

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DAS CURVAS DE RETENÇÃO E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA ESTIMADAS PELA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN
(1980) PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**

Fernanda Vescovi Gonçalves

Dissertação de Mestrado

Vitória
2012

FERNANDA VESCOVI GONÇALVES

**Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica
estimadas pela equação de van Genuchten (1980) para diferentes
tipos de solos.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do
Espírito Santo, para a obtenção de título de
Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Fundação e Geotecnia
Orientadora: Prof. Dr^a. Kátia Vanessa Bicalho

Vitória

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G635e Gonçalves, Fernanda Vescovi, 1986-
Estudo da curva de retenção e condutividade hidráulica
estimadas pela equação de van Genuchten (1980) para
diferentes tipos de solo / Fernanda Vescovi Gonçalves. – 2012.
138 f. : il.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solos - Permeabilidade. 2. Solos - Potencial matricial. 3.
Solos - Umidade. I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

Fernanda Vescovi Gonçalves

**ESTUDO DA CURVA DE RETENÇÃO E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA ESTIMADAS PELA A EQUAÇÃO DE VAN
GENUCHTEN (1980) PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia **25 de outubro de 2012** por:



Profa. Dra. Kátia Vanessa Bicalho
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES



Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Doutor em Engenharia Civil
Membro Externo - UFOP

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus professores, por sempre estarem dispostos a ensinar, em especial à professora Kátia, por me orientar, mesmo que em altas horas da noite dos finais de semana, pela paciência, pelas palavras de motivação na hora certa e por estar sempre disposta a me ajudar. Agradeço por acreditar e pela confiança que depositou em meu trabalho.

Ao professor Bruno Dantas, pelas valiosas observações durante a realização deste trabalho, ao professor Patrício e funcionários do PPGEC pelo carinho com que sempre me atenderam. Aos professores Waldyr, Bruno e Patrício por terem aceitado participar da banca de avaliação desta dissertação e, principalmente pelas valiosas contribuições.

Aos meus colegas e amigos da Pós-graduação, pelos momentos memoráveis nas aulas, pelos estudos em grupo, ensinamentos e principalmente pelos momentos alegres, em especial à Larissa Camporez e Camila Loss por me acompanharem desde a graduação e pela amizade.

Aos meus pais pelo apoio e amor. Ao meu noivo, por sempre estar presente nas horas difíceis e pelo carinho. Aos meus irmãos e amigos por entenderem a ausência e o estresse durante esse período.

Aos meus colegas da Sincro Engenharia por me darem suporte nos momentos em que precisei me ausentar e por entenderem a importância da realização deste sonho.

À Deus por colocar pessoas maravilhosas na minha vida que me ajudaram muito, direta ou indiretamente, a realizar este sonho.

RESUMO

GONÇALVES,F.V.(2012). Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimadas pela equação de van Genuchten (1980) para diferentes tipos de solos. 2012. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFES, Vitória.

Uma das equações mais utilizadas na literatura para representar analiticamente a curva de retenção de água no solo foi proposta por van Genuchten (1980) e, existem vários bancos de dados publicados com valores dos quatro parâmetros independentes de ajuste da equação para diferentes tipos de solos e regiões. A equação de van Genuchten (1980) possibilita a determinação de uma expressão analítica para a função de condutividade hidráulica de solos não saturados a partir dos modelos propostos por Burdine (1953) ou Mualem (1976). O objetivo deste trabalho é estudar curvas de retenção e condutividades hidráulicas publicadas na literatura para diferentes tipos de solos (Wosten et al.; 1999; Schaap et al., 2001; Hodnett e Tomasella, 2002; e Gerscovich e Sayão, 2002) e quantificar a variação dos parâmetros de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica desses solos. Os diferentes métodos experimentais utilizados para determinar esses dados, a grande variabilidade de solos e regiões diferentes dos dados, a falta de informação completa das propriedades geotécnicas dos solos e a falta de significado físico dos parâmetros de van Genuchten (1980) não possibilitaram definir uma função que quantifique a variação dos parâmetros de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica para os solos analisados neste trabalho. As análises realizadas sugerem que não existe dependência entre o teor de finos/textura de solos granulares com finos e os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) quando o percentual de finos é tal que preenche todos os vazios das partículas mais grossas. Neste caso a classificação exclusivamente por textura não pode ser usada para estimar os parâmetros de van Genuchen (1980). A variação da permeabilidade saturada com o teor de finos pode ser uma forma de indicar o valor do percentual de finos que isto acontece. Para os solos arenosos siltsos analisados este percentual de finos é aproximadamente 30%. Verifica-se

que os solos que não apresentam uma diferença significativa na permeabilidade (condutividade hidráulica saturada) podem apresentar grandes variações nos valores da condutividade hidráulica não saturada dependendo do teor de finos desses solos, tal que para altos valores de sucções a permeabilidade relativa das amostras com até 10% de finos pode ser até 10^{16} vezes menor que a das amostras com percentual de finos superior a 90%.

Palavras-chave: Solos, Permeabilidade; Potencial Matricial, Umidade.

ABSTRACT

The van Genuchten (1980) equation has been widely used in the literature to represent analytically the soil water retention curve, and there are several published database tables which allow estimate the van Genuchten (1980) parameters (VG parameters) for different soils and regions. The equation enables one to derive closed-form analytical expressions for the unsaturated hydraulic conductivity function using Burdine (1953) and Mualem (1976) models. The objective of this dissertation is to study published database tables of the retention and hydraulic conductivity functions for different soils (Wosten et al.; 1999; Schaap et al., 2001; Hodnett and Tomasella, 2002; and Gerscovich and Sayão, 2002), and quantify the variation of VG parameters with the grain size distribution of these soils. The different experimental methods, the large variability of soils, and the lack of complete information of the soil properties of the investigated data, and the lack of physical meaning of VGparameters did not allow to define functions to quantify the variation of VGparameters with the grain size distribution for the investigated soils. The results suggest that there is no dependency between the VG parameters and the fine content of the investigated silty sand soils when the percentage of fines is such that it fills all large grains voids. In this case, the limited classification based only on soil texture can not be used to estimate the VG parameters. The variation of saturated hydraulic conductivity with fines content **provides a useful means of assessing** the existence of the dependency between the VG parameters and the soil texture. For the silty sandy soils evaluated in this study, when the fines content is higher that 30% there is no dependency between the VG parameters and the fines content. It is also observed that the soils that do not exhibit a significant difference in their saturated hydraulic conductivity values may exhibit large variations in their unsaturated hydraulic conductivity values depending on their fines content. For high suction values, the relative permeability of the soil specimens with 10% of fines content can be up to 10^{16} times lower than that of the soil specimens with 90% of fines content

Keywords: Soils, Permeability, Potential Matrix, Humidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formas da membrana contráctil (Silva, 2006).....	27
Figura 2: Fenômeno de tensão superficial na interface solo – água (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	29
Figura 3: Ângulo de contato entre líquido e sólido (Georgetti, 2010).....	33
Figura 4: Combinação de capilaridade e adsorção produzindo sucção matricial em solo não saturado (Hillel, 1971).....	33
Figura 5: Curva de retenção (secagem) típica com os estágios de transição (Marinho, 2005).	35
Figura 6: Descrição das curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo (Fredlund, 2002).	36
Figura 7: Forma geral da curva de retenção de acordo com a distribuição dos poros. Em (a) para materiais porosos de distribuição uniforme dos poros, em (b) melhor representação para materiais com um único tamanho de poros, em (c) para materiais com dois tamanhos de poros, em (d) para materiais bem graduado (Marinho, 2005). .	37
Figura 8: Representação esquemática da curva de retenção para diferentes tipos de solo (Vanapalli, 1994).....	39
Figura 9: Curvas de retenção obtidas de amostras compactadas com diferentes umidades (Vanapalli et al., 1999).	40
Figura 10: Variação do valor de sucção referente à entrada de ar para um solo argiloso compactado no lado seco e submetido a diferentes pressões de confinamento (Vanapalli et al., 1999).	41
Figura 11: Variação do valor da sucção referente à entrada de ar para um solo argiloso compactado no lado úmido e submetido a diferentes pressões de confinamento (Vanapalli et al., 1999).	42

- Figura 12: Categorização das equações de curva de retenção baseado na gama de condições de sucção do solo que são razoavelmente bem definidos por cada um dos equações empíricas (adaptado Fredlund et al., 2011)..... 44
- Figura 13: Influência dos parâmetros matemáticos na equação de Fredlund e Xing (1994). Em (a) temos a variação de a , com $n = 2$ e $m = 1$. Em (b) variação de m , com $a = 100$ e $n = 2$ e em (c) variação de n , com $a = 100$ e $m = 1$ (Fredlund e Xing, 1994). 47
- Figura 14: Influência dos parâmetros matemáticos na equação de van Genuchten (1980). Em (a) temos a variação de a (α), com $n = 2$ e $m = 1$. Em (b) variação de m , com $a = 100$ e $n = 2$ e (c) variação de n (n_v), com $a = 100$ e $m = 1$ (Silva, 2005). 49
- Figura 15: Permeabilidade intrínseca, condutividade hidráulica da água e condutividade do ar para vários tipos de solo (Lu e Likos, 2004). 54
- Figura 16: Esquema de funções de permeabilidade e curvas de retenção para areia e silte argiloso. (Fredlund et al., 1997). Em (a) curva de retenção para solo arenoso e silte argiloso em (b) a representação da condutibilidade hidráulica para os mesmos solos. 56
- Figura 17: Distribuição textural para amostras para Curvas de retenção (a), para o subconjunto para condutividade hidráulica (K_s) (b) e para o subconjunto da condutividade hidráulica não saturada ($K(se)$) (d). A fig. 17d retrata as classe texturais: S: areia, LS: Areia lemosa, sL: Lemo arenoso, sL: Lemo argilo arenoso, sC: argila arenosa, L: Lemo, SiL: Lemo siltoso, Si: Silte, sicL: Lemo argiloso siltoso, SiC: Argila siltosa, cL: lemo argiloso, C: argila (Schaap et al. 2001). 63
- Figura 18: Variação dos valores K_s com a porcentagem de finos para as 554 amostras de solos do banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001)..... 70
- Figura 19: Distribuição da porcentagem das amostras do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) de acordo com cada subgrupo (% de finos)..... 71
- Figura 20: Variação de α (cm^{-1}) com a % de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001)..... 73
- Figura 21: Variação de n_v com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001)..... 74

Figura 22: Variação de θ_s com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).....	75
Figura 23: Variação de θ_r com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).....	75
Figura 24: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x umidade volumétrica (Θ), definidas a partir dos valores médios dos dez subgrupos (0% - 10%, 10% - 20%, 20% - 30%, 30% - 40%, 40% - 50%, 50% - 60%, 60% - 70%, 70% - 80%, 80% - 90%, 90% - 100% de finos) avaliados neste trabalho.....	76
Figura 25: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores médios dos dez subgrupos (0% - 10%, 10% - 20%, 20% - 30%, 30% - 40%, 40% - 50%, 50% - 60%, 60% - 70%, 70% - 80%, 80% - 90%, 90% - 100% de finos) avaliados neste trabalho.....	77
Figura 26: Variação dos valores médios de α (cm^{-1}) com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).....	78
Figura 27: Variação dos valores médios de n_v com o %finos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).....	80
Figura 28: Variação dos valores médios dos parâmetros θ_r e θ_s com a % finos.	80
Figura 29: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da <i>mediana</i> dos valores dos dez subgrupos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) avaliados neste trabalho.....	82
Figura 30: Variação dos valores das medianas de α (cm^{-1}) com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	83
Figura 31: Variação dos valores das medianas de n_v com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	84
Figura 32: Variação dos valores das medianas de θ_s e θ_r com o %finos para as amostras apresentado no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	85
Figura 33: Distribuição da porcentagem das amostras de acordo com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001).....	87

