180	307,514	449,350	1,461	1,050	
		C1F3L1	7,060	7,492	311,051	0,620	310,431	444,820	1,433	1,091	
		C2F3L1	6,863	7,467	300,371	1,950	298,421	427,090	1,431	1,093	
		C3F3L1	7,018	7,512	310,868	3,180	307,688	429,870	1,397	1,144	
Lote 2: areia fina resinada	2,650	C1F1L2	7,068	7,528	314,474	0,620	313,854	467,580	1,490	0,779	0,746
		C2F1L2	7,168	7,508	317,231	1,950	315,281	478,310	1,517	0,747	
		C3F1L2	7,298	7,507	322,840	3,180	319,660	489,910	1,533	0,729	
		C1F2L2	7,112	7,515	315,282	0,620	314,662	481,110	1,529	0,733	
		C2F2L2	7,177	7,500	316,895	1,950	314,945	477,060	1,515	0,749	
		C3F2L2	7,077	7,515	313,730	3,180	310,550	475,800	1,532	0,730	
		C1F3L2	6,982	7,545	311,995	0,620	311,375	464,980	1,493	0,775	
		C2F3L2	7,032	7,515	311,735	1,950	309,785	475,800	1,536	0,725	
		C3F3L2	7,092	7,522	314,953	3,180	311,773	473,270	1,518	0,746	
Lote 3: areia média resinada	2,670	C1F1L3	7,413	7,533	330,261	0,620	329,641	509,000	1,544	0,729	0,745
		C2F1L3	7,417	7,525	329,679	1,950	327,729	501,430	1,530	0,745	
		C3F1L3	6,957	7,523	309,095	3,180	305,915	483,800	1,581	0,688	
		C1F2L3	7,002	7,532	311,784	0,620	311,164	481,980	1,549	0,724	
		C2F2L3	7,022	7,527	312,259	1,950	310,309	478,440	1,542	0,732	
		C3F2L3	7,015	7,520	311,410	3,180	308,230	463,530	1,504	0,775	
		C1F3L3	6,990	7,525	310,713	0,620	310,093	459,780	1,483	0,801	
		C2F3L3	7,045	7,517	312,465	1,950	310,515	468,210	1,508	0,771	
		C3F3L3	6,970	7,508	308,453	3,180	305,273	467,670	1,532	0,743	

¹⁴ Os corpos-de-prova de areia fina foram fabricados com $e = 0,75$ (valor médio), e portanto com $CR = 1,00$. Os corpos-de-prova de areia média foram fabricados com $e = 0,75$ (valor médio), e portanto com $CR = 0,96$. A umidade de moldagem dos corpos-de-prova de argila caolínica foi 15%

A fim de avaliar o efeito do *tempo de contacto* entre o papel-filtro e a amostra de solo, dividiram-se os vinte e sete corpos-de-prova em três grandes grupos, denominados *famílias*. Cada família corresponde a uma periodicidade de inspeção e troca de papéis-filtro (7 dias, 14 dias e 28 dias).

Visando ao estudo da *deficiência de contacto*, idealizaram-se todos os corpos-de-prova como cilindros com uma das bases feita descontínua pela presença de um sulco. De cilindro a cilindro ocorre variação no diâmetro do sulco a fim de que sejam gerados diferentes graus de deficiência de contacto. Cada família contém três representantes de cada um dos três materiais estudados. A diferença entre os elementos de uma tripla de um mesmo material é o diâmetro do sulco gerador de mau contacto, que varia para forjar deficiências progressivas (20%, 50% e 80%). Na Tabela 4 encontram-se as informações sobre a conformação geométrica dos corpos-de-prova.

Tabela 4: Informações sobre a conformação geométrica dos corpos-de-prova

Informações sobre a conformação geométrica dos corpos-de-prova				
Deficiência de contacto		20%	50%	80%
Corpos-de-prova	Diâmetro (mm)	75	75	75
	Altura (mm)	75	75	75
Sulcos	Diâmetro (mm)	20	35	45
	Profundidade (mm)	2	2	2

5.2. Organização do experimento

Três lotes de corpos-de-prova foram produzidos. Cada lote corresponde a um material com diâmetro de grãos bem definido. O primeiro lote reúne amostras de um solo com grãos muito finos (argila caolinítica rosa). O segundo lote é composto por amostras com grãos grossos (uma areia fina; $\phi = 0,15$ mm). O terceiro lote abrangerá amostras contituídas por grãos ainda maiores (de uma areia média; $\phi = 0,60$ mm). Consoante o exposto na seção 5.1, a variação de diâmetro de grãos tem o objetivo de verificar efeitos da rugosidade intersticial do solo sobre a qualidade das aferições de sucção.

Cada lote corresponde a um conjunto de nove corpos-de-prova. Estes corpos-de-prova foram empregados na investigação do relacionamento entre o papel-filtro e o solo ao longo do processo de equalização. Agrupados em sublotos de três elementos, foram testados quanto ao tempo de equilíbrio (cada um dos três trios foi posto em repouso por períodos que variaram entre sete e vinte e oito dias) e quanto ao grau de contacto entre o papel-filtro e o solo (todo corpo-de-prova apresenta sobre uma de suas faces horizontais um sulco circular de diâmetro característico, causando mau contacto entre o solo e o papel-filtro; em um mesmo trio, de um elemento a outro há variação do diâmetro característico do

sulco, de maneira a possibilitar a avaliação do efeito do mau contacto sobre as aferições de sucção). Visando a ilustrar a descrição feita acima, apresenta-se na Figura 18 um esboço do todo o elenco de corpos-de-prova que foram empregados no experimento. No tocante à taxonomia, propõe-se a Tabela 5 como subsídio para o esclarecimento da organização do experimento.

Figura 18 : Esboço de todo o elenco de corpos-de-prova empregado no experimento

Tabela 5 : Elucidação do sistema taxonômico empregado na organização do experimento

	Lote 1: argila caolinítica rosa sinterizada			Lote 2: areia fina resinada ($\bar{\Phi} = 0,15$ mm)			Lote 3: areia média resinada ($\bar{\Phi} = 0,60$ mm)		
grau de deficiência de contacto	-20%	-50%	-80%	-20%	-50%	-80%	-20%	-50%	-80%
Família 1 (7 dias)	C1F1L1	C2F1L1	C3F1L1	C1F1L2	C2F1L2	C3F1L2	C1F1L3	C2F1L3	C3F1L3
Família 2 (14 dias)	C1F2L1	C2F2L1	C3F2L1	C1F2L2	C2F2L2	C3F2L2	C1F2L3	C2F2L3	C3F2L3
Família 3 (28 dias)	C1F3L1	C2F3L1	C3F3L1	C1F3L2	C2F3L2	C3F3L2	C1F3L3	C2F3L3	C3F3L3

Figura 19: Fotografia de uma das três famílias de corpos-de-prova utilizadas no experimento

5.3. Fabricação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de argila caolinítica foram produzidos por compactação estática e posterior sinterização (disposição em mufla a 1000°C).

Os corpos-de-prova de areia, por sua vez, requereram um procedimento especial de fabricação. Com vistas a assegurar a integridade destes corpos-de-prova, empregou-se uma resina laminar como aglomerante¹⁵. Neste caso, o procedimento de fabricação envolveu a preparação do aglomerante (dosagem e adição de catalisador, com posterior agitação da mistura), sua aplicação aos agregados (os grãos propriamente ditos) e o repouso dos corpos-de-prova recém-moldados por 24 horas. Procedeu-se, então, à desforma. A seguir, nas Figuras 20 e 21, encontram-se ilustrações da sequência de fabricação dos corpos-de-prova (respectivamente, corpos-de-prova de argila e de areia).

¹⁵ A resina utilizada foi do tipo laminar M, fornecida pela empresa Maxepoxi. O catalisador empregado foi o Araduc HY 951, fornecido pela mesma empresa. O traço em peso da mistura foi: 1: 10 : 100 (catalisador / resina / areia)

20.A. Alocação de material: argila caolinítica rosa a 1% de umidade (pesagem e acomodação em cadinhos)

20.B. Correção de umidade (adição de água; homogeneização de umidade)

20.C. Preenchimento do molde em três camadas

20.D. Desforma

20.E. Sinterização (disposição em mufla a 1000°C durante 2 horas)

20.F. Saturação (imersão a vácuo em solução salina¹⁶) e deflagração da seqüência experimental

Figura 20: Fabricação dos corpos-de-prova de argila caolinítica rosa sinterizada

¹⁶ Anteriormente à deflagração do experimento, saturaram-se todos os corpos-de-prova em solução de NaCl a 0.109 mol/L, o que equivale à geração de 500 kPa de sucção osmótica, de acordo com a Equação (3).

Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro

21.A. Alocação do material granular (pesagem; disposição em cadinho)

21.B. Preparação do aglomerante (pesagem da resina e do catalisador / agitação da mistura por 30 minutos)

21.C. Formação do material fresco: mistura dos agregados e do aglomerante

21.D. Revestimento das paredes internas do molde com substância desmoldante

21.E. Acomodação do material fresco (em 3 camadas; entre uma e outra camada, soqueteamento)

21.F. Secagem (24 horas)

21.G. Desforma

21.H. Aquecimento em estufa (105°C) por 24 horas

21.I. Lavagem com jato d'água (eliminação de eventual película formada pelo contacto entre o aglomerante e a substância desmoldante)

21.J. Saturação (imersão a vácuo em solução salina¹⁷) e deflagração do experimento

Figura 21: Fabricação dos corpos-de-prova de areia (fina e média)

¹⁷ Anteriormente à deflagração do experimento, saturaram-se todos os corpos-de-prova em solução de NaCl a 0.109 mol/L, o que equivale à geração de 500 kPa de sucção osmótica, de acordo com a Equação (3).

