UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**“ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE SOLOS A
PARTIR DO ENSAIO DE ASCENSÃO CAPILAR”**

TANIA ZAPATA COACALLA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

VERSÃO CORREGIDA

São Carlos-SP

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Z35e Zapata Coacalla, Tania
Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar. / Tania Zapata Coacalla; orientador Orencio Monje Vilar. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Ascensão capilar. 2. Otimização. 3. Condutividade hidráulica saturada. 4. Função condutividade hidráulica . I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira TÂNIA ZAPATA COACALLA.

Título da dissertação: "Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar".

Data da defesa: 31/08/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Orencio Monje Vilar** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Dr. **Miguel Alfaro Soto**
(UNESP – Campus de Rio Claro)

APROVADA

Profª. Drª. **Gene Stancati**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

A Deus, pelo seu cuidado e amor de cada dia, e a minha amada família pelo amor incondicional, e apoio nos momentos difíceis, que me deram fortaleza para continuar.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Celso e Brunilda e meus irmãos Giovanna, Roxana e Celso, pela credibilidade e apoio incondicional, e serem um pilar de força na minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Orencio Monje Vilar, pela grande paciência, atenção e grande apoio durante o processo de definição e orientação deste trabalho; e dar-me o exemplo de ter sempre uma boa atitude ante os problemas. Muito obrigado Professor!.

Ao CNPq – Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos os professores do Departamento de Geotecnia, pela colaboração e pela oportunidade de realização deste trabalho, em especial ao professor Nélio Gaioto por seu exemplo de perseverança.

Aos técnicos do laboratório, José, Oscar, Benedito e Antonio pelo apoio durante o processo da pesquisa.

Aos funcionários Mariestela, Neiva, Herivelto, e Alvaro, que foram sempre tão solícitos e amáveis no atendimento das minhas necessidades, e serem sempre amigáveis.

A meus queridos amigos Camilo, Daniel, Albano, Simone, Patricia (Chilena), Loana, Patricia (Perú), Jaqueline e Patricia (Brasil), pela entranhável amizade e as palavras de ânimo que sempre me deram.

A meus colegas Italo, Thiago, Alberto, Claudia, Karina, Mariana, Rafaela, Ana Elisa, Vinicius e Gian Franco, pelo companherismo e colaboração durante o mestrado.

Aos meus queridos amigos cristãos: Cecilia, Sra Elba, Sra, Lucrecia, Sra Heloisa, Miriam, Mery, Daniel, Irene, Andrea, Cristian, Ricardo, Eduardo, Marcio, Jorge, Adriana e Hugo, pela fé compartilhada e longo aprendizado.

A meus amigos Cecilia e Henry, por ter-me dado muita força durante os primeiros meses da minha estadia, e brindar-me sempre sua amizade.

A meus amigos de Puno-Perú, Nancy, Gilda, Roxana, Fredy, Emilio, Roberto, Jesús, Adolfo, Gino, Ruben, Gilmer, Pedro e Clovis, pela perdurável amizade: ainda longe sempre estiveram apoiando e incentivando no processo do mestrado.

Ao povo brasileiro por acolher-me com alegria e terem sempre um espírito fraternal para com os estrangeiros, fazendo-me sentir em casa.

*Jesus sentou-se, chamou os doze e lhes disse:
“Se alguém quer ser o primeiro, deve ficar em último lugar
e servir a todos.”
Marcos 9: 35*

RESUMO

ZAPATA, T. C. Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar, 2012.166p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o potencial do ensaio de ascensão capilar e de uma técnica de otimização de parâmetros para estimar os parâmetros hidráulicos dos solos. O ensaio de ascensão capilar é de execução simples e rápida e reflete um fenômeno condicionado pelas propriedades hidráulicas do solo. Na representação matemática da ascensão capilar, utilizou-se o modelo de Terzaghi (1943) que considerou tratar-se de uma condição de fluxo governada pela condutividade hidráulica saturada (k_s), e o modelo de Lu & Likos (2004b), que utilizaram a equação de Gardner (1958) para representar a função condutividade hidráulica, considerando que o fluxo se dá em meio não saturado. O processo de otimização utilizou a rotina SOLVER componente do programa EXCEL, e foi testado utilizando-se os dados experimentais de Lane & Washburn (1946) e de Zhang & Fredlund (2009). Em seguida, resultados de ascensão capilar de oito amostras de solos típicos do Estado do São Paulo, Brasil, foram modelados com os parâmetros derivados da técnica. Observou-se que tanto o modelo de Terzaghi (1943) quanto o de Lu & Likos (2004b) conseguiram reproduzir os resultados experimentais de ascensão capilar, com melhores resultados associados ao modelo de Lu & Likos (2004b) para a maior parte dos solos analisados. A previsão da condutividade hidráulica saturada, de forma geral, diferiu menos de uma ordem de grandeza dos valores medidos experimentalmente, embora maiores discrepâncias tenham sido notadas para determinados tipos de solos. O parâmetro de Gardner da função condutividade hidráulica resultou em valores da mesma ordem de grandeza dos valores reportados na literatura para solos similares. Os resultados sobre a aplicação do ensaio de ascensão capilar e da técnica de otimização mostraram-se promissores para a determinação de parâmetros hidráulicos dos solos analisados, com a vantagem de ter-se um procedimento simples e rápido para a finalidade descrita.

Palavras-chave: Ascensão capilar, Otimização, Condutividade hidráulica saturada, Função Condutividade hidráulica.

ABSTRACT

ZAPATA, T. C. Estimating the hydraulic properties of soils from capillary rise test, 2012.166p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

This study evaluates the potential of capillary rise test and a parameter optimization technique to estimate soil hydraulic parameters. The capillary rise is a simple and expedite test that is conditioned by soil hydraulic properties. In the mathematical representation of the capillary rise we used the model of Terzaghi (1943), who considered that saturated hydraulic conductivity commands the phenomenon and the model of Lu & Likos (2004b) who used the Gardner equation (1958) to represent the hydraulic conductivity function, considering that the flow takes place in a non-saturated condition. The optimization process used the SOLVER routine, component of the EXCEL program, that was firstly tested using experimental data of Lane & Washburn (1946) and Zhang & Fredlund (2009). Then, results of capillary rise of eight samples of typical soils of the State of São Paulo, Brazil, were modeled with the parameters derived from the technique. It was observed that both the Terzaghi (1943) and Lu & Likos (2004b) models were able to reproduce the experimental results of capillarity, although the best results were yielded by the model Lu & Likos (2004b) for most soils. The prediction of saturated hydraulic conductivity, in general, differed less than one order of magnitude of experimentally measured values, although larger discrepancies have been noted for certain types of soils. The resulting Gardner parameter of the hydraulic conductivity function were of the same order of magnitude of the values reported in the literature for similar soils. The results on the application of capillary rise test and optimization technique proved promising for the determination of soil hydraulic parameters analyzed, with the advantage of having a simple and rapid procedure for the purpose described.

Keywords: Capillary Rise, Optimization, saturated hydraulic conductivity, hydraulic conductivity function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxo através de um solo	24
Figura 2. Variação de k_s em função da variação da estrutura - Solo silto-argiloso compactado (OLSEN, 1962).	27
Figura 3. Influência do grau de saturação em areias. saturação (WALLACE, 1948. Apud LAMBE, 1951).	28
Figura 4. Influência do grau de saturação em argilas. Adaptada de Mitchell et al (1965)	28
Figura 5. Permeâmetro de carga constante	30
Figura 6. Esquema do ensaio de carga variável.	31
Figura 7. a) Curva de retenção; b) Curva de condutividade hidráulica. (LU & LIKOS, 2004a)	33
Figura 8. a) Histerese na curva de retenção; b) Histerese na função condutividade hidráulica (LU & LIKOS, 2004a)	34
Figura 9. Curva de retenção para solo arenoso, solo siltoso e solo argiloso. Adaptada de Fredlund & Xing (1994)	34
Figura 10. a) Curva de retenção para areias e argilas; b) Relação da Condutividade hidráulica e sucção. Adaptada de Hillel (1998)	35
Figura 11. Permeâmetro de regime permanente (KLUTE, 1965)	38
Figura 12: Esquema para ensaio de fluxo transiente num solo não saturado (KLUTE & DIRKSEN, 1986)	39
Figura 13: Equipamento para o ensaio do perfil instantâneo em laboratório	40
Figura 14. Equilíbrio mecânico do incremento capilar num tubo de pequeno diâmetro	42
Figura 15. Perfil do solo, comportamento da pressão da água (LU & LIKOS, 2004a)	44
Figura 16. Dependência da capilaridade com o raio dos poros, a tensão superficial e a sucção matricial (FREDLUND & RAHARDJO, 1993)	45
Figura 17. A relação do processo de ascensão capilar <i>versus</i> grau de saturação em solos (Linha A processo de drenagem; Linha B processo de ascensão capilar) (LAMBE, 1951)....	45
Figura 18. Máxima altura de ascensão capilar com solo idealizado composto de partículas uniformes, 1) arranjo cúbico (SC); 2) arranjo tetraédrico (TH). (LU & LIKOS, 2004a)	47
Figura 19. Fluxo de ascensão capilar como função de z (MALIK et al, 1989)	48
Figura 20. Modelo de Terzaghi, em coluna vertical.	49
Figura 21. Condição do solo para o modelo de Lu & Likos (2004b)	51

Figura 22. Condutividade hidráulica não saturada pelo modelo de Gardner de um parâmetro a) Comparação com dados experimentais; b) Representação geral para três solos típicos (LU & LIKOS, 2004a)	51
Figura 23. Ensaio de Capilaridade e Curvas padrão de k_s (Adaptada de BADILLO, 1990) ..	53
Figura 24. Arranjo do ensaio de permeabilidade capilar horizontal.	53
Figura 25. Análise dos resultados experimentais do ensaio de permeabilidade capilar.....	55
Figura 26. Relação entre problema inverso e direto.....	58
Figura 27. Ensaio de Permeabilidade de carga variável: a) processo de saturação das amostras,	71
Figura 28. Materiais utilizados para moldagem das amostras: 1) balança de precisão de 0.01; 2) molde partido; 3) base inferior; 4) disco de polietileno; 5) Paquímetro para controle das alturas de compactação.	72
Figura 29. Equipamento para compactação dinâmica do corpo de prova.....	72
Figura 30. Corpos de prova em processo de secagem ao ar.....	73
Figura 31. Equipamento utilizado para o ensaio de ascensão capilar em solos.	73
Figura 32. Ensaio de ascensão capilar, em andamento.	74
Figura 33. Avanço da frente de umedecimento ao longo do tempo (Solo Tremembé).....	75
Figura 34. Resultados dos ensaios de ascensão capilar realizados por Lane & Washburn (1946)	80
Figura 35. Resultados dos ensaios de ascensão capilar realizados por Lane & Washburn (1946)	80
Figura 36. Ajuste realizado para o solo C-4 de Lane & Washburn (1946), considerando diferentes termos da série da solução – Modelo de Lu & Likos (2004) (Primeira opção).....	82
Figura 37. Ajuste realizado para o solo C-4 de Lane & Washburn (1946), considerando diferentes termos da série da solução – Modelo de Lu & Likos(1) (2004) (Segunda opção)..	82
Figura 38. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-1(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	84
Figura 39. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-2 (Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	85
Figura 40. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-3(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	86
Figura 41. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-4 (Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	87

Figura 42. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-5(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	88
Figura 43. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-6(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	89
Figura 44. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2009) para o solo C-7(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	90
Figura 45. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-8(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c	91
Figura 46. Relação ascensão capilar versus tempo dos solos estudados por Zhang & Fredlund (2009).....	94
Figura 47. Ajuste realizado para o solo CL de Zhang &Fredlund (2009) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Primeira opção).....	95
Figura 48. Ajuste realizado para o solo CL de Zhang &Fredlund (2009) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Segunda opção).....	95
Figura 49. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo CL, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c	97
Figura 50. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo ML, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c	98
Figura 51. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo SC, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2009), e valores de k_s e h_c	99
Figura 52. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo SM, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c	100
Figura 53. Comparação das curvas de Condutividade Hidráulica versus sucção obtida por Zhang & Fredlund (2009), com as obtidas considerando os parâmetros k_s e β , fornecidos pelo Programa SOLVER.....	102
Figura 54. Ascensão capilar versus tempo, para os oito solos ensaiados no laboratório.....	104
Figura 55. Ajuste realizado para o solo A8 (Itapetininga - Piraju) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Primeira opção).....	105
Figura 56. Ajuste realizado para o solo A8 (Itapetininga – Piraju) – Proposta de Lu & Likos(1) (2004) (Segunda opção)	105
Figura 57. Ascensão capilar versus tempo do solo A1, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c	108
Figura 58. Ascensão capilar versus tempo do solo A2, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c	109

Figura 59. Ascensão capilar versus tempo do solo A3, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .	110
Figura 60. Ascensão capilar versus tempo do solo A4, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .	111
Figura 61. Ascensão capilar versus tempo do solo A5, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .	113
Figura 62. Ascensão capilar versus tempo do solo A6, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .	114
Figura 63. Ascensão capilar versus tempo do solo A7, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004); e valores de k_s , h_c .	115
Figura 64. Ascensão capilar versus tempo do solo A8, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .	116
Figura 65. Velocidade de ascensão capilar versus tempo dos oito solos ensaiados no laboratório.	118
Figura 66. Perfil de variação da umidade nas diferentes alturas durante o processo de ascensão capilar nos solos	120
Figura 67. Comparação da condutividade hidráulica saturada estimada e experimental considerando: a) Modelo de Terzaghi (1943); b) Modelo de Lu & Likos (2004).	124
Figura 68. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo o tipo de solo. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).	125
Figura 69. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo a percentagem de finos.	125
Figura 70. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo o tipo de solo. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).	133
Figura 71. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo a percentagem de finos.	134
Figura 72. Apresentação das células variáveis, a célula objetivo, os dados experimentais de t e z , e a curva estimada considerado os valores iniciais de k_s , h_c e β .	151
Figura 73. Janela “Parâmetros SOLVER”	152
Figura 74. Janela para colocar as restrições das variáveis.	152
Figura 75. Janela de Opções para o controle do processo de otimização.	154
Figura 76. Processo de iteração	154
Figura 77. Janela de resultados do SOLVER.	155
Figura 78. Valores finais dos parâmetros variáveis.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da Condutividade hidráulica (CASAGRANDE & FADUM, 1940).....	25
Tabela 2. Valores de k_s , em depósitos naturais. (TERZAGHI & PECK, 1967).....	26
Tabela 3. Relação estreita entre o grau de saturação e a Condutividade hidráulica não saturada.	36
Tabela 4. Relação estreita entre a sucção matricial e a Condutividade hidráulica não saturada	36
Tabela 5. Relação estreita entre o conteúdo de umidade volumétrica e a Condutividade hidráulica não saturada.....	37
Tabela 6. Conceitos estabelecidos por Buckingham e sua equivalência na atualidade.	43
Tabela 7. Valores de β sugeridos por Elrick et al (1989).....	52
Tabela 8. Altura capilar segundo o tipo do solo (PERLOFF & BARON, 1991).....	55
Tabela 9. Altura aproximada da ascensão capilar em diferentes tipos de solos	56
Tabela 10. Faixas típicas da ascensão capilar em solos (Mc CARTHY, 1977; Apud. C. VENKATRAMAIAH)	56
Tabela 11. Ascensão máxima capilar para solos de diferentes texturas.	56
Tabela 12. Características dos solos ensaiados por Lane & Washburn (1946) e resultados de condutividade hidráulica saturada (k_s) e máxima altura de ascensão capilar (h_c).	68
Tabela 13. Características dos solos ensaiados por Zhang & Fredlund (2009), porosidade, condutividade hidráulica saturada (k_s) e máxima altura de ascensão capilar.....	68
Tabela 14. Local de amostragem dos solos pertencentes ao Estado de São Paulo	69
Tabela 15. Índices físicos; classificação SUCS, e parâmetros de compactação dos oito solos analisados nesta pesquisa.	70
Tabela 16. Índices físicos dos corpos de prova antes do ensaio e a condutividade hidráulica saturada, k_s	70
Tabela 17. Células variáveis para os modelos de Terzaghi e Lu & Likos	76
Tabela 18. Resultados obtidos pelo Programa SOLVER, com as propostas de Terzaghi e Lu & Likos (Variando k_s , h_c , β) e Lu & Likos (1) (Variando h_c , β). Solos estudados por Lane & Washburn (1946).....	83
Tabela 19. Parâmetro β estimado	92
Tabela 20. Comparação do valor de β estimados e fornecidos pelo SOLVER	93

Tabela 21. Ajustes com as propostas de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) com o programa SOLVER, com seus respectivos parâmetros de k_s , h_c e β . Solos estudados por Zhang & Fredlund (2009).....	96
Tabela 22. Parâmetro β – solos de Zhang & Fredlund	101
Tabela 23. Índices físicos dos corpos de prova após compactação.	103
Tabela 24. Índices físicos dos corpos de prova submetidos aos ensaios de ascensão capilar, após a secagem e depois do finalizado o ensaio de ascensão capilar.	103
Tabela 25. Parâmetros k_s , h_c e β obtidos no processo de otimização para os oito solos ensaiados, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004).	106
Tabela 26. Parâmetro β obtido pelo SOLVE (Parâmetro de Gardner (1958))	117
Tabela 27. Perfil da Variação do Teor de umidade ao longo do corpo de prova.	119
Tabela 28. Variação do Grau de saturação ao longo do corpo de prova, medido a partir da base.	119
Tabela 29. Comparação dos resultados de k_s , obtidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004).	123
Tabela 30. Análise ANOVA, para o parâmetro k_s	124
Tabela 31. Parâmetros de h_c , obtidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e Lu & Likos(2004).	126
Tabela 32. Análise de ANOVA para o parâmetro h_c	127
Tabela 33. Valores de β - Parâmetro de Gardner (1958).....	128
Tabela 34. Análise ANOVA para o parâmetro β	128
Tabela 35. Tempo decorrido para que a frente de umedecimento atinja o topo do corpo de prova	129
Tabela 36. Velocidade residual do processo da ascensão capilar nos oito solos ensaiados ..	130
Tabela 37. Valores da condutividade hidráulica saturada k_s , obtido pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004)	131
Tabela 38. Análise ANOVA para o parâmetro k_s	132
Tabela 39. Valores da altura máxima da ascensão capilar (h_c)	135
Tabela 40. Valores de β (Parâmetro de Gardner, 1958)	135

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área transversal da amostra (L^2)
a	Área transversal do tubo alimentador de água (L^2)
a, b, n, m	Constantes de ajuste
C	Coeficiente de forma
D	Diâmetro da partícula (L)
D_s	Diâmetro efetivo das partículas (L)
D_{10}	Diâmetro efetivo (L)
$D(\theta)$	Função difusividade hidráulica (L^2/T^{-1})
e	Índice de vazios
F	Fator da análise de variância
g	Gravidade ($L.T^2$)
h	Carga hidráulica (L)
h_a	Altura da franja capilar (L)
h_c	Altura máxima capilar (L)
i	Gradiente hidráulico
k	Condutividade hidráulica não saturada ($L.T^{-1}$)
k_s	Condutividade hidráulica saturada do solo ($L.T^{-1}$)
L	Trecho do solo na direção do fluxo (L)
n	Porosidade do solo
q	Vazão percolada ($L^3.T^{-1}$)
q	Densidade de fluxo (L.T)
q_m	Fluxo de ascensão capilar ($L.T^{-1}$)
r	Raio do tubo capilar (L)
S	Grau de saturação
S_r	Grau de saturação
S_{ru}	Grau de saturação residual
S_e	Grau de saturação efetiva
t	Tempo (T)
t_o	Tempo da ascensão capilar observada no laboratório (T)
t_e	Tempo da ascensão capilar estimada pelo Solver (T)
T_s	Tensão superficial ($M.L^{-1}.T^{-2}$)

v	Velocidade de descarga de água ($L.T^{-1}$)
v_p	Velocidade de percolação ($L.T^{-1}$)
z_A e z_B	Cargas de posição ou gravitacionais (L)
ΔH	Perda de energia
γ_w	Peso específico da água ($M.L^{-3}$)
μ	Viscosidade do fluido ($M/L.T$)
ψ_b	Sucção de entrada de ar ($M.L^{-1}.T^{-2}$)
β	Parâmetro de distribuição do tamanho dos poros
θ_s	Teor de umidade volumétrico saturado (L^3/L^{-3})
θ_r	Teor de umidade volumétrico residual (L^3/L^{-3})
θ_o	Teor de umidade volumétrica inicial (L^3/L^{-3})
θ	Teor de umidade volumétrica (L^3/L^{-3})
α	Ângulo de contato entre o líquido e a parede do tubo
ρ_w	Massa específica da água (M/L^3)
Ψ	Potencial capilar (L)
λ	Condutividade capilar ($L.T^{-1}$)
ψ	Sucção do solo ($M.L^{-1}.T^{-2}$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	23
2.1.1	FATORES QUE INTERFEREM NA CONUTIVIDADE HIDRÁULICA	25
2.1.2	ENSAIOS PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA NO LABORATÓRIO.	29
2.2	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS NÃO SATURADOS	32
2.2.1	CURVA DE RETENÇÃO	32
2.2.2	MODELOS EMPIRICOS, PARA A FUNÇÃO CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	35
2.2.3	ENSAIOS PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA NO LABORATÓRIO.	37
2.2.3.1	Ensaio de regime permanente.....	38
2.2.3.2	Ensaio de regime transiente.....	39
2.3	ASCENSÃO CAPILAR.....	41
2.3.1	ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS.....	43
2.3.2	MODELOS PARA REPRESENTAR O FENÔMENO DE ASCENSÃO CAPILAR	46
2.3.3	ENSAIOS DA ASCENSÃO CAPILAR DA ÁGUA EM SOLOS NÃO SATURADOS.....	52
2.3.3.1	ENSAIO VERTICAL DE CAPILARIDADE.	52
2.3.3.2	ENSAIO HORIZONTAL DE CAPILARIDADE	52
2.3.4	VALORES DA ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS.....	55
2.4	O PROBLEMA INVERSO E METODOS DE OTIMIZAÇÃO.	57
2.4.1	O PROBLEMA INVERSO.....	57
2.4.2	A OTIMIZAÇÃO	59
2.4.3	METODO DE OTIMIZAÇÃO SOLVER	60

2.4.4	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS EM PROBLEMAS GEOTÉCNICOS.....	61
2.4.4.1	Vantagens e desvantagens	64
3	MATERIAIS E METODOS.....	67
3.1	Materiais.....	67
3.1.1	Amostras.....	67
3.2	Procedimento experimental - Segunda etapa.....	69
3.2.1	Caracterização dos solos.....	69
3.2.2	Ensaio de permeabilidade.....	70
3.2.3	Ensaio de ascensão capilar	71
3.3	Obtenção de parâmetros por meio da técnica de otimização <i>SOLVER</i>.	75
4	RESULTADOS	79
4.1	PRIMEIRA ETAPA	79
4.1.1	Solos estudados por Lane & Washburn (1946).....	79
4.1.1.1	Ascensão capilar	79
4.1.1.2	Apresentação dos ajustes e obtenção dos parâmetros.	81
4.1.1.3	Análise dos parâmetros obtidos.....	84
4.1.2	Solos estudados por Zhang & Fredlund (2009).....	93
4.1.2.1	Ascensão Capilar	93
4.1.2.2	Apresentação dos ajustes.....	94
4.1.2.3	Análise dos parâmetros obtidos.....	97
4.2	SEGUNDA ETAPA	102
4.2.1	Solos estudados nesta pesquisa	102
4.2.1.1	Dados dos corpos de prova.....	103
4.2.1.2	Ascensão capilar	104
4.2.1.3	Apresentação dos ajustes	104
4.2.1.4	Análise dos parâmetros obtidos.....	107
4.2.1.5	Velocidade de ascensão capilar	117
4.2.1.6	Variação da umidade	118

5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	121
5.1	PRIMEIRA ETAPA	121
5.1.1	Técnica de otimização SOLVER	121
5.1.1.1	Curvas de Ascensão capilar	121
5.1.1.2	Análise dos parâmetros	122
5.2	SEGUNDA ETAPA.....	128
5.2.1	Análise do ensaio de ascensão capilar	129
5.2.2	Velocidade de ascensão capilar.....	129
5.2.3	Técnica de otimização SOLVER	130
5.2.3.1	Análise dos modelos	130
5.2.3.2	Análise dos parâmetros	131
5.2.4	Análise do conteúdo de umidade durante o processo de ascensão capilar	136
6	CONCLUSÕES.....	137
6.1	Trabalhos Futuros.....	138
	REFERÊNCIAS.....	141
	APÊNDICE.....	147

1 INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica, uma das propriedades fundamentais dos solos, é utilizada para o cálculo de vazões em diversos empreendimentos geotécnicos. Trata-se de uma propriedade que possui grande faixa de variação, dependendo do tipo de solo e das diversidades associadas ao meio físico. Em condições saturadas, a condutividade hidráulica é uma propriedade que depende apenas do tipo do fluido e da temperatura. Para um solo não saturado, a condutividade hidráulica depende do nível de energia da água intersticial e usualmente essa dependência resulta numa relação funcional expressa por meio do potencial hidráulico ou da sucção. É comum também expressar a condutividade hidráulica não saturada como uma função da umidade (gravimétrica ou volumétrica) ou do grau de saturação do solo.

A medida experimental da condutividade hidráulica pode ser obtida por meio de ensaios de campo e de laboratório, numa diversidade de arranjos e de condições de contorno. Em laboratório, solos mais permeáveis, como os pedregulhos e as areias, podem ter a condutividade hidráulica saturada medida de forma relativamente simples. Porém, essa medida tende tornar-se mais difícil em solos menos permeáveis. É comum que certos tipos de solos necessitem de vários dias de ensaio para a obtenção da condutividade hidráulica. Esses tempos de ensaio e as dificuldades experimentais aumentam quando se trata de medir a função condutividade hidráulica, para determinados níveis de sucção. Arranjos de ensaio e instrumentação especial, como tensiômetros e transdutores de umidade, são com frequência necessários. Dessa forma, novas alternativas que permitam realizar essas medidas e obter as propriedades hidráulicas dos solos em menor tempo e de forma mais simples são atraentes.

A ascensão capilar nos solos é um fenômeno físico conhecido, cuja relação entre a altura de sucção e conteúdo de umidade apresenta uma estreita relação com a curva de retenção de água nos solos. Esta similaridade reflete uma influência direta da condutividade hidráulica na ascensão capilar, o que torna esse fenômeno uma possível alternativa para avaliar a condutividade hidráulica de solos. O ensaio de ascensão capilar é um teste simples, que consiste em medir o avanço da ascensão ao longo do tempo e que demanda tempos relativamente curtos para sua execução. A literatura relata vários estudos e modelos que foram desenvolvidos para descrever o fenômeno de ascensão capilar. Uma das primeiras propostas para modelar a ascensão capilar nos solos foi dada por Terzaghi (1943) cuja equação foi baseada na lei de Darcy, considerando que o fluxo é governado pela condutividade hidráulica saturada, k_s .