Figura 34: Variação de θ_r com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	88
Figura 35: Variação de Θ_s com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	88
Figura 36: Variação de n_v com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	89
Figura 37: Variação de α (cm^{-1}) com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).	90
Figura 38: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da <i>média</i> dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999).	91
Figura 39: Variação dos valores médio do parâmetro α com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).	91
Figura 40: Variação dos valores médio do parâmetro n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.	92
Figura 41: Variação dos valores médios dos parâmetros Θ_s com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.	93
Figura 42: Variação dos valores médios dos parâmetros Θ_r com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.	93
Figura 43: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da <i>mediana</i> dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999).	94
Figura 44: Variação dos valores das medianas do parâmetro α (cm^{-1}) com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).	95
Figura 45: Variação dos valores das medianas do parâmetro n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).	96
Figura 46: Variação dos valores das medianas dos parâmetros Θ_s com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).	96

- Figura 47: Variação dos valores das medianas dos parâmetros Θ_r com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).** 97
- Figura 48: Curvas de retenção, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999) para solos profundos. 99
- Figura 49: Curvas de retenção, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999) para solos superficiais. ... 99
- Figura 50: Variação dos valores dos parâmetros (a) Θ_r , (b) α , (c) Θ_s e (d) n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para solos profundos..... 100
- Figura 51: Variação dos valores dos parâmetros (a) Θ_r , (b) α , (c) Θ_s e (d) n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para solos superficiais..... 101
- Figura 52: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Grossa obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. (c) e (d) Curvas de retenção para classificação textural Média obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos superficiais e profundos ,respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. 103
- Figura 53: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Média Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. (c) e (d) Curvas de retenção para classificação textural Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos superficiais e profundos, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. 104
- Figura 54: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Média Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. 105

Figura 55: Curvas de retenção dos solos brasileiros obtidos a partir dos parâmetros apresentados por Gerscovich e Sayão (2002).	110
Figura 56: Variação de α (cm^{-1}) e n_v obtendo a mesma curva de retenção. Amostra original: areia argilo siltosa com $\alpha = 2,715$ (cm^{-1}) e $n_v = 1,2$	113
Figura 57: Relações entre Condutividade Hidráulica não saturada ($K(\text{Se})$) e Sucção (h) definidas para os valores médios dos dez subgrupos avaliados neste trabalho.	118
Figura 58: Relações entre Condutividade Hidráulica não saturada ($K(\text{Se})$) e Sucção (h) definidas para os valores das medianas dos dez subgrupos avaliados neste trabalho.	118
Figura 59: Relações entre a condutividade hidráulica relativa ($K(\text{Se})/K_s$) e sucção (h) definidas para os valores médios dos dez subgrupos avaliados neste trabalho	119
Figura 60: Relações entre a condutividade hidráulica relativa ($K(\text{Se})/K_s$) e sucção (h) definidas para os valores das medianas dos dez subgrupos (% de finos) avaliados neste trabalho.	120
Figura 61: Visualização da relação entre função de condutividade hidráulica não saturada e curva de retenção solo-água.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de medidas de sucção (Vilar, 2002).....	31
Tabela 2: Proposições para estimar a curva de retenção solo – água.	43
Tabela 3: Valores máximos e mínimos obtidos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001) para os parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980).	50
Tabela 4: Parâmetros de van Genuchten sugeridos por Wosten et al. (1999).....	50
Tabela 5: Valores de Θ_s , Θ_r , α , n_v para solos tropicais e temperados (Hodnett e Tomasella, 2002).....	51
Tabela 6: Descrição dos locais dos solos e caracterização das amostras (Gerscovich e Sayão, 2002).....	51
Tabela 7: Parâmetros da curva de retenção (Θ_s , Θ_r , α , n_v), porosidade do solo (n), número de dados experimentais (N) (Gerscovich e Sayão, 2002).	52
Tabela 8: Proposições para a modelagem da curva de condutividade hidráulica (Gerscovich e Guedes, 2002).	58
Tabela 9: Origem do banco de dados HYPRES (Wosten e al. 1999).....	64
Tabela 10: Classificação de texturas usadas no banco de dado HYPRES (Wosten et al.,1999).....	65
Tabela 11: Descrição dos locais dos solos e caracterização das amostras (Gerscovich e Sayão, 2002).....	66
Tabela 12: Representatividade de cada subgrupo (primeira classificação) no banco de dados do programa Rosetta Schaap et al. (2001).....	72
Tabela 13: Valores referentes à média e mediana dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para os 10 subgrupos criados com os dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).....	86

Tabela 14: Distribuição do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001) para a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.	86
Tabela 15: Valores referentes à média e mediana dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para as cinco classes texturais propostas por (Wosten et al. 1999).	97
Tabela 16: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de α	106
Tabela 17: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de n_v	106
Tabela 18: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Guber Wosten et al. (1999) para os valores de Θ_r	106
Tabela 19: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de Θ_s	107
Tabela 20: Distribuição granulométrica das amostras de solo apresentada por Gerscovich e Sayão (2002) e classificação segundo Wosten et. al. (1999) (adaptado de Gerscovich e Sayão (2002).	108
Tabela 21: Parâmetros da curva de retenção (θ_s , θ_r , α , n_v) valor de entrada de ar para as curvas de retenção (VEA) e classificação de Wosten et al. (1999). (Adatado de Gerscovich e Sayão, 2002).	111
Tabela 22: Variação de α para os mais diversos autores comentados neste trabalho.	112
Tabela 23: Variação de n_v para os mais diversos autores comentados neste trabalho.	112
Tabela 24: Variação de Θ_r para os mais diversos autores comentados neste trabalho.	114
Tabela 25: Variação de Θ_s para os mais diversos autores comentados neste trabalho.	114

LISTA DE SÍMBOLOS

α , m , n_v : parâmetros de ajuste.

$C(u)$: fator de correção

D_{max} : maior diâmetro dos poros

e : número natural = 2,71828

h : carga de pressão (sucção)

i : gradiente hidráulico

K_s : condutividade hidráulica

$K(se)$: condutividade hidráulica não saturada

v : velocidade de percolação

Se : Grau de saturação efetivo

Sr : Grau de saturação residual

S : Grau de saturação

T : Tensão superficial

Δu : Sucção

u_a : pressão do ar

u_w : pressão da água

$u_a - u_w$: sucção mátrica

$(u_a - u_w)_b$: sucção correspondente ao ponto de entrada de ar

Θ : umidade volumétrica

Θ_r : umidade volumétrica residual

Θ_s : umidade volumétrica de saturação

Ψ : potencial da água

Ψ_g : potencial gravitacional

Ψ_m : potencial matricial

Ψ_{pn} : potencial pneumático

Ψ_{os} : potencial osmótico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	22
1.3	Organização da dissertação	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Comentários iniciais.....	25
2.2	Fases do solo não saturado.....	25
2.3	Sucção.....	27
2.4	Retenção de água pelos solos.....	32
2.4.1	Capilaridade.....	32
2.4.2	Adsorção.....	33
2.5	Curvas de Retenção	34
2.5.1	Forma e Obtenção da Curva de Retenção	34
2.6	Fatores que influenciam a curva de retenção	38
2.6.1	Tipo de solo	38
2.6.2	Umidade inicial de moldagem.....	40
2.6.3	História de tensões	41
2.7	Equações matemáticas.....	42
2.7.1	Equação de Brooks e Corey (1964).....	45
2.7.2	Equações de Fredlund e Xing (1994)	46
2.7.3	Equação de van Genuchten (1980)	48
2.8	Permeabilidade X Condutividade hidráulica	52
3	APRESENTAÇÃO BANCOS DE DADOS.....	60
3.1	Comentários iniciais.....	60
3.2	Banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001).....	61

3.3	Banco de dados HYPRES	63
3.4	Tabelas apresentadas por Gerscovich e Sayão (2002)	65
3.5	Crítérios de separação para o banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001)	67
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
4.1	Considerações Iniciais	69
4.2	Análise do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) - Primeira classificação textural.	71
4.2.1	Análise com valores médios	76
4.2.2	Análise com valores da mediana	81
4.3	Análise do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) - Segunda classificação textural (Proposta por Wosten et al., 1999).....	86
4.3.1	Análise com valores médios	90
4.3.2	Análise da mediana	94
4.4	Banco de dados HYPRES (Wosten et al. 1999)	97
4.5	Comparação entre o Banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e valores apresentados por Wosten et al. (1999).....	101
4.6	Curvas de retenção com os parâmetros propostos por Gerscovich e Sayão (2002)	107
4.7	Conclusões Parciais	115
4.8	Função de Condutividade hidráulica não saturada	116
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
5.1	Conclusões	123
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	127
6	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	128
	ANEXO 1	135
	ANEXO 2	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O estudo da mecânica dos solos não saturados é necessário tanto pelo fato de termos a grande maioria dos solos no estado não saturado, quanto devida à necessidade de compreender fenômenos que eram até pouco tempo desconsiderados nos projetos e nas análises de engenharia civil, e particularmente na engenharia geotécnica. Tais fenômenos tratam em sua grande maioria de aspectos ambientais, onde o meio ambiente é um elemento fundamental no comportamento do solo (Marinho, 2005).

A curva de retenção da água no solo, a seguir denominada simplesmente curva de retenção, é importante em qualquer estudo do comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados. A determinação da curva de retenção que expressa relação entre a umidade do solo (volumétrica ou gravimétrica) e o correspondente potencial mátrico (Childs, 1940), é difícil tanto pelo tempo que se consome nas medições quanto pela intrínseca modificação dos pontos da curva devido à histerese.

A curva de retenção varia com vários fatores que vão desde a distribuição granulométrica, da forma e do arranjo das partículas do solo, valores da umidade e índice de vazios iniciais (Vanapalli et al. 1999, Kawai et al. 2000), energia de compactação (Marinho e Stuermer, 2000), temperatura do solo (Duarte et al. 2004) até a composição e concentração de solutos na fase líquida nos solos argilosos ativos. Assim, a possibilidade da estimativa da curva de retenção, através de

equações empíricas, com base em parâmetros de fácil determinação pode ser extremamente útil para o estudo de solos não saturados.

Varias equações têm sido propostas para estimar a curva de retenção, entre elas, destacamos a equação de van Genuchten (1980). Os parâmetros de ajuste da curva de van Genuchten (1980), α e n_v são usados também no modelo matemático de Mualem (1976) para estimar a função de condutividade hidráulica, o que permite resolver a equação de Richards e obter a distribuição de umidade e sucção no subsolo.

Publicações com valores dos parâmetros são encontrados na literatura como, por exemplo, banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001), Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002).

Hodnett e Tomasella (2002) alerta que o uso de uma tabela de consulta irá depender da disponibilidade de dados, e se a classe do solo em estudo é representada no banco de dados. Apesar dos avanços obtidos no desenvolvimento de modelos (ou equações) para previsão do comportamento de solos não saturados, verifica-se a necessidade do uso de parâmetros adequadamente determinados e de comprovação com casos práticos.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estudar as curvas de retenção e os parâmetros independentes de ajuste da equação de van Genuchten (1980) obtidos pelo banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e publicações disponíveis na literatura (Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002)). Estudou-se também as curvas de condutividade hidráulicas obtidas pelo banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) .

Os objetivos específicos são:

- Estudar as curvas de retenção e a condutividade hidráulica não saturada para diferentes tipos de solos e regiões publicados na literatura;
- Avaliar a influência da granulometria/textura e o significado físico dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) nas curvas de retenção obtidas;
- Avaliar a variação dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica dos solos;
- Avaliar se é possível definir uma função analítica que quantifique a variação dos parâmetros de ajuste de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica dos solos analisados neste trabalho;
- Avaliar se é possível definir valores dos parâmetros independentes para os solos brasileiros e temperados baseados em dados publicados e em função da textura/granulometria;
- Avaliar a influência da distribuição granulométrica na função de condutividade hidráulica dos solos não saturados;

1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho é composto de 5 capítulos, referência bibliográfica e dois anexos. O trabalho se divide em três partes: a primeira apresenta a revisão bibliográfica necessária para o entendimento da pesquisa; a segunda etapa apresenta análises da pesquisa e discussões; na terceira parte encontram-se as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

A primeira parte é composta pelo capítulo 2 (o primeiro capítulo é a introdução e contempla os objetivos do presente trabalho) no qual os conceitos básicos de solos não saturados, sucção e formas de retenção da água no solo são

apresentados. Estes conceitos são importantes para o estudo da curva de retenção da água no solo, ou simplesmente curva de retenção, a qual expressa a relação entre a umidade dos solos (gravimétrica ou volumétrica) e a sucção (correspondente potencial mátrico) do solo. Além de apresentar o conceito da curva de retenção e sua importância, os fatores que interferem na curva de retenção, sua forma e o fenômeno da histerese são estudados. Apresentam-se modelos matemáticos de três autores diferentes, a influência de cada parâmetro nas equações e o significado físico quando existe.