5.4. Rotina de coleta de dados: protocolo laboratorial

Itemizando o procedimento experimental, chega-se ao seguinte:

- pesagem dos corpos-de-prova ;
- fixação dos papéis-filtro ;
- embalagem dos conjuntos em filme plástico ;
- embalagem em papel alumínio ;
- acomodação em sacos plásticos com identificação ;
- condicionamento em caixas de isopor (estas, por sua vez, são acomodadas em ambiente com pequenas variações de temperatura; nas condições do presente experimento, $\pm 2^{\circ}\text{C}$).
- repouso do sistema (processo de equalização) : intervalo mínimo de sete dias ;
- pesagem dos sacos plásticos com lacre (os que se empregam para pesar os papéis) ainda vazios ;
- desembalagem dos corpos-de-prova e retirada dos papéis-filtro (estes devem ser imediatamente colocados nos respectivos sacos plásticos) ;
- pesagem dos corpos-de-prova ;
- pesagem dos sacos plásticos que já contêm os papéis-filtro de topo e de base dos corpos-de-prova ;
- secagem dos corpos-de-prova;
- colocação de novos papéis-filtro e re-embalagem do corpos-de-prova ;
- condicionamento dos corpos-de-prova nas caixas de isopor ;
- disposição dos papéis antigos em cápsulas para secagem em estufa ;
- calculam-se as umidades dos papéis-filtro. Pelo emprego da curva de calibração, inferem-se os valores de sucção que havia nos corpos-de-prova ;
- as umidades dos corpos-de-prova, acompanhadas dos respectivos valores de sucção aferidos, formam os pares ordenados das curvas de retenção dos materiais estudados.

6. Apresentação e avaliação de dados experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais, os quais foram obtidos segundo o procedimento descrito no Capítulo 5. Após a apresentação de cada curva de retenção, segue um comentário acerca do comportamento do material¹⁸ estudado com relação à variação de um dos parâmetros experimentais.

Em princípio, avaliações individuais são feitas acerca do desempenho de cada material. Assim, as seções 6.1 (argila caolinítica rosa sinterizada), 6.2 (areia fina resinada) e 6.3 (areia média resinada), compreendem, em seus itens, avaliações acerca do efeito da *deficiência de contacto* (seções 6.1.1, 6.2.1 e 6.3.1) e do *tempo* (seções 6.1.2, 6.2.2 e 6.3.2) sobre os resultados experimentais.

Em seguida, as constatações feitas nas seções supracitadas são observadas em conjunto, de modo a possibilitar uma apreciação dos resultados experimentais em termos dos *materiais* estudados. Desse modo, a seção 6.4 apresenta avaliações sobre a susceptibilidade dos três materiais aos graus de deficiência de contacto (seção 6.4.1) e ao tempo (seção 6.4.2). Na Figura 22, encontra-se um esquema referente à estruturação do processo de avaliação dos dados experimentais.

Figura 22: Estruturação do processo de avaliação dos dados experimentais

¹⁸ Vale lembrar que os três materiais estudados (argila caolinítica rosa, areia fina e areia média) sofreram alterações estruturais em decorrência do processo de fabricação dos corpos-de-prova. No entanto, tais alterações (a saber: *sinterização*, no caso da argila caolinítica rosa, e *tratamento em resina*, no caso das areias) foram importantes para a definição de superfícies de contacto com características bem distintas, o que contribuiu para a clareza e objetividade da análise comparativa dos resultados experimentais.

6.1. Curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada

6.1.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais

A seguir, apresentam-se curvas de retenção para a argila caolinítica rosa sinterizada. Sobre um mesmo plano estão plotadas as curvas referentes às sucções matriciais parciais (deficiências de contacto de 20%, 50% e 80%) e a curva relativa à sucção matricial plena. Tomando esta última como referência, a avaliação consiste em observar a tendência de translação dos gráficos associada à variação crescente do grau de deficiência de contacto.

Na Tabela 6 estão registrados os pares ordenados (s, θ) , obtidos pelas aferições efetuadas em laboratório. Na Figura 23 apresentam-se as curvas de retenção d'água associadas a essas aferições, as quais se fizeram *semanalmente* (note-se que, dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o primeiro está sujeito a variação).

Tabela 6: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada

Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	4	0,51	Matricial Parcial (-20%)	1	5	0,53
	2	11	0,42		2	14	0,44
	3	16	0,35		3	23	0,36
	4	25	0,30		4	28	0,31
	5	30	0,23		5	34	0,25
	6	42	0,20		6	52	0,20
	7	92	0,15		7	116	0,16
	8	296	0,10		8	540	0,10
	9	1.065	0,05		9	2.525	0,05
Matricial Parcial (-50%)	1	8	0,51	Matricial Parcial (-80%)	1	10	0,48
	2	27	0,43		2	35	0,38
	3	36	0,35		3	41	0,33
	4	42	0,30		4	47	0,28
	5	73	0,22		5	135	0,22
	6	183	0,20		6	340	0,19
	7	397	0,16		7	858	0,14
	8	2.164	0,10		8	2.164	0,10
	9	3.438	0,05		9	4.680	0,05

Figura 23: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolínica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal

A observação da Figura 23 permite afirmar que o aumento do grau de deficiência de contacto acarreta a translação progressiva da curva de retenção para a direita. Portanto, o grau de deficiência de contacto e a magnitude do desvio da curva são *diretamente proporcionais*.

A partir deste ponto do texto, é conveniente adotar um procedimento para a avaliação quantitativa da translação da curva de retenção. Por esta razão, será empregado o seguinte algoritmo:

- Equacionamento das curvas de retenção (pelo emprego do modelo de Van Genuchten);
- Estipulação de valores de umidade para comparação entre curvas;
- Cálculo das sucções correspondentes aos valores de umidade selecionados;
- Comparação entre as sucções calculadas para as diversas curvas, no mesmo patamar de umidade;
- Observação da tendência de variação do desvio percentual de aferição (tomando como base a sucção calculada para a curva de sucção matricial plena).

Para o caso específico da Figura 23, a aplicação do procedimento acima descrito fica registrada pela Figura 24 e pela Tabela 7, a seguir:

Figura 24: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolínica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (Curvas de Van Genuchten sobrepostas aos pontos experimentais; teores de umidade selecionados para comparação: 0,4; 0,3; 0,2)

Tabela 7: Registro das informações relativas ao procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção semanal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	sucção (kPa) / desvio percentual de aferição					
		$\theta = 0,40$		$\theta = 0,30$		$\theta = 0,20$	
Plena	$\theta(s) = 0,0634 + \frac{0,4466}{[1 + (0,0719 \cdot s)^{1,9870}]^{0,4967}}$	12		23		44	
-20%	$\theta(s) = 0,0741 + \frac{0,4559}{[1 + (0,0555 \cdot s)^{2,1031}]^{0,5245}}$	17	40%	29	31%	55	26%
-50%	$\theta(s) = 0,0773 + \frac{0,4327}{[1 + (0,0391 \cdot s)^{1,7741}]^{0,4363}}$	25	104%	52	133%	126	187%
-80%	$\theta(s) = 0,0267 + \frac{0,5033}{[1 + (0,0618 \cdot s)^{1,4157}]^{0,2936}}$	24	98%	64	184%	207	372%

Plotando os pares ordenados {grau de deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 25:

Figura 25: Representação gráfica dos desvios percentuais de aferição em função dos graus de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções semanais)

Ainda avaliando a argila caolinítica rosa sinterizada, apresenta-se a seguir a Figura 26, onde estão representadas as curvas de retenção de sucção matricial parcial, bem como a de sucção matricial plena. Todos esses gráficos foram construídos a partir de dados experimentais aferidos *quinzenalmente*. A Tabela 8, que antecede a Figura 26, contém o registro dos dados experimentais referentes às curvas de retenção plotadas na referida Figura.

Tabela 8: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada

Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	5	0,53	Matricial Parcial (-20%)	1	7	0,53
	2	29	0,31		2	29	0,32
	3	75	0,19		3	85	0,19
	4	1.009	0,16		4	1.362	0,15
	5	1.537	0,12		5	1.590	0,11
Matricial Parcial (-50%)	1	8	0,51	Matricial Parcial (-80%)	1	8	0,52
	2	40	0,29		2	40	0,31
	3	99	0,19		3	99	0,19
	4	1.590	0,13		4	1590	0,15
	5	2.164	0,09		5	2.164	0,11

Figura 26: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal

Será adotado aqui o mesmo procedimento de avaliação empregado para as curvas da Figura 23. A seguir, na Figura 27, são apresentadas as curvas de retenção da Figura 26 subjacentes às funções contínuas (i.e. funções de Van Genuchten) que melhor as representam .

Figura 27: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

A respeito da Figura 27, é interessante notar como as curvas de retenção estão mais próximas entre si, levando em conta a disposição relativa que apresentam na Figura 24. Este fato é o primeiro indício de que o aumento da periodicidade de inspeção (i.e. tempo de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo) acarreta a mitigação da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto entre o solo e o papel-filtro.

A seguir, na Tabela 9, apresentam-se as informações referentes à aplicação do procedimento de avaliação comparativa apresentado na página 50 (e.g. equações das curvas de retenção, teores de umidade adotados para comparação, valores de sucção calculados para os teores de umidade adotados, etc.).