As limitações da utilização da condutividade hidráulica saturada (k_s) foram discutidas pelo próprio Terzaghi, sendo o assunto, também abordado por Lane & Washburn (1946) e Lu & Likos (2004b), que a partir da proposta original de Terzaghi, consideraram que a condição não saturada deve governar o fenômeno da ascensão capilar. Estes últimos autores propuseram outro modelo incluindo a função condutividade hidráulica de Gardner (1958) de um parâmetro, para descrever a variação da condutividade com a sucção ou com o potencial hidráulico.

No caso da solução de Terzaghi (1943), a ascensão capilar depende da condutividade hidráulica saturada, k_s , e da máxima altura de ascensão capilar, h_c . Na solução de Lu & Likos (2004b), além desses parâmetros é necessário conhecer o parâmetro β da função de Gardner (1958) que retrata a variação da condutividade com a sucção ou o potencial hidráulico. Como em cada caso tem-se apenas uma equação, não é possível derivar os parâmetros desejados diretamente.

A técnica do problema inverso é uma técnica de otimização, que se baseia na determinação das causas por meio da observação dos efeitos de um fenômeno físico. Esta técnica já foi utilizada em problemas geotécnicos como, por exemplo, por Kool et al (1987) na determinação de parâmetros que afetam o fluxo da água e o transporte de solutos em solos não saturados; ou para otimizar a função condutividade hidráulica de ensaios com fluxo transiente (Eching & Hopman, 1993) e por Simunek et al (1997) para determinar a condutividade hidráulica através de métodos de evaporação em núcleos de solo. Considerando esse retrospecto, os efeitos do fenômeno da ascensão capilar (frente de avanço de umedecimento “ z ” e tempo “ t ”) poderiam ser medidos em laboratório, e os parâmetros que o governam serem determinados por meio de uma técnica de otimização. Tendo em vista as considerações citadas acima, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a aplicabilidade da técnica de otimização de parâmetros para obter a condutividade hidráulica saturada (k_s), a máxima altura de ascensão capilar (h_c), e o parâmetro β da equação de Gardner, a partir de ensaios de ascensão capilar.

A técnica é primeiramente testada utilizando resultados da literatura acerca de ensaios de ascensão capilar, nomeadamente, os resultados dos trabalhos de Lane & Washburn (1946) e Zhang & Fredlund (2009). Em seguida, a técnica é aplicada a ensaios de ascensão capilar, com corpos de prova de 100mm de altura, realizados com oito solos típicos do Estado de São Paulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cálculo de vazões, a infiltração e o adensamento dos solos, dentre outros exemplos, constituem situações comandadas pela condutividade hidráulica, uma propriedade fundamental que governa o fluxo de água através dos solos.

A água num solo pode estar sujeita a pressões positivas normalmente abaixo do nível freático, ou a pressões negativas normalmente na zona não saturada. A lei de Darcy fornece a velocidade de descarga da água numa determinada seção do solo. Sabe-se que a velocidade é proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade denominada de condutividade hidráulica.

Tem-se assumido que a lei de Darcy é capaz de descrever o fluxo tanto em condições saturadas quanto não saturadas, embora em cada condição a condutividade apresente diferentes características.

Em seguida, apresentam-se várias considerações acerca da condutividade hidráulica, como fatores que nela interferem e métodos de medida, além de aspectos sobre métodos de otimização.

2.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica é uma propriedade do solo que mede a maior ou menor facilidade com que ocorre o fluxo do fluido através dos poros interconectados do solo. Essa propriedade é influenciada por fatores que dependem do meio físico e do fluido considerado.

Para a existência do fluxo através da estrutura do solo, é necessário ter um gradiente de energia, relação entre a energia dissipada e a distancia em que isso ocorre expressado por: $i = -\partial h / \partial x_i$. O sinal negativo indica que há uma redução da carga na direção do fluxo. A Figura 1 ilustra alguns elementos relacionados ao fluxo laminar da água através de um solo.

Figura 1. Fluxo através de um solo

Nos pontos A e B estão representados dois piezômetros que medem as alturas de carga de pressão, respectivamente, u_A / γ_w e u_B / γ_w . Considerando o nível de referência indicado, as cargas de posição ou gravitacionais são representadas por z_A e z_B . As cargas totais $h(cm)$ são, portanto:

$$h_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \quad (1)$$

$$h_B = \frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \quad (2)$$

Nota-se que para que ocorra o fluxo entre A e B, é necessário gastar uma certa energia, ou, dito de outra forma, ter-se uma perda de energia (ΔH):

$$\Delta H = h_A - h_B \quad (3)$$

A relação entre ΔH (cm) e L (cm) (Trecho do solo na direção do fluxo) constitui o gradiente hidráulico:

$$i = \Delta H / L \quad (4)$$

A velocidade de descarga de água considerando a seção total por onde ocorre o fluxo, é dada pela lei de Darcy expressa como:

$$v = -k_s i \quad (5)$$

Onde: v é a velocidade de descarga (cm/s); k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo (cm/s); i é o gradiente hidráulico.

A velocidade de descarga diferencia-se da velocidade de percolação (v_p) pelo fato de que esta retrata o fluxo pelos poros do solo. Pelo princípio da condutividade, pode-se mostrar que:

$$v_p = v / n \quad (6)$$

Onde: v_p é a velocidade de percolação (cm/s); v é a velocidade de descarga (cm/s); n é a porosidade do solo.

Define-se ainda a permeabilidade intrínseca, K , que apresenta dimensão de área e que é constante para um dado solo, ou seja, independe do fluido considerado. A condutividade hidráulica, k_s , e a permeabilidade, K , podem ser associadas por:

$$k_s = \frac{\gamma_w}{\mu} K \quad (7)$$

Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo (cm/s); γ_w é o peso específico da água (g/cm³); μ é a viscosidade do fluido (g/cm.s); K é a permeabilidade intrínseca (cm²).

A Tabela 1 mostra valores típicos de condutividade hidráulica saturada para uma gama variada de solos.

Tabela 1. Valores da Condutividade hidráulica (CASAGRANDE & FADUM, 1940)

Condutividade hidráulica (cm/s)												
	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Drenagem	Bom						Pobre		Praticamente impermeável			
Tipo de solo	Pedregulho limpo		Areias limpas, Areias mais pedregulhos limpos			Areias muito finas, siltes orgânicas e inorgânicas, misturas de areias, siltes e argilas, depósitos estratificados de argilas			“Impermeáveis” argilas homogêneas embaixo de zonas de intemperismo			
“Impermeáveis”, solos modificados pelos efeitos, de vegetação e intemperismo												

2.1.1 FATORES QUE INTERFEREM NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica depende de características do próprio solo e do fluido que percola. Estas características são apresentadas a seguir.

a) SOLO

Várias características interferem na condutividade hidráulica, como o índice de vazios, o tamanho das partículas, a composição, a estrutura e o grau de saturação. Porém, estas características apresentam também uma dependência entre elas, como por exemplo, a estrutura que depende do tamanho das partículas, da relação de vazios e da composição do solo.

Segundo Craig (1992), a condutividade hidráulica depende principalmente do tamanho médio dos poros, que está diretamente relacionado à distribuição do tamanho das partículas, forma e estrutura do solo. Comumente quanto menor o tamanho das partículas, menor será o

diâmetro médio dos poros e resultará em uma menor condutividade hidráulica, fazendo com que esta propriedade seja uma função do índice de vazios.

Um aspecto importante é que em um mesmo solo, em função da sua variabilidade, pode apresentar grande faixa de variação de condutividade, conforme relatado por Terzaghi & Peck (1967) e ilustrado na Tabela 2. Nessa tabela, nota-se a grande faixa de variação medida em estratos naturais.

Tabela 2. Valores de k_s , em depósitos naturais. (TERZAGHI & PECK, 1967)

Tipos de formação	Valor de k_s cm/s
<i>Depósitos fluviais</i>	
- Ródano em Genissiat	Até 0,40
- Pequenos rios dos Alpes orientais	0,02 – 0,16
- Missouri	0,02 – 0,20
<i>Depósitos glaciais</i>	
- Planícies aluviais	0,05 – 2,00
- Esker, Westfield, Mass.	0,01 – 0,13
- Delta, Chicopee, Mass.	0,0001 – 0,015
- Till Morrénico	Menor de 0,0001
<i>Depósitos eólicos</i>	
- Areia de médano	0,1 – 0,3
- Loes	0,001+/-
- Terras loésicas	0,0001+/-
<i>Depósitos lacustres e marinhos (não costeiros)</i>	
- Areia muito fina uniforme U=5-2	0,0001 – 0,0064
- Avenida, N.Y. U=5-2	0,0001 – 0,0050
- Brooklyn U=5	0,00001 – 0,0001
- Argila	Menor de 0,0000001

Nas argilas a composição e a estrutura são fatores relevantes em função das características físico-químicas da superfície das partículas (DAS, 2006). A condutividade hidráulica depende do filme da água ao redor da partícula, o qual é influenciado pela capacidade de troca e valência de cátions, dentre outras características. Assim, por exemplo, pode-se encontrar diferenças dos valores da condutividade hidráulica maiores que três ordens de grandeza entre uma caulinita e uma montmorilonita, sabidamente mais ativa.

O efeito da compactação de solos argilosos e sua influência sobre a estrutura e condutividades resultantes é mostrado por Lambe & Whitman (1989). No ramo seco da curva de compactação, o solo apresenta uma estrutura floculada causada pela resistência ao arranjo durante o processo de compactação resultando em uma maior condutividade hidráulica. Ao

contrário, do lado úmido o solo apresenta uma estrutura dispersa devido à ordenação quase paralela das partículas de argila o que aumenta a tortuosidade e dificulta o fluxo da água, resultando valores consideravelmente mais baixos da condutividade hidráulica.

Olsen (1962) mostra resultados de um solo silto argiloso compactado (Figura 2), onde se nota a grande faixa de valores da condutividade hidráulica, resultado da variação na estrutura do solo, associado à compactação para diferentes densidades e conteúdos de umidade.

Figura 2. Variação de k_s em função da variação da estrutura - Solo silto-argiloso compactado (OLSEN, 1962).

Outro fator importante que interfere na condutividade é o Grau de saturação, pois um decréscimo deste resulta em significativa redução da condutividade hidráulica. Esse fenômeno acontece porque as bolhas de ar contidas no solo reduzem a seção por onde a água pode fluir, diminuindo assim a condutividade hidráulica (LAMBE, 1951).

Na Figura 3 apresenta-se resultados de ensaios onde se pode comprovar em areias o acréscimo da condutividade hidráulica com o incremento do grau de saturação (WALLACE, 1948. Apud LAMBE, 1951).

Na Figura 4, Mitchell (1993), baseado na equação de Kozeny-Carman (8) obtém uma relação linear da variação da condutividade hidráulica em função do cubo do grau de saturação para solos argilosos. Na figura pode-se apreciar ainda o efeito do repouso da amostra, pois corpos de prova identicamente preparados foram ensaiados imediatamente após a compactação e vinte e um dias depois de compactado. Nota-se que após o tempo de repouso, os corpos de prova tenderam a mostrar um aumento da condutividade hidráulica.

$$k = CD_s^2 \left(\frac{\gamma_w}{\mu} \right) \frac{e^3}{1+e} S^3 \quad (8)$$

Onde: C é um coeficiente de forma; D_s é o diâmetro efetivo das partículas; γ_w é peso específico da água (g/cm^3); μ é a viscosidade do fluido (g/cm.s); e é o índice de vazios; S é o grau de saturação.

Figura 3. Influência do grau de saturação em areias. saturação (WALLACE, 1948. Apud LAMBE, 1951).

Figura 4. Influência do grau de saturação em argilas. Adaptada de Mitchell et al (1965)

b) FLUIDO

O tipo de fluido nos poros do solo geralmente é água, mas nos casos de aterros sanitários, lagoa de oxidação ou outros problemas de contaminação nos solos, o fluido pode mudar e ser o produto da decomposição de resíduos orgânicos ou resíduos de produtos industriais ou outros agentes contaminantes, como gasolina.

Segundo Das (2006) dependendo do tipo de fluido, existe uma relação inversa entre a temperatura e a viscosidade do fluido, mostrando que aumentando a temperatura o valor da viscosidade decresce paralelamente com o peso específico, e portanto, aumenta a condutividade hidráulica, o que significa que o fluido escoará com mais facilidade pelos poros do solo. A temperatura padrão para medir a condutividade hidráulica é de 20 graus Celsius podendo-se obter o equivalente para outras temperaturas, em função das relações de viscosidade do fluido nas temperaturas de interesse.

2.1.2 ENSAIOS PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA NO LABORATÓRIO.

Existem diversos métodos para medir a condutividade hidráulica, tanto em campo como em laboratório. A vantagem principal dos ensaios no laboratório é a facilidade do controle das condições de contorno e da direção do fluido. Estes ensaios podem ser realizados utilizando diversos equipamentos como permeâmetros, câmaras triaxiais e edômetros. Em geral, as técnicas de ensaio utilizam o conceito de carga constante ou de carga variável, podendo os permeâmetros ser de parede rígida ou de parede flexível, como ocorre quando se usa câmaras triaxiais. A escolha dos equipamentos dependerá do tipo de solo, a condição da amostra e as condições do ensaio. Em seguida se apresentam de forma breve estes tipos de ensaios mais utilizados.

a) Ensaio de carga constante

Este ensaio é recomendado para solos mais permeáveis ($k > 10^{-5}$ cm/s). Aplica-se um fluxo vertical permanente (ascendente ou descendente) através da massa do solo sob uma carga hidráulica constante, medindo-se o volume percolado ao longo do tempo. A condutividade hidráulica é calculada pela seguinte expressão:

$$k = \frac{qL}{Ah} \quad (9)$$

Onde: q é a vazão (cm^3/s); L é o comprimento da amostra (cm); A é a área transversal da amostra (cm^2); e h é carga hidráulica (cm). A Figura 5 apresenta um esquema do ensaio

Figura 5. Permeâmetro de carga constante

Algumas desvantagens deste ensaio são:

- É mais indicado para solos granulares de alta condutividade hidráulica, porque para solos menos permeáveis torna-se difícil a medida de vazões e a perda por evaporação da água percolada seria significativa.
- Em ensaios de parede rígida normalmente não há controle de saturação do solo e podem-se criar caminhos preferenciais entre a parede do tubo e o solo.

b) Ensaio de carga variável

Este ensaio é recomendado para solos arenosos ou siltosos, mas não em argilas que apresentam valores muito baixos da condutividade hidráulica ($k \sim < 10^{-7} \text{ cm/s}$), porque precisariam de tempos de prova muito longos, que associados à evaporação poderia introduzir erros de medida. Neste ensaio a medição da vazão é realizada no tubo alimentador de água; fazendo a medida da diferença de níveis ($dh = h_o - h_i$) num determinado tempo (dt) (Figura 6). A condutividade hidráulica é calculada com a seguinte equação:

$$k_s = 2,3 \frac{aL}{At_1} \log \frac{h_o}{h_i} \quad (10)$$

Onde: k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo (cm/s); a é área transversal do tubo alimentador de água (cm^2); L é o comprimento da amostra (cm); A é área

transversal da amostra (cm^2); h_o nível de água inicial (cm); e h_l nível de água final (cm), para um tempo t_l . A Figura 6 apresenta um esquema do ensaio:

Figura 6. Esquema do ensaio de carga variável.

As mesmas desvantagens listadas anteriormente com relação aos permeâmetros de parede rígida permanecem nesta alternativa. Adicionalmente, registre-se a dificuldade de medidas de volumes percolados para os solos menos permeáveis.

Uma alternativa aos ensaios em câmaras com parede rígida é o ensaio em câmara triaxial, conhecido como ensaio de parede flexível, pelo fato de revestir a amostra com uma membrana flexível que fica aderida ao corpo de prova. Este ensaio é recomendado para solos de textura fina, em especial para argilas. A montagem da amostra é a mesma dos ensaios triaxiais, cujas vantagens sobre os permeâmetros são o controle da saturação na amostra; o controle das tensões aplicadas; e a garantia de ter um bom contato entre a membrana e amostra.

Alonso (2005) fez uma análise em solos compactados, considerando os permeâmetros de parede rígida e flexível para diferentes solos. A análise mostra, que os valores da condutividade hidráulica obtidos com permeâmetros de parede rígida foram uma ordem de grandeza menores que os obtidos pelo permeâmetro de parede flexível, fato que é relacionado à condição não saturada dos corpos de prova nos permeâmetros de parede rígida.

2.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS NÃO SATURADOS

O fluxo de água num solo não saturado também é regido pela lei de Darcy (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Porém a condutividade hidráulica não é mais uma constante, mas sim uma variável que depende do conteúdo ou da energia da água presente no solo.

A energia da água em um solo não saturado tem as mesmas componentes que em um solo saturado, porém, a parcela de pressão assume valores negativos. Costuma-se representar essa parcela de pressão pela sucção, um quantificador da avidéz que um solo demonstra pela água. A sucção fica determinada em essência, pela componente relacionada à matriz do solo (sucção matricial) e pela componente associada à solução do solo, a componente osmótica. A componente matricial é governada por efeitos capilares e de adsorção (LIBARDI, 1995), e tem sido reconhecida como a responsável por governar o comportamento mecânico e hidráulico dos solos (ALONSO et al, 1990). A sucção responde portanto, pelas características de retenção de água num solo.

2.2.1 CURVA DE RETENÇÃO

Chama-se de curva de retenção de água de um solo a relação entre o conteúdo de água no solo, expresso pela umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou pelo grau de saturação e a sucção atuante, normalmente representada pela parcela matricial. Hidraulicamente e fisicamente a curva de retenção significa a quantidade de água em equilíbrio que um solo pode ter para uma determinada sucção.

A análise de uma curva de retenção típica (Figura 7a) permite observar que ela possui três trechos, que também se apresentam na função condutividade hidráulica (Figura 7b). O trecho superior (a-b) na curva de retenção é quase linear, e embora a sucção seja incrementada, o teor de umidade não varia significativamente. Este mesmo comportamento aparece na função condutividade hidráulica, onde o trecho (a-b) representaria a condutividade hidráulica saturada até chegar ao ponto “b”, onde o ar entra na estrutura do solo e a curva começa a descer de maneira significativa. No trecho (a-b) o solo permanece saturado, ainda que a água esteja sujeita a pressões negativas ou sucção. No ponto b tem-se a pressão ou

sucção de entrada de ar, ponto onde o ar começa a entrar na estrutura do solo pelos poros de maior diâmetro.

No trecho, (b-c) na curva de retenção se observa que com o incremento da sucção, o conteúdo de umidade decresce acentuadamente. Isto se reflete na função condutividade hidráulica pela presença de mais ar na estrutura do solo, portanto, menos poros interconectados com água para ter fluxo, diminuindo consideravelmente a condutividade hidráulica.

No terceiro trecho (c-d) da curva de retenção, o teor de umidade vai descendo, até chegar ao teor de umidade residual. Trata-se da umidade presente na estrutura do solo como meniscos de água isolados, porém sem contato entre eles. Portanto, na função condutividade hidráulica, desde o ponto c até d a condutividade hidráulica decresce significativamente, pela pouca continuidade dos poros preenchidos com água, até o ponto onde a condutividade hidráulica é praticamente nula.

Figura 7. a) Curva de retenção; b) Curva de condutividade hidráulica. (LU & LIKOS, 2004a)

Um aspecto característico, tanto da curva de retenção, quanto da função condutividade hidráulica é a histerese que indica que a retenção depende da trajetória seguida, ou seja, se o solo é drenado ou umedecido.

A Figura 8 ilustra os efeitos da histerese tanto na curva de retenção quanto na função condutividade hidráulica.

Figura 8. a) Histerese na curva de retenção; b) Histerese na função condutividade hidráulica (LU & LIKOS, 2004a)

Além dos fatores que influem na condutividade hidráulica de solos saturados, o tipo de solo desempenha um papel importante no comportamento não saturado, assim como também a condição da água na matriz do solo.

Fredlund & Xing (1994) apresentam curvas de retenção típicas para diferentes tipos de solos como mostrado na Figura 9. Nota-se que o conteúdo de umidade saturado θ_s e o valor de sucção na entrada de ar (ψ_b), aumentam em função da plasticidade do solo. Estas propriedades se modificam em função de outros fatores como o histórico de tensões.

Figura 9. Curva de retenção para solo arenoso, solo siltooso e solo argiloso. Adaptada de Fredlund & Xing (1994)

Hillel (1998) apresenta diferenças de curva de retenção entre areias e argilas (Figura 10a) e suas repercussões sobre a condutividade hidráulica. Observa-se que a condutividade hidráulica saturada da areia é maior do que argila; mas que a condutividade das areias decresce mais rapidamente com os incrementos de sucção, até atingir valores ainda menores que os das argilas (Figura 10b).

Figura 10. a) Curva de retenção para areias e argilas; b) Relação da Condutividade hidráulica e sucção. Adaptada de Hillel (1998)

2.2.2 MODELOS EMPIRICOS, PARA A FUNÇÃO CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

a) Relação entre a condutividade hidráulica e o grau de saturação

A Tabela 3 apresenta diferentes propostas para estimar a função condutividade hidráulica em função do grau de saturação. Comumente as informações acerca do grau de saturação são inferidas a partir da curva de retenção expressa por meio do grau de saturação (S_r), como por exemplo, no método de Brooks & Corey (1964). Nesse sentido, define-se a saturação efetiva S_e como.

$$S_e = \frac{S_r - S_{ru}}{1 - S_{ru}} \quad (11)$$

Tabela 3. Relação estreita entre o grau de saturação e a Condutividade hidráulica não saturada.

Autor	Função
Avernajov (1950)	$k(S) = k_s S_e^n$
Brooks & Corey (1964)	$k(S) = k_s S_e^\delta$
Kovacs (1981)	$k(S_r) = k_s \left(\frac{(S_r - S_{ru})}{(1 - S_{ru})} \right)^{3,5}$
Nielsen et. al. (1986)	$k(S_e) = k_s S_e^n \left[1 - (1 - S_e^{1/m}) \right]^2$

Onde: k é a condutividade hidráulica não saturada (m/s); k_s é a condutividade hidráulica saturada (m/s); S_r é o grau de saturação; S_{ru} é o grau de saturação residual; S_e é o grau de saturação efetiva; n , m são constantes de ajuste.

b) Relação entre a condutividade hidráulica e a sucção matricial

A função condutividade hidráulica não saturada pode ser também expressa em função da sucção matricial. Conforme se exemplifica na Tabela 4:

Tabela 4. Relação estreita entre a sucção matricial e a Condutividade hidráulica não saturada

Autor	Função
Richards (1931)	$k(\psi) = a\psi + b$
Wind (1955)	$k(\psi) = a\psi^{-n}$
Gardner (1958)	$k(\psi) = k_s / \left[1 + a(\psi / \rho_w g)^b \right]$ $k(\psi) = k_s \exp(-\beta h_m)$
Brooks & Corey (1964)	$k = k_s$ para $\psi \leq \psi_b$ $k(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^n$ para $\psi > \psi_b$

Onde: k é a condutividade hidráulica não saturada (m/s); k_s é a condutividade hidráulica saturada (m/s); ψ_b é a sucção de entrada de ar (kPa); β é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros; a , b , n são constantes de ajuste.

O primeiro modelo foi desenvolvido por Richards (1931) apresentando uma função linear com dois parâmetros de ajuste. Outros autores adotaram uma função potencial ou exponencial como Gardner (1958) que propôs duas equações. A primeira com dois

parâmetros de ajuste (a e b) relacionados ao ponto de inflexão da função, e à inclinação da curva, respectivamente. A segunda equação apresenta só um parâmetro de ajuste: β (m^{-1}) que é o parâmetro que representa a distribuição do tamanho dos poros na massa do solo. Este parâmetro captura a taxa de redução da condutividade hidráulica quando a sucção decresce.

c) Relação entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de umidade volumétrica

Estes modelos relacionam a condutividade hidráulica não saturada ao conteúdo de umidade volumétrica, determinando a função condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água. Neste caso é assumido que o solo tem uma distribuição aleatória do tamanhos dos poros e sua estrutura é incompressível. A Tabela 5 apresenta alguns modelos encontrados na literatura.

Tabela 5. Relação estreita entre o conteúdo de umidade volumétrica e a Condutividade hidráulica não saturada

Autor	Função
Davidson et al (1969)	$k(\theta) = k_s \exp[a(\theta - \theta_s)]$
Campbell (1973)	$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^n$
Van Genuchten (1980)	$k(\theta) = k_s \left(\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta)} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2$

Onde: k é a condutividade hidráulica não saturada (m/s); k_s é a condutividade hidráulica saturada (m/s); θ_s , θ_r é o teor de umidade volumétrico saturado e residual respectivamente (m^3/m^3); a , n , m são constantes de ajuste.

2.2.3 ENSAIOS PARA MEDIR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA NO LABORATÓRIO.

Os ensaios de laboratório para obter a condutividade hidráulica não saturada estão classificados de acordo com o regime de fluxo estabelecido no solo. Assim, têm-se métodos de ensaios em regime permanente e ensaios em regime transiente de fluxo, que podem ser realizados em amostras alteradas ou inalteradas e com condições hidráulicas e tensões controladas.

Nos ensaios de regime permanente o fluxo é constante e contínuo, onde suas condições de contorno são mantidas no tempo, e a condutividade hidráulica, a direção e velocidade do fluxo são constantes num ponto. Nos ensaios de regime transiente, o conteúdo de umidade, as condições de contorno e o gradiente hidráulico mudam com o tempo, assim como a velocidade e a direção do fluxo.

2.2.3.1 Ensaios de regime permanente

Um dos equipamentos mais conhecidos para medir a condutividade hidráulica é aquele que foi proposto por Klute (1965), cujo esquema está na Figura 11. Pode-se observar uma amostra de solo com pedras porosas de alta pressão de entrada de ar, na base e no topo. Na parte superior é aplicada uma determinada carga hidráulica (h_{hw}), estando o corpo de prova sob uma determinada pressão de ar (u_a). A carga hidráulica h_{hw} é também mantida constante na base do corpo de prova, de forma a ter-se uma diferença de carga que promova o fluxo de forma semelhante ao que acontece nos ensaios com carga constante nos solos saturados.

Figura 11. Permeâmetro de regime permanente (KLUTE, 1965)

Tensiômetros posicionados em 1 e 2 permitem medir a carga perdida entre os dois pontos, a qual associada a distância ΔL e a q_w , volume de água que percola num determinado tempo, permite calcular a condutividade hidráulica. Esta condutividade estará associada a uma determinada sucção, dada por $(u_a - u_w)$, onde u_a é pressão de ar e u_w , pressão na água, normalmente, tomada como a média entre u_{w1} e u_{w2} .

Em alguns ensaios a umidade do solo é medida por métodos não destrutivos, nesse caso o ensaio pode ser repetido, para medir a condutividade hidráulica a diferentes sucções com a mesma amostra.

A principal vantagem deste método é a simplicidade na montagem e a análise dos resultados do ensaio, sendo uma de suas limitações os tempos prolongados para atingir o regime permanente (HERNANDEZ, 2008).