A diferença entre permeabilidade e condutividade hidráulica também é apresentada no capítulo 2. Nesse capítulo estão contidas proposições matemáticas para modelagem da condutividade hidráulica não saturada.

Na segunda parte da dissertação, apresenta-se o capítulo 3 e 4. O capítulo 3 apresenta o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001), o qual é a base principal do presente trabalho. Além deste banco de dados, também são apresentadas outras publicações disponíveis na literatura (Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002). No capítulo 4 apresenta-se a análise de resultados para duas classificações texturais utilizadas para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Apresenta-se também as curvas de retenção obtidas com os valores dos parâmetros independentes publicados por Gerscovich e Sayão (2002). O final desse capítulo contempla a conclusão parcial para o estudo das curvas de retenção, dos parâmetros de ajuste a equação de van Genuchten (1980) e das curvas de condutividade hidráulica não saturadas hipotéticas criadas neste trabalho para a primeira classificação textural do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001).

Finalmente na última parte, o capítulo 5, apresentam-se as conclusões finais e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comentários iniciais

Vários problemas da engenharia geotécnica envolvem solos não saturados, tais como: aterros compactados, fundações em solos expansivos, barragens de terra, estabilidade de taludes e encostas. Além disso, longos períodos de estiagem podem causar a condição de não saturação do solo, cuja ocorrência tem sido frequente em vários países (Bicalho e Vivaqua, 2012). Nas últimas décadas várias pesquisas têm sido desenvolvidas buscando compreender o comportamento de solos não saturados visando melhorar e aperfeiçoar os projetos de engenharia. No Brasil, já foram realizados sete simpósios brasileiros sobre o tema (simpósios NSAT) e um congresso internacional (congresso UNSAT).

Neste capítulo serão discutidos alguns fatores relevantes ao estudo de solos não saturados, tais como: as fases constituintes do solo não saturado, sucção e as formas de retenção da água no solo. Estes conceitos são importantes para o estudo das curvas retenção da água pelo solo, também apresentadas neste capítulo. Além do conceito da curva de retenção e sua importância, discutem-se os fatores que interferem na curva de retenção, sua forma e o fenômeno da histerese. Modelos matemáticos de três autores diferentes são apresentados além da influência de cada parâmetro nas equações e o significado físico quando existe. A diferença entre permeabilidade e condutividade hidráulica também é apresentada.

2.2 Fases do solo não saturado

O solo não saturado difere do saturado porque possui três fases: sólido, água e ar. Estas são estruturadas de forma que os espaços vazios, chamados de poros, têm capacidade de armazenar líquidos e gases. Fredlund e Rahardjo (1993)

consideram ainda, uma quarta fase, a membrana contráctil, devido à importância da interação água-ar.

A geometria da interface entre dois fluidos é regida pelo equilíbrio de forças existentes em ambos os lados da interface. Em um sistema líquido-líquido, tais como uma gota de óleo na água, estas forças incluem a pressão em cada líquido e uma tensão interfacial que atua entre os dois. Em um sistema gás-líquido, tais como a interface ar-água no solo não saturado, a tensão de superfície da fase de ar pode ser praticamente ignorada, considerando apenas três componentes necessários para o equilíbrio mecânico: a pressão do ar, pressão da água, e a tensão superficial da fase aquosa (Lu e Likos, 2004). Geralmente, a tensão superficial é definida como o nível máximo de energia que um fluido pode armazenar sem rompimento e tem como unidade joules por metro quadrado (J/m^2), o equivalente a newtons por metro (N/m).

A tensão superficial de uma interface gás-líquido é muitas vezes considerada como uma força concentrada atuando apenas ao longo da fronteira de superfície. No entanto, a tensão superficial é resultante de uma tensão distribuída que atua na interface e também para alguma profundidade no interior da fase líquida. Se não houvesse diferença de pressão entre a interface (ou seja, $u_w = u_a$), teria-se uma superfície perfeitamente plana. Neste caso, a tensão superficial não pode ser obrigada a existir porque o sistema pode estar em equilíbrio mecânico com ou sem a tensão superficial. No entanto, quando há uma diferença de pressão entre as duas fases, uma força adicional, a tensão superficial, é necessária para o equilíbrio (Lu e Likos, 2004). A resistência da tensão superficial depende e geralmente decresce com o aumento da temperatura (Libardi, 1995). Para superfícies curvilíneas a diferença de pressão é responsável por uma série de fenômenos capilares (Reichardt, 1985). A Figura 1 ilustra este fenômeno.

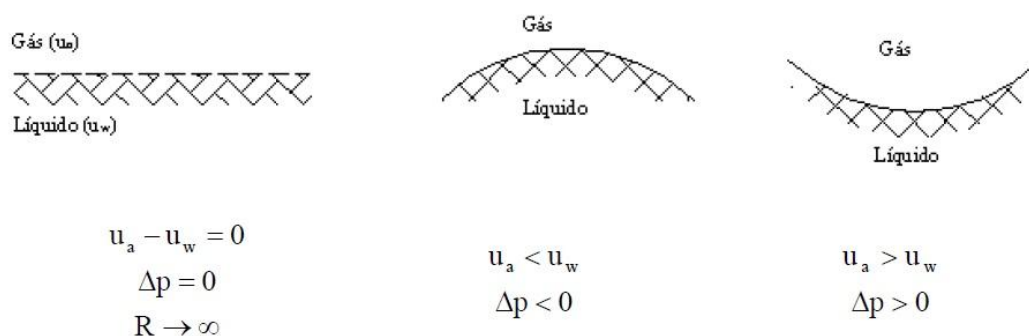


Figura 1: Formas da membrana contráctil (Silva, 2006).

2.3 Sucção

Sucção pode ser descrita como a energia com que um elemento poroso absorve água quando ela está livre para se mover. Esta avidez por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo (Marinho, 2005).

A água obedece à tendência universal e movimenta-se no sentido de diminuir sua energia. Quanto menor a energia de um corpo, maior sua estabilidade. Assim, conhecendo os potenciais da água em diferentes pontos do solo, pode-se determinar sua tendência de movimento. O estado de energia da água é considerado uma característica importante dos solos (Lu e Likos, 2004).

A energia cinética e a energia potencial são as duas formas principais de energia, no entanto, para o caso da água, onde o movimento nas diferentes partes do sistema solo-água é, em geral, muito lento, a energia cinética pode ser considerada como nula. Reichardt (1985) afirma que dificilmente pode-se determinar de forma absoluta o potencial total da água. Assim, determina-se a diferença entre um estado padrão e o referido estado no sistema. Considera-se estado padrão, ao qual é atribuído o valor zero, o estado no qual o sistema encontra-se em condições normais de temperatura e pressão, livre de solutos, com interface líquido-gás plana, situado a um referencial de posição.

Reichardt (1985) define que o trabalho útil realizado para conduzir um infinitesimal de água pura isotérmica, isobárica e reversivelmente sob condições padronizadas para o estado considerado no solo, é chamado de potencial total. Se existe uma diferença de potencial, a água passa do ponto de maior potencial para o de menor potencial. Portanto, nota-se que a diferença de potencial é um indicativo da tendência de movimento da água. Os dados de potencial são expressos em pascal, em atmosferas ou em cmH₂O, pois, temos dados em termos de energia por unidade de volume, que é pressão.

Segundo Reichardt (1985) e Campbell (1988) o potencial da água é a somatória de quatro componentes: osmótica (ψ_{os}), matricial (ψ_m), gravitacional (ψ_g) e pneumática (ψ_{pn}), tal que:

$$\psi = \psi_m + \psi_{os} + \psi_{pn} + \psi_g \quad (1)$$

Vilar (2002) afirma que o potencial osmótico ou soluto reflete a influência da presença de solutos na água no solo. O potencial matricial ou mátrico (sucção) decorre das forças de capilaridade e adsorção originadas da interação entre a matriz do solo e água. O potencial pneumático ou de pressão origina-se de pressões de gás diferentes da pressão atmosférica e tem importância relevante quando se consideram os ensaios de placa de pressão ou a translação de eixos.

Segundo Marinho (2005), a sucção em solos é composta de duas partes, a sucção matricial e a sucção osmótica. As tensões que controlam o comportamento dos solos não saturados, e em algumas situações também as dos solos saturados, são fortemente influenciadas pela pressão negativa na água intersticial. Esta pressão, não necessariamente de tração, é dada pela diferença entre a pressão atmosférica (ou pressão no ar) e a pressão na água, denominada de sucção matricial.

Lu e Likos (2004) demonstram que a diferença entre a pressão do ar e da água, $u_a - u_w$, também chamada de sucção, está relacionada com o raio de curvatura da membrana, R , e a tensão superficial, T , tal que (equação 2):

$$\Delta u = (u_a - u_w) = \frac{2T}{R} \quad (2)$$

O aparecimento da sucção é um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico dos solos não saturados. Estas variações alteram tanto a compressibilidade quanto a resistência do solo.

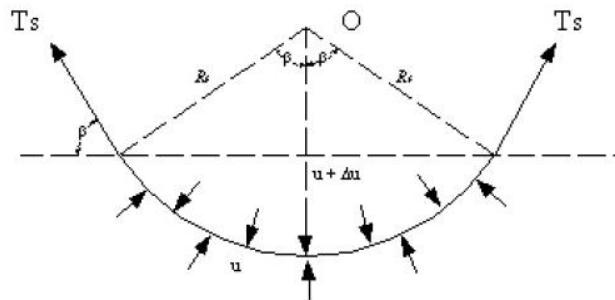


Figura 2: Fenômeno de tensão superficial na interface solo – água (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A sucção em solos tem sido objeto de estudos desde o século XIX. Os primeiros estudos foram aplicados à agricultura. Uma análise detalhada destes primeiros trabalhos permite uma melhor compreensão dos métodos de medição de sucção. Estes métodos utilizam ferramentas básicas, nas quais o conceito físico/químico é facilmente compreendido. Livingston (1906) apresentou um estudo sobre medições de sucção no deserto objetivando estudar as plantas daquela região. Livingston utilizou tubos capilares com uma membrana semi-permeável, preenchidos com soluções de diferentes concentrações. Desta forma, foi capaz de verificar se o solo absorvia ou perdia água por osmose. Em outras palavras, Livingston foi capaz de avaliar a sucção que se encontrava naquele solo. Shull (1916) desenvolveu um método para determinação indireta da sucção utilizando sementes de plantas que funcionavam como elemento de absorção. Este método foi posteriormente aprimorado por Gardner (1937). Outros autores contribuíram para os

estudos da determinação da sucção em solos (e.g. Livingston & Koketsu, 1920; Hansen, 1926 etc.). Os estudos envolvendo os aspectos teóricos da termodinâmica que se relacionam com a interpretação e compreensão da sucção em solos foram feitos por Edlefsen & Anderson (1943). Na mecânica dos solos Terzaghi (1925) foi o primeiro a referir-se à capacidade dos solos argilosos de sustentarem elevada sucção (Marinho 2005).

Uma grande variedade de técnicas tem sido utilizada para medição de sucção (potencial mátrico) em solos não saturados com diferentes aplicações e faixa ou intervalo de medida. Vilar (2002) apresenta as vantagens e limitações de vários métodos de determinação direta e indireta da sucção de solos não saturados (tabela 1). Sucção matricial e total podem ser medidas. A sucção osmótica é geralmente determinada a partir dos valores de sucção matricial e total apesar de existirem técnicas disponíveis para sua determinação. Na maioria das técnicas mede-se o conteúdo de água ou alguma propriedade física para medir sucção. Nas técnicas indiretas mede-se o conteúdo de água ou alguma propriedade física (umidade relativa, resistência elétrica, etc.) sensível a mudança do conteúdo de água, ou seja, o parâmetro medido não é a sucção sendo necessária a curva de calibração para calcular o valor da sucção no solo. Os ensaios para determinação (direta ou indireta) de sucção de solos não saturados são demorados e frequentemente esse tempo não pode ser reduzido. Assim, o uso de modelos ou equações para estimar a variação de sucção com o teor de umidade pode ser necessário para análises preliminares de projetos que envolvam solos não saturados, mas os resultados estimados precisam ser posteriormente confirmados através de técnicas experimentais.