Tabela 9: Registro das informações relativas ao procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção quinzenal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	sucção (kPa) / desvio percentual de aferição					
		$\theta = 0,40$		$\theta = 0,30$		$\theta = 0,20$	
Plena	$\theta(s) = 0,1098 + \frac{0,4091}{\left[1 + (0,0604 \cdot s)^{2,2265}\right]^{0,5509}}$	16		27		55	
-20%	$\theta(s) = 0,1193 + \frac{0,4108}{\left[1 + (0,0526 \cdot s)^{2,3680}\right]^{0,5777}}$	18	19%	31	14%	61	11%
-50%	$\theta(s) = 0,1311 + \frac{0,3991}{\left[1 + (0,0454 \cdot s)^{2,5403}\right]^{0,6063}}$	21	37%	34	27%	67	22%
-80%	$\theta(s) = 0,1327 + \frac{0,3878}{\left[1 + (0,0470 \cdot s)^{2,4572}\right]^{0,5364}}$	21	38%	36	34%	79	45%

Plotando os pares ordenados {grau de deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 28:

Figura 28: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (argila caolinítica rosa sinterizada, inspeções quinzenais).

Na medida que aumenta o tempo de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo, maior torna-se a quantidade total de água absorvida pelo papel-filtro durante o período entre duas inspeções consecutivas. Isto ocorre porque a água capilar passa a migrar das bordas para o centro do papel-filtro, umedecendo-o além do que seria somente por meio do contacto deficiente.

O comportamento migratório da água capilar é descrito pelo conjunto de pares ordenados plotados no gráfico da Figura 28. Esses pares ordenados indicam a tendência de evolução do fenômeno acima exposto.

Em sequência, expõem-se os dados experimentais referentes às aferições *mensais* efetuadas sobre os corpos-de-prova de argila caolinítica rosa sinterizada. Consta da Tabela 10 o registro dos dados de aferição.

Tabela 10: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à argila caolinítica rosa sinterizada

Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	4	0,52	Matricial Parcial (-20%)	1	4	0,52
	2	19	0,36		2	22	0,36
	3	29	0,27		3	33	0,25
	4	45	0,20		4	50	0,20
	5	599	0,14		5	735	0,15
Matricial Parcial (-50%)	1	7	0,52	Matricial Parcial (-80%)	1	9	0,53
	2	23	0,36		2	28	0,36
	3	38	0,26		3	43	0,29
	4	52	0,20		4	85	0,21
	5	735	0,15		5	1.001	0,13

Na Figura 29 estão representadas as curvas de retenção de sucção matricial parcial, bem como a de sucção matricial plena.

Figura 29: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal

Consoante o método adotado desde o princípio deste Capítulo, apresentam-se, na Figura 30, as curvas de retenção subjacentes às funções contínuas (i.e. funções de Van Genuchten) que melhor as representam.

Figura 30: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Uma vez mais, empregar-se-á o procedimento de avaliação quantitativa adotado para os gráficos apresentados anteriormente. Na Tabela 11 estão registradas as informações relativas à aplicação do referido procedimento:

Tabela 11: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada (inspeção mensal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	sucção (kPa) / desvio percentual de aferição					
		$\theta = 0,40$		$\theta = 0,30$		$\theta = 0,20$	
Plena	$\theta(s) = 0,1393 + \frac{0,3807}{[1 + (0,0590 \cdot s)^{2,8308}]^{0,6467}}$	16		24		45	
-20%	$\theta(s) = 0,1519 + \frac{0,3681}{[1 + (0,0499 \cdot s)^{3,3039}]^{0,6973}}$	18	18%	27	11%	48	6%
-50%	$\theta(s) = 0,1491 + \frac{0,3709}{[1 + (0,0466 \cdot s)^{3,0510}]^{0,6722}}$	20	27%	30	23%	55	22%
-80%	$\theta(s) = 0,1314 + \frac{0,3986}{[1 + (0,0428 \cdot s)^{2,3136}]^{0,5678}}$	23	49%	40	65%	87	94%

A efetuação do procedimento acima descrito permite a quantificação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais.

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio de medição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 31:

Figura 31: Variação do acréscimo percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (argila caolinítica rosa sinterizada, inspeções mensais).

Com respeito a todas as famílias de curvas de retenção avaliadas, observa-se que a deficiência de contacto constitui fator de desvio de aferição de sucção matricial. De fato, quanto maior o grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo, maior a superavaliação da sucção aferida. Isto ocorre porque a privação de contacto, materializada nos sulcos dos corpos-de-prova, implica eliminação de parte da rede de canais capilares. Ou seja, a adução d'água intersticial é parcialmente interrompida, fazendo com que os papéis-filtro submetidos a esta condição apresentem-se, quando das inspeções periódicas, mais secos do que seus pares que medem sucção matricial plena. Sendo inversamente proporcional a relação entre umidade do papel e sucção aferida, decorre que os papéis-filtro que medem sucção matricial parcial indicam valores de sucção mais altos do que os apontados por papéis-filtro que medem sucção matricial plena. E quanto maior o grau de deficiência de contacto, tanto mais intensa a majoração das aferições efetuadas. Em suma:

grau de deficiência de contacto $\uparrow$: majoração da aferição de sucção matricial $\uparrow$

Na Tabela 12 encontra-se um registro sumário das informações processadas na seção 6.1.1.

Tabela 12: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – argila caolinítica rosa sinterizada (referencial: medidas de sucção matricial plena)

Quadro-resumo: registro de <i>desvios percentuais de aferição</i> (em relação às medidas de sucção matricial plena) decorrentes de <i>deficiência de contacto</i>							
		Modalidade de Sucção (grau de deficiência de contacto)					
		Sucção Matricial Parcial (-20%)		Sucção Matricial Parcial (-50%)		Sucção Matricial Parcial (-80%)	
Periodicidade de inspeção (número de dias)	7	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
		0,4	40%	0,4	104%	0,4	98%
		0,3	31%	0,3	133%	0,3	184%
		0,2	26%	0,2	187%	0,2	372%
	14	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
		0,4	19%	0,4	37%	0,4	38%
		0,3	14%	0,3	27%	0,3	34%
		0,2	11%	0,2	22%	0,2	45%
	28	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
		0,4	18%	0,4	27%	0,4	49%
		0,3	11%	0,3	23%	0,3	65%
		0,2	6%	0,2	22%	0,2	94%

6.1.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais

Finda a análise individual das famílias de curvas levantadas segundo as três periodicidades de inspeção, cabe agora uma avaliação comparativa dos resultados obtidos daquelas análises. Destarte, apresentar-se-ão, nas Figuras 32, 33 e 34, sob a forma de “gráficos de barras”, os desvios percentuais de aferição registrados para os três teores de umidade adotados como referência, considerando as três periodicidades de inspeção.

Figura 32: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,4$)

Figura 33: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,3$)

Figura 34: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (argila caolinítica rosa sinterizada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,2$)

Da observação das Figuras 32 a 34 fica claro o efeito do tempo sobre as aferições de sucção matricial parcial. Um comentário relevante a ser feito concerne às barras verticais. Aquelas que correspondem às periodicidades de 14 e 28 dias apresentam alturas bastante inferiores às daquelas associadas à periodicidade de 7 dias. Este fato sugere que o aumento do tempo de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo tende a mitigar a tendência de majoração das aferições de sucção, esta associada à redução do contacto entre o papel-filtro e a superfície do solo. Portanto, os parâmetros *tempo* e *deficiência de contacto* agem em sentidos opostos quando sujeitos a variações progressivas.

De fato, os canais capilares que mantêm contacto com o papel-filtro respondem pelo processo de troca d'água até que o equilíbrio do sistema seja atingido. Enquanto a homeostase não for alcançada, haverá fluxo. E durante este processo, quanto maior o tempo disponibilizado ao sistema, maior será a quantidade d'água transferida do solo para o papel-filtro.

Além disso, da comparação entre os três gráficos é possível notar que a magnitude do desvio percentual de aferição varia conforme o teor de umidade volumétrica considerado. Para uma curva de retenção levantada com deficiência de contacto, quanto menor for o teor de umidade volumétrica, maior será o desvio percentual de aferição.

Dando continuidade ao processo de avaliação, passa-se a estudar o efeito da variação da periodicidade de inspeção dos corpos-de-prova sobre as aferições de sucção matricial e total.

De início, apresentam-se, na Tabela 13, os pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total.

Tabela 13: Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (argila caolinítica rosa sinterizada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)

periodicidade de inspeção: 7 dias			periodicidade de inspeção: 14 dias			periodicidade de inspeção: 28 dias		
período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
1	515	0,35	1	542	0,29	1	513	0,36
2	537	0,30	2	549	0,20	2	533	0,27
3	538	0,23	3	598	0,19	3	548	0,20
4	539	0,20	4	2.087	0,13	4	1.085	0,14
5	597	0,15						
6	792	0,10						

Em seguida, na Figura 35, apresentam-se dois grupos de gráficos: um trio de curvas de sucção matricial plena (elas diferem entre si pela periodicidade com que seus dados de origem foram coletados) e um trio de curvas de sucção total (diferem entre si pela mesma razão por que o fazem as curvas de sucção matricial plena).

Note-se que, dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o segundo está sujeito a variação.

Figura 35: Representação gráfica das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)

Os valores de sucção matricial levantados segundo as três periodicidades (7 dias, 14 dias e 28 dias) estão muito próximos entre si, de maneira que a superposição dessas curvas de retenção aponta para a modicidade do efeito produzido pelo alongamento do tempo de equilíbrio sobre as aferições de sucção.

Semelhantemente, em se tratando dos valores de sucção total, não se observa efeito sensível do tempo de equilíbrio sobre os resultados. Aliás, vale lembrar que para valores de sucção total superiores a 100 kPa não se observa efeito do tempo de equilíbrio (Marinho, 1994).