Este ensaio apresenta também desvantagens como a possibilidade de possíveis contrações da amostra, que pode gerar caminhos preferenciais do fluxo entre a amostra e o molde, além do grande tempo necessário para medir, na maior parte das vezes, volumes ínfimos de água (VILAR, 2009).

2.2.3.2 Ensaios de regime transiente

Existem varias alternativas de ensaios em condição transiente, ou seja, ensaios em que o fluxo e suas características variam ao longo do tempo. Ilustram-se essas alternativas com dois exemplos clássicos disponíveis na literatura.

- **Ensaio horizontal de infiltração no fluxo transiente (Método baseado na entrada e saída de fluxo)**

Para analisar o fluxo transiente num solo, Bruce & Klute (1956) ensaiaram numa coluna horizontal de solo com umidade inicial constante θ_0 . O avanço do frente de umedecimento é produzido por uma carga de água constante, onde a taxa de infiltração é relativamente rápida na zona de início para logo diminuir a velocidade em função do tempo (t) e a distância (x). Ao finalizar o ensaio, após um determinado tempo “ t ” é medida a variação da umidade ao longo do corpo de prova, que também está em função do tempo e distância, tal como se mostra na Figura 12.

Figura 12: Esquema para ensaio de fluxo transiente num solo não saturado (KLUTE & DIRKSEN, 1986)

A equação de difusividade relacionada ao processo de fluxo transiente nas condições de ensaio é dada pela equação 12:

$$D(\theta) = -\left(\frac{1}{2t_o}\right)\left(\frac{dx}{d\theta}\right)\int_{\theta_o}^{\theta} x d\theta \quad (12)$$

Onde θ_o é teor de umidade volumétrica inicial do solo (m^3/m^3); θ é o teor de umidade volumétrica numa distância x depois de iniciado o processo (m^3/m^3); $dx/d\theta$ é a tangente à curva θ versus x num ponto dado; t_o é o tempo objeto de análise e $D(\theta)$ é a função difusividade hidráulica.

A condutividade hidráulica não saturada, pode ser calculada a partir da difusividade e da curva de retenção (equação 13).

$$k(\theta) = D(\theta) \frac{d\theta}{\psi_m} \quad (13)$$

• Ensaio do perfil instantâneo

O ensaio do perfil instantâneo realizado em laboratório consta de um molde de parede rígida contendo uma amostra de solo em estado alterado ou inalterado, não saturado e com umidade muito baixa, colocada em posição horizontal; contendo em seus extremos, papel filtro e placas metálicas. A carga hidráulica é aplicada em um dos extremos ($x=0$), e o outro extremo, permitirá o contato com a atmosfera ($x=L$). Ao longo do molde, são colocados tensiômetros e dispositivos, para medir a sucção e o conteúdo de umidade respectivamente (Figura 13).

Figura 13: Equipamento para o ensaio do perfil instantâneo em laboratório (OLSON & DANIEL, 1981)

Considerando a amostra quase seca, ou com conteúdo de umidade muito baixo, portanto, com uma alta sucção, inicia-se o ensaio medindo as sucções iniciais

(condição de equilíbrio da amostra), para logo fornecer lentamente uma taxa de fluxo baixa por um extremo ($0.2 - 5\text{cm}^3/\text{dia}$), para percorrer ao longo do corpo de prova fazendo as medidas da sucção e o conteúdo de umidade para vários intervalos de tempo. Conclui-se o ensaio quando a pressão nos poros torna-se positiva na entrada do fluxo. No final do ensaio pode-se também seccionar a amostra e extrair o conteúdo de umidade. Esse processo pode demorar de duas até três semanas para ser totalmente realizado.

Essas medições tornam possível o desenho das curvas “Carga hidráulica vs. Distância”, assim como, o “Conteúdo de umidade volumétrica vs. Distância” que nos fornece o gradiente hidráulico para um tempo específico.

Com os dois dados pode-se encontrar a condutividade hidráulica não saturada para um intervalo de tempo e um ponto fixo definido, com a seguinte equação (14).

$$k = \left\{ \left[\frac{dV_w}{dt} \right] \left[\frac{\gamma_w}{A} \right] \right\} / \left[\frac{dp}{dx} \right] \quad (14)$$

Onde: k é a condutividade hidráulica não saturada; $\left[\frac{dV_w}{dt} \right]$ é a variação do volume de água com o tempo, entre um ponto fixo e a extremidade ($x=L$); $\left[\frac{dp}{dx} \right]$ é o gradiente hidráulico médio num ponto fixo; γ_w é a densidade da água; A é a área transversal da amostra.

A maior vantagem destes métodos transientes em relação aos permanentes é o tempo necessário para a execução dos ensaios. Porém uma desvantagem é que não tem controle do estado de tensões, nem da variação de volume dos corpos de prova (HERNANDEZ, 2008).

2.3 ASCENSÃO CAPILAR

O fenômeno capilar se manifesta pela interação entre as três fases de um sistema composto por sólidos, água e ar. Sendo que, na interfase sólido-líquido observa-se o fenômeno de adsorção, produto da atração das moléculas da água com uma superfície sólida, e na interface líquido-ar apresenta-se o fenômeno de tensão superficial. A soma da tensão

superficial e da adsorção dá origem à capilaridade. Esse fenômeno é demonstrado num tubo de vidro de pequeno diâmetro, onde a água ascende acima do nível freático até uma máxima altura, denominada de altura de ascensão capilar h_c .

A tensão superficial é uma força de pressão por unidade de comprimento atuando ao redor do menisco na superfície da água em contato com uma superfície sólida, no caso das paredes do tubo de vidro capilar ilustrado na Figura 14. Para existir equilíbrio, a componente vertical de tensão superficial deverá ser igual ao peso da coluna de água, conforme se expressa na equação (15).

$$2\pi T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g \quad (15)$$

Disso resulta:

$$h_c = \frac{2T_s}{r\rho_w g} \cos \alpha \quad (16)$$

Onde: h_c é a altura máxima capilar (m); T_s é a tensão superficial (N/m); α é o ângulo de contato entre o líquido e a parede do tubo; ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3); r é o raio do tubo capilar (m).

A equação 16 nos mostra como existe uma relação inversa entre o raio do tubo e a ascensão capilar, sendo que para menores raios maior será a altura de ascensão capilar.

Figura 14. Equilíbrio mecânico do incremento capilar num tubo de pequeno diâmetro (FREDLUND & RAHARDJO, 1993)

2.3.1 ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS

Segundo Jimenez Salas (2007) a ascensão capilar num solo não é similar aos tubos de vidro, porque os poros do solo não têm o mesmo diâmetro e sua estrutura forma um tipo de grade, que em contato com a água satura-se até uma determinada altura; depois, a água pode subir só pelos poros menores porque os outros estão cheios de ar.

Em 1907 o físico Buckingham tendo como objetivo analisar a evaporação da água na superfície do solo realizou experimentos em colunas de solos, fazendo num princípio testes de ascensão capilar, até atingirem a máxima altura de ascensão. Em alguns casos, o ensaio foi controlado pelo período de mais de um ano. Como resultado de suas observações, no processo de ascensão capilar no solo obteve três principais conclusões, que ainda continuam sendo pesquisadas nos estudos de solos não saturados. A primeira conclusão é a existência de uma estreita relação de dependência, entre a condutividade capilar e a retenção da umidade no solo; a segunda foi o conceito do potencial capilar, definida pelo trabalho realizado contra as forças atrativas sólido-água, e a terceira que o autor deduziu que o movimento da água num solo não pode ser uma relação linear de fluxo, e propôs a variação da lei de Darcy, apresentada na equação 17. Assim, esse físico gerou conceitos, que atualmente são usados com outras nomenclaturas. Na Tabela 6, constam a terminologia e anotações usadas por Buckingham e as equivalências atuais.

$$q = \lambda(\psi) \frac{d\psi}{dx} \quad (17)$$

Onde: q é a densidade de fluxo (m/s); ψ é o potencial capilar (m); λ é a condutividade capilar (m/s).

Tabela 6. Conceitos estabelecidos por Buckingham e sua equivalência na atualidade.

<i>Terminologia usada por Buckingham</i>	<i>Termo moderno equivalente</i>
Potencial capilar (ψ)	Potencial matricial (ψ)
Condutividade capilar (λ)	Condutividade hidráulica não saturada (k)
Curva de retenção água-solo	Curva característica

O processo de ascensão capilar numa massa de solo é ilustrado na Figura 15. Este perfil apresenta duas zonas divididas pelo nível de água. A zona por baixo do nível da água é saturada e a pressão da água é positiva. A zona acima do nível de água apresenta a sua vez

três partes: A mais próxima ao nível de água todos os poros estão preenchidos com água por efeito capilar e o solo se encontra saturado, porém a pressão da água é negativa, este trecho é chamado de franja capilar. Acima deste trecho o solo está com os poros parcialmente saturados, a fase da água é contínua e o fluxo da água tem um comportamento transiente, dependente do tempo e das condições do meio ambiente, com pressão na água também negativa; por último, tem-se o trecho caracterizado pelo conteúdo de água residual nos poros, na forma de meniscos isolados, que praticamente, não permitem o fluxo da água (LU & LIKOS, 2004a). A Figura 15 apresenta também a curva de umidade volumétrica *versus* avanço capilar, e observa-se que ela é similar à curva de retenção que apresentam os solos não saturados.

Figura 15. Perfil do solo, comportamento da pressão da água (LU & LIKOS, 2004a)

Fazendo uma comparação da ascensão da água em tubos capilares e a ascensão nos solos, existe uma analogia entre o raio do tubo e o raio dos poros no solo. Observa-se em concordância com a equação 16 que a máxima altura capilar é inversamente proporcional ao raio do tubo. Assim, para maiores raios do tubo capilar ou dos poros no solo, menor será a altura de ascensão capilar. Estes aspectos estão esquematizados na Figura 16a e na Figura 16b tem-se uma associação dos diferentes tipos de solos, com seus raios de poros típicos e respectivas as ascensões capilares (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Figura 16. Dependência da capilaridade com o raio dos poros, a tensão superficial e a sucção matricial (FREDLUND & RAHARDJO, 1993)

O solo pode ter diferentes alturas de ascensão capilar que dependem da condição de umidade inicial nos poros do solo. A Figura 17 mostra uma análise das diferentes alturas de ascensão capilar que pode atingir um solo, tanto em um processo de drenagem quanto num processo de ascensão capilar. A primeira análise foi realizada numa coluna de solo em condição inicial saturada permitindo-se a drenagem até estabilizar. O comportamento do fluxo é representado pela linha “A”, onde o ponto “a” representa a máxima altura capilar que teria o solo (h_{cx}) em caso de existir ainda canais contínuos preenchidos com água; o ponto “b” representa a máxima altura capilar saturada, quando todos os vazios estão cheios de água (h_{cs}).

Figura 17. A relação do processo de ascensão capilar *versus* grau de saturação em solos (Linha A processo de drenagem; Linha B processo de ascensão capilar) (LAMBE, 1951)

Na segunda análise o solo está numa condição seca e logo posto em contato com a água, iniciando assim um processo de ascensão capilar representado pela linha “B”. Nesta curva o ponto “c” representa a ascensão capilar máxima, que a água poderia atingir por efeito de capilaridade (h_{cr}), e o ponto “d” a altura onde todos os poros estão saturados, que é denominado de altura mínima de capilaridade (h_{cn}).

2.3.2 MODELOS PARA REPRESENTAR O FENÔMENO DE ASCENSÃO CAPILAR

O fenômeno de ascensão capilar nos solos apresenta três características físicas fundamentais para a engenharia em geral: características como a máxima altura de ascensão capilar; a capacidade de armazenamento do fluido; e a taxa de ascensão capilar, que são dependentes das propriedades do solo e da água contida nos poros. A característica principal da massa do solo é a geometria complexa que apresenta a distribuição do seus vazios o que torna difícil a avaliação analítica do fenômeno capilar. Considerando este problema foram desenvolvidas equações empíricas para encontrar a máxima altura de ascensão capilar baseadas em propriedades fáceis de medir em laboratório, como é o diâmetro das partículas; o índice de vazios; parâmetros de distribuição do tamanho dos poros e altura de entrada de ar. Apresentam-se a seguir, distintas formulações para descrever o fenômeno de ascensão capilar em solos.

1. Associação com a ascensão capilar em tubos

Como já mostrado na equação 16 a ascensão capilar depende do diâmetro do tubo capilar e fazendo a $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$, $g = 980 \text{ cm/s}^2$, $T_s = 72 \text{ mN/m}$ a 25°C e o ângulo de contato $\alpha = 0$, a equação resulta em:

$$h_c(\text{cm}) = \frac{0,3}{d(\text{cm})} \quad (18)$$

Lu & Likos (2004a) fizeram uso desta equação supondo um solo hipotético composto de partículas do mesmo diâmetro. A partir daí, associaram o diâmetro dos poros com o diâmetro das partículas formados em arranjos cúbico (fofo-SC) e tetraédrico (compacto-TH). A equação para as duas condições resulta:

$$[SC] \frac{9,76T_s \cos \alpha}{D(cm)\rho_w g} \leq h_c (cm) \leq \frac{26,67T_s \cos \alpha}{D(cm)\rho_w g} [TH] \quad (19)$$

Onde T_s é a tensão superficial(mN/m); α é o ângulo de contato; D é o diâmetro da partícula (cm); ρ_w é a massa específica da água (g/cm^3); g a gravidade (cm/s^2).

A Figura 18 apresenta os valores da máxima ascensão capilar para diferentes diâmetros do tubo capilar e das partículas, onde SC indica o arranjo cúbico (fofo) e TH indica o arranjo tetraédrico (compacto), com maiores ascensões associadas à TH que apresenta menores diâmetros nos poros.

Figura 18. Máxima altura de ascensão capilar com solo idealizado composto de partículas uniformes, 1) arranjo cúbico (SC); 2) arranjo tetraédrico (TH). (LU & LIKOS, 2004a)

Entre as observações do teste do tubo capilar, tem-se que o tubo capilar atingiria uma altura máxima de 10m, o que significa o valor de uma atmosfera, enquanto que o solo por apresentar outras características como a interação físico-química (água-partícula), ou a presença de cargas na superfície das partículas que podem influir na ascensão capilar poderia atingir valores de dezenas de metros.

Lu & Likos (2004a) analisando os resultados de Lane & Washburn (1946) chegaram à seguinte expressão para a máxima altura de ascensão capilar:

$$h_c = -990(\ln D_{10}) - 1540 \quad (20)$$

Onde: D_{10} e h_c em mm, D_{10} para diâmetros de 0,006 – 0,2mm

2. Modelo de Peck et al (1974)

Peck et al (1974), apresentam um modelo para expressar a altura máxima de ascensão capilar em função do índice de vazios e , o diâmetro efetivo D_{10} , como apresentado na equação 21. Onde um incremento no diâmetro efetivo reflete um aumento no diâmetro médio dos poros, que gera um decréscimo na altura de ascensão capilar.

$$h_c = \frac{C}{eD_{10}} \quad (21)$$

Onde: h_c é obtido em cm; C varia de 0,1 a 0,5cm² e depende das impureza na superfície e forma dos grãos; e D_{10} é o diâmetro efetivo em cm.

3. Modelo de Malik et al (1989)

Malik et al (1989) mostraram que existe uma relação linear entre a função exponencial do fluxo de ascensão capilar (q_m) e o avanço de ascensão do fluido (z), que segue a seguinte expressão (equação 22):

$$q_m = Ae^{-bz} \quad (22)$$

Onde q_m é o fluxo de ascensão capilar (µm/dia); A , b são constantes que dependem da Condutividade hidráulica saturada, k_s , e do conteúdo de umidade residual θ_r .

Como mostrado na Figura 19, os dados experimentais apresentam uma tendência linear que é bem representada pela equação 22, e pode-se encontrar a altura máxima da ascensão capilar h_c na interseção da função com o eixo das abscissas.

Figura 19. Fluxo de ascensão capilar como função de z (MALIK et al, 1989)

4. Modelo de Kumar & Malik (1990)

O modelo de Kumar & Malik (1990) apresenta uma relação da máxima altura de ascensão capilar (h_c) em função da raiz quadrada do raio equivalente dos poros (r), e à altura da franja capilar h_a como apresentado na equação 23.

$$h_c = h_a + 134,84 - 5,16\sqrt{r} \quad (23)$$

5. Modelo de Terzaghi (1943)

A Figura 20 ilustra a ascensão capilar em uma coluna de solo vertical, onde Terzaghi (1943) considerou que a velocidade de ascensão é governada pela lei de Darcy, e que o fluxo se dá numa condição saturada.

Figura 20. Modelo de Terzaghi, em coluna vertical.

Na Figura 20 a água sobe pelos “tubos capilares do solo” onde a velocidade diminui rapidamente até chegar a zero. Considerando a área constante o fluxo será vertical linear, e para um determinado tempo t a altura capilar será z , por tanto a carga hidráulica para este nível é $(h_c - z)$ e o gradiente hidráulico será:

$$i = \frac{h_c - z}{z} \quad (24)$$

Onde: h_c é a máxima altura de ascensão capilar (cm); e z é o avanço da altura de ascensão capilar (cm).

A velocidade de ascensão capilar será igual à velocidade de percolação:

$$v_p = \frac{v}{n} = \frac{dz}{dt} \quad (25)$$

Onde: v_p é a velocidade de percolação (cm/s); v é a velocidade de descarga (cm/s); n é a porosidade.

Pela lei de Darcy:

$$v = k_s i = n \frac{dz}{dt} \quad (26)$$

Onde: n é a porosidade do solo

Da conjugação das duas equações 24 e 26, e considerando ascensão nula no tempo 0, Terzaghi (1943) obteve a seguinte solução:

$$t = \frac{nh_c}{k_s} \left(\ln \frac{h_c}{h_c - z} - \frac{z}{h_c} \right) \quad (27)$$

Nesta equação t é o tempo (s); n é a porosidade do solo; h_c é a máxima altura de ascensão capilar (cm); k_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/s); e z é o avanço da altura de ascensão capilar (cm).

Lane & Washburn (1946) analisaram o processo de ascensão capilar em oito solos não coesivos. Os resultados da ascensão capilar foram comparados com as curvas obtidas por meio do modelo de Terzaghi, mostrando que a taxa de incremento capilar fornecido por Terzaghi (1943) é maior que a medida em laboratório, sendo essa diferença creditada à condutividade hidráulica saturada, k_s . Ao reduzir o valor de k_s utilizado no modelo, a aproximação entre a curva experimental e a de laboratório melhorava.

6. Modelo de Lu & Likos (2004b)

Lu & Likos (2004) considerando a proposição original de Terzaghi (1943) e as observações de Lane & Washburn (1946), assume que a condição não saturada deve governar o fenômeno capilar e propõe uma nova alternativa de solução usando a função condutividade hidráulica de Gardner (1958), para representar a variação da condutividade hidráulica no processo de ascensão capilar.

A equação de Gardner pode ser expressa como (equação 28):

$$k(h) = k_s \exp^{(-\beta h)} \quad (28)$$

Onde $k(h)$ é a condutividade hidráulica num determinado potencial hidráulico (h) em cm; k_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/s); β é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros, que representa a variação da condutividade com o potencial hidráulico.

Como ilustrado na Figura 21 o inverso de β pode ser interpretado como a altura da entrada de ar ou altura saturada da ascensão capilar, fato que foi comprovado em alguns solos, com dados experimentais de Richards (1952) e (Moore, 1939)(Apud Lu & Likos, 2004a) para areias e argilas (Figura 22a). Estes dados experimentais foram comparados com os dados

estimados pelo modelo de Gardner de um parâmetro, onde o parâmetro β atende a relação $\beta=1/h_a$.

Considerando o modelo de Gardner para três tipos de solo, a Figura 22b apresenta valores típicos de β conforme sugerido por Lu & Likos (2004a).

Figura 21. Condição do solo para o modelo de Lu & Likos (2004b)

Figura 22. Condutividade hidráulica não saturada pelo modelo de Gardner de um parâmetro a) Comparação com dados experimentais; b) Representação geral para três solos típicos (LU & LIKOS, 2004a)

Outra aplicação do parâmetro β é dada na medição da condutividade hidráulica saturada, determinada em campo por meio do método do permeâmetro de Guelph de um estágio. Este método utiliza também a equação de Gardner de um parâmetro, porém os valores de β são adotados da Tabela 7 proposta por Elrick et al (1989), que dependem da macroporosidade e textura do solo, afetando significativamente os valores da condutividade hidráulica saturada (SOTO et al, 2009).

Tabela 7. Valores de β sugeridos por Elrick et al (1989)

β (cm ⁻¹)	TIPO DE SOLO
0,01	Argilas compactas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras.
0,12	Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras.
0,36	Areia grossa inclui solos com macroporos e fissuras.

A solução final de Lu & Likos (2004b) é apresentada na forma de séries, como se expressa na equação 29:

$$t = \frac{n}{k_s} \sum_{j=0}^{m=\infty} \frac{\beta^j}{j!} \left(h_c^{j+1} \ln \frac{h_c}{h_c - z} - \sum_{s=0}^j \frac{h_c^s z^{j+1-s}}{j+1-s} \right) \quad (29)$$

Onde: t é o tempo (s); n é a porosidade do solo; k_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/s); β é o parâmetro que representa a variação da condutividade com o potencial hidráulico; h_c é a máxima altura de ascensão capilar (cm); z é o avanço da altura de ascensão capilar (cm).

2.3.3 ENSAIOS DA ASCENSÃO CAPILAR DA ÁGUA EM SOLOS NÃO SATURADOS.

2.3.3.1 ENSAIO VERTICAL DE CAPILARIDADE.

Terzaghi (1943) desenvolveu um método para avaliar a condutividade hidráulica baseada na ascensão capilar e na comparação com comportamentos típicos. Este método consiste em colocar uma amostra num tubo vertical transparente em contato com a água, tal como mostrado na Figura 23. Medem-se as alturas atingidas por capilaridade *versus* tempo, as quais são comparadas com curvas padrão para solos “tipo” obtendo-se a condutividade hidráulica saturada por interpolação.

2.3.3.2 ENSAIO HORIZONTAL DE CAPILARIDADE

O ensaio horizontal de capilaridade é uma variação do ensaio vertical, e foi fundamentado na lei de Poiseuille. Nesse estudo, considera-se a velocidade média do fluido dentro de um tubo horizontal, e também a aplicação da lei de Darcy, obtendo-se as seguintes conclusões:

O avanço da frente de umedecimento (x) por capilaridade é diretamente proporcional à raiz quadrada do tempo, ($x^2 = mt$). Onde: m é uma constante que depende das propriedades físicas dos solos como a condutividade hidráulica k , o índice de vazios e , e a altura máxima de ascensão h_c (BADILLO, 1990)

As fórmulas estão baseadas na hipótese de que os meniscos formam-se por completo, e os capilares são do mesmo diâmetro. A Figura 24 ilustra uma disposição desse ensaio que foi realizado na posição horizontal, para excluir o efeito do potencial gravitacional sobre o fluxo.

Figura 23. Ensaio de Capilaridade e Curvas padrão de k_s (Adaptada de BADILLO, 1990)

Figura 24. Arranjo do ensaio de permeabilidade capilar horizontal.

A velocidade de fluxo de acordo com a lei de Darcy pode ser expressa como a equação 30.

$$v = nS_r v_p = k_s i \quad (30)$$

Onde: v é a velocidade do fluxo (cm/s); n é a porosidade; S_r é o grau de saturação capilar; v_p é a velocidade de percolação (cm/s); k_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/s); i é o gradiente hidráulico.

A velocidade de percolação equivale à variação do avanço da água em função do tempo: $v_p = \frac{dx}{dt}$, e as cargas hidráulicas (H) nas posições 1 e 2 equivalem a:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= z_1 + \frac{u_1}{\gamma_w} = -h_w + h_w = 0 \\ H_2 &= z_2 + \frac{u_2}{\gamma_w} = -h_w + h_c \end{aligned} \right\}$$

Disso resulta

$$\frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{h_w + h_c}{x} \quad (31)$$

Assim,

$$\frac{dx}{dt} = k \left[\frac{1}{nS_r} \right] \left[\frac{h_w + h_c}{x} \right] \quad (32)$$

Integrando entre os limites das condições 1 e 2

$$\int_{x_1}^{x_2} x dx = \int_0^t \frac{k_s}{nS_r} (h_w + h_c) dt \quad (33)$$

Tem-se a equação final (34):

$$\frac{x_2^2 - x_1^2}{t} = \frac{2k_s}{nS_r} (h_w + h_c) \quad (34)$$

Onde: x é a posição do frente de umedecimento, t (s) o tempo no intervalo ($x_2 - x_1$); k_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/s); n é a porosidade; S_r é o grau de saturação capilar; h é a carga variável (cm).

As variáveis desconhecidas k_s e h_c podem ser encontradas a partir dos resultados experimentais do ensaio. Inicialmente realiza-se o ensaio sobre uma carga h_{w1} , atingida certa posição “ x ” aumenta-se a altura de carga para h_{w2} . Os resultados experimentais podem ser colocados num gráfico conforme ilustrado na Figura 25, de forma a ter-se dois coeficientes angulares, m_1 e m_2 .

Figura 25. Análise dos resultados experimentais do ensaio de permeabilidade capilar

Do gráfico tem-se então:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \frac{2k_s}{nS_r} (h_{w1} + h_c) \\ m_2 &= \frac{2k_s}{nS_r} (h_{w2} + h_c) \end{aligned} \right\}$$

Onde k_s é a condutividade hidráulica saturada; (h_{w1}, h_{w2}) alturas de carga aplicada; h_c altura máxima capilar; S_r é o grau de saturação. O resultado gráfico permite calcular k_s e h_c .

2.3.4 VALORES DA ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS

Alguns valores típicos de altura de incremento capilar são apresentados na Tabela 8, 9, 10 e 11, para diferentes tipos de solos.

Tabela 8. Altura capilar segundo o tipo do solo (PERLOFF & BARON, 1991)

Tipo de solo	h_c (cm)
Areia grossa	2 – 5
Areia	12 – 35
Areia fina	35 – 70
Silte	70 – 150
Argila	200 – 400 e mais

Alturas máximas de ascensão capilar atingida por solos de texturas diferentes, estudados por Lane & Washburn (1943), Malik et al (1989) e Kumar & Malik (1990) encontrados na literatura são apresentados na Tabela 11.

Tabela 9. Altura aproximada da ascensão capilar em diferentes tipos de solos (HOLTZ & KOVACS, 1981)

Tipo de solo	Solto-h_c (cm)	Denso-h_c (cm)
Areia grossa	3 – 12	4 – 15
Areia media	12 – 50	15 – 110
Areia fina	30 – 200	40 – 350
Silte	200 – 1000	250 – 1200
Argila	Maior a 1000	

Tabela 10. Faixas típicas da ascensão capilar em solos (Mc CARTHY, 1977; Apud. C. VENKATRAMAIAH)

Tipo de solo	h_c (cm)
Pedregulho fino	2 – 10
Areia grossa	15
Areia fina	30 – 100
Silte	100 – 1000
Argila	1000 – 3000

Tabela 11. Ascensão máxima capilar para solos de diferentes texturas.