Tabela 1: Métodos de medidas de sucção (Vilar, 2002).

Método de Sucção	Faixa de Medida e tempo aproximado de equilíbrio	Observações
Funil de pedra porosa (matricial)	0 a 70 kPa (Horas)	- sucção é aplicada diretamente à amostra; - bom para baixas sucções onde a precisão das panelas é limitada.
Placa de Pressão (matricial)	0 a 1.500 kPa (Horas)	- emprega a técnica de translação de eixos; - depende da capacidade da pedra porosa (pressão de entrada de ar); - continuidade da fase ar
Membrana de pressão (matricial/total?)	Até 10.000 (dias)	- emprega a técnica de translação de eixos; - emprega membrana de celulose (seletividade?)
Tensiômetro (matricial)	0 a 70 kPa (minutos)	- tempo de resposta: depende da condutância da pedra porosa; sensibilidade do elemento de medida; - existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; - tensiômetros de alta capacidade (para pressões de -1 atm); tiram partido da elevada resistência à tração da água
Papel Filtro	Papel-solo em contato (matricial)	- depende do contato entre o solo (pode ser dificuldade); - necessita calibração do papel filtro; - evitar formação de fungos; - pesagem (precisão 0,0001g)
	Papel-solo sem contato (total)	
Blocos Porosos (matricial)	10 a 1.000 kPa (semanas)	- baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos (gesso, fibra de vidro, etc); resistência elétrica (ohms x sucção); - desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível a altas sucções.
Psicrômetros (total / osmótica)	100 a 8.000 kPa (minutos)	- depende de rigoroso controle da temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; - sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária).
Sensores de Condutividade Térmica (osmótica)	todos os valores (minutos)	- condutividade elétrica do extrato da solução; - concentração de solutos; - extrato + psicrômetros: resultados precários.
Equilíbrio da fase vapor (total)	Toda a faixa acima de \approx 400 kPa (dias)	- solução com concentração conhecida, umidade relativa, sucção total; - amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até equilíbrio de peso; - equilíbrio demorado.
Princípios Osmóticos (matricial)	200 a 1.600 kPa (horas)	- solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; - solução de PoliEtilenoGlicol (PEG), peso molecular 20.000; - útil para instalar e controlar sucção em ensaios

2.4 Retenção de água pelos solos

A capacidade de retenção de água pelos solos depende de fatores como o tipo de solo, a micro estrutura (arranjo das partículas e por consequência a distribuição dos poros) e a composição mineralógica do solo. Consideram-se dois processos básicos que explicam a retenção de água pelo solo: a capilaridade e a adsorção.

2.4.1 Capilaridade

O fenômeno da capilaridade manifesta-se em tubos de pequenos diâmetros postos em água, como resultado da tensão superficial e tendo relação direta com a componente de sucção total no solo (Fredlund e Rahardjo, 1993). Pode ser representado ao tomar-se um tubo capilar mergulhado em água livre, no qual haverá a formação de menisco, côncavo ou convexo, determinado pela diferença de pressão entre a atmosfera e o líquido. A altura para a ascensão capilar, quando a pressão sob a superfície externa é maior que a pressão no interior do tubo, pode ser obtida através do equilíbrio de forças verticais atuantes na água interna do tubo. Quanto menor o diâmetro do tubo capilar maior a altura para ascensão capilar.

Segundo Hillel (1971), a formação de menisco em tubos capilares é resultante do ângulo de contato do líquido com a superfície do tubo. O ângulo de contato dependerá de forças moleculares como: força molecular de van der Waals de atração coesiva do líquido e força van der Waals de atração adesiva entre o sólido e a partícula de água. Dependendo das forças de adsorção que ocorrem entre as moléculas do fluido e do material que compõe o sólido, o ângulo de contato pode ser agudo, reto ou obtuso (Figura 3).

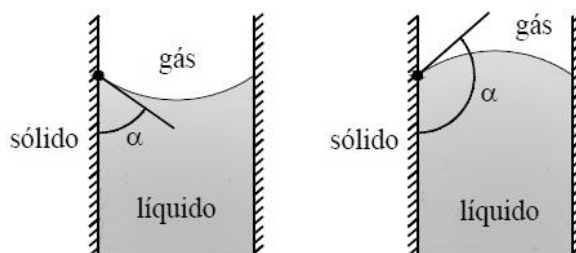


Figura 3: Ângulo de contato entre líquido e sólido (Georgetti, 2010).

Para solos não saturados, a água capilar pode ser contínua ou não. A continuidade depende da interligação entre os meniscos de umidade. Se for contínua, a variação de pressão hidrostática com a elevação segue a equação ($u = \gamma_w \times z$). No caso de descontinuidade, a pressão a água em qualquer ponto é independente da elevação e é determinada somente pelo raio do menisco.

2.4.2 Adsorção

Adsorção é a fixação de moléculas de uma substância na superfície de outra. Fenômeno originado do diferencial de forças de atração e repulsão que ocorrem entre as moléculas de diferentes fases em suas superfícies de contato (Figura 4).

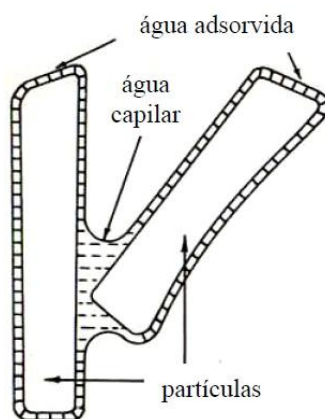


Figura 4: Combinação de capilaridade e adsorção produzindo sucção matricial em solo não saturado (Hillel, 1971).

Existem vários tipos de adsorções. Hillel (1971) cita adsorções químicas e físicas como principais. A adsorção da água é geralmente de natureza eletrostática. Esse mecanismo causa fortes retenções de água em argilas sob altas sucções. A água adsorvida pode possuir diferentes propriedades de resistência e viscosidade daquelas comuns em fase líquida à mesma temperatura.

2.5 Curvas de Retenção

A curva de retenção da água no solo, ou simplesmente curva de retenção, é a representação gráfica da relação entre a umidade dos solos (gravimétrica ou volumétrica) e a sucção (correspondente potencial mátrico) do solo.

2.5.1 Forma e Obtenção da Curva de Retenção

A curva de retenção possui, na maioria dos casos, o formato de um “S”. A Figura 5 mostra a configuração de uma curva de retenção e seus estágios (curva de secagem). O primeiro estágio identificável da curva de retenção é a zona de limite de entrada de ar, a qual inicia com um valor de sucção próximo a zero e vai até a sucção correspondente ao valor da entrada de ar. Este valor representa a sucção no qual o ar começa a entrar no poro maior do solo. Neste estágio, os poros se encontram preenchidos por água. Um segundo estágio é a zona de transição onde o solo começa a reduzir a saturação e a sucção aumenta significativamente com o decréscimo da umidade. Este estágio inicia no valor de entrada de ar e termina no valor de sucção correspondente ao ponto de saturação residual. O último estágio é a zona de saturação residual que inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, ou seja, quando o teor de umidade chega próximo de zero (Marinho, 2005).

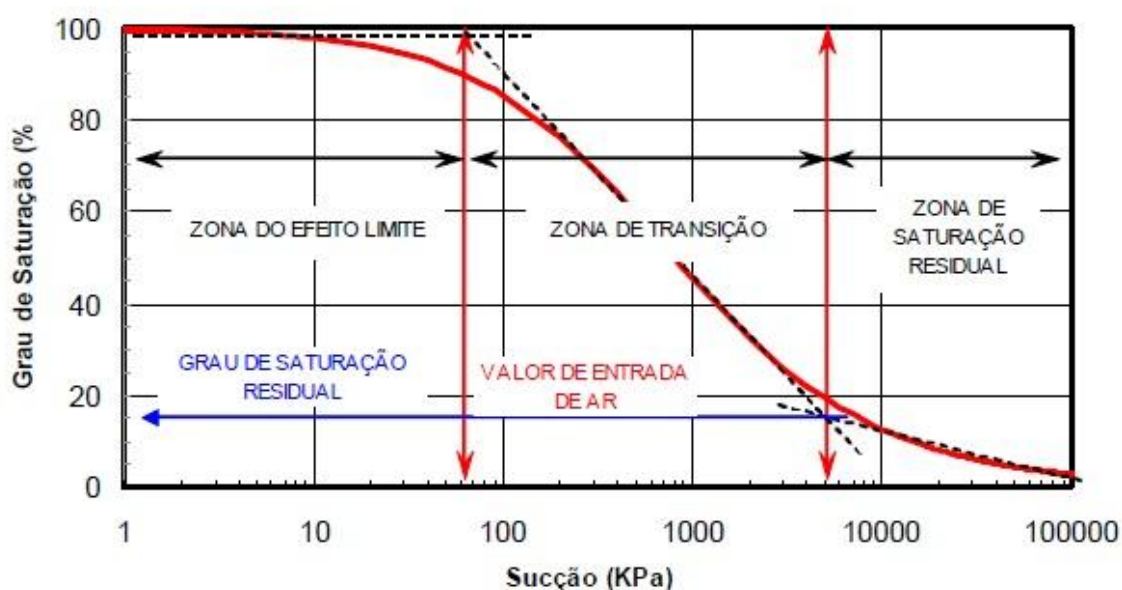


Figura 5: Curva de retenção (secagem) típica com os estágios de transição (Marinho, 2005).

A curva de retenção solo água depende da trajetória seguida durante o ensaio a partir de um teor de umidade inicial do solo, ou seja, secagem ou umedecimento. No processo de drenagem ou, secagem, aplicam-se gradualmente sucções maiores a uma amostra inicialmente saturada, fazendo medidas sucessivas de sucção em função da umidade volumétrica (Θ). No processo por umedecimento ou molhamento toma-se uma amostra inicialmente seca ao ar e permitindo seu umedecimento gradual por redução de tensão. Para o processo a partir de um teor de umidade do solo, pode-se aplicar tanto um processo de umedecimento quanto de secagem. A curva de secagem e a curva de umedecimento formam os limites externos para a curva de retenção de um dado solo. Entre os limites externos, existem infinitas curvas que representam a relação umidade sucção do solo. Reichardt (1985) alerta que cada método fornece uma curva contínua, mas diferentes. Assim, relação entre a sucção matricial e a umidade não é unívoca, fenômeno denominado de histerese. A determinação da curva de retenção é difícil devido ao tempo que se consome nas medições e pela intrínseca modificação dos pontos da curva devido à histerese (Figura 6).

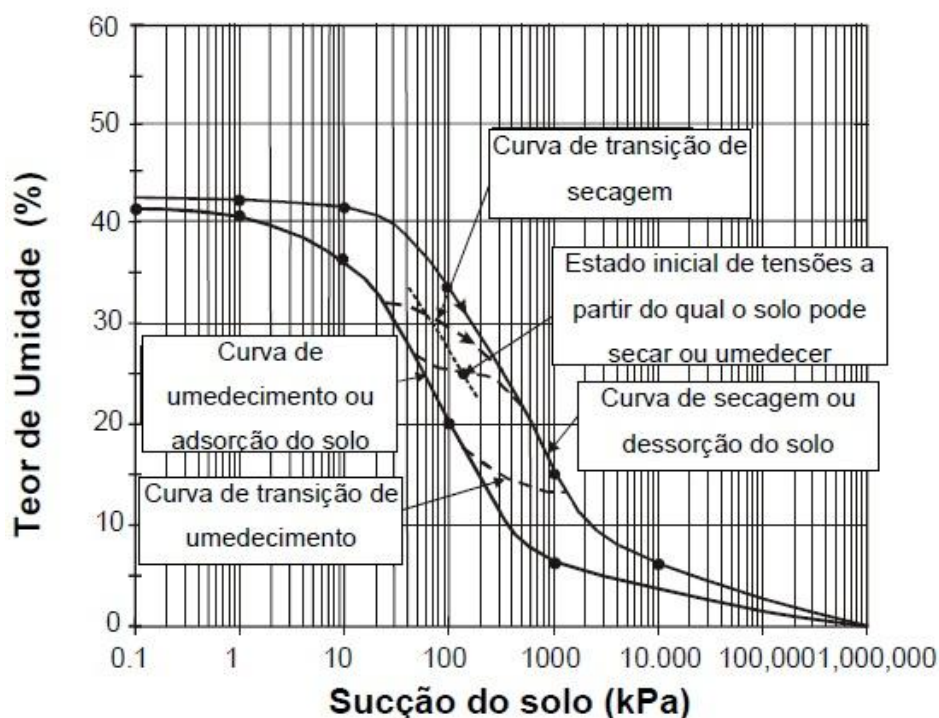


Figura 6: Descrição das curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo (Fredlund, 2002).