6.2. Curvas de retenção de areia fina resinada ($\bar{\Phi} = 0,15 \text{ mm}$)

6.2.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais

A seguir, apresentam-se curvas de retenção para a areia fina resinada. O procedimento de avaliação dos resultados experimentais permanece tal como definido na seção 6.1. Ou seja, o efeito da deficiência de contacto sobre as aferições de sucção matricial será estudado a partir da observação da disposição relativa das curvas de retenção, plotadas sobre um mesmo plano cartesiano.

Na Figura 36, apresentam-se curvas de retenção construídas a partir de aferições efetuadas *semanalmente* (note-se que, dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o primeiro está sujeito a variação).

Antecedendo a Figura 36 dispõe-se a Tabela 14, que contém o registro dos dados experimentais que geraram as curvas da referida Figura.

Tabela 14: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada

Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	3	0,36	Matricial Parcial (-20%)	1	3	0,37
	2	3	0,34		2	5	0,35
	3	14	0,26		3	20	0,27
	4	1.677	0,25		4	1.855	0,26
	5	2.353	0,21		5	2.164	0,22
	6	2.566	0,17		6	3.438	0,17
	7	3.534	0,13		7	8.673	0,13
	8	8.687	0,09		8	16.075	0,09
	9	16.626	0,05		9	18.756	0,04
Matricial Parcial (-50%)	1	3	0,36	Matricial Parcial (-80%)	1	3	0,35
	2	6	0,34		2	6	0,34
	3	21	0,25		3	22	0,26
	4	2.164	0,24		4	2.525	0,25
	5	2.525	0,21		5	3.438	0,21
	6	4.680	0,17		6	5.460	0,17
	7	11.808	0,13		7	13.777	0,13
	8	16.075	0,09		8	16.075	0,09
	9	25.534	0,05		9	26.185	0,05

Figura 36: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal

A observação da Figura 36 permite afirmar que o aumento do grau de deficiência de contacto acarreta a translação progressiva da curva de retenção para a direita. Portanto, o grau de deficiência de contacto e a magnitude do desvio da curva são *diretamente proporcionais*.

Esta tendência, já observada para a argila caolinítica rosa sinterizada, será matematicamente descrita pelo emprego do pela aplicação do procedimento de avaliação comparativa proposto na página 50. Portanto, cada curva de retenção da Figura 36 será aproximada por uma função contínua ao longo do espectro de sucções aferidas (consoante o exposto alhures, tal função contínua é definida por uma equação de Van Genuchten). Na Figura 37 estão representadas as curvas de retenção da Figura 36, subjacentes às respectivas funções contínuas. Em seqüência, encontram-se compilados na Tabela 15 os dados referentes à aplicação do procedimento de avaliação comparativa das curvas de retenção.

Figura 37: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Tabela 15: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção semanal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição			
Plena, para $\theta \geq 0,26$	$\theta(s) = 0,2600 + \frac{0,0900}{\left[1 + (0,2195 \cdot s)^{15,1214}\right]^{0,1883}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		5		6	
Plena, para $\theta < 0,26$	$\theta(s) = 0,1300 + \frac{0,1340}{\left[1 + (0,0005 \cdot s)^{7,1214}\right]^{0,6583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		2150		2575	
-20%, para $\theta \geq 0,26$	$\theta(s) = 0,2600 + \frac{0,1000}{\left[1 + (0,2102 \cdot s)^{10,1214}\right]^{0,1883}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		5	16%	8	26%
-20%, para $\theta < 0,26$	$\theta(s) = 0,1290 + \frac{0,1310}{\left[1 + (0,0004 \cdot s)^{6,1214}\right]^{0,9583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		2700	26%	3106	21%
-50%, para $\theta \geq 0,25$	$\theta(s) = 0,2510 + \frac{0,0990}{\left[1 + (0,1695 \cdot s)^{15,1214}\right]^{0,1883}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		6	29%	8	23%
-50%, para $\theta < 0,25$	$\theta(s) = 0,1240 + \frac{0,1270}{\left[1 + (0,0003 \cdot s)^{5,1214}\right]^{0,8583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		3000	40%	3659	42%
-80%, para $\theta \geq 0,26$	$\theta(s) = 0,2550 + \frac{0,0985}{\left[1 + (0,1747 \cdot s)^{11,1214}\right]^{0,1883}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		6	29%	8	36%
-80%, para $\theta < 0,26$	$\theta(s) = 0,1250 + \frac{0,1350}{\left[1 + (0,0003 \cdot s)^{6,1214}\right]^{0,4583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		4000	86%	4851	88%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 38:

Figura 38: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções semanais).

A seguir, na Figura 39, apresentam-se as curvas de retenção de sucção matricial (plena e parcial) para areia fina resinada, levantadas segundo periodicidade quinzenal. A Tabela 16, que antecede a Figura 39, tem a função de apresentar o registro dos dados experimentais de que são constituídas as curvas plotadas nessa Figura.

O procedimento de avaliação comparativa adotado até aqui será aplicado mais uma vez. Portanto, depois de apresentadas as curvas de retenção, estas serão aproximadas por funções contínuas (i.e. equações de Van Genuchten), as quais serão submetidas ao algoritmo enunciado na página 50. Isto feito, um novo conjunto de pares ordenados {grau de deficiência de contacto; desvio percentual de aferição} terá sido definido. Este conjunto, por sua vez, será comparado com os demais levantados durante o estudo da areia fina resinada.

Tabela 16: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada

Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	4	0,35	Matricial Parcial (-20%)	1	2	0,35
	2	76	0,30		2	62	0,30
	3	2.456	0,21		3	2.325	0,21
	4	3.168	0,20		4	2.946	0,20
	5	8.348	0,17		5	7.433	0,17
	6	9.983	0,13		6	11.808	0,14
Matricial Parcial (-50%)	1	3	0,36	Matricial Parcial (-80%)	1	3	0,34
	2	85	0,30		2	100	0,29
	3	2.946	0,21		3	4.011	0,21
	4	3.045	0,20		4	6.371	0,20
	5	8.673	0,17		5	8.906	0,16
	6	11.808	0,14		6	11.903	0,13

Figura 39: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal

Na Figura 40, encontram-se plotadas sobre um mesmo plano as curvas de retenção referentes à areia fina resinada. Superpostas aos pontos experimentais estão as funções contínuas (de Van Genuchten) que melhor representam os resultados obtidos em laboratório.

Figura 40: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Em conformidade com o procedimento adotado até o presente, apresenta-se na Tabela 17 o registro das operações relativas à aplicação do processo de avaliação comparativa das curvas de retenção.

Tabela 17: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção quinzenal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição			
Plena, para θ ≥ 0,21	$\theta(s) = 0,2120 + \frac{0,1380}{\left[1 + (0,0310 \cdot s)^{5,5214}\right]^{0,1283}}$	θ = 0,34	Δ%	θ = 0,30	Δ%
		30		60	
Plena, para θ < 0,21	$\theta(s) = 0,1300 + \frac{0,0882}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{3,0114}\right]^{8,8583}}$	θ = 0,20	Δ%	θ = 0,17	Δ%
		4000		6790	
-20%, para θ ≥ 0,21	$\theta(s) = 0,2120 + \frac{0,1380}{\left[1 + (0,0295 \cdot s)^{5,1214}\right]^{0,1283}}$	θ = 0,34	Δ%	θ = 0,30	Δ%
		33	8%	66	11%
-20%, para θ < 0,21	$\theta(s) = 0,1300 + \frac{0,0882}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{3,1500}\right]^{7,2383}}$	θ = 0,20	Δ%	θ = 0,17	Δ%
		5000	25%	7808	15%
-50%, para θ ≥ 0,21	$\theta(s) = 0,2120 + \frac{0,1380}{\left[1 + (0,0255 \cdot s)^{5,1214}\right]^{0,1283}}$	θ = 0,34	Δ%	θ = 0,30	Δ%
		38	25%	78	30%
-50%, para θ < 0,21	$\theta(s) = 0,1300 + \frac{0,0882}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{3,1214}\right]^{7,0383}}$	θ = 0,20	Δ%	θ = 0,17	Δ%
		6000	50%	9000	33%
-80%, para θ ≥ 0,21	$\theta(s) = 0,2120 + \frac{0,1430}{\left[1 + (0,0253 \cdot s)^{5,1114}\right]^{0,1283}}$	θ = 0,34	Δ%	θ = 0,30	Δ%
		42	39%	82	36%
-80%, para θ < 0,21	$\theta(s) = 0,1280 + \frac{0,0902}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{3,1314}\right]^{8,3281}}$	θ = 0,20	Δ%	θ = 0,17	Δ%
		7000	75%	10000	47%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 41:

Figura 41: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções quinzenais).

A seguir, apresentam-se as curvas de retenção referentes à areia fina resinada, levantadas segundo periodicidade mensal. Na Tabela 18 estão registrados os dados experimentais que geraram as curvas de retenção de sucção matricial parcial, bem como a de sucção matricial plena, as quais estão retratadas na Figura 42 sobre um mesmo plano cartesiano.

Tabela 18: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à areia fina resinada

Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	2	0,35	Matricial Parcial (-20%)	1	2	0,37
	2	4	0,28		2	4	0,30
	3	735	0,24		3	540	0,25
	4	2.164	0,19		4	1.855	0,21
	5	4.011	0,16		5	2.946	0,17
Matricial Parcial (-50%)	1	3	0,35	Matricial Parcial (-80%)	1	3	0,35
	2	3	0,29		2	4	0,29
	3	598	0,25		3	764	0,25
	4	2.001	0,21		4	2.525	0,21
	5	2.987	0,17		5	3.503	0,17

Figura 42: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal

Na Figura 43, as curvas de retenção da Figura 42 são associadas a funções contínuas, a fim de que seja possível aplicar o algoritmo de avaliação comparativa apresentado na seção 6.1.1. Assim:

Figura 43: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Uma vez efetuadas as aproximações das séries experimentais por funções contínuas, cabe a deflagração do procedimento de comparação. Na Tabela 19 encontram-se compiladas as informações referentes ao desenvolvimento deste procedimento.