Autores da pesquisa	Tipo de solo	Altura máxima de ascensão capilar h_c (cm)
Lane & Washburn (1946)	C1:Pedregulho grossa	5,4
	C2:Pedregulho com areia	28,4
	C3:Areia bem graduada com finos	19,5
	C4:Areia fina pobremente graduada	106,0
	C5:Areia grossa com finos	82,0
	C6:Areia siltosa	239,6
	C7:Areia com silte	165,5
	C8:Argila	359,2
Malik et al (1989)	Ludas – Areias	72,1
	Rawalwas – Areias	77,5
	Rewari – Areias	60,9
	Bhiwani – Areias	65,6
	Tohana – Areia com marga	117,0
	Hisar – Areia com marga	149,4
	Barwala – Marga com areia	158,4
	Rohtak – Marga com areia	155,7
	Hisar – Marga com areia	174,5
	Pehwa – Marga com areia argilosa	154,6
	Hansi – Marga argilosa	127,5
	Ambala – Marga com silte e argila	141,5

Tabela 11. (Continuação) Ascensão máxima capilar para solos de diferentes texturas.

Autores da pesquisa	Tipo de solo	Altura máxima de ascensão capilar h_c (cm)
Kumar & Malik (1990)	Tohana – Areia com marga	117,0
	Hissar – Areia com marga	149,4
	Barwala – Marga arenosa	158,4
	Rohtak – Marga arenosa	155,7
	Hissar – Marga arenosa	174,5
	Pehowa - Marga argilo arenosa	154,6
	Hansi – Marga argilosa	127,5
	Ambala – Marga argilo siltosa	141,5

2.4 O PROBLEMA INVERSO E METODOS DE OTIMIZAÇÃO.

2.4.1 O PROBLEMA INVERSO

Para se estudar um fenômeno físico, tem que se definir um modelo de comportamento. Geralmente os modelos são baseados em leis matemáticas e físicas expressas por parâmetros próprios que nos permitem fazer previsões sobre o fenômeno estudado. Este procedimento constitui o denominado “Problema direto”, onde os “efeitos” são calculados a partir das “causas”. Os “efeitos” representam as respostas obtidas a partir do modelo, e as “causas” representam as condições iniciais, de contorno e as propriedades do sistema (material).

Em problemas de engenharia os modelos que reproduzem o comportamento de alguns fenômenos são expressões complexas que às vezes não admitem uma definição analítica explícita, e em geral dependem de vários parâmetros. Nestes casos pode-se aplicar o “Problema inverso”, que consiste em determinar as “causas” desconhecidas a partir dos “efeitos” desejados ou observados e de informação prévia dos parâmetros. A seguir na Figura 26 apresenta-se de forma gráfica a relação entre o problema direto e o problema inverso.

Figura 26. Relação entre problema inverso e direto.

O problema inverso pode ser classificado segundo a “causa” a ser determinada (CAMPOS, 2003):

- Pela natureza matemática do método, pode ser explícito ou seja uma inversão direta, ou pode ser implícito.
- Pela natureza estatística do método que pode ser determinística ou estocástica.
- Pela natureza da propriedade estimada, que pode ser pela condição inicial, condição de contorno, ou propriedades do sistema.
- Pela natureza da solução, que pode ser por estimativa de parâmetros ou por estimativa da função.

Uma característica importante dos problemas inversos é que são denominados de problemas mal-postos, porque apresentam alguma das três características apresentadas a seguir (RITTER et al, 2002):

- Não Identificável.- Quando existe mais de um conjunto de parâmetros estimados que levem à mesma resposta no modelo.
- Instabilidade .- Quando pequenos erros na medida variável ou nos parâmetros fixos resultam numa grande variação nos parâmetros estimados.
- Sem Unicidade.- Quando a solução não é única.

Para resolver os problemas inversos existem métodos de otimização que podem ser aplicados. A otimização utiliza métodos matemáticos e de cálculo numérico que são denominados de “linguagens de modelação”.

2.4.2 A OTIMIZAÇÃO

A investigação operativa é definida como a ciência de aplicar os recursos disponíveis para conseguir a satisfação ótima de um objetivo específico desejado (RAMOS et al, 2010). Surgiu na Primeira Guerra Mundial devido à necessidade urgente de distribuir os recursos com maior eficiência. Estas mesmas técnicas foram posteriormente aplicadas a outras áreas da ciência.

Dentro das disciplinas típicas da investigação operativa encontram-se os métodos de otimização, que podem ser classificados em métodos clássicos e métodos meta - heurísticos. Entre os métodos clássicos encontram-se a otimização linear, não linear, estocástica, dinâmica, etc.; e entre os métodos heurísticos estão os algoritmos evolutivos como as redes neurais por exemplo. A diferença entre estes dois métodos é que o primeiro busca um ótimo local de uma solução, enquanto que a segunda busca um ótimo global (RAMOS et al, 2010).

Para desenvolver um modelo de otimização é preciso utilizar linguagens de modelagem que podem ser:

- Linguagens de programação; como a linguagem C, C++, Java, Visual Basic, Fortran entre outros.
- Linguagens de cálculo numérico ou simbólico; que podem ser planilhas de cálculo, Matlab, etc.

As vantagens dos otimizadores de planilhas de cálculo além da facilidade de uso é a boa integração total com a planilha de cálculo que facilita a explicação do modelo e os resultados, tendo também a facilidade de apresentação dos resultados em gráficos (GASS, 1995). Um destes otimizadores é o programa SOLVER inserido no programa EXCEL.

- Linguagens algébricos de modelado.

Os otimizadores utilizam algoritmos para resolver o modelo, que podem ser deterministas ou estocásticas. Os algoritmos deterministas são os mais utilizados na engenharia, entre eles o método de Newton, quase-Newton, Gradiente conjugado, Método de Levenberg – Marquadt, Método Simplex, entre outros.

Os métodos de otimização são aplicados quando é preciso minimizar ou maximizar uma função. Estes algoritmos procuram encontrar valores “ótimos” em problemas nos quais o cálculo analítico seria muito complexo. Em geral todos estes algoritmos utilizam iterações na

qual são comparados em cada iteração os valores novos com os anteriores, que permitirá dar uma nova direção a seguir até atingir o objetivo.

Os problemas de otimização apresentam três partes:

- Função objetivo.- Que é a medida quantitativa do sistema que se deseja otimizar, sendo esta maximizada ou minimizada.
- Variáveis de decisão.- Que são as decisões ou os parâmetros que vão afetar o valor da função objetivo.
- Restrições.- Que representam o conjunto de relações que podem ser equações ou inequações, ou podem ser também valores fixos ou faixa de valores, que as variáveis têm que satisfazer.

Portanto, o processo de otimização consiste em encontrar os valores das variáveis que possam fazer ótima a função objetivo, cumprindo todas as restrições.

2.4.3 METODO DE OTIMIZAÇÃO SOLVER

O Solver é um programa de fácil uso que vem incluído junto às ferramentas de Excel, desenvolvido por Frontline Systems Inc. Também existem versões de Solver que funcionam com outros sistemas operativos e são complementos de programas como Matlab, Quattro Pro e Lotus. O Solver é um complemento de Excel baseado na programação de restrições, que permite resolver uma grande quantidade de problemas de otimização, utilizando para isso o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG ou GRG2), o algoritmo Bound and Branch e o Simplex (SÁNCHEZ & LÓPEZ, 1998).

Sendo o Solver um programa de otimização, podemos distinguir três partes na sua estrutura: a primeira, a célula função objetivo que se deve otimizar (maximizar ou minimizar), em problemas complexos pode ser mais de uma. A segunda, são as células variáveis de decisão que contém os parâmetros, e por último as células das restrições que podem ser explícitas ou apresentar uma faixa de valor e inclusive podem não existir. Com o Solver é possível resolver problemas que tenham até 200 variáveis de decisão, 100 restrições explícitas e 400 simples (AVELLA, 2011).

A partir dos valores iniciais proporcionados pelo usuário, o algoritmo GRG se move na região factível definida, intercambiando os valores das células variáveis. Se o valor da célula objetivo melhora o algoritmo se movimenta nessa direção; se, pelo contrário o valor da célula objetivo não melhora, ele se movimenta na direção contrária. O processo iterativo

continua até quando a célula objetivo não pode melhorar mais, ou quando o número de iterações definido pelo usuário é completado.

2.4.4 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS EM PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

Os estudos de fluxo de fluidos e transporte de contaminantes num meio não saturado como o solo têm sido muito frequentes nas últimas décadas, devido à necessidade de cuidar dos recursos naturais e de previsão de contaminações do solo e das águas subterrâneas. As propriedades hidráulicas e de transporte são determinadas tradicionalmente com a imposição de uma série de restrições iniciais e de contorno, de tal maneira que as equações que as governam têm que ser analíticas ou semi-analíticas.

Nesta linha, existem na atualidade muitos ensaios de laboratório e campo para avaliar as propriedades hidráulicas em solos não saturados, porém, a sua realização é dificultada devido principalmente à necessidade de aplicar restrições iniciais e condições de contorno, que diminuem sua praticidade por consumir longos períodos de tempo e por serem de alto custo.

Para superar estes problemas, têm sido aplicados de forma bem-sucedida métodos indiretos, como, por exemplo, o método do “problema inverso”. Através de técnicas de otimização, este método facilita bastante a obtenção dos parâmetros hidráulicos básicos do fluxo e do transporte de solutos. Porém, estes parâmetros devem ser bem identificados antes de se aplicar o modelo, uma vez que modelar o comportamento de fluidos em solos não saturados depende de muitos parâmetros associados a processos físico-químicos, e nem todos podem ter a mesma relevância no fenômeno analisado.

A formulação do modelo é, portanto, uma parte extremamente importante, sendo preciso conhecer as duas fases que o compõem:

- Identificação dos processos.- Nesta fase, são identificados os processos físico-químicos e as equações correspondentes que vão representar o fenômeno físico analisado.
- Identificação da estrutura do modelo.- Nesta fase, são estabelecidas as formulações matemáticas, as variáveis de estado e os parâmetros físicos que definem o comportamento do fenômeno estudado. Podemos citar exemplos de algumas formulações matemáticas baseadas na lei de Darcy, Dispersão de Fick, Equação de Richards, Funções da condutividade hidráulica não saturada

de Van Genuchten, dentre outros. As variáveis de estado são observações e medidas obtidas nos ensaios, como a ascensão capilar, a umidade, a vazão percolada, e os parâmetros físicos, como a condutividade hidráulica saturada e a porosidade.

A partir da década de 1980, têm se tornado mais frequentes as aplicações do método inverso para determinar as propriedades hidráulicas dos solos não saturados, como os exemplos citados a seguir:

Kool et al (1985) realizaram ensaios de tipo transiente (outflow onestep), com a finalidade de determinar a curva de retenção e a função condutividade hidráulica. As propriedades hidráulicas do solo foram representadas pelo modelo de Van Genuchten, contendo três parâmetros variáveis: o conteúdo de umidade residual e os coeficientes α e n . Estes parâmetros foram obtidos por meio da minimização da função objetivo contendo a diferença entre as medidas de fluxo experimentais e as estimadas. Uma das conclusões dos autores foi que os valores dos parâmetros de entrada tinham que ser razoavelmente próximos dos valores reais para evitar soluções irreais e melhorar a velocidade de convergência. Além disso, afirmaram que é preciso ter cuidado na obtenção dos dados nos ensaios, buscando minimizar os erros.

Dois anos depois, Kool et al (1987) aplicaram o método de estimação de parâmetros ao fluxo e transporte de solutos, enfatizando a importância de definir cuidadosamente o modelo que representa o fenômeno físico, porque o método de estimação de parâmetros é apenas um processo iterativo baseado no modelo adotado. Além disso, também assinalaram que a função objetivo deve ser bem formulada, porque influirá na unicidade e sensibilidade dos resultados no processo de otimização.

Eching & Hopmans (1993) analisaram a estimação da função condutividade hidráulica por meio dos métodos de estimação de parâmetros, tendo como objetivo principal minimizar os problemas de falta de unicidade no modelo. Para isso, optaram pelo modelo de Van Genuchten e realizaram ensaios de “Outflow One-step e Outflow multistep” muito próximos dos realizados por Kool et al (1985 e 1987), adicionando porém as medições da carga de pressão da água no solo. Concluíram que, ao adicionar estas medidas, é possível obter uma informação adequada para se chegar a uma solução única do modelo. Realizaram também comparações entre amostras inalteradas e amostras remoldadas que conservavam as mesmas características. Nos ensaios, observaram uma variação nos dados obtidos devido à mudança

da estrutura no solo. Esta variação afetou a sensibilidade do modelo, ocasionando uma variação na estimação dos parâmetros.

Simunek et al (1998) tiveram como objetivo principal avaliar o potencial do método de otimização de parâmetros para estimar simultaneamente a curva de retenção e a função condutividade hidráulica baseados em ensaios de evaporação em núcleos de solo. Para definir o modelo, basearam-se na equação de Richards. As medições feitas em laboratório foram as leituras dos tensiômetros e as perdas da água por evaporação ao longo do tempo. O estudo esteve direcionado à minimização dos problemas de unicidade e à estabilidade do modelo, com a finalidade de ter a mínima informação necessária para se obter uma solução única. No caso da otimização da função condutividade hidráulica, observaram-se a sensibilidade do modelo ao parâmetros n (fator de forma da equação de Van Genuchten), o conteúdo de umidade saturada e a existência de uma dependência entre os parâmetros n e o conteúdo de umidade residual.

Chen et al (1998) utilizaram os ensaios de “Outflow Multi-step” para aplicá-los a dois sistemas de fluxo diferentes do convencional (ar-água), que neste caso foram os sistemas ar-óleo e óleo-água. Aplicaram o método de otimização de parâmetros para estimar a função condutividade hidráulica e a relação pressão capilar-saturação. Com este objetivo, foram avaliados sete modelos paramétricos constituídos por 6 ou 7 parâmetros desconhecidos, obtendo bons ajustes entre os dados experimentais e os dados estimados em quatro modelos testados. Os autores observaram que o aumento do número de parâmetros conduz a melhores previsões nas medidas variáveis, porém, influi de forma negativa na unicidade do modelo, criando maior incerteza nos valores estimados dos parâmetros. Portanto, consideraram importante advertir que, na fase de formulação do modelo, os parâmetros que podem ser medidos de forma independente com boa precisão devem ser inseridos no modelo como constantes.

Ritter et al (2002) aplicaram o método de estimação de parâmetros para avaliar o fluxo da água e transporte de solutos por meio das propriedades hidráulicas dos solos. O modelo foi baseado também na equação de Richards, e foram obtidos dados de campo da variação da umidade ao longo do tempo para 3 profundidades. Os autores analisaram os parâmetros com o método tradicional de tentativa-erro e o método inverso com o algoritmo de busca global. Foram encontrados maiores erros com o primeiro método, por ser mais subjetivo, e melhores ajustes no segundo. Na análise foi constatado que o modelo adotado era um problema “mal-posto”, sendo a causa a grande quantidade de parâmetros estimados, o que influiu na convergência do modelo.

2.4.4.1 Vantagens e desvantagens

Para se definir as vantagens e desvantagens do método de estimação de parâmetros, é útil observar separadamente três fatores importantes do problema:

- a formulação do modelo;
- a função objetivo;
- os parâmetros.

Serão expostos neste tópico alguns pontos favoráveis e desfavoráveis nos métodos de otimização de parâmetros encontrados na literatura revisada.

A. Formulação do modelo

Uma vantagem dos métodos de otimização de parâmetros segundo Kool (1987) é que eles não há restrições inerentes à forma ou complexidade do modelo que representa o fenômeno físico, nem à estipulação das condições iniciais e de contorno, nem às relações constitutivas.

Outra vantagem é que as condições experimentais podem ser selecionadas com base na conveniência e na celeridade, em vez da necessidade de simplificar a matemática, como ocorre no processo direto. Além disso, se existe incerteza nos parâmetros ou na exatidão do modelo que representa o fenômeno físico, isto pode ser avaliado de maneira rápida apenas com o processamento do modelo (KOOL, 1987).

Ainda, utilizar os métodos de estimação de parâmetros apresenta outro ponto favorável: estes podem estar baseados em ensaios transientes, que são muito mais rápidos que os ensaios de regime permanente, assim como também as condições de contorno podem ser livremente escolhidas.

A gama relativamente ampla de opções de modelos selecionados também indica a flexibilidade e robustez do método de estimação de parâmetros. Vantagens inerentes ao método de estimação de parâmetros incluem a simplicidade e precisão das medições feitas em laboratório ou campo (CHEN et al, 1998).

Para evitar um problema “mal-posto”, deve-se ter cuidado na escolha dos ensaios dos quais serão extraídos os dados que caracterizam o fenômeno estudado, dados que influirão na estimação dos parâmetros.

Na formulação do modelo, deve-se concentrar a atenção nos parâmetros considerados, evitando que exista entre eles uma estreita dependência, que logo é refletida na sensibilidade do modelo (RITTER et al, 2002).

B. Função objetivo

A eficiência da função objetivo depende principalmente do número de parâmetros, da topologia da função objetivo e da parametrização do algoritmo. Esta eficiência está diretamente relacionada à performance do processo de otimização.

Em alguns casos, quando os parâmetros são independentes, deve-se ter cuidado para que a função objetivo não deixe de abranger um dos parâmetros, podendo ocasionar grandes variações em comparação com dados reais (KOOL et al, 1987).

C. Os parâmetros

A vantagem principal do método de otimização é poder encontrar de forma mais rápida os parâmetros que definem o comportamento do fenômeno físico, evitando a necessidade de realizar ensaios demorados, custosos e pouco precisos.

Em geral, a maior desvantagem dos métodos de otimização é o elevado grau de incerteza que apresentam os parâmetros empíricos ou físicos e a dificuldade intrínseca do problema matemático que representa o fenômeno físico. Isto se deve à formulação “mal-posta” do modelo, que gera problemas de não unicidade, sensibilidade e não identificação dos parâmetros.

Além disso, existem problemas quando os parâmetros são dependentes entre si, o que influi na sensibilidade do modelo.

3 MATERIAIS E METODOS

Apresentam-se neste capítulo uma descrição dos solos analisados bem como o procedimento experimental realizado, na ordem em que foram executados para atingir o objetivo pretendido e que são apresentados a seguir.

3.1 Materiais

3.1.1 Amostras

Consideraram-se duas etapas na escolha das amostras, na primeira etapa recopilou-se informação de ensaios divulgados na literatura, que apresentassem dados do fenômeno capilar da água nos solos, avaliados em função do tempo, assim como os resultados da condutividade hidráulica saturada, propriedades físicas, e eventualmente valores da condutividade hidráulica não saturada. Na segunda etapa escolheram-se oito solos de distintas áreas do Estado de São Paulo, para os quais se realizaram ensaios de caracterização, de compactação, de permeabilidade e de ascensão capilar.

Primeira Etapa

Dentre os resultados da literatura, foram selecionadas duas pesquisas, a primeira com solos estudados por Lane & Washburn (1946). Estes autores ensaiaram quatro amostras de pedregulhos, três de areia e uma de silte. A Tabela 12 resume os índices físicos, a condutividade hidráulica saturada dos solos ensaiados, e a altura máxima de ascensão capilar atingida. Os solos ensaiados são classificados como C-1: pedregulho bem graduado com areia; C-2: areia grossa a média, mal graduada; C-3: areia bem graduada com pedregulho; C-4: areia média a fina, mal graduada; C-5: areia bem graduada com pedregulhos; C-6: areia siltosa; C-7: areia bem graduada com finos; e C-8: silte.

Tabela 12. Características dos solos ensaiados por Lane & Washburn (1946) e resultados de condutividade hidráulica saturada (k_s) e máxima altura de ascensão capilar (h_c).

Solo	ρ_s g/cm ³	e -	n -	k_s cm/s	h_c cm
C-1	2,70	0,27	0,21	$1,1 \times 10^{-1}$	5,4
C-2	2,65	0,45	0,31	$1,6 \times 10^{-2}$	28,4
C-3	2,70	0,29	0,23	$7,1 \times 10^{-3}$	19,8
C-4	2,70	0,45	0,31	$4,6 \times 10^{-4}$	106
C-5	2,69	0,27	0,21	$1,1 \times 10^{-4}$	82
C-6	2,75	0,48	0,40	$6,5 \times 10^{-5}$	239
C-7	2,77	0,36	0,26	$9,6 \times 10^{-6}$	165,5
C-8	2,76	0,95	0,49	$1,4 \times 10^{-5}$	360

O segundo conjunto de resultados compreende os divulgados por Zhang & Fredlund (2009), fazendo a análise de cinco tipos de solos que variam de pedregulho à argila, dos quais se analisaram os quatro solos finos. Neste estudo, Zhang & Fredlund (2009) fizeram medidas de ascensão capilar, de sucção, e de umidade, em uma coluna de solo de 100 cm de altura, buscando utilizar a técnica do perfil instantâneo na determinação da função condutividade hidráulica. A Tabela 13 mostra uma síntese dos índices físicos, de k_s e de h_c dos solos ensaiados, identificados por sua classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Tabela 13. Características dos solos ensaiados por Zhang & Fredlund (2009), porosidade, condutividade hidráulica saturada (k_s) e máxima altura de ascensão capilar.

Solo	ML	CL	SM	SC
Granulometria				
% Finos	60%	80%	24%	42%
% Areia	25%	20%	32%	29%
% Pedregulho	15%	0%	44%	29%
n	0,45	0,50	0,31	0,39
k_s	1×10^{-5}	3×10^{-6}	3×10^{-3}	2×10^{-5}
(cm/s)	a 3×10^{-4}	a 3×10^{-5}	a 5×10^{-2}	a 4×10^{-4}
* h_c	96	71	78,5	74

* h_c : Valor limitado pela altura do tubo de teste (1m.)

Segunda Etapa

Na segunda etapa, foram ensaiados oito amostras de solos provenientes de distintas áreas do estado de São Paulo. Os locais de coleta das amostras e suas respectivas identificações que serão utilizadas ao longo desta pesquisa são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14. Local de amostragem dos solos pertencentes ao Estado de São Paulo

Local da Coleta	Referência Rodovia	Coordenadas	
Sorocaba – Itapetininga (A1)	SP-270	S 23° 33' 20,9"	W 47° 49' 25,4"
São Carlos (A2)	USP - Campus II	S 22° 00' 16,1"	W 47° 56' 7,59"
Tremembé - Via Dutra (A3)	SP-123	S 22° 53' 19,6"	W 45° 35' 47,4"
Avaré (A4)	SP-255	S 22° 57' 38,8"	W 48° 48' 26,0"
Dois Córregos (A5)	Vicinal: SP-225	S 22° 18' 58,0"	W 48° 23' 36,5"
Igaratá (A6)	SP-65	S 23° 14' 58,2"	W 46° 06' 21,3"
Mairinque – Alumínio (A7)	SP-270	S 23° 31' 49,7"	W 47° 13' 38,4"
Itapetininga – Piraju (A6)	SP-270	S 23° 31' 28,8"	W 48° 28' 39,2"

Os ensaios de ascensão capilar foram feitos com solos compactados com a máxima densidade seca e umidade ótima, conforme fornecido pelo ensaio de Proctor Normal. Todos os ensaios foram feitos no Laboratório de Mecânica de Solos - Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos.

3.2 Procedimento experimental - Segunda etapa

3.2.1 Caracterização dos solos

Para a classificação dos solos estudados foram realizados ensaios de análise granulométrica conjunta, cumprindo a norma NBR 7181/84; ensaios de limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), segundo as normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente e a massa específica dos sólidos, segundo o procedimento da norma NBR 6508/84. Os solos foram classificados de acordo com o Sistema Único de Classificação de Solos (SUCS), tendo entre eles dois solos SC (areia argilosa); dois solos ML (silte de baixa compressibilidade) e quatro solos MH (silte de alta compressibilidade).

Além dos ensaios de caracterização foi realizado o ensaio de compactação Proctor Normal (NBR 7182/86), para obter os parâmetros massa específica seca máxima, $\rho_{m\acute{a}x}$, e umidade ótima, w_{ot} . (Tabela 15)

Tabela 15. Índices físicos; classificação SUCS, e parâmetros de compactação dos oito solos analisados nesta pesquisa.

Solo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
%Areia	69	56	38	19	10	8	8	4
%Silte	8	10	21	33	50	10	48	18
%Argila	24	34	40	48	40	82	45	78
LL (%)	34	38	45	49	79	108	58	60
IP(%)	14	17	11	15	26	53	24	17
SUCS	SC	SC	ML	ML	MH	MH	MH	MH
ρ_s (g/cm ³)	2,566	2,690	2,587	2,867	2,98	2,657	2,749	2,666
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,890	1,800	1,46	1,520	1,46	1,272	1,563	1,430
w _{ot} (%)	12,1	14,5	26,7	24,8	31,5	37,7	22,9	29,8

3.2.2 Ensaio de permeabilidade

Para a medida da condutividade hidráulica saturada k_s , os corpos de prova foram compactados dinamicamente em cinco camadas, em moldes de 50 mm de diâmetro e 50mm de altura, buscando-se atingir a massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e a umidade ótima (w_{ot}) fornecidos no ensaio de Proctor Normal (NBR 7182/86).

Na sequência os corpos de prova contidos nos permeâmetros foram percolados por água até atingir-se uma condição de fluxo permanente, para então serem efetuadas as medidas de permeabilidade. Utilizou-se o ensaio de carga variável, tendo-se na Figura 27 uma vista geral do ensaio. Os índices físicos dos corpos de prova antes do ensaio, e a média dos resultados dos ensaios de condutividade hidráulica saturada após o ensaio, são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16. Índices físicos dos corpos de prova antes do ensaio e a condutividade hidráulica saturada, k_s .

Solo	w %	ρ g/cm ³	ρ_d g/cm ³	e -	n -	S _r %	k_s cm/s
A1	12,1	2,07	1,85	0,39	0,28	80	$4,3 \times 10^{-7}$
A2	15,2	2,05	1,78	0,51	0,34	79,8	$1,1 \times 10^{-7}$
A3	27,5	1,86	1,46	0,89	0,47	92,2	$1,3 \times 10^{-6}$
A4	24,1	1,95	1,57	0,83	0,45	83,6	$4,2 \times 10^{-8}$
A5	31,8	1,87	1,42	0,94	0,49	86,4	$1,8 \times 10^{-6}$
A6	37,4	1,75	1,27	1,09	0,52	91,04	$3,7 \times 10^{-6}$
A7	22,7	1,86	1,52	0,82	0,45	77,04	$7,8 \times 10^{-6}$
A8	29,5	1,75	1,35	0,97	0,49	80,65	$6,0 \times 10^{-7}$

Figura 27. Ensaio de Permeabilidade de carga variável: a) processo de saturação das amostras, b) Permeômetro conectado no painel de permeabilidade

3.2.3 Ensaio de ascensão capilar

Para observar o avanço do frente de umedecimento no solo, foram realizados ensaios de ascensão capilar, também com as amostras de solo compactado em sua massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e teor de umidade ótima (w_{ot}). Os detalhes da moldagem das amostras, montagem e execução descrevem-se a continuação.

a.- Moldagem das amostras

Para a moldagem das amostras compactadas consideraram-se a ρ_{dmax} e w_{ot} , obtidos pelo ensaio de compactação. Os solos foram compactados em um molde de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, em camadas de 20mm até o topo, com o auxílio de um equipamento de compactação manual. A Figura 28 mostra os materiais necessários para a moldagem das amostras e a Figura 29 mostra o equipamento para compactação dinâmica dos solos.