O fenômeno da histerese acontece por diferentes fatores como, por exemplo, a geometria não uniforme dos poros intercomunicados por pequenas passagens, o efeito do ângulo de contato que varia em função da trajetória seguida e a ocorrência do ar ocluído (bolhas de ar descontínuas).

Materiais porosos rígidos, com distribuição uniforme de poros possuem uma curva de retenção similar à curva (a) indicada na Figura 7. A perda total de água com o aumento da sucção além do ponto de desaturação (ou ponto de entrada de ar) não acontece. Mesmo em materiais porosos com uma distribuição uniforme de poros, certa quantidade de água permanece presente no material devido a fenômenos de superfície. Desta forma, uma melhor representação da forma da curva de retenção de um material com um único tamanho de poro deve ser aquela indicada pela curva (b) na Figura 7. Depois da entrada de ar, certa quantidade de água permanece no material e uma energia maior é necessária para removê-la. A curva (c) da Figura 7 representa um material com dois tamanhos de poros. Cada um dos tamanhos está associado a um valor de sucção por meio do modelo capilar. Um

material com um grande número de tamanho de poros deve apresentar uma redução mais gradual do teor de umidade com o aumento da sucção. A curva (d) representa este material. Aplicando o modelo capilar pode-se inferir os tamanhos de poro equivalente para o material (i.e. 0.0146mm a 0.0000146mm) (Marinho, 2000).

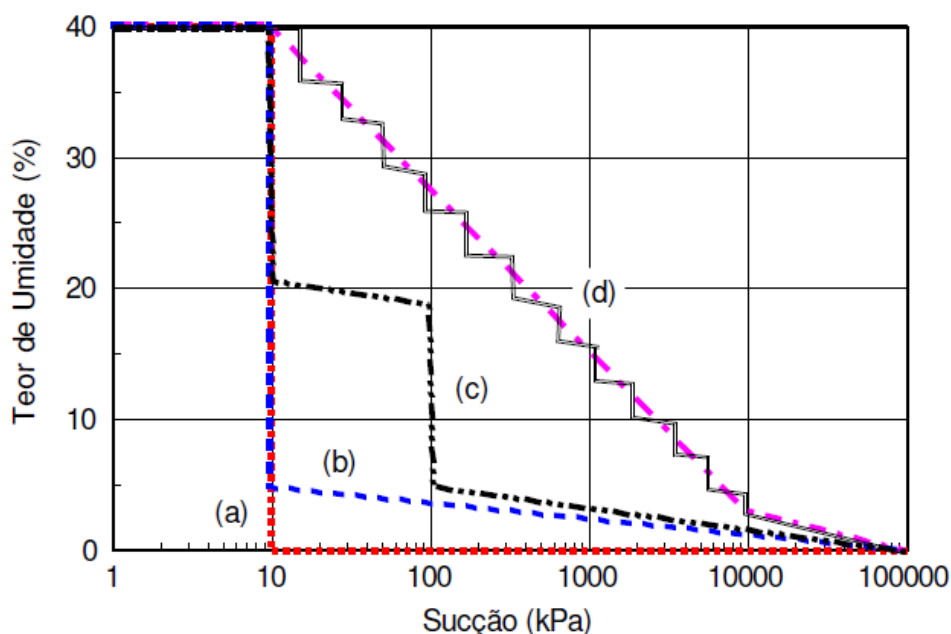


Figura 7: Forma geral da curva de retenção de acordo com a distribuição dos poros. Em (a) para materiais porosos de distribuição uniforme dos poros, em (b) melhor representação para materiais com um único tamanho de poros, em (c) para materiais com dois tamanhos de poros, em (d) para materiais bem graduado (Marinho, 2005).

O valor da entrada de ar na curva de retenção (ψ_a) pode ser relacionado com o diâmetro dos poros. Assim:

$$\psi_a = \frac{4T}{D_{\max}} \quad (3)$$

onde T é tensão de superfície e D_{\max} é o maior diâmetro dos poros (Côte et al., 2002). A distribuição dos diâmetros dos poros está relacionada com a distribuição granulométrica dos grãos do solo e com a condição de compactação do solo (Watabe et al., 2000).

2.6 Fatores que influenciam a curva de retenção

A forma da curva de retenção depende da distribuição granulométrica, da forma, do arranjo e mineralogia das partículas do solo, dos valores da umidade e índice de vazios iniciais (Vanapalli et al.1999, Kawai et al. 2000, Zhou e Yu, 2005), da energia de compactação (Marinho e Stuermer, 2000, Miller et al. 2002), da temperatura do solo (Duarte et al., 2004) e da composição e concentração da fase líquida nos solos argilosos ativos. Assim, amostras de um solo particular, apesar de terem a mesma textura e mineralogia, podem ter diferentes curvas de retenção. Além disto, existe o erro experimental na determinação das curvas de retenção de um solo. Zapata et al. (2000) mostram que o operador e o intervalo de sucção medido produzem significativa variabilidade na curva de retenção medida.

A maioria das curvas de retenção, como já comentado, possui a forma de um “S”. Essa forma é uma resposta à distribuição granulométrica de poros do material (Marinho, 2005). Fredlund et al. (1997) propõem a previsão da curva de retenção a partir da distribuição granulométrica e propriedades massa volume. No entanto, esta previsão mostrou-se eficiente somente para solos arenosos e razoavelmente eficiente para solos siltosos. Para solos argilosos tornou-se mais difícil a previsão embora o algoritmo desenvolvido tivesse previsão razoável. Para solos finos, Vanapalli et al. (2002) descrevem que a estrutura do solo e a história de tensões apresentam a maior influência no comportamento da curva de retenção solo água. Em solos não coesivos, a granulometria exerce uma maior influência no formato da curva de retenção solo água. Zhou e Yu (2005) mostram que a história de tensão e a umidade inicial são os fatores que tem maior influência na curva de retenção de um solo, entretanto, a influência destes fatores tende a reduzir para altos valores de sucção. Os fatores de influência como *tipo de solo, umidade inicial de moldagem e história de tensões*, são discutidos a seguir.

2.6.1 Tipo de solo

O tipo de solo influencia no valor de entrada de ar e na inclinação da curva de retenção (Figura 8). Os solos argilosos possuem uma maior capacidade de

retenção de água em relação aos solos arenosos. Quanto maior a plasticidade das argilas, maior será o valor de entrada de ar e de sucção residual (Fredlund, 1998). Solos arenosos por apresentarem grandes poros interconectados em sua estrutura, apresentam pequena capacidade de retenção de água. Assim, a entrada de ar ocorre para pequenos valores de sucção. Os solos siltosos, por sua vez, apresentam comportamento intermediário entre os solos arenosos e argilosos.

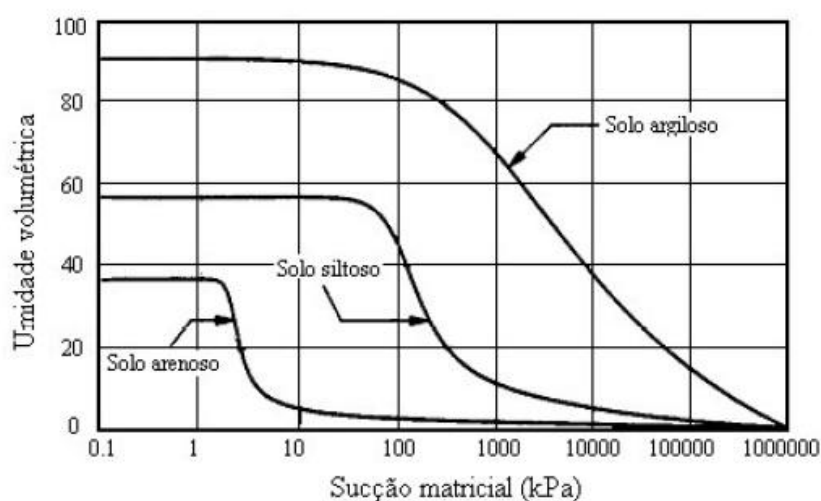


Figura 8: Representação esquemática da curva de retenção para diferentes tipos de solo (Vanapalli, 1994).

Não existem muitos estudos que apresentam as curvas de retenção de misturas de solos grossos e finos. Yuan e Ding (2011) mostram que se o teor de pedregulho é menor ou igual a 50%, a curva de retenção de uma mistura de argila e pedregulho é definida pela argila pura, uma vez que os vazios entre os pedregulhos são ocupados pela argila. E neste caso, a argila pode ser usada para determinar a curva de retenção da mistura. O valor da entrada de ar da curva de retenção de um solo depende da distribuição granulométrica do solo. Quando o solo tem alta proporção de finos o tamanho dos poros entre as partículas é menor e o valor de entrada de ar é maior. Yang et al. (2004) mostram que as formas das curvas de retenção para solos arenosos são semelhantes à distribuições granulométrica dos solos e são dependentes do valor da densidade seca do solo. Um solo de textura grossa tem um menor valor de entrada de ar e menor valor de sucção residual. Quando o D_{10} , tamanho de grão efetivo do solo, é pequeno, na faixa de 3-6 mm, a

sucção residual e o valor da entrada de ar tendem a aproximar do mesmo valor (zero). Curvas de retenção solo-água de solos uniformes são mais íngremes e possuem menos histerese total do que aqueles de solos menos uniformes.

2.6.2 Umidade inicial de moldagem

Vanapalli et al. (1999) realizaram ensaios para a obtenção da curva de retenção de um solo argilo arenoso em três condições de moldagem: amostra moldada no lado seco, no lado úmido e na umidade ótima da curva de compactação (Figura 9). Para a amostra com maior umidade, a capacidade de retenção de água e resistência a dessaturação são maiores. A compactação no lado úmido faz com que este solo apresente estrutura mais homogênea (Oliveira, 2004). As amostras moldadas no lado seco possuem poros interconectados e dessa forma, a dessaturação inicial é controlada pela macroestrutura. Para as amostras moldadas na umidade ótima, a curva de retenção apresenta características intermediárias entre às duas condições de moldagens anteriores (Oliveira, 2004). Vanapalli et al. (1999) afirmam que essas conclusões são válidas para solos finos, mas necessitam de trabalhos para solos de diferentes origens.

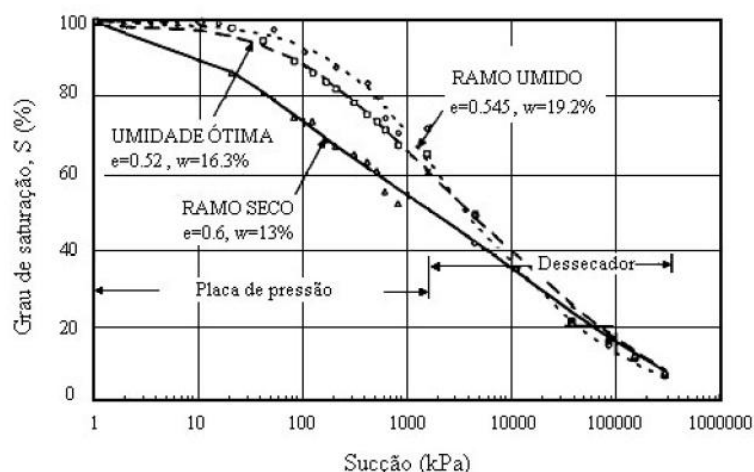


Figura 9: Curvas de retenção obtidas de amostras compactadas com diferentes umidades (Vanapalli et al., 1999).