Tabela 19: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia fina resinada (inspeção mensal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição			
Plena, para $\theta \geq 0,25$	$\theta(s) = 0,2500 + \frac{0,1200}{\left[1 + (0,4605 \cdot s)^{18,1214}\right]^{0,1183}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		2,5		3,2	
Plena, para $\theta < 0,25$	$\theta(s) = 0,1500 + \frac{0,1070}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,0014}\right]^{27,8583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		1800		2748	
-20%, para $\theta \geq 0,25$	$\theta(s) = 0,2500 + \frac{0,1200}{\left[1 + (0,3905 \cdot s)^{20,1214}\right]^{0,1183}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		2,9	16%	3,7	16%
-20%, para $\theta < 0,25$	$\theta(s) = 0,1540 + \frac{0,1030}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{1,9100}\right]^{29,6583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		2200	22%	3465	26%
-50%, para $\theta \geq 0,25$	$\theta(s) = 0,2500 + \frac{0,1100}{\left[1 + (0,3605 \cdot s)^{15,1214}\right]^{0,2583}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		2,8	12%	3,4	6%
-50%, para $\theta < 0,25$	$\theta(s) = 0,1540 + \frac{0,1030}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,0314}\right]^{27,8583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		2500	39%	3826	39%
-80%, para $\theta \geq 0,25$	$\theta(s) = 0,2540 + \frac{0,1160}{\left[1 + (0,3605 \cdot s)^{15,1214}\right]^{0,2483}}$	$\theta = 0,34$	$\Delta\%$	$\theta = 0,30$	$\Delta\%$
		2,9	16%	3,5	9%
-80%, para $\theta < 0,25$	$\theta(s) = 0,1500 + \frac{0,1080}{\left[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,0014}\right]^{23,8583}}$	$\theta = 0,20$	$\Delta\%$	$\theta = 0,17$	$\Delta\%$
		3000	67%	4495	64%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 44:

Figura 44: Variação do desvio percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia fina resinada, inspeções mensais).

Na Figura 44 observa-se mais uma vez a crescente propensão a desvios de aferição vinculada a aumentos no grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo. Percebe-se também que os maiores desvios de aferição ocorrem para os menores teores de umidade volumétrica.

Na Tabela 20 encontra-se o registro das informações referentes a acréscimos percentuais de aferição de sucção em função dos graus de deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo.

Tabela 20: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – areia fina resinada (referencial: medidas de sucção matricial plena)

Quadro-resumo: registro de <i>desvios percentuais de aferição</i> (em relação às medidas de sucção matricial plena) decorrentes de <i>deficiência de contacto</i>							
		Modalidade de Sucção (grau de deficiência de contacto)					
		Sucção Matricial Parcial (-20%)		Sucção Matricial Parcial (-50%)		Sucção Matricial Parcial (-80%)	
		θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
Periodicidade de inspeção (número de dias)	7	0,34	16%	0,34	29%	0,34	29%
		0,30	26%	0,30	23%	0,30	36%
		0,20	26%	0,20	40%	0,20	86%
		0,17	21%	0,17	42%	0,17	88%
	14	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
		0,34	8%	0,34	25%	0,34	39%
		0,30	11%	0,30	30%	0,30	36%
		0,20	25%	0,20	50%	0,20	75%
	28	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$
		0,34	16%	0,34	12%	0,34	16%
		0,30	16%	0,30	6%	0,30	9%
		0,20	22%	0,20	39%	0,20	67%
		0,17	26%	0,17	39%	0,17	64%

6.2.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais

Até o presente, foram efetuadas comparações entre curvas de retenção levantadas segundo períodos iguais. Para cada comparação realizada, o único parâmetro sujeito a variação era o grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo. Assim é que, para a areia fina resinada, houve três seqüências independentes de análise (uma para cada período de inspeção).

Desta feita, serão apresentados graficamente os DESVIOS PERCENTUAIS DE AFERIÇÃO em função dos PERÍODOS DE INSPEÇÃO e dos GRAUS DE DEFICIÊNCIA DE CONTACTO. Essa apresentação será efetuada para diversos TEORES DE UMIDADE VOLUMÉTRICA. Os “gráficos de barras” das Figuras 45 a 48 ilustram o acima exposto:

Figura 45: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,34$)

Figura 46: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,30$)

Figura 47: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,20$)

Figura 48: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia fina resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,17$)

A observação das Figuras 45 a 48 permite afirmar que o aumento da periodicidade de inspeção acarreta o abatimento das alturas das barras verticais.

Semelhantemente ao que foi constatado para a argila caolínica rosa sinterizada, a periodicidade de inspeção desempenha um papel relevante no que diz respeito à configuração dos dados experimentais. O aumento do tempo de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo propicia condições para a compensação do *deficit* de umidade gerado pela deficiência de contacto.

Portanto, o aumento da disponibilidade de tempo passa a representar um ‘caminho alternativo’ para a água do solo. A área de contacto disponível tem seu aproveitamento maximizado pela majoração da periodicidade de inspeção.

Outrossim, constata-se que os maiores desvios percentuais de aferição ocorrem para os menores teores de umidade volumétrica. Ou seja, o destacamento entre as curvas de retenção não acontece uniformemente. Trata-se de uma combinação de translação e distorção. De fato, quanto mais seco estiver o solo, menor será a quantidade de capilares em sua estrutura porosa. Ou seja, menor será a densidade superficial de terminais capilares. Daí decorre que o *deficit* de umedecimento do papel-filtro torna-se maior quanto menor for o teor de umidade volumétrica do solo estudado.

Dando continuidade ao processo de avaliação, passa-se a estudar o efeito da variação da periodicidade de inspeção dos corpos-de-prova (variação do tempo de interação entre o papel-filtro e o solo) sobre as aferições de sucção matricial e total. Apresentam-se na Figura 49 dois grupos de gráficos: um trio de curvas de sucção matricial plena (elas diferem entre si pela periodicidade com

que seus dados de origem foram coletados) e um trio de curvas de sucção total (diferem entre si pela mesma razão por que o fazem as curvas de sucção matricial plena).

Note-se que dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o segundo está sujeito a variação.

A Tabela 21, que antecede a Figura 49, é um registro dos dados experimentais que constituem as curvas de retenção referentes à sucção total.

Tabela 21: Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (areia fina resinada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)

periodicidade de inspeção: 7 dias			periodicidade de inspeção: 14 dias			periodicidade de inspeção: 28 dias		
período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
1	517	0,26	1	575	0,30	1	506	0,28
2	2.169	0,25	2	2.968	0,21	2	1.241	0,24
3	2.831	0,21	3	3.677	0,20	3	2.664	0,19
4	3.067	0,17				4	4.505	0,16

Figura 49: Representação gráfica das curvas de retenção de areia fina resinada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)

Os valores de sucção matricial levantados segundo as três periodicidades (7 dias, 14 dias e 28 dias) estão muito próximos entre si, de maneira que a superposição dessas curvas de retenção não sugere influência significativa da variação do tempo de equilíbrio sobre os resultados experimentais.

Analogamente, com respeito aos valores de sucção total, não se observa efeito sensível do tempo de equilíbrio sobre os resultados. Aliás, vale lembrar que para valores de sucção total superiores a 100 kPa não se observa efeito do tempo de equilíbrio (Marinho, 1994).

6.2.3. Efeito da resina sobre o comportamento da areia fina ($\bar{\Phi} = 0,15 \text{ mm}$)

Conforme explicitado na seção 4.3, os corpos-de-prova de areia fina e os de areia média foram fabricados pela adição de uma resina laminar aos grãos avulsos. Naturalmente, nesse ponto da descrição, surge um questionamento: a adição do aglomerante poderia ter alterado o comportamento do material no tocante à sua capacidade de retenção de água? Na busca da resposta para essa pergunta, foi consultado o trabalho de Vieira (2005), que apresenta o levantamento de curvas de retenção de diversos solos, entre os quais a areia fina que foi empregada no presente trabalho.

Vieira, no entanto, diferentemente do procedimento ora adotado, não adicionou qualquer aglomerante aos grãos de areia.

A diferença entre os métodos representa uma oportunidade para avaliar o efeito da resina sobre o comportamento do solo. A comparação entre as curvas de retenção obtidas por cada um dos procedimentos permite que se faça tal avaliação. Na Figura 50, apresentam-se plotados sobre um mesmo plano os dois gráficos.

Figura 50: Representação gráfica da alteração de comportamento da areia fina mediante a aplicação da resina laminar M como aglomerante. Ambas as curvas de retenção referem-se à sucção matricial plena para periodicidade semanal de inspeções, nos termos do presente trabalho

Foi marcante o efeito da resina sobre o comportamento da areia fina. A curva de retenção deste material passou a cobrir um espectro mais amplo de valores de sucção, o que indica que o aglomerante teve o condão de estreitar o espaço intersticial da matriz sólida, aumentando a propensão do material à sustentação de meniscos capilares. É por essa razão que os materiais granulares são denominados areia fina *resinada* e areia média *resinada*, nos termos do presente trabalho. No tocante

à capacidade de retenção de água, estes materiais apresentam desempenho muito superior ao que teriam se não contassem com a presença do aglomerante¹⁹.