No fim da compactação os corpos de prova foram retirados do molde e deixados secar em contato com a atmosfera, até a constância do peso, como mostrado na Figura 30.

Figura 28. Materiais utilizados para moldagem das amostras: 1) balança de precisão de 0.01; 2) molde partido; 3) base inferior; 4) disco de polietileno; 5) Paquímetro para controle das alturas de compactação.

Figura 29. Equipamento para compactação dinâmica do corpo de prova

b.- Montagem do ensaio

Os equipamentos e acessórios utilizados neste ensaio estão ilustrados na Figura 31. Tem-se um recipiente de fornecimento de água assentado sobre uma balança com precisão de 0,01g. Este recipiente de PVC possui uma capacidade de 250ml, com um diâmetro de 100mm e altura de 35mm e fica localizado no mesmo nível do corpo de prova. A conexão do reservatório com a base do corpo de prova é feita por um tubo de 5mm de diâmetro (área $0,345\text{cm}^2$). A base do corpo de prova tem 50mm de diâmetro e 40mm de altura e contém uma

pedra porosa de elevada permeabilidade ($k > 10^{-1}$ cm/s) em seu topo, que serve de apoio ao corpo de prova.

Na lateral uma régua com escala milimétrica, permite medir o avanço da frente de umedecimento com o tempo controlado com cronômetro; as massas de água adsorvidas foram medidas por meio da variação de peso do reservatório.

Figura 30. Corpos de prova em processo de secagem ao ar

Figura 31. Equipamento utilizado para o ensaio de ascensão capilar em solos.

c.-Realização do ensaio

Uma vez nivelado o conjunto: base do corpo de prova – reservatório encheu-se o reservatório com água até saturar a pedra porosa. Nesse instante considerou-se a primeira leitura da balança como o zero de referência.

Em seguida colocou-se a amostra, sem proteção lateral, sobre a pedra porosa e passou-se a registrar a altura de ascensão capilar e a variação de peso do reservatório com água ao longo do tempo. Tomaram-se leituras em intervalos de tempo de dez segundos até um minuto, em cada minuto até dez minutos, e a cada cinco minutos até meia hora. Em alguns casos foram feitas leituras mais espaçadas considerando-se que a velocidade da água diminui com a altura, e que certos solos têm velocidades de ascensão baixas. Teve-se cuidado também de medir a temperatura da água e a umidade relativa do ambiente para conhecer a evaporação da água, e a sua possível influencia na velocidade. O ensaio era concluído quando a frente de umedecimento atingia o topo do corpo de prova, verificado visualmente.

Uma vez concluído o ensaio foram tiradas medidas finais do corpo de prova, como o diâmetro e altura para analisar problemas de possível expansão da amostra; e, por último foram extraídas amostras para determinação do teor de umidade a cada 2cm de altura do corpo de prova. Para cada tipo de solo realizaram-se, no mínimo, duas determinações de ascensão capilar, para verificar-se a repetitividade de resultados. As Figuras 32 e 33 mostram o arranjo geral de um ensaio em execução e o processo de ascensão capilar no solo ao longo do tempo.

Figura 32. Ensaio de ascensão capilar, em andamento.

Figura 33. Avanço da frente de umedecimento ao longo do tempo (Solo Tremembé).

A planilha desenvolvida para registrar os dados da ascensão capilar, da variação de umidade e os cálculos respectivos é apresentada no Apêndice A.

3.3 Obtenção de parâmetros por meio da técnica de otimização *SOLVER*.

Os modelos apresentados por Terzagui (1943) e Lu & Likos (2004) para representar a ascensão capilar em solos poderiam ser aplicados diretamente a resultados de ensaio, caso se conhecessem todas as variáveis intervenientes e restasse determinar apenas uma, por exemplo, k_s , como ocorre nos ensaios rotineiros de permeabilidade. Neste caso optamos pela técnica inversa e passamos a medir os efeitos do fenômeno e por meio de uma técnica de otimização estimamos os parâmetros que o governam.

O método de otimização selecionado foi o programa SOLVER, escolhido por sua versatilidade e fácil uso na aplicação de diversos problemas. O Solver é um complemento de Excel que utiliza o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG o GRG2), o algoritmo Bound & Branch e o Simplex, sendo uma de suas funções resolver problemas de otimização linear e não linear, com a capacidade de considerar até 200 variáveis de decisão, assim como de colocar 100 restrições explícitas e 400 simples. (Avella, 2011).

Os campos de que precisa o programa Solver para otimizar o modelo são as células variáveis de decisão e a célula função objetivo; a primeira cuja variabilidade afetará o valor da função objetivo e a segunda que é a medida quantitativa que se deseja otimizar (maximizar ou

minimizar). A seguir, são apresentados os modelos assim como os campos do programa SOLVER definidos para esta pesquisa.

- **Modelos**

Os modelos selecionados para representar o processo de ascensão capilar nos solos foram os de Terzaghi (1943) (Equação 35) e de Lu & Likos (2004b) (Equação 36).

$$t = \frac{nh_c}{k_s} \left(\ln \frac{h_c}{h_c - z} - \frac{z}{h_c} \right). \quad (35)$$

Onde: t é o tempo; n é a porosidade do solo; h_c é a máxima altura de ascensão capilar; k_s é a condutividade hidráulica saturada; e z é o avanço da altura de ascensão capilar.

$$t = \frac{n}{k_s} \sum_{j=0}^{m=\infty} \frac{\beta^j}{j!} \left(h_c^{j+1} \ln \frac{h_c}{h_c - z} - \sum_{s=0}^j \frac{h_c^s z^{j+1-s}}{j+1-s} \right) \quad (36)$$

Onde: t é o tempo; n é a porosidade do solo; k_s é a condutividade hidráulica saturada; β é o parâmetro que representa a variação da condutividade com o potencial hidráulico; h_c é a máxima altura de ascensão capilar; z é o avanço da altura de ascensão capilar.

- **Os parâmetros variáveis**

Os parâmetros otimizados (células variáveis) no programa SOLVER são apresentados na Tabela 17, para os dois modelos.

Tabela 17. Células variáveis para os modelos de Terzaghi e Lu & Likos

	Terzaghi (1943)		Lu & Likos (2004)	
Parâmetros (Células Variáveis)	1.-Condutividade	hidráulica	1.-Condutividade	hidráulica
	saturada (k_s)		saturada (k_s)	
	2.-Altura máxima de ascensão		2.-Altura máxima de ascensão	
	capilar (h_c)		capilar (h_c)	
			3.-Parâmetro β (da equação de Gardner de um parâmetro)	

No modelo de Lu & Likos (2004) realizou-se a otimização de parâmetros no programa SOLVER considerando duas opções: na primeira opção apresentando como variáveis os três parâmetros k_s , h_c e β , e cuja notação será “Lu & Likos”; e, na segunda opção, considerou-se fixo o valor de k_s obtido em laboratório e como variáveis os parâmetros h_c e β , cuja notação será “Lu & Likos(1)”. Neste modelo realizaram-se ajustes de até seis termos da série para cada solo analisado, com o objetivo de obter um melhor ajuste às curvas experimentais.

- ***A Função objetivo***

A função objetivo que será minimizada durante o processo de otimização SOLVER, até obter o melhor ajuste entre as curvas experimentais e estimadas será a soma dos desvios quadráticos entre os valores observados em laboratório (t_o) e, os estimados pelo Solver (t_e) (t_o) (Equação 37).

$$F.O. = \sum (t_o - t_e)^2 \quad (37)$$

Para ter uma melhor visualização dos ajustes, optou-se para o eixo do tempo a escala logarítmica nos solos estudados por Lane & Washburn (1946), e escala aritmética para os solos ensaiados por Zhang & Fredlund (2009) e solos ensaiados nesta pesquisa. O critério do melhor ajuste, além da visualização gráfica das curvas, foi determinado em função do menor valor da soma dos desvios quadráticos entre os tempos estimados e os experimentais.

No apêndice B, apresenta-se um exemplo do processo empregado no programa SOLVER para cada um dos solos analisados, neste caso usando o método de Lu & Likos com três variáveis, k_s , h_c e β .

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados na seguinte ordem:

- a) Ensaaios de ascensão capilar; compreendendo os resultados reportados por Lane & Washburn (1946), os resultados divulgados por Zhang & Fredlund (2009) e os resultados experimentais obtidos neste trabalho.
- b) Quadros resumo dos ajustes com os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004b) até a sexta série.
- c) Gráficos com os melhores ajustes com a proposta de Terzaghi (1943), de Lu & Likos (2004b) (variando os três parâmetros k_s , h_c , β); e finalmente a proposta de Lu & Likos(1) (mantendo fixo k_s e variando h_c e β). Na segunda etapa inclui-se a análise da variação da velocidade e da umidade ao longo do tempo.

A análise será apresentada para cada conjunto de resultados, individualmente e na medida em que se avança na discussão, algumas comparações entre os resultados obtidos também serão efetuadas.

4.1 PRIMEIRA ETAPA

4.1.1 Solos estudados por Lane & Washburn (1946)

4.1.1.1 Ascensão capilar

As Figuras 34 e 35 mostram as relações entre o tempo e ascensão capilar medida por Lane & Washburn (1946) para diferentes tipos de solos, cujas características foram apresentadas em Materiais e Métodos. Por uma questão de escala os resultados estão separados em duas partes, na Figura 34 estão os solos C-1, C-2 e C-3 e na Figura 35 apresentam-se os solos C-4, C-5, C-6, C-7 e C-8.

Notam-se diferentes padrões de comportamento em função dos tipos de solo ensaiados. Os solos C-1, C-2 e C-3 atingem as menores alturas máximas de ascensão capilar, o que ocorre em curto espaço de tempo, inferior a dois dias para o solo C-1, e ainda menores para os solos C-2 e C-3. Estes solos são granulares com composição que varia desde

pedregulho (C-1) até areia média, com pedregulho, bem graduada. A partir do solo C-4 até C-8 a composição varia gradualmente de areia média (C-4) até silte (C-8) e nota-se que as máximas alturas de ascensão capilar estão associadas a uma redução do tamanho das partículas. Observou-se também que outro fator importante que influi na ascensão capilar é a graduação dos solos, pois os solos mal graduados C-2, C-4, C-6, C-8, atingem maiores alturas de ascensão, contrário aos solos bem graduados C-1, C-3, C-5 e C-7.

Observou-se que em geral a ascensão capilar diminui consideravelmente a partir do ponto de inflexão na curva “Ascensão capilar *versus* tempo”, e essa tendência à constância apresenta-se em torno do 80% da máxima ascensão capilar.

Figura 34. Resultados dos ensaios de ascensão capilar realizados por Lane & Washburn (1946)
– Solos C-1, C-2, C-3

Figura 35. Resultados dos ensaios de ascensão capilar realizados por Lane & Washburn (1946)
– Solos C-1, C-2, C-3.

4.1.1.2 Apresentação dos ajustes e obtenção dos parâmetros.

A Tabela 18 sintetiza os resultados do processo de otimização por meio do programa SOLVER para os solos ensaiados por Lane & Washburn (1946), apresentando primeiro os dados obtidos experimentalmente da condutividade hidráulica saturada (k_s) e da altura de ascensão capilar (h_c). Em seguida, incluem-se os resultados dos ajustes realizados considerando os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004b) com seus respectivos parâmetros: no modelo de Terzaghi (1943), k_s e h_c , e no modelo de Lu & Likos (2004), k_s , h_c e β .

Recorda-se que na análise pela proposta de Lu & Likos (2004b), consideraram-se também dois tipos de condições: a primeira fazendo variar os três parâmetros (k_s , h_c , β) no programa SOLVER, cuja notação no gráfico será “Lu & Likos” e o segundo, considerando como dado fixo a condutividade hidráulica saturada (k_s) obtida experimentalmente e fazendo variar no programa SOLVER, os parâmetros (h_c e β) cuja notação no gráfico será “Lu & Likos(1)”.

No caso do modelo de Lu & Likos (2004b), realizaram-se ajustes considerando até seis termos da série, identificados por m1 a m6 para cada solo analisado. As Figuras 36 e 37 ilustram como exemplo o ajuste realizado para o solo C-4 (Lane & Washburn (1946)), avaliando cinco termos da série na proposta de Lu & Likos (2004) nas duas condições. A escolha de quantos termos da série fornece o melhor ajuste foi baseada no menor valor da soma dos desvios quadráticos entre os pontos estimados e os medidos experimentalmente. No exemplo do solo C-4, Figura 36, o melhor ajuste ocorre quando se utiliza apenas o segundo termo da série. A mesma situação se repete na Figura 37, onde estão os ajustes proporcionados pela segunda opção do método Lu & Likos (1)(2004). Estes valores aparecem sombreados na Tabela 18 que sintetiza os parâmetros de melhor ajuste obtidos nas diversas análises. O mesmo é repetido para os demais solos, onde os melhores ajustes aparecem sombreados.

Os valores dos parâmetros resultantes dos melhores ajustes foram extraídos e serviram para traçar as curvas de modelação dos resultados experimentais, conforme se apresentará no item 4.1.1.3.-Análise de parâmetros obtidos por ajuste.

Figura 36. Ajuste realizado para o solo C-4 de Lane & Washburn (1946), considerando diferentes termos da série da solução – Modelo de Lu & Likos (2004) (Primeira opção).

Figura 37. Ajuste realizado para o solo C-4 de Lane & Washburn (1946), considerando diferentes termos da série da solução – Modelo de Lu & Likos(1) (2004) (Segunda opção).

Tabela 18. Resultados obtidos pelo Programa SOLVER, com as propostas de Terzaghi e Lu & Likos (Variando k_s , h_c , β) e Lu & Likos (1) (Variando h_c , β). Solos estudados por Lane & Washburn (1946).

SOLO	Parâmetros	Dados	Terzaghi	Lu & Likos - SOLVER (Variando k_s, h_c, β)						Lu & Likos (1) - SOLVER (k_s Fixo e Variando h_c, β)					
		Experimentais		$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$	$m6$	$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$	$m6$
C-1	$k_s(\text{cm/s})$	1.1E-01	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03		1.1E-03	1.1E-03	1.1E-03	1.1E-03	1.1E-03	
	$h_c(\text{cm})$	5.40	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50		5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	
	β			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.000	1.00	1.00	1.00	1.00	
C-2	$k_s(\text{cm/s})$	1.6E-02	1.0E-03	5.8E-03	7.6E-02	5.5E-01	2.3E-01	1.1E-01	3.4E-03	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02
	$h_c(\text{cm})$	28.40	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	28.53	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50
	β	0.176		1.000	1.000	0.925	0.443	0.304	0.107	1.000	0.435	0.253	0.202	0.182	0.173
C-3	$k_s(\text{cm/s})$	7.1E-03	1.0E-03	1.7E-03	1.6E-02	9.8E-02	4.7E-01	5.9E-01	9.6E-01	7.1E-03	7.1E-03	7.1E-03	7.1E-03	7.1E-03	7.1E-03
	$h_c(\text{cm})$	19.80	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	20.97	26.54	36.11	49.34
	β			1.000	1.000	1.000	1.000	0.781	0.714	1.000	0.655	0.500	0.500	0.500	0.500
C-4	$k_s(\text{cm/s})$	4.6E-04	1.6E-05	9.9E-05	2.0E-04	3.5E-04	5.3E-04	6.2E-05		4.6E-04	4.6E-04	4.6E-04	4.6E-04	4.6E-04	
	$h_c(\text{cm})$	106.00	108.00	115.00	150.00	200.00	250.00	300.00		106.00	106.00	106.00	106.00	106.00	
	β	0.047		0.100	0.100	0.100	0.097	0.049		0.100	0.060	0.041	0.036	0.034	
C-5	$k_s(\text{cm/s})$	1.1E-04	4.2E-06	2.8E-05	1.2E-04	3.7E-04	7.2E-04	7.2E-04		1.1E-04	1.1E-04	1.1E-04	1.1E-04	1.1E-04	
	$h_c(\text{cm})$	82.00	82.00	82.00	82.00	82.00	83.00	85.00		82.25	82.27	82.27	82.27	82.27	
	β	0.024		0.100	0.100	0.100	0.100	0.100		0.430	0.101	0.066	0.055	0.050	
C-6	$k_s(\text{cm/s})$	6.2E-05	1.6E-05	1.0E-04	1.9E-05	1.0E-04	9.9E-05	9.9E-05		6.2E-05	6.2E-05	6.2E-05	6.2E-05	6.2E-05	
	$h_c(\text{cm})$	239.60	239.60	239.60	239.60	239.60	239.60	239.60		239.60	239.60	239.66	239.60	239.60	
	β	0.006		0.025	0.001	0.010	0.009	0.008		0.025	0.008	0.007	0.006	0.006	
C-7	$k_s(\text{cm/s})$	9.6E-06	9.7E-06	1.8E-04	8.9E-04	8.7E-04	4.9E-04	6.5E-04		9.6E-06	9.6E-06	9.6E-06	9.6E-06	9.6E-06	
	$h_c(\text{cm})$	165.50	166.00	166.00	166.00	167.00	166.00	166.02		298.80	697.20	1735.00	2500.00	4000.00	
	β			0.117	0.084	0.052	0.030	0.030		0.057	0.052	0.054	0.050	0.050	
C-8	$k_s(\text{cm/s})$	1.4E-05	1.9E-05	5.4E-05	8.1E-05	9.6E-05	1.0E-04	1.0E-04		1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	
	$h_c(\text{cm})$	360.00	361.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00		467.59	467.59	467.59	467.59	467.59	
	β			0.005	0.005	0.005	0.005	0.005		0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	

4.1.1.3 Análise dos parâmetros obtidos

As curvas de ascensão capilar *versus* tempo são ilustradas nas Figuras 38 a 45, para cada solo estudado por Lane & Wasburn (1946). Nestas figuras estão os resultados dos pontos experimentais e as curvas dos melhores ajustes, fornecidos pelo método de Terzagui (1943), de Lu & Likos (2004) e de Lu & Likos (1)(2004), traçadas com os parâmetros obtidos por meio de o programa SOLVER. Para o método de Lu & Likos (2004) apresenta-se, na legenda, o termo da serie (m) que fornece o melhor ajuste aos dados experimentais. Os parâmetros obtidos da otimização e os resultados experimentais estão inseridos na tabela localizada na parte inferior de cada gráfico.

Solo C-1: Na Figura 38 tem-se os resultados para o solo C-1, um pedregulho com areia grossa, bem graduado e observa-se que os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos(1)(2004), estão muito afastados dos dados experimentais. Já o ajuste fornecido por Lu & Likos (2004) tende a se aproximar dos dados experimentais e fornece o valor da condutividade hidráulica saturada(k_s) com uma aproximação de duas ordens de grandeza. Em contrapartida, o valor de h_c , fornecido pelo *SOLVER*, é muito próximo ao obtido, experimentalmente, nas três alternativas.

Figura 38. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-1(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-2: A Figura 39 ilustra os resultados para o solo C-2, composto por areia grossa a média, onde pode-se observar que o processo de ascensão capilar é melhor representado pelo modelo de Lu & Likos (2004), após decorridos 150s do ensaio. O valor da condutividade hidráulica saturada(k_s) varia em uma ordem de grandeza comparadas ao dado experimental, para as duas propostas, embora a proposta de Terzagui (1943) forneça uma ordem de grandeza menor e a de Lu & Likos (2004) uma ordem de grandeza maior que o valor k_s experimental. O valor da altura máxima capilar é similar ao dado obtido experimentalmente nas três condições de análise.

Figura 39. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-2 (Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-3: A Figura 40 apresenta as curvas de ascensão capilar *versus* tempo para o solo C-3 classificado como uma areia bem graduada com pedregulho. Pode-se observar que o ajuste com a proposta de Lu & Likos (2004), nas duas condições, representa melhor o processo de ascensão capilar neste caso, excetuando os pontos anteriores a 1000s do ensaio, este ajuste fornece um valor de k_s com uma diferença de uma ordem de grandeza maior que o valor de k_s experimental. Por outro lado, o modelo de Terzaghi (1943) não se ajusta aos dados experimentais, porem o resultado obtido de k_s , é da mesma ordem de grandeza do que o

obtido no laboratório. Igual aos casos anteriores o valor de h_c é similar nas três análises e praticamente igual ao obtido experimentalmente.

Figura 40. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-3(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-4: A Figura 41 mostra a curva de ascensão capilar do solo C-4, uma areia média a fina, mal graduada. A curva de ajuste com a proposta de Terzaghi (1943) ainda fica longe dos dados experimentais, sobretudo nos primeiros pontos, mas fornece um valor de k_s com uma diferença de uma ordem de grandeza menor que o dado experimental. A proposta de Lu & Likos (2004) apresenta um bom ajuste, embora a curva se afaste dos pontos experimentais para tempos acima de 1000000s. A condutividade hidráulica saturada tem a mesma ordem de grandeza do k_s experimental, no entanto o valor fornecido de h_c é maior em 40% ao h_c de laboratório.

Na análise segundo Lu & Likos(1) (2004), tem-se uma curva que fica afastada da curva experimental, mas o valor de h_c otimizado é igual ao dado experimental.

Figura 41. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-4 (Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-5: A Figura 42 apresenta a curva de ascensão capilar do solo C-5, classificado como areia bem graduada com pedregulhos, mostrando que o melhor ajuste aos dados experimentais é o fornecido pela proposta de Lu & Likos (2004), acrescido do fato de que a condutividade hidráulica saturada(k_s) apresenta-se na mesma ordem de grandeza que o valor experimental.

O ajuste com Terzaghi (1943) ficou afastado dos pontos experimentais e o valor da condutividade hidráulica saturada(k_s) é diferenciado por duas ordens de grandeza com o k_s experimental.

O ajuste com Lu & Likos(1) ao igual que as outras duas propostas, também fornece um valor de h_c similar ao dado experimental, mesmo que os dados experimentais apresentam uma forma muito sinuosa.

Figura 42. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-5(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-6: Na Figura 43 mostra-se os resultados para o solo C-6, composto de uma areia siltosa. Observa-se no gráfico que as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) ajustam-se bem aos pontos experimentais, fornecendo também o valor da condutividade hidráulica saturada (k_s), na mesma ordem de grandeza do valor experimental e um valor de h_c similar ao h_c de laboratório.

A proposta de Lu & Likos(1) (2004) afasta-se um pouco dos pontos experimentais, mas fornece h_c igual ao dado experimental. Os ajustes das três propostas têm praticamente a mesma forma e aproximam-se bem dos pontos experimentais.

Figura 43. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-6(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-7: A Figura 44 mostra os resultados dos ajustes com a proposta de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), para o solo C-7, consistindo de uma areia bem graduada com finos. Pelo gráfico observa-se que Terzaghi (1943) aproxima-se dos pontos experimentais, com k_s da mesma ordem de grandeza que o k_s experimental. Lu & Likos (2004) também se aproxima dos pontos experimentais, porém k_s tem uma diferença de duas ordens de grandeza em relação ao k_s experimental.

Lu & Likos(1)(2004), também tende a se aproximar dos pontos experimentais porém proporciona um valor de h_c muito elevado, superior em 25 vezes o valor medido experimentalmente.

Mantendo o padrão dos resultados anteriores, h_c previsto por Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) são praticamente iguais ao valor medido.

Figura 44. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2009) para o solo C-7(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Solo C-8: Na Figura 45 tem-se os resultados para o solo C-8, composto por silte. Observa-se que as propostas de Terzaghi (1946) e Lu & Likos(2004) ficaram muito afastadas da curva experimental, mas mesmo nessas condições forneceram um k_s da mesma ordem de grandeza que o valor de k_s experimental, e também um valor de h_c similar ao dado experimental. Já com Lu & Likos(1)(2004) o ajuste melhora um pouco, mas h_c afasta-se do valor experimental.

Figura 45. Melhor ajuste com os Métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) para o solo C-8(Lane & Washburn), e valores de k_s e h_c .

Análise do Parâmetro β da função Condutividade hidráulica de Gardner (1958)

Embora Lane & Washburn (1946) não forneçam qualquer informação sobre a condutividade não saturada, Lu & Likos (2004) consideraram os resultados de ascensão capilar obtidos em 24 solos (Tabela 19), que continham dados experimentais de h_c (altura máxima de ascensão capilar) e h_a (altura de entrada de ar). Os autores encontraram para esses solos uma relação $h_c/h_a = 2$ a 5. Em outra análise consideraram também a relação $h_a = 1/\beta$ e a partir das duas relações estimaram o parâmetro β para os solos C-2, C-4, C-5 e C-6 ensaiados por Lane & Washburn (1946).

Nesta pesquisa consideramos também estimar o parâmetro β para os demais solos conforme se mostra na Tabela 20. Em seguida a partir da utilização do SOLVER obtiveram-se valores de β (calculados) que se encontram também na Tabela 20, para comparação.

Embora os valores de β utilizados para comparar tenham sido estimados, observa-se que adotar k_s conhecido (segunda opção do modelo de Lu & Likos(1)(2004)) fornecem valores de β calculados que se aproximam dos valores estimados para vários dos solos analisados.

Tabela 19. Parâmetro β estimado

Autores	Tipo de solo	$h_a(\text{cm})$	$\beta(\text{cm}^{-1})$
Lane & Washburn (1946)	C1:Pedregulho grossa	$\beta \cdot h_c = 2$	0,8
	C2:Pedregulho com areia	$\beta \cdot h_c = 5$	0,176
	C3:Areia bem gradada com finos	$\beta \cdot h_c = 3$	0,152
	C4:Areia fina pobremente gradada	$\beta \cdot h_c = 5$	0,047
	C5:Areia grossa com finos	41	0,024
	C6:Areia siltosa	175	0,006
	C7:Areia com silte	39	0,026
	C8:Argila	140	0,007
Malik (1989)	Ludas – Areias	29,1	0,034
	Rawalwas – Areias	29,6	0,034
	Rewari – Areias	29,4	0,034
	Bhiwani – Areias	27,6	0,036
	Tohana – Areia com marga	37,4	0,027
	Hisar – Areia com marga	37,5	0,027
	Barwala – Marga com areia	41,2	0,024
	Rohtak – Marga com areia	48,7	0,021
	Hisar – Marga com areia	47,7	0,021
	Pehwa – Marga com areia argilosa	44,5	0,023
	Hansi – Marga argilosa	29,6	0,034
	Ambala – Marga argilo siltosas	15	0,066
	Tohana – Areia com marga	66,7	0,015
Kumar & Malik (1990)	Hissar – Areia com marga	72,9	0,014
	Barwala – Marga arenosa	47,3	0,021
	Rohtak – Marga arenosa	44	0,023
	Hissar – Marga arenosa	66	0,015
	Pehowa - Marga argilo arenosa	59,6	0,017
	Hansi – Marga argilosa	16,3	0,061
	Ambala – Marga argilo siltosa	16,9	0,059

Fonte: Unsaturated Soil Mechanics de Lu & Likos (2004a) p.141

Tabela 20. Comparação do valor de β estimados e fornecidos pelo SOLVER

Solo	$\beta(\text{cm}^{-1})$ Lu & Likos (2004)	$\beta(\text{cm}^{-1})$ SOLVER (variando k_s , h_c , β)	$\beta(\text{cm}^{-1})$ SOLVER (variando h_c, β)
C-1*	0,370	1,00	1,00
C-2	0,176	0,925	0,173
C-3*	0,152	1	0.655
C-4	0,047	0,10	0,06
C-5	0,024	0,10	0,066
C-6	0,006	0,001	0,025
C-7*	0.026	0,117	0,050
C-8*	0.007	0,005	0,005

*Os valores de β foram estimados pela autora, considerando a relação $\beta h_c = 2$ a 5.