2.6.3 História de tensões

Vanapalli et al. (1999) propõem diferentes curvas de retenção solo água para corpos de provas moldados no lado seco, úmido e na umidade ótima da curva de compactação e submetidos a diferentes pressões de confinamento. Observa-se na Figura 10 que para as curvas de retenção para solos moldados no lado seco, ocorre um aumento da sucção de entrada de ar com o aumento da pressão de confinamento.

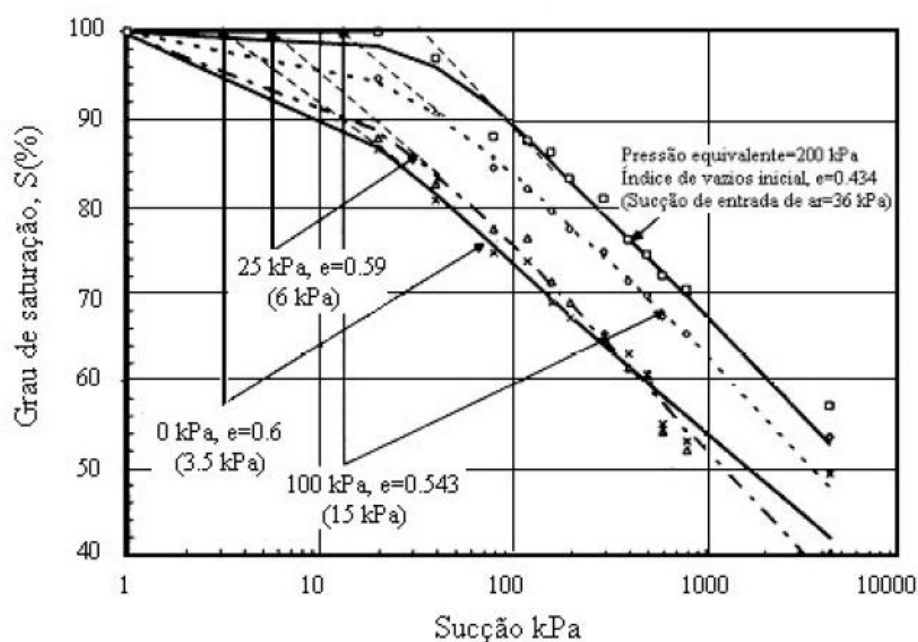


Figura 10: Variação do valor de sucção referente à entrada de ar para um solo argiloso compactado no lado seco e submetido a diferentes pressões de confinamento (Vanapalli et al., 1999).

Para a moldagem dos corpos de prova no lado úmido (Figura 11), os procedimentos para simular diferentes pressões de confinamento nos corpos de prova, não interferem no formato da curva de retenção (Oliveira, 2004). A dessaturação do corpo de prova é governada pelos microporos para todos os níveis de sucção (Vanapalli et al., 1999). As amostras moldadas na umidade ótima apresentam comportamento intermediário em relação às amostras moldadas no lado seco e úmido (Oliveira, 2004).

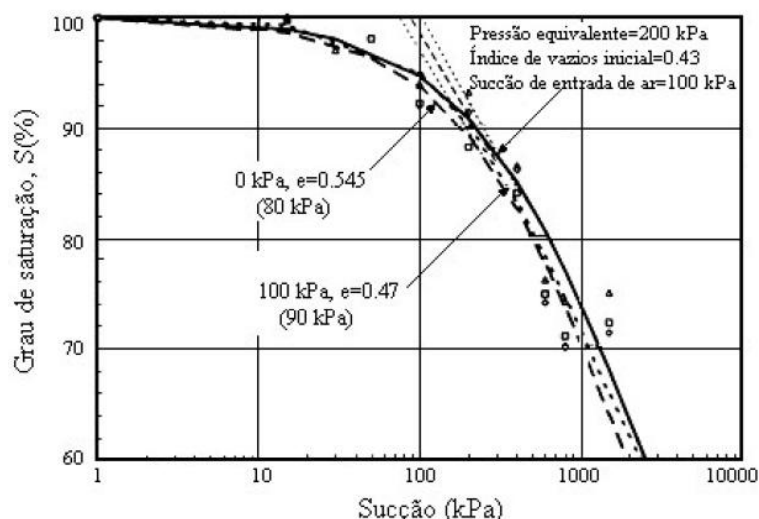


Figura 11: Variação do valor da sucção referente à entrada de ar para um solo argiloso compactado no lado úmido e submetido a diferentes pressões de confinamento (Vanapalli et al., 1999).

Segundo Zhou e Yu (2005) a umidade inicial tem influência considerável na forma de curvas de retenção. Quanto maior for o teor de água, mais inclinada a curva. O valor da entrada de ar também aumenta com o teor de água inicial. A resistência à dessaturação é relativamente baixa para solos moldados à seco em comparação com ideal e solo moldados do lado úmido. Assim, para solos de alto teor de água inicial, o efeito da dessaturação é mais evidente, especialmente a valores de sucção baixas. Masce et al. (2002) entretanto, mostraram que para a gama limitada de conteúdos de água analisados em solos com teor de areia, silte e argila, obtidos a partir de três aterros ao sul de Michigan, EUA, não houve relação significativa ou sistemática entre teor de água e compactação no comportamento da curva de retenção. Além disso, não houve diferença significativa entre o comportamento da curva de retenção do campo compactada e as amostras laboratoriais compactadas.

2.7 Equações matemáticas

A curva de retenção tem sido utilizada para estimar as propriedades mecânicas e hidráulicas de solos não saturados assim, é mais útil que a curva de

retenção seja expressa na forma de uma equação. Várias equações (Tabela 2) têm sido propostas para estimar a curva de retenção para diferentes tipos de solos (Leong e Rahardjo, 1997).

Tabela 2: Proposições para estimar a curva de retenção solo – água.

Referência	Equação	Descrição parâmetros
Brooks e Corey (1964)	$S_e = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_b}{u_a - u_w} \right\}^\lambda$ $S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r}$	S_e = grau de saturação efetivo $(u_a - u_w)_b$ = valor de entrada de ar λ = índice de distribuição dos tamanhos dos poros
Fredlund e Xing (1994)	$\theta_w = \theta_s \cdot C(u) \cdot \left[\frac{1}{\ln(e + (u/a)^{n_v})} \right]^m$ $C(u) = 1 - \left[\frac{\ln(1 + u/u_r)}{\ln(1 + 10^6/u_r)} \right]$	$\theta_w, \theta_s, \theta_r$ = Teores de umidade volumétrica, saturação e residual. u = Sucção para qual se deseja obter a umidade u_r = sucção correspondente à umidade volumétrica residual, kPa $C(u)$ = Fator de correção α, m, n_v = parâmetros de ajuste e = número natural = 2,71828 10^6 = valor de sucção para qualquer tipo de solo.
van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (ah)^{n_v} \right]^m}$	θ_s = a umidade volumétrica na saturação, ou seja a porosidade do solo θ_r = umidade volumétrica residual; h igual a carga de pressão (sucção); α, n_v, m = parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, $m = 1 - 1/n_v$
Gardner (1958)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right]}$	θ_r = umidade volumétrica residual a, b = parâmetro de ajuste

Fredlund et al.(2011) separam as equações em três categorias dependendo do intervalo de sucção no solo. A figura 12 apresenta as duas categorias estudadas neste trabalho. Abaixo do valor de entrada de ar, algumas equações propostas possuem uma linha horizontal, o que indica que o solo não possui condição de

armazenamento de água. Consequentemente, curvas de retenção desta equações que definem o valor de armazenamento de água precisa ser interceptados antes que se torne demasiado próximo de zero (ou excessivamente pequeno). Uma condição similar é encontrado em grandes sucções “sucção residual”, em que a equação proposta pode mais uma vez, tornar-se assintota a uma linha horizontal. Resultados experimentais têm mostrado uma razoavel relação (semi-log) entre a sucção residual e o caso onde o solo encontra-se completamente seco (isto é, 1 000 000 kPa e zero teor de água). Esta condição foi incorporada na equação proposta por Fredlund e Xing (1994).

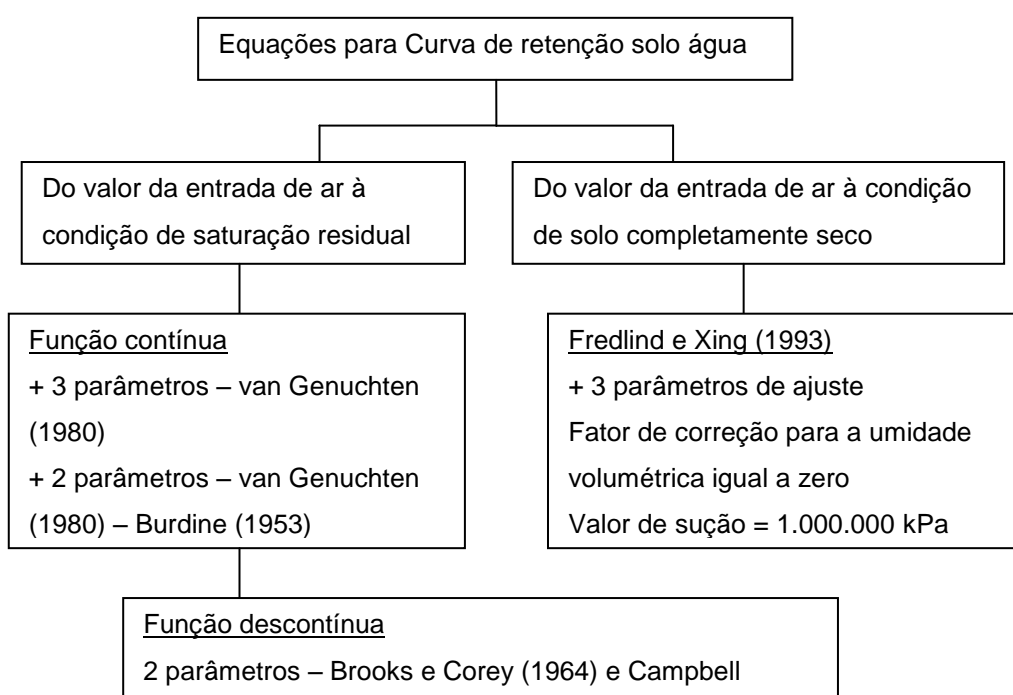


Figura 12: Categorização das equações de curva de retenção baseado na gama de condições de sucção do solo que são razoavelmente bem definidos por cada um dos equações empíricas (adaptado Fredlund et al., 2011).

No entanto, Nimmo (1991) observa que as equações para as curvas de retenção são bem-sucedidas para altose médios teores de água, mas muitas vezes dão maus resultados em teores de água baixos. Um outro problema relacionado com estas funções é de não permitir que o conteúdo de água igual a zero, suposição fisicamente irreal (Nimmo, 1991), ou permitir que ele seja zero apenas a sucção infinito (Bicalho et al, 2013). Além disso, essas funções são em grande parte

empírica e desconectado de propriedades do solo básicos, como a geometria dos poros e adsorção (Hillel, 1980).

A seguir apresenta-se e discutem-se as três equações mais utilizadas na literatura: Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994).

2.7.1 Equação de Brooks e Corey (1964)

A equação de Brooks e Corey (1964) necessita de três parâmetros do solo: o ponto de entrada de ar do solo $(u_a - u_w)_b$, o grau de saturação residual (S_r) e o índice de distribuição de tamanho dos poros do solo (λ). O S_r obtido empiricamente é definido como o grau de saturação no qual um aumento na sucção matricial não provoca mudança significativa no grau de saturação. Os outros dois parâmetros podem ser visualizados, se a condição de saturação for expressa em termos de grau de saturação efetivo (S_e), que é definido como:

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (4)$$

O modelo de Brooks e Corey (1964) proposto para definir a relação entre o grau de saturação efetivo e a sucção matricial, pode ser expresso por:

$$S_e = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_b}{u_a - u_w} \right\}^\lambda \text{ para } (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b \quad (5)$$

$$S_e = 1 \text{ para } (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b$$

Diferentemente das equações apresentadas por Fredlund e Xing (1994), van Genuchten (1980), a equação de Brooks e Corey (1964) não apresenta uma curva no formato sigmodal (Leong e Rahardljo, 1997).