6.3. Curvas de retenção de areia média resinada ($\bar{\Phi} = 0,60 \text{ mm}$)

6.3.1. Avaliação do efeito da deficiência de contacto sobre os resultados experimentais

A seguir, apresentam-se curvas de retenção para a areia média resinada. O procedimento de avaliação a ser empregado é o que foi definido na seção 6.1.1, em congruência com o exposto até aqui.

Na Figura 51, estão plotadas sobre um mesmo plano as curvas referentes às sucções matriciais parciais (deficiências de contacto de 20%, 50% e 80%) e a curva relativa à sucção matricial plena. Tomando esta última como referência, a avaliação consiste em observar a tendência de translação dos gráficos associada à variação crescente do grau de deficiência de contacto. Constam da próxima Figura as curvas de retenção construídas a partir de aferições efetuadas *semanalmente* (note-se que, dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o primeiro está sujeito a variação). Na Tabela 22, que antecede a Figura 51, encontram-se registrados os dados experimentais de que são constituídas as curvas de retenção da referida Figura.

Tabela 22: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas semanalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada

Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	1	0,30	Matricial Parcial (-20%)	1	1	0,31
	2	1	0,18		2	1	0,18
	3	1	0,11		3	2	0,11
	4	8	0,08		4	36	0,07
	5	335	0,04		5	1.000	0,05
Matricial Parcial (-50%)	1	1	0,30	Matricial Parcial (-80%)	1	1	0,29
	2	3	0,18		2	3	0,19
	3	4	0,10		3	9	0,11
	4	135	0,08		4	183	0,07
	5	2.946	0,04		5	6.371	0,04

¹⁹ Se consideradas individualmente, as características de retenção dos materiais estudados não são significativas para a consecução dos objetivos do presente trabalho. Em realidade, a diferença entre os comportamentos dos materiais é o que constitui o substrato para as inferências que comporão a análise experimental.

Conforme pontuado no texto do RESUMO, para os propósitos do presente trabalho, **os solos são instrumentos de investigação, ao passo que o método de aferição de sucção é o objeto de estudo.**

Figura 51: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal

É válida aqui a observação feita a respeito das curvas de retenção de argila caolinítica rosa sinterizada e das curvas de areia fina resinada. Isto é, quanto maior for o grau de deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo, maior será o acréscimo percentual verificado sobre as aferições de sucção matricial. Consoante o exposto acerca dos demais materiais estudados, percebe-se que as variáveis *deficiência de contacto* e *supervalorização de aferição* são diretamente proporcionais.

Como se tem procedido até este ponto da análise, submeter-se-ão os dados experimentais ao processo de avaliação comparativa apresentado na seção 6.1.1. Executando os passos do referido algoritmo, as curvas de retenção da Figura 49 serão aproximadas por funções contínuas (i.e. equações de Van Genuchten), as quais serão comparadas entre si segundo suas posições em relação à curva de retenção de sucção matricial plena.

Na Figura 52 estão representadas as curvas de retenção da Figura 50 subjacentes às funções contínuas que melhor as representam.

Figura 52: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: semanal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Dando prosseguimento à aplicação do algoritmo, serão calculadas as abscissas das funções de Van Genuchten para os valores de umidade estipulados com referenciais de comparação. Na Tabela 23 encontram-se registradas as informações referentes à aplicação do processo de avaliação comparativa das curvas de retenção.

Tabela 23: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção semanal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição					
		θ = 0,25		θ = 0,15		θ = 0,10	
Plena	$\theta(s) = 0,0369 + \frac{0,3831}{\left[1 + (1,8639 \cdot s)^{3,1530}\right]^{0,6828}}$	0,6		0,9		1,2	
-20%	$\theta(s) = 0,0380 + \frac{0,3820}{\left[1 + (1,1162 \cdot s)^{2,7737}\right]^{0,6395}}$	1,0	70%	1,7	90%	2,5	110%
-50%	$\theta(s) = 0,0351 + \frac{0,3949}{\left[1 + (1,3251 \cdot s)^{1,8601}\right]^{0,4624}}$	1,3	120%	3,0	230%	6,0	400%
-80%	$\theta(s) = 0,0244 + \frac{0,3856}{\left[1 + (1,2112 \cdot s)^{1,5758}\right]^{0,3654}}$	1,8	200%	5,6	520%	14,0	1070%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 53:

Figura 53: Variação do acréscimo percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções semanais).

Prossegue a avaliação do comportamento da areia média resinada no que diz respeito a deficiência de contacto. Na Figura 54 estão representadas as curvas de retenção de sucção matricial parcial, bem como a de sucção matricial plena. Todos esses gráficos foram construídos a partir de dados experimentais aferidos *quinzenalmente*.

A Tabela 24, que antecede a Figura 54, encerra em si o registro dos dados experimentais em que se baseiam as curvas plotadas na referida Figura.

Tabela 24: Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas quinzenalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada

Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	1	0,23	Matricial Parcial (-20%)	1	1	0,22
	2	1	0,17		2	2	0,18
	3	3	0,09		3	3	0,09
	4	11	0,08		4	16	0,08
	5	2.054	0,04		5	2.946	0,04
Matricial Parcial (-50%)	1	1	0,22	Matricial Parcial (-80%)	1	2	0,24
	2	2	0,16		2	2	0,18
	3	4	0,09		3	4	0,09
	4	20	0,08		4	25	0,08
	5	4.680	0,04		5	5.460	0,04

Figura 54: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal

A seguir, na Figura 55, apresentam-se as séries experimentais da Figura 54 subjacentes às funções contínuas que melhor as representam.

Figura 55: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: quinzenal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Da comparação das Figuras 52 e 55, percebe-se significativo estreitamento do espaço entre as curvas de retenção. Isto indica que o aumento da periodicidade de inspeção acarreta a atenuação da tendência de desvio de aferição de sucção, que está associada à deficiência de contacto entre o papel-filtro e o solo.

Este fato, já observado quando das avaliações dos demais materiais, mostra-se válido também para a areia média resinada. Em verdade, este resultado experimental está primordialmente relacionado à capacidade absorvente do papel-filtro. Em se aumentando o período de inspeção, tal capacidade é posta a trabalhar no sentido de compensar deficiências de contacto entre o papel e o solo.

Dando prosseguimento ao estudo das curvas de retenção, apresentam-se na Tabela 25 as informações referentes à aplicação do procedimento de avaliação comparativa das referidas curvas levantadas quinzenalmente.

Tabela 25: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção quinzenal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição					
		θ = 0,25		θ = 0,15		θ = 0,10	
Plena	$\theta(s) = 0,0253 + \frac{0,4047}{\left[1 + (3,4190 \cdot s)^{1,7686}\right]^{0,4346}}$	0,5		1,3		2,6	
-20%	$\theta(s) = 0,0320 + \frac{0,3880}{\left[1 + (2,7099 \cdot s)^{1,7176}\right]^{0,4164}}$	0,7	40%	1,9	46%	4,2	62%
-50%	$\theta(s) = 0,0290 + \frac{0,3910}{\left[1 + (1,9028 \cdot s)^{1,8640}\right]^{0,4635}}$	0,8	60%	1,9	46%	3,7	42%
-80%	$\theta(s) = 0,0391 + \frac{0,4009}{\left[1 + (0,8548 \cdot s)^{2,2767}\right]^{0,5608}}$	1,6	220%	3,1	138%	5,0	92%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio de medição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 56:

Figura 56: Variação do acréscimo percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções quinzenais).

Em seqüência, efetua-se a avaliação comparativa das curvas de retenção de areia média resinada construídas segundo periodicidade *mensal*. Conforme feito até o presente, serão apresentadas as séries de pontos experimentais (Figura 57), seguidas das funções contínuas que melhor as representam (Figura 58). Será deflagrado, então, o algoritmo de avaliação comparativa, cujos dados básicos encontram-se compilados na Tabela 27.

Por sua vez, a Tabela 26, que antecede as Figuras 57 e 58, presta-se a indicar o registro dos dados experimentais que compõem as curvas de retenção plotadas nas referidas Figuras.

Tabela 26 : Registro dos pares ordenados (s, θ) obtidos pelas aferições efetuadas mensalmente em laboratório. Dados referentes à areia média resinada

Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	Modalidade de Sucção	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
Matricial Plena	1	1	0,25	Matricial Parcial (-20%)	1	1	0,23
	2	2	0,16		2	2	0,16
	3	5	0,11		3	5	0,11
	4	5.070	0,08		4	4.680	0,07
	5	7.317	0,04		5	8.673	0,04
Matricial Parcial (-50%)	1	2	0,24	Matricial Parcial (-80%)	1	2	0,27
	2	2	0,16		2	2	0,16
	3	6	0,12		3	7	0,11
	4	5.460	0,08		4	7.433	0,08
	5	8.708	0,04		5	10.120	0,04

Figura 57: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal

Figura 58: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada, correspondentes à sucção matricial plena, bem como às sucções matriciais parciais. Periodicidade de inspeção: mensal (sobreposição das funções contínuas correspondentes ao equacionamento das curvas de retenção)

Na medida que o período de inspeção é dilatado, torna-se notória a progressiva aproximação entre as curvas de retenção. A comparação das Figuras 52, 55 e 58 permite afirmar que o aumento do tempo de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo corresponde a um avizinhamento das curvas, processo este que tende à superposição das referidas curvas.