4.1.2 Solos estudados por Zhang & Fredlund (2009)

4.1.2.1 Ascensão Capilar

A Figura 46 mostra o processo de ascensão capilar ao longo do tempo para os quatro solos estudados por Zhang & Fredlund (2009). Estas amostras não atingiram sua máxima altura de ascensão capilar, tendo em vista o valor limitado de 1m do tubo de teste, como citado no item de materiais e métodos, mas mesmo assim pode-se observar a diferença de comportamento entre os quatro solos. Não há uma clara relação entre maiores ascensões e quantidade de finos, notando-se nas etapas iniciais de ensaio, uma superposição das curvas dos solos ML, SC e CL. A menor velocidade de ascensão está associada ao solo SM, que atingiu a mesma altura do solo CL em praticamente o dobro do tempo.

Figura 46. Relação ascensão capilar versus tempo dos solos estudados por Zhang & Fredlund (2009)

4.1.2.2 Apresentação dos ajustes.

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados obtidos dos parâmetros k_s , h_c e β por meio do Programa de otimização SOLVER, com os métodos e os procedimentos de análise semelhante aos realizados para os solos de Lane & Washburn (1946). Nesta tabela observa-se como o solo CL atinge os melhores ajustes considerando até o terceiro termo da série; no entanto os solos ML, SC e SM atingem os melhores ajustes já para o primeiro termo da série, situação que indica uma aproximação à fórmula de Terzaghi (1943).

Com o objetivo de ilustrar o ajuste com a proposta de Lu & Likos (2004) em suas duas condições, apresenta-se como exemplo nas Figuras 47 e 48, o solo CL considerando todos os termos analisados de m1 a m5; procedimento que foi realizado para todos os solos, para em seguida plotar os melhores ajustes atingidos com cada proposta e fazer a análise dos parâmetros obtidos.

Figura 47. Ajuste realizado para o solo CL de Zhang & Fredlund (2009) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Primeira opção)

Figura 48. Ajuste realizado para o solo CL de Zhang & Fredlund (2009) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Segunda opção)

Tabela 21. Ajustes com as propostas de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) com o programa SOLVER, com seus respectivos parâmetros de k_s , h_c e β . Solos estudados por Zhang & Fredlund (2009).

SOLO	Parâmetros	Dados Experimentais	Terzaghi	Lu & Likos - SOLVER (Variando k_s, h_c, β)					Lu & Likos(1) - SOLVER (k_s Fixo e Variando h_c, β)				
				$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$	$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$
CL	k_s (cm/s)	1.7E-05	5.4E-06	6.0E-06	5.6E-06	5.6E-06	5.4E-06	5.0E-06	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05
	h_c (cm)	71.00	210.00	250.00	290.00	290.00	300.00	320.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
	β			0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.044	0.027	0.024	0.023	0.023
ML	k_s (cm/s)	1.6E-04	1.2E-05	1.7E-05	1.4E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.6E-05
	h_c (cm)	96.00	150.00	150.00	190.00	210.00	210.00	210.00	153.86	153.00	153.00	153.00	153.00
	β			0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.006	0.005	0.005	0.005
SM	k_s (cm/s)	2.7E-02	1.0E-04	3.8E-05	7.0E-04	7.8E-03	3.5E-02	1.1E-01	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02
	h_c (cm)	78.50	80.00	260.00	260.00	260.00	250.00	250.00	84.99	87.01	412.90	412.90	412.90
	β			0.500	0.507	0.517	0.431	0.381	1.000	1.000	0.961	0.473	0.320
SC	k_s (cm/s)	2.1E-04	5.6E-06	3.1E-05	8.3E-05	2.3E-04	4.4E-04	6.8E-04	2.1E-04	2.1E-04	2.1E-04	2.1E-04	2.1E-04
	h_c (cm)	74.00	200.00	200.00	230.00	200.00	200.00	200.00	81.84	126.33	126.33	126.33	126.33
	β			0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.069	0.059	0.056

4.1.2.3 Análise dos parâmetros obtidos

Nas Figuras 49 a 52 apresentam-se os melhores ajustes aos dados experimentais (ascensão capilar *versus* tempo), dos solos estudados por Zhang & Fredlund (2009). Os ajustes foram obtidos pelo método de Terzaghi (1943) e pelo método de Lu & Likos (nas duas condições) apresentando o número do termo da série em que o melhor ajuste ocorreu, assim como os resultados dos parâmetros de k_s , h_c e β . A análise dos resultados é apresentada a seguir considerando a porcentagem de finos dos solos ($\phi < 0.074\text{mm}$). O solo CL, argila de baixa plasticidade, tem 80% de finos; o solo ML, silte de baixa compressibilidade apresenta 60% de finos; o solo SC, areia argilosa com 42% de finos e por último o solo SM, areia siltosa tem 24% de finos.

Figura 49. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo CL, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c .

Solo CL: A Figura 49 ilustra os resultados para o solo CL, uma argila de baixa plasticidade e pode-se observar que as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) (nas duas condições) apresentam um bom ajuste aos pontos experimentais, sendo o melhor ajuste fornecido pelo método de Lu & Likos(1) (2004). Referente ao resultado de k_s , as duas propostas tem a mesma ordem de grandeza, mas não se encontram dentro da faixa de resultados experimentais de k_s . Os valores de h_c calculados diferem em até 40%, porém estes

resultados não podem ser comparadas com o h_c experimental, por conta das limitações de altura nos ensaios de Zhang & Fredlund (2009).

SOLO ML: A Figura 50 mostra o processo da ascensão capilar através do tempo do solo ML, um silte de baixa compressibilidade. Nota-se bons ajustes considerando as tres propostas utilizadas, até uma altura capilar de 75cm. Os valores de k_s são da mesma ordem de grandeza e se encontram dentro da faixa de valores k_s experimentais (extremo inferior). O valor de h_c obtido pelas tres condições de análise são próximas entre si.

Figura 50. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo ML, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c .

SOLO SC: Na Figura 51 têm-se os resultados para o solo SC uma areia argilosa, e observa-se que o método de Terzaghi (1943) fornece o melhor ajuste aos dados experimentais do processo de ascensão capilar. O modelo de Lu & Likos (2004) nas duas condições, se afastam dos pontos experimentais principalmente nos primeiros pontos até $z=50cm$. O resultado de k_s com a proposta de Terzaghi (1943) fica fora da faixa de k_s experimental, com uma diferença de uma ordem de grandeza, porém o k_s obtido com Lu & Likos (2004) encontra-se dentro da

faixa experimental, mesmo não tendo sido verificado uma boa representação do processo de ascensão capilar.

O parâmetro h_c obtido na otimização apresenta o mesmo valor utilizando as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e um valor menor com a segunda condição de Lu & Likos(1)(2004).

Figura 51. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo SC, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2009), e valores de k_s e h_c .

SOLO SM: A Figura 52 mostra a curva de ascensão capilar do solo SM, uma areia siltosa e observa-se que a curva de ajuste com a proposta de Terzaghi (1943) e a segunda condição de Lu & Likos(1)(2004), ficam muito afastadas dos dados experimentais. Já o ajuste de Lu & Likos (2004) (primeira condição) tende a se-aproximar aos dados experimentais, fornecendo também um valor de k_s que está dentro da faixa dos valores de k_s experimental. O ajuste com Terzaghi (1943) apresenta um valor de k_s com uma diferença de duas ordens de grandeza, comparado com o limite inferior da faixa experimental. Por outro lado os resultados de h_c são similares para o modelo de Terzaghi (1943) e Lu & Likos(1) (2004) (segunda condição), mas com Lu & Likos (2004) na primeira condição o valor de h_c se afasta em aproximadamente três vezes dos outros dois valores.

Figura 52. Relação Ascensão capilar versus tempo do solo SM, com os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), e valores de k_s e h_c .

Parâmetro β da função Condutividade hidráulica de Gardner (1958)

Zhang & Fredlund (2009) calcularam, a partir de seus resultados experimentais, as funções condutividade hidráulica para faixas variadas de sucção. Os autores notaram que a função podia ser bem representada pelo modelo de Gardner SHCC de dois parâmetros (1958) (equação 38).

$$k = \frac{k_s}{1 + a(\psi / \rho_w g)^b} \quad (38)$$

Onde: k condutividade hidráulica; k_s condutividade hidráulica saturada; ψ sucção do solo; a, b parâmetros de ajuste relacionados.

Utilizou-se o método de Lu & Likos (2004) com o intuito de conhecer o parâmetro β da função condutividade hidráulica de Gardner (1958), embora não se esperasse bons ajustes, pelo fato de Zhang & Fredlund (2009) terem utilizado a função condutividade hidráulica com dois parâmetros (equação 38)

A Tabela 22 mostra os parâmetros obtidos, considerando as duas opções.

Tabela 22. Parâmetro β – solos de Zhang & Fredlund

Solo	$\beta(\text{cm}^{-1})$ Lu&Likos (variando k_s , h_c , β)	$\beta(\text{cm}^{-1})$ Lu&Likos (variando h_c , β)
CL	0,01	0,027
ML	0,01	0,005
SM	0,50	1,00
SC	0,10	0,10

Observa-se que a segunda opção de análise fornece valores de β que estão dentro da faixa de valores divulgados na literatura (Lu & Likos, 2004a). Para testar a adequação do modelo de Gardner de um parâmetro e da técnica proposta, os dados experimentais de condutividade hidráulica não saturada *versus* altura de sucção obtida por Zhang & Fredlund (2009) foram comparados considerando o parâmetro β encontrado pelo Solver. O comportamento é ilustrado na Figura 53 para os quatro solos, considerando os parâmetros β obtidos nas duas opções. Como esperado, não há uma boa superposição entre a curva ajustada pelos citados autores e a obtida neste trabalho, pois Zhang & Fredlund (2009) utilizaram uma função condutividade hidráulica dependente de dois parâmetros. Uma parte dessa discrepância deve-se aos valores de k_s utilizados resultantes da técnica de otimização. Estes foram ligeiramente inferiores aos utilizados por Zhang & Fredlund (2009), porém, situaram-se na faixa de medida dos valores reportados por esses autores. Entretanto, nota-se, até a entrada de ar, uma razoável concordância com os dados experimentais e curvas que tendem a seguir a forma das curvas ajustadas por Zhang & Fredlund (2009).

Figura 53. Comparação das curvas de Condutividade Hidráulica versus sucção obtida por Zhang & Fredlund (2009), com as obtidas considerando os parâmetros k_s e β , fornecidos pelo Programa SOLVER.

4.2 SEGUNDA ETAPA

4.2.1 Solos estudados nesta pesquisa

Como já mostrado nos itens anteriores, o processo de otimização aplicado ao ensaio de ascensão capilar, foi primeiro testado utilizando os dados experimentais de Lane & Washburn (1946) assim como de Zhang & Fredlund (2009).

Com base no desempenho promissor da técnica, passou-se a utilizá-la na análise de ensaios de ascensão capilar em moldes de solo de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. A

seguir são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de ascensão capilar e do processo de otimização pelo programa SOLVER para cada solo ensaiado.

4.2.1.1 Dados dos corpos de prova

Os índices físicos dos corpos de prova foram determinados após compactação e também após secagem ao ar. Ao final dos ensaios de ascensão capilar, os índices físicos foram novamente determinados. As Tabelas 23 e 24 mostram os valores dos índices físicos representados por: massa específica (ρ), massa específica seca (ρ_d), massa específica dos sólidos (ρ_s), índice de vazios (e), porosidade (n), umidade (w) e grau de saturação (S_r), nas diferentes etapas.

Tabela 23. Índices físicos dos corpos de prova após compactação.

Solo	Solo compactado						
	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	e -	n (%)	w (%)	S_r (%)
A1	2,09	1,86	2,566	0,38	27	11,97	81,4
A2	2,05	1,79	2,690	0,50	33	14,42	78,3
A3	1,86	1,47	2,587	0,76	43	26,90	90,9
A4	1,90	1,52	2,867	0,89	47	25,05	81,2
A5	1,90	1,45	2,980	1,05	51	31,15	88,4
A6	1,71	1,25	2,657	1,13	53	36,77	86,7
A7	1,89	1,55	2,749	0,78	44	22,29	78,8
A8	1,92	1,49	2,666	0,78	44	28,29	95,5

Tabela 24. Índices físicos dos corpos de prova submetidos aos ensaios de ascensão capilar, após a secagem e depois do finalizado o ensaio de ascensão capilar.

Solo	Antes do ensaio (Após secagem)						Depois do ensaio		
	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e -	n (%)	w (%)	S_r (%)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r (%)
A1	1,92	1,88	0,36	27	1,99	14,0	1,88	16,40	100,0
A2	1,84	1,82	0,48	32	1,08	6,10	1,82	16,62	93,60
A3	1,56	1,54	0,68	40	1,25	4,20	1,54	32,22	100,0
A4	1,72	1,62	0,77	44	6,78	25,1	1,62	27,70	100,0
A5	1,72	1,64	0,81	45	4,46	16,4	1,64	35,82	100,0
A6	1,37	1,29	1,07	52	6,49	16,2	1,29	39,99	94,31
A7	1,54	1,54	0,79	44	0,29	1,00	1,54	27,54	95,80
A8	1,72	1,66	0,61	38	3,55	15,5	1,66	29,04	100,0

4.2.1.2 Ascensão capilar

A Figura 54 mostra os resultados dos ensaios de ascensão capilar para os oito solos ensaiados. Nota-se que as velocidades de ascensão são variáveis. Em alguns solos a água atinge o topo do corpo de prova em tempos que variam de 3 a 9 horas (solos: A1, A2, A5, A6, A7 e A8), enquanto outros necessitam de tempos de 15 até 24 horas (solos: A3 e A4).

Figura 54. Ascensão capilar versus tempo, para os oito solos ensaiados no laboratório.

4.2.1.3 Apresentação dos ajustes

As Figuras 55 e 56 são exemplos dos ajustes realizados pela proposta de Lu & Likos (2004) em suas duas condições, para o solo A8 (Itapetininga – Piraju) considerando cinco termos da série. O critério de escolha do melhor ajuste, como já explicado na primeira etapa, foi em função do menor valor obtido da soma dos desvios quadráticos entre os valores estimados de “t” e os observados no laboratório.

A Tabela 25 resume os resultados dos parâmetros k_s , h_c , e β obtidos pelo programa SOLVER com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) para os oito solos analisados. Os valores sombreados da tabela indicam os melhores ajustes obtidos pela equação de Lu & Likos (2004) e permitem ver a variação dos parâmetros em função ao número de termos da série considerados.

Observam-se como os melhores ajustes para a maioria dos solos, com o modelo de Lu & Likos (2004) nas duas opções são atingidos no primeiro termo da serie (m1), cuja fórmula difere muito pouco da fórmula proposta de Terzaghi (1943).

Outra anotação importante na análise com a primeira condição de Lu & Likos (2004) é que embora o valor de h_c varie até mesmo 1000cm, não faz variar a ordem de grandeza do valor da condutividade hidráulica saturada k_s .

Na análise com a segunda condição da proposta de Lu & Likos(1)(2004), observa-se também como o fato de fixar k_s obriga a que a rotina SOLVER forneça valores de h_c irreais, como os 7830cm obtidos no solo de Avaré.

Figura 55. Ajuste realizado para o solo A8 (Itapetininga - Piraju) – Proposta de Lu & Likos (2004) (Primeira opção)

Figura 56. Ajuste realizado para o solo A8 (Itapetininga – Piraju) – Proposta de Lu & Likos(1) (2004) (Segunda opção)

Tabela 25. Parâmetros k_s , h_c e β obtidos no processo de otimização para os oito solos ensaiados, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004).

SOLO	Parâmetros	Dados Experimentais	Terzaghi	Lu & Likos - SOLVER (Variando k_s, h_c, β)					Lu & Likos (1) - SOLVER (k_s Fixo e Variando h_c, β)				
				$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$	$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	$m5$
A1 (SC)	k_s (cm/s)	4.3E-07	5.6E-06	8.7E-06	7.7E-06	5.2E-06	4.3E-06	3.9E-06	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	
	h_c (cm)		80.00	80.00	100.00	150.00	180.00	200.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	
	β			0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.007	0.007	0.007	0.007	
A2 (SC)	k_s (cm/s)	1.1E-07	2.6E-06	2.7E-06	2.0E-06	1.9E-06	1.7E-06	1.6E-06	1.1E-07	1.1E-07	1.1E-07		
	h_c (cm)		300.00	300.00	400.00	420.00	460.00	500.00	6996.00	6700.00	6500.00		
	β			0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.001	0.001	0.001		
A3 (ML)	k_s (cm/s)	1.3E-06	2.3E-06	2.4E-06	1.8E-06	1.7E-06	1.7E-06		1.3E-06	1.3E-06	1.3E-06		
	h_c (cm)		150.00	150.00	200.00	210.00	210.00		272.54	272.54	272.54		
	β			0.010	0.010	0.010	0.010		0.001	0.001	0.001		
A4 (ML)	k_s (cm/s)	4.2E-08	1.8E-06	5.5E-07	4.6E-07	3.9E-07	2.7E-07		4.2E-08	4.2E-08	4.2E-08		
	h_c (cm)		150.00	500.00	600.00	700.00	1000.00		7830.00	7830.00	7830.00		
	β			0.010	0.010	0.010	0.010		0.052	0.045	0.044		
A5	k_s (cm/s)	1.8E-06	2.7E-06	2.7E-06	2.3E-06	1.1E-06			1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	
	h_c (cm)		400.00	420.00	500.00	1000.00			594.47	594.49	594.49	594.48	
	β			0.010	0.010	0.010			0.001	0.001	0.001	0.001	
A6 (MH)	k_s (cm/s)	3.7E-06	8.5E-06	8.9E-06	4.5E-06	2.6E-06	1.8E-06		3.7E-06	3.7E-06	3.7E-06	3.7E-06	
	h_c (cm)		150.00	150.00	300.00	500.00	700.00		344.00	344.10	344.14	344.14	
	β			0.010	0.013	0.010	0.010		0.005	0.005	0.005	0.005	
A7 (MH)	k_s (cm/s)	7.8E-06	4.5E-06	4.5E-06	4.1E-06	3.5E-06			7.8E-06	7.8E-06	7.8E-06		
	h_c (cm)		517.26	550.00	600.00	700.00			304.44	304.44	304.44		
	β			0.010	0.010	0.010			0.001	0.001	0.001		
A8 (MH)	k_s (cm/s)	6.0E-07	3.0E-06	4.7E-06	4.5E-06	3.7E-06	3.1E-06	1.9E-06	6.0E-07	6.0E-07	6.0E-07	6.0E-07	
	h_c (cm)		350.00	350.00	400.00	500.00	600.00	1000.00	3573.74	3573.74	3573.74	3573.74	
	β			0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.195	0.135	0.125	0.099	

4.2.1.4 Análise dos parâmetros obtidos

As Figuras 57 a 64 apresentam os melhores ajustes fornecidos pelas propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) para os oito solos ensaiados, com seus respectivos resultados dos parâmetros (k_s e h_c) fornecidos pelo programa *SOLVER*. Os ajustes foram plotados separadamente pela forma como os dados da otimização tenderam a se superpor aos resultados experimentais, os que são apresentados a seguir com mais detalhe para cada tipo de solo.

SOLO: SOROCABA-ITAPETININGA (A1)

A Figura 57 mostra uma foto do ensaio com o solo A1 em andamento, e os ajustes obtidos com o modelo de Terzaghi (1943) e com as duas variantes do modelo de Lu & Likos (2004) aqui utilizadas.

Nota-se um ajuste aos dados experimentais que pode ser considerado, visualmente, muito bom, qualquer que seja o método considerado. Nas duas opções do modelo de Lu & Likos (2004), os ajustes mostrados referem-se ao resultado considerando apenas o primeiro termo da série. Quando isto ocorre, a solução de Lu & Likos (2004) é muito próxima da solução de Terzaghi (1943) tendo presente que o termo zero da série representa a solução de Terzaghi (1943) e portanto não é de surpreender que os ajustes sejam semelhantes.

Porém ocorre uma pequena divergência, possivelmente, proporcionada pela técnica de otimização do *SOLVER*, nos valores de k_s obtidos por Terzaghi (1943) e por Lu & Likos (2004).

Com relação à altura máxima de ascensão capilar, h_c , nota-se que os dois métodos fornecem o mesmo valor.

Outro ponto interessante refere-se à altura h_c determinada por Lu & Likos(1)(2004). O fato de fixar o valor de k_s igual ao valor experimental faz com que h_c atinja um valor de 1000cm para que haja uma boa aderência aos dados experimentais.

Por fim, registre-se que a diferença entre k_s experimental e o fornecido pela técnica de otimização é de uma ordem de grandeza (os valores calculados foram maiores).

Figura 57. Ascensão capilar versus tempo do solo A1, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

SOLO: SÃO CARLOS (CAMPUS 2) (A2)

A Figura 58 mostra uma foto do processo de ascensão capilar no solo A2, uma areia argilosa, assim como os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) nas duas condições. Observa-se no gráfico que os ajustes obtidos pelas três condições de análise (Terzaghi (1943), Lu & Likos (2004) e Lu & Likos(1)(2004)) tenderam a se superpor aos dados observados no laboratório.

Também o melhor ajuste obtido pelo método de Lu & Likos (2004), em suas duas condições, foi no termo 1 da série, se aproximando assim ao modelo de Terzaghi (1943). Disto resultam valores de k_s próximos entre si e diferenciados também em uma ordem de

grandeza maior em relação ao valor experimental. Os resultados de h_c fornecidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) são similares. Porém o ajuste com Lu & Likos(1) (2004), fornece um valor de $h_c=6996\text{cm}$ que poderia ser irreal de acontecer em campo, sendo este valor uma imposição do método para se conseguir uma boa aproximação da curva otimizada com a experimental.

Figura 58. Ascensão capilar versus tempo do solo A2, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

SOLO: TREMEMBE (A3)

Na Figura 59 apresentam-se os melhores ajustes obtidos pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), com seus respectivos resultados dos parâmetros de k_s e h_c , para o solo A3, um silte de baixa compressibilidade. Visualmente, observa-se no gráfico boa

aproximação dos três ajustes aos pontos experimentais, mostrando também formas de curvas similares. Os ajustes de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), fornecem valores de k_s muito próximos entre si e da mesma ordem de grandeza do k_s experimental. Os parâmetros h_c , fornecidos pelas três análises, encontram-se dentro dos valores apresentados na literatura para este tipo de solo Tabelas (8, 9, 10 e 11), mas os valores não têm similitude com os obtidos considerando Lu & Likos(1)(2004). Cabe mencionar também que os melhores ajustes pelo método de Lu & Likos(2004) nas duas opções foi atingida no primeiro termo da série.

Figura 59. Ascensão capilar versus tempo do solo A3, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

SOLO: AVARE (A4)

A Figura 60 apresenta uma foto do ensaio de ascensão capilar para o solo A4, um silte de baixa compressibilidade, assim como os melhores ajustes fornecidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) em suas duas condições de análise.

Figura 60. Ascensão capilar versus tempo do solo A4, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

Nota-se que os ajustes fornecidos pelas três análises consideradas seguem a mesma trajetória dos pontos experimentais, o que significa que o processo de otimização foi eficiente neste caso para representar o processo de ascensão capilar. Cabe mencionar que o modelo de Lu & Likos (2004) nas duas condições, atingiu o melhor ajuste no termo 1 da série, cuja equação aproxima-se ao modelo de Terzaghi (1943).

Embora com ajustes ótimos, os valores de k_s variaram entre si e os calculados foram maiores.

O parâmetro h_c , fornecido pelo modelo de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) encontra-se dentro da faixa de valores encontrados na literatura Tabelas (8, 9, 10 e 11), mas o resultado de $h_c=7830\text{cm}$ obtido pelo modelo de Lu & Likos(1)(2004) está fora da faixa documentada além de ser um valor que dificilmente poderia acontecer na realidade.

SOLO: DOIS CORREGOS (A5)

A Figura 61 apresenta os resultados obtidos para o solo A5, um silte de alta compressibilidade. Observa-se também neste solo, como os ajustes com Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004) em suas duas condições de análise, tem uma sobreposição das curvas otimizadas com a curva experimental, o que indicaria bom ajuste. Novamente as duas opções de Lu & Likos (2004), forneceram o melhor ajuste no primeiro termo da série. Os resultados obtidos para o parâmetro k_s , pelos dois métodos fornecem praticamente o mesmo valor que o obtido no laboratório.

Com relação ao valor de h_c obtido da otimização pode-se observar que os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), apresentam valores próximos e dentro dos valores encontrados na literatura Tabelas (8, 9, 10 e 11).

Outra observação importante, relacionada ao comportamento do solo no processo de ascensão capilar refere-se à expansão da amostra que ocorreu progressivamente à medida que a água ascendia. Na foto da Figura 61 nota-se inclusive, a tendência de separação entre as camadas da amostra compactada.

Figura 61. Ascensão capilar versus tempo do solo A5, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

SOLO: IGARATA (A6)

A Figura 62 apresenta o solo A6, um silte de alta compressibilidade, cujo processo de ascensão capilar pode ser observado nos gráficos e na foto. Notam-se que os três ajustes conseguem se superpor à curva experimental, e resultados de k_s são da mesma ordem de grandeza que o obtido experimentalmente. O ajuste fornecido pelas duas condições de Lu & Likos (2004), também é atingido no primeiro termo da série.

Os resultados de h_c , proporcionados pelos três análises, encontram-se dentro da faixa de valores registrados na literatura Tabelas (8, 9, 10 e 11).

Figura 62. Ascensão capilar versus tempo do solo A6, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

SOLO: MAIRINQUE - ALUMINIO (A7)

A Figura 63 apresenta os resultados para o solo A7, um silte de alta compressibilidade, com seus respectivos ajustes pelo modelo de Terzaghi (1943) e pelas duas variantes do modelo de Lu & Likos (2004), além da foto do processo de ascensão capilar em andamento.

Nota-se que os ajustes aos dados experimentais são bons qualquer que seja o modelo considerado, resultando que na segunda opção do modelo de Lu & Likos(1) (2004), fornece um bom ajuste já no primeiro termo da série. Notam-se também valores obtidos da otimização muito próximos dos valores experimentais.

Entretanto, os três valores de h_c obtidos da técnica de otimização são bastante discrepantes entre si.