2.7.2 Equações de Fredlund e Xing (1994)

A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) para estimar a curva de retenção é:

$$\theta_w = \theta_s \cdot C(u) \cdot \left[\frac{1}{\ln(e + (u/a)^{n_v})} \right]^m \quad (6)$$

Onde:

$$C(u) = 1 - \left[\frac{\ln(1 + u/u_r)}{\ln(1 + 10^6/u_r)} \right]$$

$\theta_w, \theta_s, \theta_r$ = Respectivamente, teores de umidade volumétrica a uma dada sucção (u), de saturação e residual.

u = Sucção para qual se deseja obter a umidade

u_r = sucção correspondente à umidade volumétrica residual, kPa

$C(u)$ = Fator de correção

α, m, n_v = parâmetros de ajuste

$[\alpha]$ em kPa

e = número natural = 2,71828

10^6 = valor de sucção para qualquer tipo de solo segundo Fredlund e Xing (1997), kPa.

A equação (6) é baseada na hipótese da curva de retenção depender da distribuição dos poros e considera ainda, que os meniscos formados possuem formato esférico, que se justifica assumindo poros de seção circular e os canais que interligam os mesmos são cilíndricos e dispostos de forma aleatória (Oliveira, 2004).

As influências dos parâmetros α , n_v e m na equação 6 proposta por Fredlund e Xing (1994) são apresentadas na figura 13a, 13b e 13c respectivamente. Assim como na equação de van Genuchten (1980), a influência do parâmetro α quando se mantém n_v e m fixos está diretamente relacionado com o valor da pressão de entrada de ar. Geralmente, de acordo com Fredlund e Xing (1994), o valor de α pode ser maior do que a pressão de entrada de ar, contudo, para valores pequenos de m ,

α pode ser igual a esta pressão. O parâmetro α não altera a forma da curva, mas a posição da curva em direção à região de maiores ou menores valores de sucção. O parâmetro n_v controla a inclinação da Curva de retenção e o parâmetro m controla a inflexão da parte inferior da curva de retenção e o patamar mínimo da mesma (van Genuchten 1980). O parâmetro n_v é relacionado com a distribuição granulométrica, tal que quanto mais uniforme for o solo maior o valor de n_v .

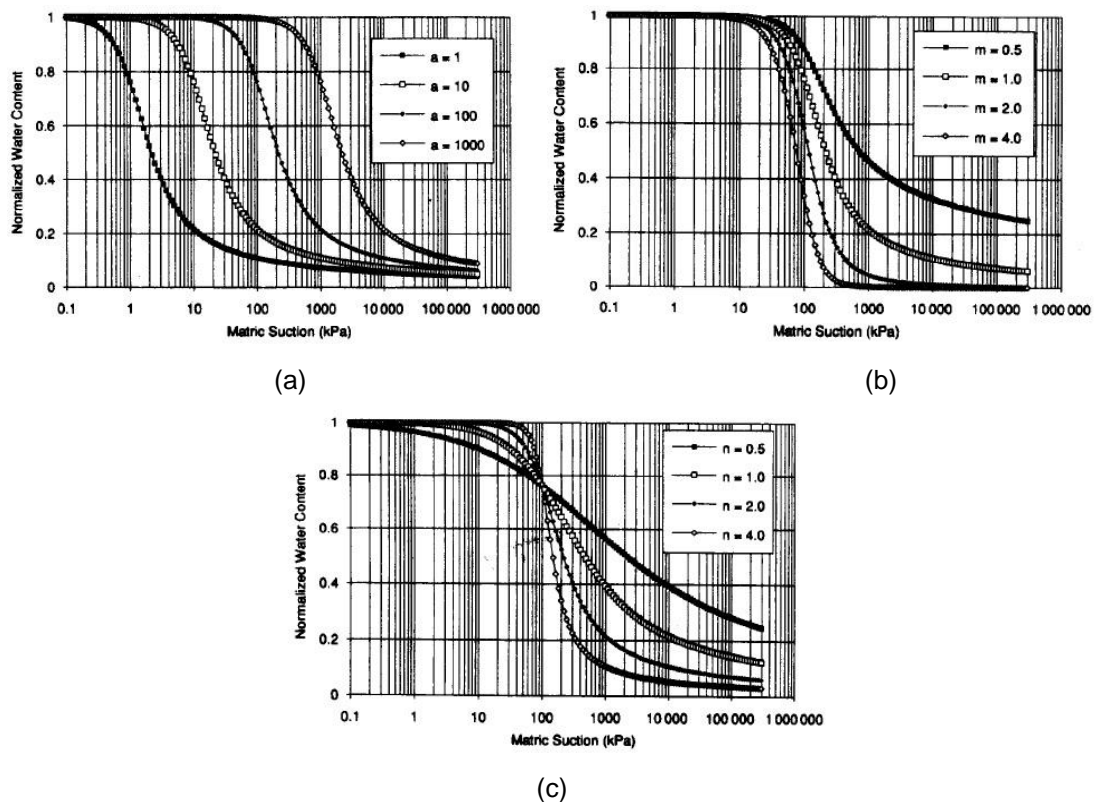


Figura 13: Influência dos parâmetros matemáticos na equação de Fredlund e Xing (1994). Em (a) temos a variação de a , com $n=2$ e $m=1$. Em (b) variação de m , com $a=100$ e $n=2$ e em (c) variação de n , com $a=100$ e $m=1$ (Fredlund e Xing, 1994).

Fredlund e Xing (1994) destacam que pequenos valores de m resultam em uma inclinação moderada nos maiores valores de sucção, e valores de n produzem uma curva mais acentuada próxima à pressão de entrada de ar.

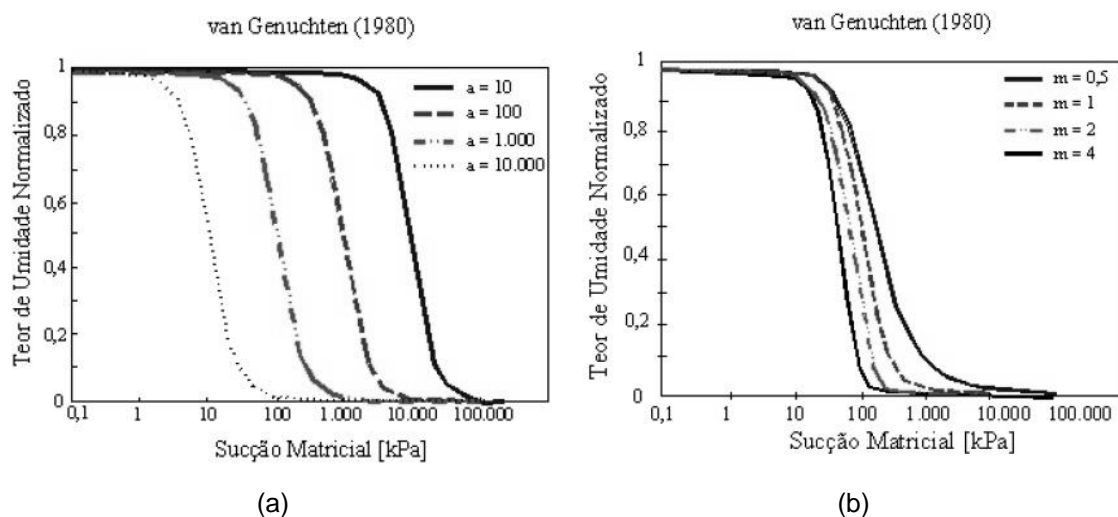
2.7.3 Equação de van Genuchten (1980)

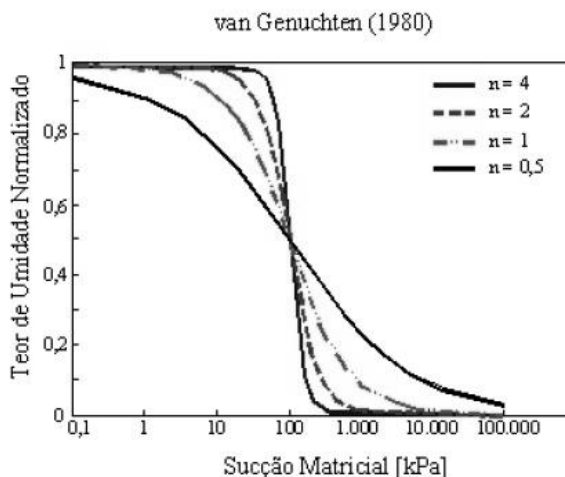
A expressão proposta por van Genuchten (1980) para estimar a curva de retenção é definida como:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^{n_v}\right]^m} \quad (7)$$

onde θ é a umidade volumétrica; θ_s é a umidade volumétrica na saturação, ou seja, a porosidade do solo; θ_r igual a umidade volumétrica residual; h igual a carga de pressão (sucção); α ; n_v ; m são os parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, tal que: $m = 1 - 1/n_v$ (Mualem, 1976). Assim, a equação (7) possui quatro variáveis independentes: θ_s , θ_r , α , n_v . Maior flexibilidade e precisão podem ser obtidas deixando os parâmetros n_v e m independentes sem uma correlação fixa (Fredlund e Xing 1994).

A influência dos parâmetros α , n_v e m na equação (7) de van Genuchten (1980) são apresentadas nas Figura 14a, 14b e 14c respectivamente. A influência dos parâmetros da equação de van Genuchten é semelhante aos parâmetros da equação de Fredlund e Xing (1994). O parâmetro α quando se mantém n_v e m fixos, está inversamente relacionado com o valor da Pressão de Entrada de ar. O parâmetro α não altera a forma da curva, mas a posição da curva em direção à região de maiores ou menores valores de sucção.





(c)

Figura 14: Influência dos parâmetros matemáticos na equação de van Genuchten (1980). Em (a) temos a variação de a (α), com $n = 2$ e $m = 1$. Em (b) variação de m , com $a = 100$ e $n = 2$ e (c) variação de n (n_v), com $a = 100$ e $m = 1$ (Silva, 2005).

O parâmetro n_v controla a inclinação da Curva de retenção e o parâmetro “ m ” controla a inflexão da parte inferior da curva de retenção e o patamar mínimo da mesma (van Genuchten 1980). O parâmetro n_v é relacionado com a distribuição granulométrica, tal que quanto mais uniforme for o solo maior o valor de n_v .

A equação proposta por van Genuchten (1980) é muito utilizada para estimar a curva de retenção de diferentes solos, e várias publicações sugerem valores dos parâmetros da equação proposta por van Genuchten (1980) dentre elas as apresentadas por Gerscovich e Sayão (2002), Hodnette e Tomasella (2002), Wosten et al. (1999) e do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) serão destacadas por serem utilizadas neste trabalho.

A tabela 3 apresenta os valores máximos e mínimos obtidos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) para cada parâmetro independente da equação estudada. O banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e as tabelas acima citadas estão detalhados no capítulo 3, Apresentação do Banco de dados, uma vez que, nesta etapa destaca-se somente os valores dos parâmetros disponíveis na literatura.

Tabela 3: Valores máximos e mínimos obtidos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001) para os parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980).

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo	Valor Mínimo
θ_r	cm ³ /cm ³	0,30	0,00
θ_s	cm ³ /cm ³	0,82	0,25
α	(1/cm)	1,00	0,00
n_v	adimensional	10,00	1,01

Wosten et al. (1999) analisou o banco de dados HYPRES de toda a Europa e obteve (tabela 4), utilizando a equação de van Genuchten e funções PTFs, os parâmetros de ajuste médios.

Tabela 4: Parâmetros de van Genuchten sugeridos por Wosten et al. (1999)

Classificação textural	θ_r	θ_s	α	n_v	m
Solos superficiais					
Grossa	0,0250	0,4030	0,0383	1,3774	0,2740
Média	0,0100	0,4390	0,0314	1,1804	0,1528
Média fina	0,0100	0,4300	0,0083	1,2539	0,2025
Fina	0,0100	0,5200	0,0367	1,1012	0,0919
Muito Fina	0,0100	0,6140	0,0265	1,1033	0,0936
Subsolos					
Grossa	0,0250	0,3660	0,0430	1,5206	0,3424
Média	0,0100	0,3920	0,0249	1,1689	0,1445
Média fina	0,0100	0,4120	0,0082	1,2179	0,1789
Fina	0,0100	0,4810	0,0198	1,0861	0,0793
Muito Fina	0,0100	0,5380	0,0168	1,0730	0,0680

Hodnett e Tomasella (2002) sugerem valores médios dos parâmetros propostos por van Genuchten (1980), θ_s , θ_r , α , n_v , para diferentes solos tropicais e compara esses valores com os parâmetros publicados para solos de região de clima temperado (Tabela 5). Os valores dos parâmetros referentes à coluna “tropical” foram obtidos do banco de dados IGBP-DIS a partir de uma função PTF. Os valores referentes à coluna “Temp.” foram obtidos do banco de dados CeP. Eles observaram diferenças significativas entre os parâmetros de solo tropicais e temperados, alertam sobre a importância de se usar corretamente as funções PTFs e os parâmetros sugeridos na literatura e questionam a forma de como os bancos de dados devem

ser representados, uma vez que, muitos são extremamente bem representados e outros não.