Uma vez mais, empregar-se-á o procedimento de avaliação quantitativa adotado para os gráficos apresentados anteriormente. Assim, consoante o demonstrado na Tabela 27:

Tabela 27: Registro das informações relativas à aplicação do procedimento de comparação das curvas de retenção de areia média resinada (inspeção mensal)

Sucção Matricial	Equação da curva de retenção (Van Genuchten)	s(θ) [kPa] / desvio percentual de aferição					
		θ = 0,25		θ = 0,15		θ = 0,10	
Plena	$\theta(s) = 0,0615 + \frac{0,3785}{\left[1 + (1,7169 \cdot s)^{2,0655}\right]^{0,5159}}$	1,0		2,2		4,8	
-20%	$\theta(s) = 0,0565 + \frac{0,3935}{\left[1 + (2,1234 \cdot s)^{1,7836}\right]^{0,4564}}$	1,0	0%	2,7	23%	6,9	44%
-50%	$\theta(s) = 0,0607 + \frac{0,3793}{\left[1 + (2,0067 \cdot s)^{1,8011}\right]^{0,4448}}$	1,0	0%	3,0	36%	8,3	73%
-80%	$\theta(s) = 0,0566 + \frac{0,3734}{\left[1 + (0,9287 \cdot s)^{0,9412}\right]^{0,8471}}$	1,3	30%	4,9	123%	14,8	208%

Plotando os pares ordenados {deficiência de contacto ; desvio percentual de aferição}, obtém-se o gráfico que consta da Figura 59:

Figura 59: Variação do acréscimo percentual das aferições de sucção matricial em função do grau de deficiência de contacto (areia média resinada, inspeções mensais).

A Tabela 28 é um quadro-resumo que reúne as principais informações acerca de desvios de aferição observados para a areia média resinada.

Tabela 28: Matriz descritiva da tendência de desvio de aferição associada à deficiência de contacto – areia média resinada (referencial: medidas de sucção matricial plena)

Quadro-resumo: registro de <i>desvios percentuais de aferição</i> (em relação às medidas de sucção matricial plena) decorrentes de <i>deficiência de contacto</i>								
		Modalidade de Sucção (grau de deficiência de contacto)						
		Sucção Matricial Parcial (-20%)		Sucção Matricial Parcial (-50%)		Sucção Matricial Parcial (-80%)		
		θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	
Periodicidade de inspeção (número de dias)	7	0,25	70%	0,25	120%	0,25	200%	
		0,15	90%	0,15	230%	0,15	520%	
		0,10	110%	0,10	400%	0,10	1070%	
	14	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	
		0,25	40%	0,25	60%	0,25	220%	
		0,15	46%	0,15	46%	0,15	138%	
		0,10	62%	0,10	42%	0,10	92%	
	28	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	θ	$\Delta\%$	
		0,25	0%	0,25	0%	0,25	30%	
		0,15	23%	0,15	36%	0,15	123%	
		0,10	44%	0,10	123%	0,10	208%	

6.3.2. Avaliação do efeito do tempo e da umidade sobre os resultados experimentais

O efeito do *tempo* sobre os resultados experimentais foi observado de maneira esparsa ao longo da seção 6.3.1. A seguir, será consolidada a avaliação do papel desempenhado por esta variável na determinação da acurácia do método de aferição de sucção tratado no presente estudo. Em paralelo, será contemplado o parâmetro *teor de umidade volumétrica* quanto aos efeitos que produz sobre os desvios de aferição percebidos ao longo das curvas de retenção.

Apresentam-se nas Figuras 60 a 62, “gráficos de barras” em que estão indicados os DESVIOS PERCENTUAIS DE AFERIÇÃO como função do PERÍODO DE INSPEÇÃO e do GRAU DE DEFICIÊNCIA DE CONTACTO. Cada gráfico corresponde a medidas tomadas para um TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA do material estudado. Assim é que a comparação entre esses gráficos equivale à contemplação dos efeitos produzidos por esta última variável sobre os desvios percentuais de aferição.

Figura 60: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,25$)

Figura 61: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,15$)

Figura 62: Representação gráfica da relação entre as variáveis TEMPO e CONTACTO no que diz respeito aos DESVIOS DE AFERIÇÃO (areia média resinada, considerando TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA $\theta = 0,10$)

À semelhança do que foi verificado para os demais materiais, o aumento do período de inspeção acarreta redução dos desvios percentuais de aferição. Ademais, na medida que se tomam medidas de sucção maiores (i.e. teores de umidade volumétrica menores), observam-se maiores desvios percentuais de aferição.

Dando continuidade ao processo de avaliação, passa-se a estudar o efeito da variação da periodicidade de inspeção dos corpos-de-prova (variação do tempo de interação entre o papel-filtro e o solo) sobre as aferições de sucção matricial e total. Apresentam-se na Figura 63 dois grupos de gráficos: um trio de curvas de sucção matricial plena (elas diferem entre si pela periodicidade com que seus dados de origem foram coletados) e um trio de curvas de sucção total (diferem entre si pela mesma razão por que o fazem as curvas de sucção matricial plena).

Antecede a Figura 63 a Tabela 29, em que se observam os dados experimentais que embasam as curvas de retenção plotadas na referida Figura.

Note-se que, dentre os três parâmetros de estudo – contacto, tempo e constituição – apenas o segundo está sujeito a variação.

Tabela 29: Registro dos pares ordenados que compõem as curvas de retenção referentes à sucção total (areia média resinada; inspeções semanais, quinzenais e mensais)

periodicidade de inspeção: 7 dias			periodicidade de inspeção: 14 dias			periodicidade de inspeção: 28 dias		
período (semana)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (quinzena)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ	período (mês)	sucção: s [kPa]	teor de umidade volumétrica: θ
1	501	0,18	1	488	0,23	1	495	0,23
2	495	0,11	2	496	0,17	2	501	0,16
3	506	0,08	3	507	0,09	3	511	0,11
4	834	0,04	4	506	0,08	4	5.181	0,07
			5	2.558	0,04	5	9.170	0,04

Figura 63: Representação gráfica das curvas de retenção de areia média resinada correspondentes à sucção matricial plena e à sucção total. Periodicidades de inspeção: semanal, quinzenal e mensal (susceptibilidade das medições a alterações na variável tempo)

Os valores de sucção matricial levantados segundo as três periodicidades (7 dias, 14 dias e 28 dias) estão bastante próximos entre si, de maneira que a superposição dessas curvas de retenção indica a exiguidade do efeito do tempo sobre as aferições de sucção.

Analogamente, quanto aos valores de sucção total, não se observa efeito sensível do tempo de equilíbrio sobre os resultados. Aliás, vale lembrar que para valores de sucção total superiores a 100 kPa não se observa efeito do tempo de equilíbrio (Marinho, 1994).

6.4. Avaliação comparativa das curvas de retenção

A observação das curvas de retenção permite que se façam algumas avaliações, dentre as quais vale destacar:

6.4.1. Susceptibilidade dos três materiais à variação do grau de deficiência de contacto (estrutura da matriz sólida; teor de umidade volumétrica do meio poroso)

Cabe ressaltar a proporcionalidade direta existente entre as variáveis *grau de deficiência de contacto* e *desvio percentual de aferição*. Al-Khafaf e Hanks (1972) observaram que descontinuidades na interface solo / papel-filtro acarretam desvios sobre as aferições de sucção. Além disso, esses pesquisadores associaram deficiências de contacto a restrições ao fluxo d'água do solo para o papel-filtro.

Os resultados experimentais do presente trabalho corroboram essas constatações, e apontam outras variáveis intervenientes no processo: a *estrutura da matriz sólida do solo*, o *teor de umidade volumétrica do meio poroso* e o *tempo de interação entre o papel-filtro e o solo*.

Quanto à *estrutura da matriz sólida do solo*, nota-se que:

A observação dos conjuntos de Figuras: 32 a 34, 45 a 48 e 60 a 62 permite identificar os materiais mais susceptíveis de desvios de aferição de sucção gerados por deficiência de contacto.

A seqüência crescente de tal susceptibilidade fica da seguinte maneira: areia fina resinada, argila caolinítica rosa sinterizada e areia média resinada.

A areia fina resinada, pelo tamanho de seus grãos ($\Phi = 0,15$ mm) e pela quantidade de resina que recebeu (10% do peso dos grãos), apresenta interstício mais fino do que os demais materiais. Por essa razão, são menores os desvios de aferição observados para este material do que os registrados para os demais.

A areia média resinada, pelo tamanho de seus grãos ($\Phi = 0,60$ mm), não formou um espaço intersticial tão estreito quanto o verificado para areia fina resinada, apesar de haver recebido a mesma quantidade de resina que este material. De fato, os grãos de areia média apresentam diâmetros quatro

vezes maiores do que os de areia fina. Por essa razão, são maiores os desvios de aferição observados para este material do que para os demais.

A argila calonítica rosa sinterizada ocupa posição intermediária no grupo de materiais estudados. Apesar de apresentar os menores grãos dentre todos os avaliados, este material foi produzido com um índice de vazios mais alto do que os das areias (aproximadamente 1,09, contra 0,75 das areias).

Quanto ao *teor de umidade volumétrica* do meio poroso em estudo, observou-se que os maiores desvios de aferição estão associados às mais baixas umidades. De fato, quanto mais seco estiver o meio poroso, menor será a quantidade de capilares em seu interstício. Ou seja, menor será a densidade superficial de terminais capilares, e mais seco estará o papel-filtro ao fim de um período de interação com o solo.

6.4.2. Susceptibilidade dos três materiais ao efeito do tempo

Conforme exposto ao longo das seções 6.1, 6.2 e 6.3, a expansão do tempo de interação entre o papel-filtro e a água intersticial do solo acarreta a atenuação das distorções de aferição de sucção matricial decorrentes de deficiência de contacto entre o solo e o papel-filtro. As alturas das barras descrevem bem este fenômeno.