Figura 63. Ascensão capilar versus tempo do solo A7, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004); e valores de k_s , h_c .

SOLO: ITAPETININGA - PIRAJU (A8)

Nesta Figura 64 apresenta-se o solo A8, um silte de alta compressibilidade, e os melhores ajustes fornecidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004).

Observa-se que o modelo de Terzaghi (1943) fornece uma curva que tende a se aproximar dos dados experimentais. A solução de Lu & Likos (2004), em suas duas condições de análise, tende a se superpor aos valores medidos.

O valor de k_s apresenta variação de uma ordem de grandeza maior comparado com o resultado de k_s experimental.

Os resultados para h_c , fornecidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), também são considerados dentro dos valores de h_c registrados na literatura (Tabelas 8, 9, 10 e 11). Porém considerando a segunda condição pelo método de Lu & Likos(1) (2004) fornece um valor de h_c irreal.

Figura 64. Ascensão capilar versus tempo do solo A8, com as propostas de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004), e valores de k_s , h_c .

Parâmetro β da função Condutividade Hidráulica de Gardner (1958)

Com relação ao parâmetro β da função Condutividade Hidráulica de Gardner (1958), a Tabela 26 mostra os valores obtidos do processo de otimização SOLVER, considerando as duas opções do modelo de Lu & Likos (2004b), e observa-se que a segunda opção de Lu & Likos(1)(2004b) é da ordem de 10 vezes menor que os valores obtidos pela primeira opção.

Tabela 26. Parâmetro β obtido pelo SOLVE (Parâmetro de Gardner (1958))

Solo	SUCS	Lu & Likos β (cm ⁻¹)	Lu&Likos (1) β (cm ⁻¹)
A1	SC	0,100	0,007
A2	SC	0,008	0,001
A3	ML	0,010	0,001
A4	ML	0,010	0,037
A5	MH	0,010	0,001
A6	MH	0,013	0,005
A7	MH	0,010	0,001
A8	MH	0,100	0,107

4.2.1.5 Velocidade de ascensão capilar

Com os dados do ensaio de ascensão capilar conseguiu-se calcular velocidade de ascensão. A Figura 65 ilustra a velocidade de ascensão ao longo do tempo para os oito solos ensaiados.

Observa-se no início do processo que a velocidade de ascensão capilar é elevada, e tende a se reduzir com o tempo até ter-se uma velocidade quase constante, comportamento apresentado nos solos A1, A2, A3, A4, A6, A8. Por outro lado nos solos A5 e A7, não se nota que essa condição praticamente permanente tenha sido atingida, provavelmente, pelo menor tempo que duraram os ensaios com esses solos.

Figura 65. Velocidade de ascensão capilar versus tempo dos oito solos ensaiados no laboratório.

4.2.1.6 Variação da umidade

As variações do teor de umidade nas alturas de 2, 4, 6, 8 e 10cm foram obtidas após finalizado o processo de ascensão capilar. A Tabela 27 apresenta os valores atingidos para os oito solos ensaiados, considerando os pontos medios, e a Figura 66 mostra os perfis das variações do teor de umidade ao longo do corpo de prova para cada tipo de solo.

A avaliação destes perfis mostra um comportamento padrão, definido por três trechos singulares: um trecho inicial caracterizado por seu alto conteúdo de umidade suficiente para saturar o solo, um trecho intermediário em que a velocidade de ascensão diminui e o teor de umidade decresce drasticamente, e o trecho final onde o teor de umidade é menor.

O importante deste particular comportamento é sua equivalência ou similitude à curva característica solo-água nos estudos de solos não saturados, mesmo que os corpos de prova sejam de altura pequena (100mm). Esta variação no teor de umidade apresenta-se também quando o solo atinge sua máxima altura de ascensão capilar, observação realizada por Lane & Washburn (1946) no estudo dos oito solos granulares e por Zhang & Fredlund (2009) em solos finos com 1m de altura. Este resultado indicaria que independente da altura da amostra, esta refletiria as mesmas características do solo em estado natural exposto ao fenômeno de ascensão capilar.

Por outro lado, observou-se também que alguns solos como (A1, A2, A5, A6, A7 e A8) classificados como areias argilosas e siltes de alta compressibilidade, apresentam os três trechos bem diferenciados, enquanto que os solos (A3 e A4), classificados como siltes de

baixa compressibilidade apresentam transição mais suave entre os trechos inicial e intermédio, mostrando que a saturação tende atingir maiores alturas.

Na Tabela 28 estão os graus de saturação correspondentes aos teores de umidade medidas, ao longo da altura do corpo de prova. Os valores assinalados com (+) indicam graus de saturação calculados superiores a 100%, o que, obviamente é impossível nestas condições do solo. Essa discrepância deve-se ao fato da água aderida à superfície do solo e que de fato não é água presente nos vazios. Nas medidas de umidade, o descarte dessa água é muito difícil, o que resulta nos valores comentados.

Tabela 27. Perfil da Variação do Teor de umidade ao longo do corpo de prova.

SOLO	Teor de umidade %				
	1cm	3cm	5cm	7cm	9cm
A1	34,9	13,3	13,3	13,3	12,0
A2	16,7	15,2	15,0	14,6	12,3
A3	30,7	29,6	26,4	23,0	19,6
A4	28,9	28,4	27,7	25,9	19,9
A5	40,7	37,7	35,2	34,1	31,1
A6	50,6	43,5	37,4	31,4	21,2
A7	35,4	29,8	27,6	24,4	17,7
A8	32,7	30,8	30,2	28,8	22,1

Tabela 28. Variação do Grau de saturação ao longo do corpo de prova, medido a partir da base.

SOLO	Grau de saturação (%)				
	1cm	3cm	5cm	7cm	9cm
A1	100+	90,4	90,4	90,3	81,4
A2	80,5	82,5	82,0	79,3	66,6
A3	100+	99,9	89,3	77,8	66,1
A4	93,7	92,0	89,8	83,8	64,4
A5	100+	100+	99,8	96,8	88,3
A6	100+	100+	88,2	74,2	49,9
A7	100+	100+	97,5	86,1	62,4
A8	100+	100+	100	97,4	74,6

Figura 66. Perfil de variação da umidade nas diferentes alturas durante o processo de ascensão capilar nos solos

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo constam as análises dos resultados obtidos para as duas etapas consideradas nesta pesquisa.

5.1 PRIMEIRA ETAPA

Nesta etapa procurou-se mostrar resultados da eficiência da técnica de otimização SOLVER na determinação da condutividade hidráulica saturada, da máxima altura de ascensão capilar e do parâmetro β , a partir do ensaio de ascensão capilar em solos. Nos itens seguintes apresentam-se e discutem-se diferentes questões acerca da técnica utilizada e dos resultados obtidos.

5.1.1 Técnica de otimização SOLVER

5.1.1.1 Curvas de Ascensão capilar

a.- Solos ensaiados por Lane & Washburn (1946)

Os solos ensaiados por Lane & Washburn (1946) foram realizados até atingir a máxima altura de ascensão capilar, portanto eles permitem avaliar melhor os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) como equações que representam o processo de ascensão capilar nos solos.

Em função aos ajustes obtidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004), nota-se que nestes solos granulares o modelo que melhor representa a ascensão capilar nos solos foi a proposta de Lu & Likos (2004), obtendo um ajuste próximo aos dados experimentais em sete solos, à exceção da divergência apresentada no solo siltoso C-8. No entanto, o modelo de Terzagui (1943), tem uma divergência progressiva em função do tamanho das partículas, melhorando o ajuste à medida que aumenta a proporção de partículas finas na composição do solo. O fato de se obter melhores ajustes pelo modelo de Lu & Likos (2004) confirmaria a variação da condutividade hidráulica ao longo da altura de ascensão capilar, representada por uma função condutividade hidráulica.

O ajuste feito com a segunda opção do modelo de Lu & Likos(1)(2004), que considera o valor de k_s experimental como fixo no processo de otimização, fornece valores de h_c muito similares aos dados h_c experimentais, o que indica também que esta opção representa o processo de ascensão capilar nos solos.

As taxas de ascensão capilar obtidas pelo método de Terzaghi (1943) no processo de otimização resultaram maiores que as taxas de ascensão capilar medidas no laboratório, fato que acontece na maioria dos solos testados (C-1, C-2, C-3, C-6, C-8), que pode ser atribuído à influência da sucção nos ensaios de laboratório.

Por outro lado pode-se observar também na Tabela 18, no modelo de Lu & Likos (2004) que contempla até seis termos da série, que o número de termo da série que fornece o melhor ajuste não tem um padrão de comportamento relacionado ao tipo de solo, à graduação e nem à composição do solo, sendo específico para cada tipo de solo.

b.- Solos ensaiados por Zhang & Fredlund (2009)

Os solos analisados por Zhang & Fredlund (2009) eram de graduação fina variando de areia siltosa a argila de baixa plasticidade. Nestes ensaios não se garantiu que as máximas alturas de ascensão capilar fossem atingidas, por conta dos moldes tubulares (1m de altura) e do tempo de ensaio. Os modelos de Terzaghi e Lu & Likos tenderam a reproduzir bem os dados experimentais, e nota-se que o ajuste proporcionado pelo modelo de Terzaghi (1943) aproximou-se mais dos pontos experimentais, ao contrário do que aconteceu nos solos granulares de Lane & Washburn (1946).

Quanto à segunda opção analisada no modelo de Lu & Likos(1) (2004b), se ajustou melhor nos solos ML e CL, ficando afastada da curva experimental nos solos SC e SM.

5.1.1.2 Análise dos parâmetros

a.- Condutividade hidráulica saturada k_s

A Tabela 29 mostra a comparação dos resultados da condutividade hidráulica saturada (k_s), obtidos no processo de otimização e os valores obtidos experimentalmente, para os solos ensaiados por Lane & Washburn e por Zhang & Fredlund (2009).

Pode se observar que o modelo de Terzaghi (1943) tende a reproduzir valores mais próximos aos experimentais, ou apresentam variações máximas de cerca de uma ordem de grandeza para mais ou para menos, dependendo do tipo de solo, à exceção dos solos C-5, SM e SC. Um comportamento similar nota-se nos resultados obtidos pelo modelo de Lu & Likos (2004), à exceção dos solos C-7, C-1 e SM.

Tabela 29. Comparação dos resultados de k_s , obtidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e Lu & Likos (2004).

Solo	Experimental k_s cm/s	Terzaghi (1943) k_s cm/s	Lu&Likos (2004) k_s cm/s
<i>Lane & Washburn (1946)</i>			
C-1	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$
C-2	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-1}$
C-3	$7,1 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-2}$
C-4	$4,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-4}$
C-5	$1,1 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-4}$
C-6	$6,2 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$
C-7	$9,6 \times 10^{-6}$	$9,7 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-4}$
C-8	$1,4 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$5,4 \times 10^{-5}$
<i>Zhang & Fredlund (2009)</i>			
CL	$1,7 \times 10^{-5}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$
ML	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$
SM	$2,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-5}$
SC	$2,1 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-5}$

• Análise estatística

Realizou-se também uma análise estatística de variância com fator duplo sem repetição (ANOVA), para determinar a significância tanto do modelo como do tipo de solo nos valores da condutividade hidráulica saturada.

Como visto na Tabela 30, o valor de "F" (Tipo de solo) é 1,02, sendo menor que o valor crítico de F (2,26). Por outro lado, o valor de "F" (Modelos) é igual a 0,80, sendo também menor que o valor de "F" crítico de 3,44. Portanto, não existe uma relação significativa entre o tipo de solo e o modelo utilizado no valor da condutividade hidráulica saturada.

• Análise gráfica

A comparação gráfica para os solos de Lane & Washburn (1946) é mostrada na Figura 67, onde os valores da condutividade hidráulica saturada (k_s) estimada pelo modelo de Terzaghi (Fig. 67a) mostraram-se menores que os obtidos experimentalmente, e os valores de k_s considerando o modelo de Lu & Likos (Fig. 67b) mostraram-se maiores que os k_s experimentais.

Nessas figuras, as amostras foram identificadas pela graduação, sendo "W" amostras bem graduadas e "P" mal graduadas. Nota-se que a graduação não mostra qualquer tendência

de fornecer valores maiores ou menores que os valores experimentais.

Tabela 30. Análise ANOVA, para o parâmetro k_s

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C-1	3	0,121	0,040333	0,00366
C-2	3	0,567	0,189	0,097797
C-3	3	0,0241	0,008033	5,69E-05
C-4	3	0,000676	0,000225	4,98E-08
C-5	3	0,000834	0,000278	1,49E-07
C-6	3	0,000097	3,23E-05	6,62E-10
C-7	3	0,000199	6,64E-05	9,67E-09
C-8	3	0,000087	0,000029	4,75E-10
CL	3	0,000028	9,33E-06	4,41E-11
ML	3	0,000189	0,000063	7,06E-09
SM	3	0,027138	0,009046	0,000242
SC	3	0,000247	8,22E-05	1,24E-08

Experimental	12	0,161143	0,013429	0,000997
Terzaghi	12	0,012188	0,001016	8,15E-06
Lu & Likos	12	0,568265	0,047355	0,025077

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Solos	0,097206	11	0,008837	1,024827	0,458258	2,258518
Modelos	0,01381	2	0,006905	0,800775	0,46164	3,443357
Erro	0,189703	22	0,008623			
Total	0,300719	35

Figura 67. Comparação da condutividade hidráulica saturada estimada e experimental considerando: a) Modelo de Terzaghi (1943); b) Modelo de Lu & Likos (2004).

Por sua vez, para os solos de Zhang & Fredlund (2009), as previsões mostram na sua maioria valores próximos aos calculados ou uma ordem de grandeza menor, tanto para o método de Terzaghi (1943) quanto para o de Lu & Likos (2004), conforme se mostra na Figura 68(a) e (b). Nota-se também que a classificação do solo não apresenta nenhum comportamento padrão que se relacione aos valores obtidos de k_s .

Figura 68. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo o tipo de solo. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).

Por outro lado a Figura 69 mostra a comparação dos resultados experimentais e os estimados de k_s , mas considerando a percentagem de finos na composição dos solos. Observa-se que os solos com maior quantidade de finos tendem a se aproximar aos dados experimentais.

Figura 69. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo a percentagem de finos. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).

b.- Altura máxima de ascensão capilar h_c

Com relação aos valores da altura máxima de ascensão capilar (h_c), os valores obtidos foram quase idênticos aos h_c experimentais, como pode ser visto na Tabela 31. No entanto, a segunda opção de Lu & Likos(1)(2004), que considera conhecido o valor de k_s , h_c se afasta em alguns solos (C-7 e C-8). No caso dos solos estudados por Zhang & Fredlund (2009) a comparação foi prejudicada pelo fato de que há dúvidas sobre a altura da ascensão capilar experimental, que poderia não ser a máxima, considerando o comprimento do tubo usado como molde e o tempo gasto nos testes.

Cabe ressaltar também que estes resultados obtidos estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura para estes tipos de solos Tabelas (8, 9, 10 e 11).

Tabela 31. Parâmetros de h_c , obtidos pelos modelos de Terzaghi (1943) e Lu & Likos(2004).

Solo	Laboratório h_c cm	Terzaghi h_c cm	Lu&Likos h_c cm	Lu&Likos(1) h_c cm
<i>Lane & Washburn (1946)</i>				
C-1	5,4	5,5	5,5	5,5
C-2	28,4	28,5	28,5	28,5
C-3	19,8	19,9	19,9	19,9
C-4	106	108	150	106
C-5	82	82	85	82,3
C-6	239,6	239,6	239,6	239,6
C-7	165,5	166	166	4000
C-8	360	361	360	467,59
<i>Zhang & Fredlund (2009)</i>				
CL	71	210	290	200
ML	96	150	150	153
SM	78,5	80	260	85
SC	74	200	200	126

• Análise estatística

A análise estatística ANOVA, realizou-se só para os solos de Lane & Washburn (1946), por contar-se com os dados experimentais medidos. Como visto na Tabela 32, o valor de "F" (Tipo de solo) e de "F" (Modelos) são menores que os valores de "F" crítico. Portanto, não existe uma relação significativa entre o tipo de solo e o modelo utilizado no valor da altura máxima de ascensão capilar.

Tabela 32. Análise de ANOVA para o parâmetro h_c

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>			
C-1	4	21,9	5,475	0,0025			
C-2	4	113,9	28,475	0,0025			
C-3	4	79,5	19,875	0,0025			
C-4	4	470	117,5	470,3333			
C-5	4	331,3	82,825	2,1225			
C-6	4	958,4	239,6	0			
C-7	4	4497,5	1124,375	3675209			
C-8	4	1548,59	387,1475	2876,22			
Experimental	8	1006,7	125,8375	15272,22			
Terzaghi	8	1010,5	126,3125	15324,7			
Lu & Likos	8	1054,5	131,8125	15218,77			
Lu & Likos(1)	8	4949,39	618,6738	1890463			
ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	
Solos	3963091	7	566155,9	1,239647	0,325999	2,487578	
Modelos	1444814	3	481604,8	1,054515	0,389355	3,072467	
Erro	9590857	21	456707,5				
Total	14998763	31					

c.- Parâmetro β (cm^{-1})

O parâmetro β analisado para os solos de Lane & Washburn (1946) e Zhang & Fredlund (2009) (Tabela 33), apresentou valores relativamente próximos aos estimados por Lu & Likos(2004b) quando se considera a segunda opção do modelo. Isto sugere que reduzir a quantidade de parâmetros a otimizar pode resultar em melhores estimativas para o parâmetro β , fato que não ocorreu na estimativa da altura máxima de ascensão capilar.

• Análise estatística

A análise estatística ANOVA apresenta na Tabela 34 o valor de "F" (Solos) de 6,23, maior que o valor de "F" crítico de 2,76, o que indicaria que os resultados de β são significativos. O valor de "F" (Modelos) é 4,06 sendo também significativo, porque o valor de "F" crítico é 3,74. Nota-se que o valor de F significativo (Solos) indica que dependendo do tipo de solo existe uma diferença significativa no valor de β . O valor significativo de "F" (Modelo) nos indica que em função do modelo utilizado, existe uma diferença significativa no valor de β .

Tabela 33. Valores de β - Parâmetro de Gardner (1958)

Solo	$\beta(\text{cm}^{-1})$ Lu & Likos (2004a)	$\beta(\text{cm}^{-1})$ SOLVER (1° opção)	$\beta(\text{cm}^{-1})$ SOLVER (2° opção)
<i>Lane & Washburn (1946)</i>			
C-1	0,370	1,000	1,000
C-2	0,176	0,925	0,173
C-3	0,152	1,000	0,655
C-4	0,047	0,100	0,060
C-5	0,024	0,100	0,066
C-6	0,006	0,001	0,025
C-7	0,026	0,117	0,050
C-8	0,007	0,005	0,005
<i>Zhang & Fredlund (2009)</i>			
CL	--	0,010	0,027
ML	--	0,010	0,005
SM	--	0,500	1,000
SC	--	0,100	0,100

Tabela 34. Análise ANOVA para o parâmetro β

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
C-1	3	2,37	0,79	0,1323
C-2	3	1,274	0,424667	0,187752
C-3	3	1,807	0,602333	0,181856
C-4	3	0,207	0,069	0,000763
C-5	3	0,19	0,063333	0,001449
C-6	3	0,032	0,010667	0,00016
C-7	3	0,193	0,064333	0,002224
C-8	3	0,017	0,005667	1,33E-06
Experimental	8	0,808	0,101	0,016131
Lu & Likos	8	3,248	0,406	0,224379
Lu & Likos(1)	8	2,034	0,25425	0,136131

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Solos	1,995575	7	0,285082	6,227306	0,001871	2,764199
Modelo	0,372103	2	0,186052	4,064092	0,040577	3,738892
Erro	0,640911	14	0,045779			
Total	3,008589	23				

5.2 SEGUNDA ETAPA

5.2.1 Análise do ensaio de ascensão capilar

A taxa de ascensão capilar observada nos oito solos ensaiados foi diferenciada em função do tipo de solo, onde os solos A3 e A4 classificados como siltes de baixa compressibilidade (ML), apresentaram um avanço lento da frente de umedecimento. Nestes solos foram necessários cerca de 24 horas para que a água atingisse o topo do corpo de prova. Em outros solos, como os siltosos (MH), esse tempo foi bastante reduzido, não passando de cerca de 3 horas. A Tabela 35 reúne os tempos necessários para que a frente de umedecimento atingisse o topo dos corpos de prova.

Considerando uma duração máxima de 24 horas para executar este ensaio, isto já representaria uma grande vantagem na estimativa de parâmetros hidráulicos do solo, em comparação com os ensaios convencionais, cujo tempo de execução é muito maior.

Tabela 35. Tempo decorrido para que a frente de umedecimento atinja o topo do corpo de prova

Solo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Tempo (h)	9,5	5,5	15,62	23,4	3,66	6,0	2,7	6,0

5.2.2 Velocidade de ascensão capilar

O cálculo da velocidade de ascensão capilar foi realizado considerando o registro de entrada da água no corpo de prova ao longo do tempo. Este cálculo foi realizado com o intuito de verificar se existe alguma relação entre a velocidade final residual e a condutividade hidráulica saturada, de forma análoga ao que ocorre num ensaio de infiltração. Porém não se conseguiu constatar esta hipótese. Como observado na Tabela 36, assumindo que o dado da velocidade residual seja equivalente a k_s , nota-se os distanciamentos de uma a duas ordens de grandeza com respeito aos dados experimentais de k_s nos solos A1, A3, A5, A6 e A7; e de três ordens de grandeza para os solos A2, A4, e A8. Esta discrepância era esperada, considerando-se que o gradiente hidráulico no processo de infiltração é diferente do gradiente

no processo de ascensão. Uma análise mais refinada dessa questão, talvez permita um melhor aproveitamento desse resultado na avaliação de k_s nos ensaios de ascensão.

Tabela 36. Velocidade residual do processo da ascensão capilar nos oito solos ensaiados

Solo	k_s exp.(cm/s)	Vel. residual (cm/s)
A1	$4,25 \times 10^{-7}$	$7,87 \times 10^{-5}$
A2	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-4}$
A3	$1,25 \times 10^{-6}$	$8,12 \times 10^{-5}$
A4	$4,2 \times 10^{-8}$	$6,11 \times 10^{-5}$
A5	$1,8 \times 10^{-6}$	$3,46 \times 10^{-4}$
A6	$3,7 \times 10^{-6}$	$1,97 \times 10^{-4}$
A7	$7,8 \times 10^{-6}$	$4,36 \times 10^{-4}$
A8	$6,0 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-4}$

5.2.3 Técnica de otimização SOLVER

5.2.3.1 Análise dos modelos

Os modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) (nas duas condições) tenderam a se superpor aos dados observados no laboratório. Este comportamento se repete em quase todos os solos, existindo apenas uma divergência no solo A8(Itapetininga - Piraju), o que indicaria que o processo de obtenção de parâmetros por otimização é eficiente para ser aplicado na modelação da ascensão capilar em amostras de dimensões pequenas. Porém, não se pode afirmar que os modelos representam integralmente o processo de ascensão capilar já que se trata de uma amostra limitada pela altura (100mm), e com poucos pontos registrados da ascensão capilar, o que poderia estar influenciando na obtenção dos parâmetros e aplicação na modelação dos resultados experimentais.

Outra observação importante nos ajustes pelo método de Lu & Likos (2004) nas duas condições, é que elas atingem o melhor ajuste já no primeiro termo da série. Neste caso se aproxima da equação de Terzaghi (1943) o que explicaria os bons ajustes fornecidos pelos dois modelos.

5.2.3.2 Análise dos parâmetros

a.- Condutividade hidráulica saturada k_s

Com relação aos valores obtidos pelo método de otimização SOLVER, a Tabela 37 mostra a comparação entre os valores experimentais e os valores resultantes da aplicação dos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004). Os solos em questão apresentaram pelos dois modelos, valores de k_s similares ou com desvio de uma ordem de grandeza maior em relação aos dados experimentais, o que seriam valores aceitáveis em certas aplicações práticas.

Uma possível explicação da diferença de uma ordem de grandeza do parâmetro k_s , entre os valores otimizados e os valores de laboratório, pode ser o fato de que k_s experimental foi medido sem a aplicação de qualquer processo que pudesse garantir a saturação do corpo de prova, como contrapressão, por exemplo. Assim, é de se esperar que o simples fluxo de água até atingir uma condição permanente, quando k_s é medido, não seja suficiente para a saturação, ficando bolhas de ar aprisionadas o que reduz o coeficiente de condutividade hidráulica.

Tendo presente os bons ajustes obtidos e os valores de k_s próximos aos valores experimentais, poder-se-ia dizer que o fato de usar corpos de prova de pequena altura não introduz efeitos de escala, pois o processo de otimização parece pouco depender da máxima altura de ascensão, h_c .

Tabela 37. Valores da condutividade hidráulica saturada k_s , obtido pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004)

Solo ensaiado	Experimental k_s cm/s	Terzaghi k_s cm/s	Lu&Likos k_s cm/s
A1	$4,3 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
A2	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$
A3	$1,3 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-6}$
A4	$4,2 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-7}$
A5	$1,8 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$
A6	$3,7 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-6}$
A7	$7,8 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$
A8	$6,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$

• Análise estatística

Realizou-se também a análise estatística de variância de dois fatores sem repetição (ANOVA), para determinar a significância do tipo de solo e o modelo nos valores da condutividade hidráulica saturada. A Tabela 38 apresenta o valor “F” (Solos) de 3,72 maior que o valor “F” crítico (2,72), o que indica que existe uma diferença significativa em função ao tipo de solo. O valor de “F” (Modelo) foi de 3,02, menor que o valor crítico de “F” (3,74), o que significaria que não existe uma diferença significativa do valor de k_s em função ao modelo utilizado.

Tabela 38. Análise ANOVA para o parâmetro k_s .

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
A1	3	1,47E-05	4,91E-06	1,75E-11		
A2	3	5,41E-06	1,8E-06	2,15E-12		
A3	3	6,00E-06	2,00E-06	3,7E-13		
A4	3	2,39E-06	7,97E-07	8,19E-13		
A5	3	7,2E-06	2,4E-06	2,7E-13		
A6	3	2,11E-05	7,03E-06	8,37E-12		
A7	3	1,58E-05	5,27E-06	5,06E-12		
A8	3	7,3E-06	2,43E-06	2,64E-12		
Experimental	8	1,58E-05	1,97E-06	6,98E-12		
Terzaghi	8	0,000031	3,88E-06	5,05E-12		
Lu & Likos	8	3,32E-05	4,14E-06	9,16E-12		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Solo	9,6434E-11	7	1,38E-11	3,717366	0,017497	2,764199
Modelo	2,24107E-11	2	1,12E-11	3,023633	0,081005	3,738892
Erro	5,1883E-11	14	3,71E-12			
Total	1,70728E-10	23				

• Análise gráfica

Nas Figuras 70(a) e (b), são comparados os resultados estimados e os experimentais, para os métodos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) respectivamente, observando-se também como os solos mais finos (ML e MH) apresentam valores mais próximos aos dados experimentais por ambos os métodos.

Figura 70. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo o tipo de solo. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).