O aumento do período de inspeção propicia à água intersticial condições para migrar até o papel-filtro, umedecê-lo nas regiões onde houver contacto, e migrar a partir destas regiões até aquelas onde não houver contacto. Deste modo, é possível afirmar que o aumento do período de inspeção representa um ‘caminho alternativo’ para a migração da água do solo.

Por outro lado, no que diz respeito às aferições de sucção total, a dilatação do período de inspeção não implicou alterações sensíveis nas formas das curvas de retenção. Isso pode sugerir que o tempo necessário para o atingimento do equilíbrio entre o papel-filtro e o solo seja menor ou igual a sete dias, o que é coerente com a prática internacional. Aliás, é sabido que a influência do tempo de equilíbrio sobre a acurácia das medições somente é sensível para aferições de sucção total que sejam inferiores a 100 kPa (Marinho, 1994 ; Bulut, 2005). No presente trabalho, esta sucção foi da ordem de 500 kPa, por conta da saturação inicial dos corpos-de-prova em solução salina.

7. Conclusões

O método do papel-filtro é uma ferramenta eficiente para o estudo do comportamento de solos não saturados. Presta-se a aferir um amplo espectro de valores de poro-pressão negativa, e é de simples aplicação. Apresenta, porém, algumas limitações. É fundamental tê-las em mente quando do planejamento e da execução dos ensaios, a fim de que os resultados obtidos sejam confiáveis.

O presente trabalho apresentou evidências experimentais que indicam que a acurácia das aferições efetuadas por este método pode ser significativamente afetada pela **deficiência de contacto** entre o papel-filtro e o solo estudado. Portanto, irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra podem ser responsáveis por medições incorretas. A magnitude do erro de medição é diretamente proporcional ao grau de deficiência de contacto.

Com respeito à **estrutura porosa dos materiais**, observou-se que o efeito da deficiência de contacto é mais significativo em solos com grãos grossos (e.g. $\phi = 0,60$ mm) ou com alto índice de vazios ($e \geq 1,00$). De fato, *quanto menor for o tamanho médio dos grãos de uma massa de solo ou menor for seu índice de vazios, mais profusa será a rede capilar* instaurada no interstício de sua matriz sólida (i.e. maior será a quantidade de canais capilares por unidade de volume). Conseqüentemente, *maior será a densidade superficial de terminais capilares* (quantidade de terminais capilares por unidade de área de contacto do solo). Nessas condições, *menor será em valor absoluto o deficit de umedecimento do papel-filtro* por ocasião de seu contacto deficiente com o solo. Deste modo, *menor será o desvio de aferição* associado à deficiência de contacto.

Quanto ao **efeito do tempo** sobre os resultados experimentais, observou-se que o aumento do período de exposição do papel-filtro à água intersticial do solo tende a mitigar a tendência de majoração das aferições de sucção, esta associada à redução do contacto entre o papel-filtro e a superfície do solo. Portanto, os parâmetros *tempo* e *deficiência de contacto* agem em sentidos opostos quando sujeitos a variações progressivas.

Conclui-se também que o tempo de equilíbrio não constitui fator crítico para medidas de sucção total que sejam maiores ou iguais a 500 kPa. Por outro lado, sabe-se da literatura internacional (e.g. Marinho, 1994; Bulut, 2005 etc.) que o tempo é um fator crítico para medidas de sucção total menores ou iguais a 100 kPa.

Quanto ao **teor de umidade volumétrica**, nota-se que esta variável é inversamente proporcional ao desvio percentual de aferição. Isto é, quanto mais seco estiver o solo cuja sucção está a medir-se, maior será o desvio de aferição observado. Portanto, o destacamento entre as curvas de retenção não ocorre de maneira uniforme. Trata-se de uma combinação de translação e distorção, dada em função da estrutura da matriz sólida do solo.

8. Recomendações para futuras pesquisas

A fabricação dos corpos-de-prova de areia (tanto os de areia fina como os de areia média) envolveu o emprego de uma resina laminar. As curvas de retenção destas areias demonstram que tal aglomerante exerceu influência significativa sobre a estrutura desses materiais. A resina estreitou o espaço intersticial, propiciando a sustentação de valores mais altos de poro-pressão negativa. A observação das curvas de retenção das amostras de areia permite que nos indaguemos acerca da possibilidade de fabricar, pelo emprego desta resina, pedras porosas com altos valores de entrada de ar. Provavelmente, a combinação de grãos de areia de tamanhos ligeiramente distintos seria capaz de proporcionar uma estrutura porosa mais bem entrosada, e conseqüentemente mais propensa à sustentação de meniscos. O estudo de novas combinações de grãos associadas ao uso da resina pode ser o tema de futuras pesquisas.

9. Referências bibliográficas

Al-Khafaf, S. & Hanks, R.J. (1972). “Evaluation of the Filter-Paper Method for Estimating Soil Water Potential”, Soil Science No. 4, vol. 117, pp. 194 – 199.

Anunciação, P.E.M. (1978). *Equação da pressão do vapor saturado*, Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas para obtenção do Grau de Mestre em Ciências pela Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Bulut, R., Lytton, R. & Wray, W.K. 2001. “Soil Suction Measurements by Filter Paper”, *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 115, pp.243 - 261. Houston, Estados Unidos

Bulut, R., Lytton, R. & Wray, W.K. 2005. “Free energy of water (suction) in filter-papers”, *Geotechnical Testing Journal* No. 28, vol.4, pp. 355 – 364.

Campbell, G. S. & Gee, G.W. (1986). “Water Potential: Miscellaneous Methods”, capítulo 25 de *Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods*. SSSA Book Series: 5, second edition.

Chandler, R.J. & Gutierrez, C.I. (1986). “The filter-paper method of suction measurement”, *Géotechnique*, vol. 36, no. 2, pp. 265 – 268.

Costa, E.V. (2003). “Medidas da Umidade Relativa do Ar em um Ambiente Fechado”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 25. No. 3, Setembro de 2003, pp. 346 – 348.

Deka, R.N.; Wairu, M.; Mtakwa, P.W.; Mullins, C.E.; Veenendaal, E.M. & Townend, J. “Use and accuracy of the filter-paper technique for measurement of soil matric potential”, *European Journal of Soil Science*, vol.46, pp. 233 – 238.

Dineen, K. (1997). *The influence of soil suction on compressibility and swelling*, Tese apresentada ao Imperial College of Science, Technology & Medicine da Universidade de Londres como cumprimento de parte dos requisitos para a obtenção do título de PhD na faculdade de Engenharia, Londres, Reino Unido.

Edlefsen, N.E. & Anderson, A.B.C. (1943). “Thermodynamics of soil moisture”; A Journal of Agricultural Science – vol. 15, n.2

Feltre, R. (2000). *Físico-Química*, 5a edição, Editora Moderna, São Paulo.

Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque.

Fredlund, D.G. & Houston, S.L. (1997). *Unsaturated Soil Engineering Practice*, Geotechnical Special Publication no. 68, Geo Institute, American Society of Civil Engineers

Leong, E.C., He, L. & Rahardjo, H. (2002). “Factors affecting the filter-paper method for total and matric suction measurements”, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 25, no. 3, pp.322-333.

Lu, N. & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque.

Marinho, F.A.M. (1994). “Medição de sucção com o método do papel-filtro” , *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações* ,vol. 2, pp. 515 – 522.

Marinho, F.A.M. & Pinto, C.S. (1997). “Soil suction measurement using a tensiometer”. *Proc., Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, pp. 249 – 254.

Marinho, F.A.M. (2000). “Soil Suction Measurement in Soils and Porous Materials” *GeoDenver 2000: Unsaturated Soils in Engineering Practice – Short Course Notes*, ASCE, Denver, Colorado.

Marinho, F.A.M. (2000). “Discussion on ‘The Use of Miniature Pore Pressure Transducers in Measuring Matric Suction in Unsaturated Soils’ by K.K. Muralleetharan and K.K. Granger”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 23. No. 4, Dezembro de 2000, pp. 532 – 534.

Marinho, F.A.M. & Gomes, J.E.S. (2002). “Medição de sucção pelo emprego da técnica do papel-filtro” , *X Congresso Internacional de Iniciação Científica*, São Carlos, São Paulo.

Marinho, F.A.M. & Oliveira, O. M. (2006). “The filter paper method revisited”, *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 20, n°. 10.

Marinho, F.A.M. (2004). “Mecânica dos Solos Não Saturados – Notas de Aula”, Grupo de Pesquisa em Solos Não Saturados, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Montieth & Unsworth (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2nd edition, Hodder Arnold, Londres.

Muralleetharan, K.K. & Granger, K.K. (1999). “The Use of Miniature Pore Pressure Transducers in Measuring Matric Suction in Unsaturated Soils”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 22. No. 3, Setembro de 1999, pp. 226 - 234.

Oliveira, O.M. (2004). *Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado*, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, SP.

Pinto, C.S. (2002). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, 2ª Edição, Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1994). “Discussion on ‘A new instrument for the measurement of soil moisture suction’ by F.A.M. Marinho and R.J. Chandler”, *Géotechnique*, Vol. 44, No. 3, pp. 551 – 556.

Ridley, A.M.; Dineen, K.; Burland, J.B. & Vaughan P.R. (2003). “Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering”, *Géotechnique*, vol. 53, No. 2, pp. 241 – 253.

Take, W.A.; Bolton, M.D. (2003) “Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction”, *Géotechnique*, vol. 53, no. 2, pp. 159 – 172.

Vieira, A.M. (2005). *Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos*, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, SP.

Wang, X., e Benson, C.H. (2004). “Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve.” *Geotechnical Testing Journal*, 27 (2), 163-172.