Na figura 71(a) e (b), apresenta-se a comparação dos resultados de k_s estimados e experimentais, analisando o comportamento segundo a quantidade de finos na composição do solo. Observa-se que a menor diferença entre os valores de k_s , foi alcançada pelos solos com maiores percentagens de finos na sua composição, e os mais afastados são os solos com percentagens de finos menores de 50%. O que poderia indicar que o processo de otimização é mais eficiente para os solos com alta percentagem de finos.

Figura 71. Comparação da condutividade hidráulica saturada k_s , análise segundo a percentagem de finos. a) Modelo de Terzaghi (1943), b) Modelo de Lu & Likos (2004).

b.- Altura máxima de ascensão capilar h_c

Os valores da altura máxima de ascensão capilar (h_c), pelos modelos de Terzaghi (1943) e de Lu & Likos (2004) apresentados na Tabela 39 foram coerentes com os registrados na literatura para estes tipos de solos Tabelas (8, 9, 10 e 11). Considerando a segunda opção de Lu & Likos(1)(2004) alguns resultados de h_c foram muito altos, e ficaram fora da faixa de valores encontrados na literatura, sendo difíceis de acontecer na realidade, portando não poderiam ser considerados confiáveis para ser aplicados.

Tabela 39. Valores da altura máxima da ascensão capilar (h_c)

Solo	Terzaghi h_c cm	Lu&Likos h_c cm	Lu&Likos(1) h_c cm
A1	80	80	1000
A2	300	300	6996
A3	150	210	273
A4	150	500	7830
A5	400	420	595
A6	150	150	344
A7	517	700	304
A8	350	500	3574

c.- Análise do parâmetro β de Gardner.

Para fazer o análise do parâmetro β , considerou-se o banco de dados da Tabela 19, com os valores estimados de β para diferentes tipos de solos. Segundo Lu & Likos (2004a), as faixas de valores de β nos solos variam de 0,1 para solos granulares, 0,01 para solos siltosos e 0,001 para solos argilosos.

A Tabela 40 mostra os valores obtidos pelo processo de otimização SOLVER para os oito solos estudados. Nota-se que a segunda opção de Lu & Likos(1)(2004b) tende a fornecer valores de β que correspondem em cerca de 1/10 dos valores da primeira opção. Os valores de β da segunda opção tendem a se encaixar melhor nas faixas sugeridas por Lu & Likos (2004a) segundo o tipo de solo.

Tabela 40. Valores de β (Parâmetro de Gardner, 1958)

Solo	SUCS	Lu & Likos β (cm ⁻¹)	Lu&Likos (1) β (cm ⁻¹)
A1	SC	0,100	0,007
A2	SC	0,008	0,001
A3	ML	0,010	0,001
A4	ML	0,010	0,037
A5	MH	0,010	0,001
A6	MH	0,013	0,005
A7	MH	0,010	0,001
A8	MH	0,100	0,107

Os resultados de β obtidos neste estudo sugerem que a técnica proposta pode ser útil na determinação desse parâmetro. Entretanto, estudos complementares, principalmente de medida direta do parâmetro β , se fazem necessários antes de passar-se a aplicar o procedimento a problemas reais. Destaque-se que entre os vários problemas associados a fluxo em meio não saturado que necessitam do conhecimento do citado parâmetro, inclui-se a determinação da condutividade hidráulica saturada com o uso do permeâmetro de Guelph de um estágio, procedimento mais rápido e menos sujeito a interferências do que a técnica de dois estágios.

5.2.4 Análise do teor de umidade durante o processo de ascensão capilar

Como já visto na análise de resultados (Tabela 27 e Figura 66) a variação de teor de umidade ao longo do corpo de prova resulta ser semelhante à curva característica solo/água o que indicaria também uma semelhança à curva condutividade hidráulica *versus* sucção nos solos não saturados. Mais importante é esta ocorrência ser independente da altura do corpo de prova, já que este mesmo comportamento foi observado por Lane & Washburn (1946) cujas amostras atingiram a máxima altura de ascensão capilar e Zhang & Fredlund (2009) com amostras de 1m de altura.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco central explorar a potencialidade do ensaio de ascensão capilar realizado em corpos de prova de 100 mm de altura, e de uma técnica de otimização de parâmetros, na obtenção de parâmetros hidráulicos dos solos.

Nesse contexto, buscou-se numa primeira etapa, validar a técnica com dados experimentais divulgados na literatura e, num segundo momento, aplicá-la à previsão de parâmetros de alguns solos típicos do Estado de São Paulo. Nesse propósito, foram adotados dois modelos para retratar o processo de ascensão capilar, o modelo de Terzaghi (1943) e o de Lu & Likos (2004b), que considera que o processo de ascensão é governado pelo solo não saturado, cuja função condutividade hidráulica segue a equação de Gardner (1958).

Com base nas análises é possível concluir:

- a) O processo de ascensão capilar pode ser reproduzido adequadamente, para a maioria dos solos considerados, com os parâmetros obtidos da técnica de otimização e os modelos citados.
- b) Tanto o modelo de Terzaghi (1943), quanto o de Lu & Likos (2004b) tenderam a reproduzir satisfatoriamente as curvas de ascensão capilar, na maioria dos solos analisados. Porém esses modelos não tiveram um bom desempenho nos solos mais grossos.
- c) A técnica de otimização foi capaz de determinar valores da condutividade hidráulica saturada, k_s , muito próximos dos valores experimentais, ou com desvios máximos de cerca de uma ordem de grandeza, para a maioria dos solos estudados. Para essa finalidade, as melhores aproximações estiveram associadas à utilização do modelo de Lu & Likos (2004b).
- d) As previsões de k_s parecem ser mais precisas nos solos mais finos, sugerindo que o ensaio de ascensão capilar, analisado com os modelos estudados nesta pesquisa, seria mais adequado para retratar o comportamento de solos finos..
- e) Com relação ao parâmetro β da equação de Gardner, a única possibilidade de comparação foi com os resultados de Zhang & Fredlund (2009). Embora não se esperasse bom ajuste, visto que os autores conseguiram modelar seus dados com a equação de Gardner de dois parâmetros, notou-se nos trechos iniciais anteriormente à pressão de entrada de ar, boa concordância com os resultados experimentais. A partir

daí, as curvas modeladas com os β obtidos tendem a seguir os valores experimentais, porém fornecendo valores menores que os reais.

- f) Embora não se tenham conseguido maiores informações sobre a possibilidade de determinar β , os promissores resultados mostrados pelo procedimento utilizado sugere ser possível obter a função condutividade hidráulica de solos. Uma alternativa seria obter soluções com equações que incorporassem a função condutividade hidráulica com mais parâmetros.
- g) Os valores de β estimados para os solos do Estado de São Paulo, ainda que não sendo confirmados com dados experimentais, estão dentro da faixa comum a vários solos divulgados na literatura.
- h) A razoável concordância entre valores medidos e estimados de k_s sugere que esta propriedade dos solos pode ser estimada, a partir de ensaios de ascensão capilar, sendo uma alternativa simples e rápida de ensaio.

6.1 Trabalhos Futuros

- 1) Seria importante determinar restrições da técnica de otimização de parâmetros SOLVER em relação a determinados tipos de solos, e de incluir nas equações do processo de ascensão capilar outros modelos como a equação de Gardner de dois parâmetros que representem a variação da condutividade hidráulica no processo de ascensão capilar, com o objetivo de melhores estimativas dos parâmetros hidráulicos e de poder reproduzir o comportamento de um universo maior de solos.
- 2) Analisar a influência do teor de umidade inicial na velocidade de ascensão, assim, como a altura das amostras no processo de otimização de parâmetros hidráulicos, e poder estabelecer uma rotina para a realização do ensaio.
- 3) Seria oportuno comparar corpos de prova de diferentes alturas, visto que ensaios preliminares mostraram haver diferenças de velocidade no processo de ascensão. Disso, se poderia estabelecer uma relação entre possíveis diversas alturas de corpos de prova, com a finalidade de encontrar a função condutividade hidráulica com o ensaio de ascensão capilar em amostras pequenas.
- 4) Para avaliar melhor o parâmetro β no processo de otimização SOLVER, pode se criar um banco de dados de solos finos que apresentem a curva de retenção e a função

condutividade hidráulica, além de fazer ensaios de laboratório tanto de ascensão capilar quanto ensaios diretos da condutividade hidráulica não saturada, que possibilitem comparações entre valores medidos e calculados.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, E.E; GENS, A; JOSA, A. A constitutive model for partially saturated soil. **Géotechnique**. Vol. 40 N°3, p. 405-430. 1990.
- ALONSO T.P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com parede flexível**. 2005. 112 p. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos/SP.
- AVELLA D.P. **Instrucciones de excel Solver**. 2011
<http://es.scribd.com/doc/86284878/Instrucciones-de-EXCEL-Solver>
 Acesso em 22 Julho, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira #4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.
- BADILLO J; RODRIGUEZ R. **Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I**. México, Limusa. 644p. 1990.
- BROOKS, R.H; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. **Hidrology** Paper N° 3, March. 1964.

BRUCE, R; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity. **Soil Science Society of America Proceeding**. Vol. 20, p. 458-462. 1956.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**, U.S. Dept. Agric. Bur. Soils Bull. 38, U. S. Government Printing Office, Washington, DC. 1907.

CAMPOS VELHO, H. F. **Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações**. IV Encontro de Modelagem Computacional. Nova Friburgo, RJ. (Notas de curso). 2003.

CASAGRANDE, A; R.E. FADUM. **Notes on soil testing for engineering purposes**. Harvard Univ. Grad. School of Engineering Publ. 268, p. 74. 1940.

CHEN, J; HOPMANS J.W; GRISMER M.E. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure – saturation and permeability functions. **Advances in water resources**. Vol.22, N°5, p. 479-493. 1998.

CRAIG, R.F. **Soil Mechanics**. Fifth edition. London, Chapman & Hall. 427p.1992.

DAS, B.M. **Geotechnical Engineering**. Fifth edition. Canada, Thomson. 589p. 2006.

ECHING S.O; HOPMANS J.W. Optimization of Hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. **Soil science society of America**. Vol.7, N°5, p. 1167-1175. 1993.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. **Groundwater Monitoring Review**. Vol.9, p.184-193. 1989.

FREDLUND, D.G; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York, John Wiley & Sons. 517p.1993.

FREDLUND, D.G; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.32, N°3, p.521-532, 1994.

GASS, S.I; HIRSHFELD, D.S; WASIL, E.A. Model world: The Spreadsheets of OR/MS. **Interfaces** p. 72-81. September – October. 1995.

GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**. Vol.85, N°4, p. 228-232. 1958.

HERNANDEZ M.P.M. **Avaliação de solos tropicais não saturados**. 2008. 324p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes**. New York, Academic Press, INC. 288p. 1971.

HOLTZ, R; KOVACS, W. **An introduction to Geotechnical Engineering**. New Jersey, Prentice Hall. 733p. 1981.

KOOL, J.B; PARKER, J.C; VAN GENUCHTEN, M.TH. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies, **Soil Science Soc. Am. J.** Vol. 49, p. 1348-1354. 1985.

KOOL, J.B; PARKER J. C; VAN GENUCHTEN T.H. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. **A review, J. of Hydrol.** Vol.91, p. 255-293. 1987.

KUMAR, S; MALIK, R.S. Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soil of varying texture. **Soil Science**. Vol. 150, N.6, p. 883-888. 1990.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Methods of Soil Analysis*, Black, C. A. et al., eds., Monograph 9, Part 1. **American Society of Agronomy**. Madison, WI, p. 253-261. 1965.

KLUTE, A; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods, *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. **Soil Science Society of America**. Monograph N° 9, Madison, WI, p. 687-734. 1986.

LAMBE, T.W. **Soil Testing for Engineers**. New York, John Wiley & Sons. 165p. 1951.

LAMBE T.W; WHITMAN R.V. **Mecânica de solos**. Sexta edição. New York, John Willey & Sons. 553p. 1989.

LANE K.S; WASHBURN D.E. Capillarity tests by capillarimeter and by soil filled tube. **Highway research board proceedings**. Vol.26, p. 460-473. 1946.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 1.ed. Piracicaba: USP/ESALQ– Departamento de Física e Meteorologia. 497p. 1995.

LU, N; LIKOS, W.J. **Unsaturated Soil Mechanics**. New Jersey, USA, John Wiley & Sons. 556p. 2004a.

LU, N; LIKOS, W.J. Rate of Capillary rise in soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering**. ASCE. Vol.130, N° 6, p. 646-650. 2004b.

MALIK R.S; KUMAR, S; MALIK, R.K. Maximal capillary rise flux as a function of height from the water table. **Soil science**. Vol.148, N°5 p. 322-326. 1989.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. Second edition. New York, John Wiley & Sons. 437p. 1993.

MOORE, R. E. Water conduction from shallow water tables. **Hilgardia**. Vol, 12, N° 6, p. 383- 426. 1939.

OLSEN, H.W. Hydraulic flow through saturated clay. **Proceedings of the Ninth National Conference on Clays and Clay Minerals**. p. 13-161. 1962.

OLSON, R. E.; DANIEL, D. E. **Measurements of the hydraulic conductivity of fine-grained soil, permeability and groundwater contaminant transporte**. ASTM STP 746, T.F. Zimme and C.O. Riggs. Eds. American society for testing and materials, Philadelphia, p. 18-64. 1981.

PECK, R. B; HANSEN, W. E; THORNBURN, T. H. **Foundation Engineering**. 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons. 514p. 1974.

PERLOFF, W. H; BARON, W. Soil. **Mechanics: Principles and applications**. John Wiley & Sons. 745p. 1976.

RAMOS, A; SANCHEZ, P; FERRER, J.A; BARQUÍN, J; LINARES P. **Modelos matemáticos de optimización**. Apuntes, Escuela Técnica Superior de Ingeniería-Departamento de organización Industrial, Universidad Pontificia Comillas, Madrid. p. 55. 2010.

RICHARDS L.A. Capillary conductions of liquids through porous mediums. **Physics**. Vol.1, p. 318-333. 1931.

RICHARDS L. A. Water conducting and retaining properties of soils in relations to irrigations. **Proceedings of an International Symposium on Desert Research**. Jerusalem, p. 523-546. 1952.

RITTER, A; HUPET, F; MUÑOZ-CARPENA R; LAMBOT, S; VANCLOOSTER M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water management**, Vol. 59, p. 77-96. 2002.

SALAS J; ALPAÑES J. **Geotecnia y Cimientos I**. 2^{da}. edición. España, Rueda. 500p. 2007.

SÁNCHEZ A. I; LÓPEZ A. Optimización com Solver. *Departamento de Economía Cuantitativa - Universidad de Oviedo*. 1998

<http://www.uv.es/asepuma/VI/31.PDF>

http://www.doaj.org/doaj?func=openurl&genre=article&issn=1575605X&date=1998&volume=Actas_6&issue=1&spage=29

Acesso 10Nov. 2011.

SIMUNEK, J; WENDROTH, O; VAN GENUCHTEN M.TH. A parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**. Vol.12, p.167-180. 1998

SOTO, M. A; CHANG, K. H; VILAR, O. M. Análise do método do permeâmetro Guelph na determinação da Condutividade hidráulica saturada. **Águas subterrâneas**. Vol. 23, N° 1, p. 137-152. 2009.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanic**. New York, John Wiley & Sons. 503p. 1943.

TERZAGHI, K; R.B. PECK. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 2nd. Ed. New York, John Wiley & Sons. 722p. 1967.

VENKATRAMAIAH C. **Geotechnical engineering**. Third edition. New Delhi, New Age International. 926p. 2006.

VILAR, O. M. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. Notas de aula da disciplina Mecânica dos solos não saturados. São Carlos: EESC/USP: Departamento de Geotecnia. 2009.

WALLACE, M. I. **Experimental Investigation of the Effect of Degree of Saturation on the Permeability of Sand. Master of Science**. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. 1948.

ZHANG X. LI; FREDLUND D.G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity. **Canadian Geotechnical Journal**. Vol. 46 N°12, p. 1431-1445. 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A. Planilha desenvolvida para anotações e cálculo dos ensaios de ascensão capilar.

USP		<i>DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA</i>				EESC		
ENSAIO DE ABSORÇÃO								
TESE: ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE SOLOS A PARTIR DO ENSAIO DE ASCENSÃO CAPILAR								
LOCAL DA AMOSTRA		ALUMINIO MAIRINQUE (65)		DATA:		26/11/2011		
AMOSTRA NRO. :		1		ESTADO		COMPACTADO		
						SECO AO AR		
Dados do corpo de prova				Características da amostra		Amostra compactada		
Altura h (cm)		10,08		Classificação (SUCS)		MH		
Diâmetro (cm)		5,1		ρ_{Sol} (g/cm ³)		2,749		
Massa (g)		389,07		Grau de Sat. Inicial (Sr)		78,82		
Volume (cm3)		205,92		Relação de vazios (e)		0,78		
Area (cm2)		20,43		Porosidade		0,44		
Peso esp(g/cm3)		1,89		Densidade seca(g/cm3)		1,55		
						$\rho_{\text{S Max.}}$ (g/cm ³)		
						1,563		
C.P. Inicial				C.P. Depois do ensaio				
Tipo de ensaio		W%		W%		molde		
Nro. Tara		P32		P122		1		
Peso Tara (gr)		9,38		9,37		67,85		
PT+Amostra umida (gr)		26,72		27,01		87,08		
PT+Amostra seca (gr)		23,54		23,81		475,42		
Cont. umidade W%		22,46		22,16		387,42		
w%		22,29				27,54		
						95,75		
						1,96		
						0,79		
C.P. Antes do ensaio				Umidade relativa				
Temperatura		25				8am		
Peso da amostra		320,49		3 DIAS		12pm		
Conteúdo de umidade w%		0,29		diâmetro		4pm		
Densidade umida g/cm3		1,54		5,12				
Densidade seca g/cm3		1,54		altura				
Grau de Sat. Antes do ensaio (Sr)		1,00		10,11				
Volumen cm3		208,15						
Relación de vazios e		0,79						
Porosidad n		0,44						
DADOS DO ENSAIO								
Tempo (s)	Tempo (minutos)	Agua abs. (g)	Agua acum. (g)	Molde + agua (cm3/cm2)	W%	X (cm)	q cm3/cm2	Velocidade (cm/s)
0	0,0	0	0,00	320,5	0,29	0,0	0	0
10	0,2	2,0	1,98	322,5	0,91	0,30	0,097	0,0097
20	0,3	1,0	2,94	323,4	1,21	0,40	0,144	0,0072
30	0,5	0,8	3,76	324,3	1,46	0,50	0,184	0,0061

TEOR DE UMIDADE DEPOIS DO ENSAIO

ALTURA	2CM	4CM	6CM	8CM	10CM	PRATO
TARA	P22	C23	D2	3A	156	1
P. TARA	11,23	12,28	9,47	9,5	14,5	67,85
P.T. +A.U.	20,75	22,44	22,01	20,12	26,76	
P.T. +A.S.	18,26	20,11	19,3	18,04	24,92	343,77
P.SECO	7,03	7,83	9,83	8,54	10,42	319,57
UMIDADE	35,42	29,76	27,57	24,36	17,66	

- **Cálculos**

- Vazão por unidade de área “ q ” em cm^3/cm^2 .

$q = V/A$ Onde: q é o volume de água absorvido por unidade de área do corpo de prova, t é o tempo para cada intervalo.

- Calculou-se também a velocidade acumulada “ v ” em cm/s

$v = q/t$ Para cada tempo acumulado.

- Conteúdo de umidade gravimétrico, extraído finalizando o ensaio, para cada 2cm de espessura do corpo de prova.

$w\% = \frac{Wh - Ws}{Ws}$ Onde Wh é o peso da amostra úmida depois do ensaio, Ws é o peso

seco da amostra depois do ensaio.

APÊNDICE B. Rotina Solver para estimar os parâmetros k_s , h_c e β , com a proposta de Lu & Likos (2004b).

METODO DE LU & LIKOS

Solo analisado: SC – Zhang & Fredlund

Solo	SC
Granulometria	
%Finos	42%
%Areia	29%
%Pedregulho	29%
n	0,39
k_s cm/s	2×10^{-5} a 4×10^{-4}

1. Construção do modelo de otimização

- Os parâmetros do modelo são organizados na planilha de trabalho no programa Excel, separando as células para cada variável de decisão (k_s , h_c e β).
- Inserimos os dados de tempo (t) e o avanço de ascensão z (cm) do ensaio de ascensão capilar.

Para este exemplo a equação de Lu & Likos para $j=1$ (Primeiro termo) é inserida nas células F-10:F-30

$$t = \frac{n}{k_s} \left\{ \left[h_c \ln \frac{h_c}{h_c - z} - z \right] + \beta \left(h_c^2 \ln \frac{h_c}{h_c - z} - \left(\frac{z^2}{2} + h_c \cdot z \right) \right) \right\} \quad (39)$$

- As células C6, C7 e C8 apresentam os valores de k_s , h_c , e β , respectivamente. Estes são valores iniciais que no processo de iteração do programa Solver encontra os valores que melhor se ajustem à curva experimental.
- Na Figura 72 observamos inseridos os valores experimentais de t e z na coluna A e B, respectivamente. A coluna F representa os dados estimados de t pela equação 39 considerando os valores iniciais das células variáveis. Como mostra a Figura 72 observa-se grande diferença entre os dados estimados e experimentais. Os valores da coluna G, são os erros quadráticos e calculam-se mediante a fórmula $(t_o - t_e)^2$.

A fórmula na célula G31 é “Somatória(G10:G30)” chamada de célula “função objetivo”.

Figura 72. Apresentação das células variáveis, a célula objetivo, os dados experimentais de t e z , e a curva estimada considerado os valores iniciais de k_s , h_c e β .

2. Executar o programa SOLVER.

Para ter acesso ao programa Solver selecionamos no menu principal *Arquivo > opções do excel > suplementos > ir* escolhemos a opção *Solver* e aceitar.

Para executar o programa precisamos nos posicionar na célula objetivo (célula G31), em seguida no menu principal em *Dados > Solver*. Uma janela *Parâmetros do Solver* é visualizada (Figura 73). Esta janela disponibiliza os seguintes campos:

- O campo *Definir objetivo* que é a célula que desejamos maximizar ou minimizar. Neste exemplo seria minimizar a somatória dos erros quadráticos entre os dados estimados e os experimentais (G31).
- No campo *Alterando células variáveis* inserimos as células C6 (k_s), C7 (h_c) e C8 (β) que o *SOLVER* modificará até minimizar tanto quanto possível a *célula objetivo*.
- O campo *Sujeito às restrições* representa as restrições que as células variáveis deve satisfazer, podendo ser elas explícitas como mostrado neste exemplo, ou podem apresentar limites superior e inferior.

Figura 73. Janela “Parâmetros SOLVER”

Para entrar no campo das restrições clicar no botão *adicionar* da janela *Parâmetros de Solver* (Figura 73). Neste exemplo a restrição é dada para a célula (C7), onde fixamos um valor mínimo de $h_c=74$ obtido experimentalmente e por último clicar OK. No caso de incrementar mais restrições clicar em *adicionar* (Figura 74).

Para editar as restrições, clicar na restrição e em *Alterar* (Figura 73).

Figura 74. Janela para colocar as restrições das variáveis.

Para o campo de restrições é muito importante o conhecimento da ordem de grandeza que podem apresentar os parâmetros na realidade, já que destes valores de entrada depende eficiência do processo de otimização. A continuação apresentamos as restrições que foram consideradas nesta pesquisa.

Restrição da variável k_s

A faixa de valores de k_s foi extraído da Tabela 1 para evitar valores ilógicos.

Restrição da variável h_c

Para a variável h_c na primeira etapa considerou-se como valor de entrada o valor h_c encontrado para cada solo testado.

Para a segunda etapa, pelo contrário, teve-se que iniciar com dados fornecidos pela literatura (Tabelas 8, 9, 10 e 11).

Restrição da variável β

Para a restrição da variável β foram considerados os valores estimados por Lu & Likos(2004a) em função do tipo de solo.

Areias	Silte	Argilas
0,1	0,01	0,001

Em caso de areias siltosas considerou-se uma faixa entre 0,5 a 0,01, por exemplo.

Na mesma janela de *Parâmetros do Solver* encontra-se o botão *opções* que permite definir as características do processo de solução (Figura 75). A opção *Todos os métodos* apresenta a condição *tempo máximo* que é o tempo de iteração, podendo ser o valor padrão de 100s. Neste exemplo consideramos 1000s. Para visualizar e analisar o processo das iterações é aconselhável clicar na opção *Mostrar resultados de iterações*.

Pelo processo de ascensão capilar tratar-se de um problema não linear, escolhemos a opção *GRG Não Linear*, e convergência entre valores de 0 e 1. Quanto maior o número de decimais o processo é mais demorado, optou-se pelo valor de 0,001 e por último clicar *OK*, voltando assim na janela *Parâmetros do Solver* (Figura 73).

Figura 75. Janela de Opções para o controle do processo de otimização.

Na janela *Parâmetros de Solver* executamos o programa > *resolver*, sendo mostradas todas as iterações do ajuste (Figura 76).

Figura 76. Processo de iteração

No final das iterações é mostrada uma janela com a mensagem de finalização e os parâmetros otimizados. Clicando OK para finalizar o processo (Figura 77).

Figura 77. Janela de resultados do SOLVER.

Obtendo assim os valores finais do ajuste e dos parâmetros variáveis (Figura 78).

Figura 78. Valores finais dos parâmetros variáveis.

Segue-se o mesmo procedimento para cada termo da série (m1 a m5). Neste exemplo observamos os ajustes para o solos SC- Zhang & Fredlund (2009). No Apêndice C apresenta-se o resumo de todos os solos analisados.

SC	Dado	SOLVER VARIANDO k_s , h_c , β					Solução de
	Experimental	m1	m2	m3	m4	m5	Terzaghi
k_s	2.10E-04	3.14E-05	8.31E-05	2.33E-04	4.36E-04	6.83E-04	5.55E-06
h_c	74	200.00	230.00	200.00	200.00	200.00	200
B	--	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	

O mesmo processo é realizado para a proposta de Terzaghi, mas considerando só duas variáveis (h_c e k_s).

APÊNDICE C. Ajuste da curvas de ascensão capilar com os parâmetros otimizados.

SOLOS DE LANE & WASHBURN

PRIMEIRA OPÇÃO DE LU & LIKOS (2004b)

SOLOS DE ZHANG & FREDLUND
PRIMEIRA OPÇÃO DE LU & LIKOS (2004b)

SOLOS ANALISADOS NESTA PESQUISA (SÃO PAULO)
PRIMEIRA OPÇÃO DE LU & LIKOS (2004b)

SOLOS DE LANE & WASHBURN
SEGUNDA OPÇÃO DE LU & LIKOS(1) (2004b)

SOLOS DE ZHANG & FREDLUND
SEGUNDA OPÇÃO DE LU & LIKOS(1) (2004b)

SOLOS ANALISADOS NESTA PESQUISA (SÃO PAULO)
SEGUNDA OPÇÃO DE LU & LIKOS(1) (2004b)