Tabela 5: Valores de Θ_s , Θ_r , α , n_v para solos tropicais e temperados (Hodnett e Tomasella, 2002).

Classe textural	α (kPa ⁻¹)		n_v		Θ_s (m ³ m ⁻³)		Θ_r (m ³ m ⁻³)	
	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.
Areia	0,380	1,450	2,391	2,681	0,426	0,430	0,034	0,045
Lemo arenoso	0,670	1,240	1,889	2,278	0,448	0,410	0,072	0,057
Areia lemosa	0,420	0,750	1,588	1,890	0,461	0,410	0,099	0,065
Lemo	0,330	0,360	1,446	1,560	0,531	0,430	0,163	0,078
Silte lemoso	0,170	0,200	1,556	1,410	0,578	0,450	0,198	0,067
Areia lemo argilosa	0,570	0,590	1,489	1,479	0,418	0,390	0,148	0,100
Argila lemosa	0,510	0,190	1,428	1,311	0,495	0,410	0,227	0,095
Silte lemo argiloso	0,270	0,100	1,466	1,230	0,579	0,430	0,243	0,089
Silte argiloso	0,300	0,050	1,481	1,091	0,578	0,360	0,269	0,070
Areia argilosa	0,500	0,270	1,388	1,230	0,439	0,380	0,201	0,100
Argila	0,460	0,080	1,461	1,091	0,545	0,380	0,270	0,068

Gerscovich e Sayão (2002) apresentam solos brasileiros com suas propriedades (Tabela 6) e os parâmetros da equação de van Genuchten (Tabela7).

Tabela 6: Descrição dos locais dos solos e caracterização das amostras (Gerscovich e Sayão, 2002).

Teste #	Solo	Local	ω_{nat}	γ_t	e	argila (%)	Silt (%)	Areia (%)
1	Residual	Vista Chinesa, Rj	18,90	14,54	1,24	8,11	11,30	65,60
2	Residual	Querosene, Rj	5,30	14,75	0,94	10,00	15,00	75,00
3	Residual	Lagoa, Rj	28,90	14,00	1,19	9,50	27,50	63,00
4	Residual	Salvador, BA	28,90	16,02	1,10	22,00	17,00	61,00
5	Residual	São Carlos, SP	16,70	19,20	0,65	17,40	13,70	68,90
6	Residual	Porto Alegre, RS	17,20	17,00	0,84	14,00	19,00	64,00
7	Coluvial	Vista Chinesa, Rj	19,20	14,90	1,18	41,20	4,50	50,50
8	Coluvial	Querosene, Rj	28,70	14,51	1,43	59,00	8,00	33,00
9	Sedimentar	São Carlos, SP	14,20	15,60	0,98	27,30	11,90	60,80
10	Sedimentar	São Carlos, SP	16,40	17,40	0,84	27,40	5,90	66,70
11	Sedimentar	Brasilia, DF	17,50	12,94	1,47	14,30	44,60	41,10

Os solos residuais são predominantemente arenosos enquanto os coluviais possuem grandes porcentagens de argilas devido aos processos de intemperismo. Os solos sedimentares da região de São Carlos foram obtidos de duas diferentes

profundidades (3m teste #9 e 5m teste #10). No mesmo local, solo residual foi investigado (8m teste #5) (Gerscovich e Sayão, 2002).

Tabela 7: Parâmetros da curva de retenção (θ_s , θ_r , α , n_v), porosidade do solo (n), número de dados experimentais (N) (Gerscovich e Sayão, 2002).

teste #	N	n (%)	θ_s (%)	θ_r (%)	α	n_v	m
1	6,00	55,00	52,00	10,00	0,86	1,50	0,29
2	7,00	48,00	44,00	7,00	0,68	1,45	0,33
3	5,00	54,00	49,00	7,00	0,06	1,80	0,70
4	5,00	52,00	52,00	20,00	0,46	1,20	0,13
5	16,00	39,00	39,00	15,00	0,53	1,36	0,32
6	9,00	46,00	41,00	15,00	1,00	1,20	0,25
7	8,00	54,00	54,00	15,00	1,80	1,60	0,38
8	8,00	59,00	59,00	20,00	1,50	1,70	0,28
9	16,00	50,00	47,00	15,00	1,30	1,40	0,40
10	16,00	46,00	43,00	18,00	0,60	1,60	0,32
11	7,00	59,50	45,00	18,00	0,45	0,60	0,38

Observa - se que os valores dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) apresentados na Tabela 3 (valores máximos e mínimos obtidos do banco de dados do programa Rosetta) possuem um intervalo de variação maior do que o observado nas outras Tabelas (4, 5, 7) propostas por Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002) respectivamente.

2.8 Permeabilidade X Condutividade hidráulica

Nós últimos anos tem-se utilizado o termo função de condutividade hidráulica para se referir à permeabilidade do solo em uma condição não saturada e o termo permeabilidade para se referir a condição de completa saturação (grau de saturação, S , igual a 100%), e esta terminologia será adotada neste trabalho.

Denomina-se de curva de condutividade hidráulica a representação gráfica da função que relaciona a condutividade hidráulica do solo não saturado com o seu correspondente conteúdo de água ou sucção. Desta forma, o termo permeabilidade

passa a representar uma condição particular na curva de condutividade hidráulica do solo.

O conhecimento da condutividade hidráulica é muito importante em países de clima tropical e imprescindível em estudos de estabilidade de encostas, taludes, barragens, aterros, fundações e deformação em solos não saturados, relacionados ao fluxo e retenção de umidade (Conciani et al.1997).

Em 1850 o engenheiro H. Darcy verificou experimentalmente que ao percolar água através de uma amostra de solo saturado com comprimento L e área A , a partir de dois reservatórios de nível constante sendo h a diferença entre ambos, a velocidade de percolação ($v = Q/A$) é proporcional ao gradiente hidráulico ($i = h/L$). Assim temos que:

$$v = k \times i \quad (8)$$

Onde k é chamado de coeficiente de permeabilidade ou permeabilidade.

A velocidade de percolação é inversamente proporcional à viscosidade e densidade do fluido. Quanto maior a viscosidade menor será a velocidade de percolação (equação 9). Resultados experimentais mostram que a velocidade de percolação também é altamente dependente do tamanho do poro e da distribuição dos poros. Segundo a lei de Poiseuille a velocidade é proporcional ao quadrado do diâmetro do poro (equações 9 e 10).

$$v \propto \frac{\rho g}{\mu} \quad (9)$$

$$v \propto d^2 \quad (10)$$

Ao relacionar as equações 9, 10, 11 tem-se:

$$v = Cd^2 \frac{\rho g}{\mu} \times i \quad (11)$$

Onde C é uma constante adimensional relacionada com a geometria dos poros. A parcela Cd^2 é chamada de permeabilidade intrínseca (K) do solo ou simplesmente permeabilidade. Assim, a relação entre condutividade hidráulica e a permeabilidade intrínseca é definida como:

$$k = K \frac{\rho g}{\mu} \quad [\text{m}^2] \quad (12)$$

A permeabilidade intrínseca depende apenas do tamanho, geometria e distribuição dos poros (Figura 15) e sua magnitude varia extraordinariamente de um solo para outro (Lu e Likos, 2004).

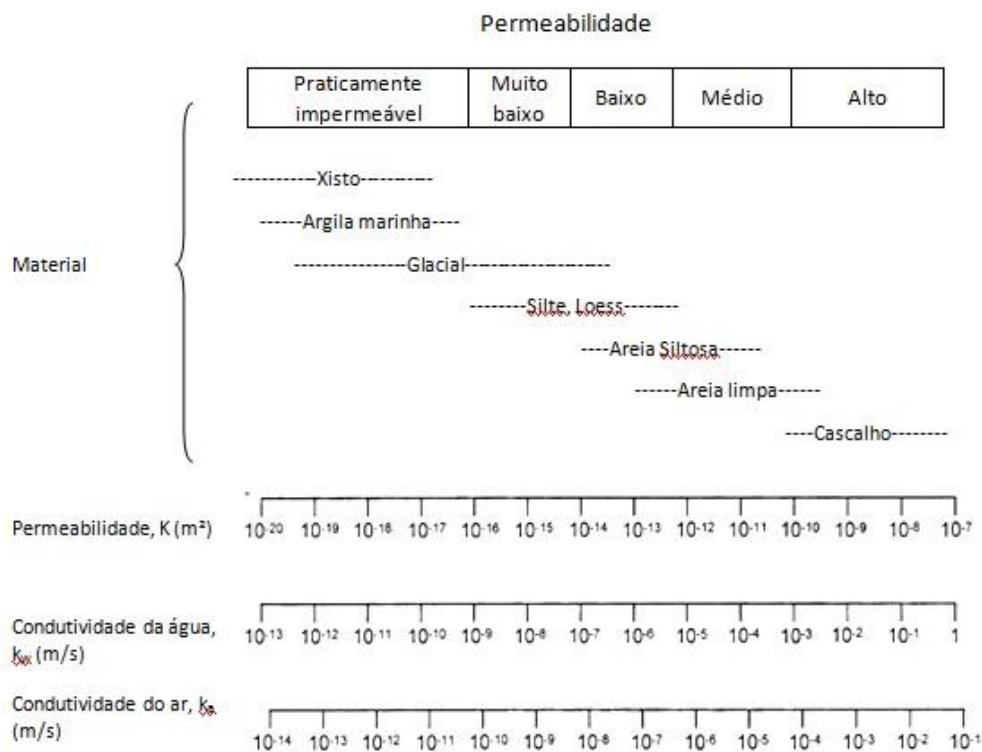


Figura 15: Permeabilidade intrínseca, condutividade hidráulica da água e condutividade do ar para vários tipos de solo (Lu e Likos, 2004).

A permeabilidade para solos saturados e a condutividade hidráulica para solos não saturados dependem de variáveis que descrevem a estrutura dos poros

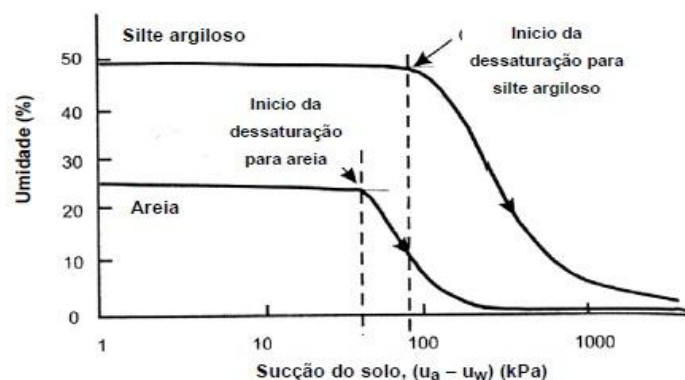
(por exemplo, índice de vazios e porosidade), as propriedades do fluido nos poros (por exemplo, densidade e viscosidade (ambas em função da temperatura)) (Masrouri et al., 2011). Para solos não saturados é importante também o efeito do grau de saturação e do histórico de saturação (Masrouri et al., 2011).

Da mesma forma que na curva de retenção, não existe um padrão definido para a apresentação da curva de condutividade hidráulica. Observa-se, entretanto, que a maioria das publicações analisadas neste trabalho apresenta a condutividade hidráulica do solo em termos de sucção matricial, grau de saturação ou conteúdo volumétrico de água (Lu e Likos, 2004). Seu valor decresce rapidamente com o decréscimo do teor de umidade volumétrica (θ) ou de carga de pressão (h), devido à diminuição da área útil para condução de água (Reichardt e Timm, 2004).

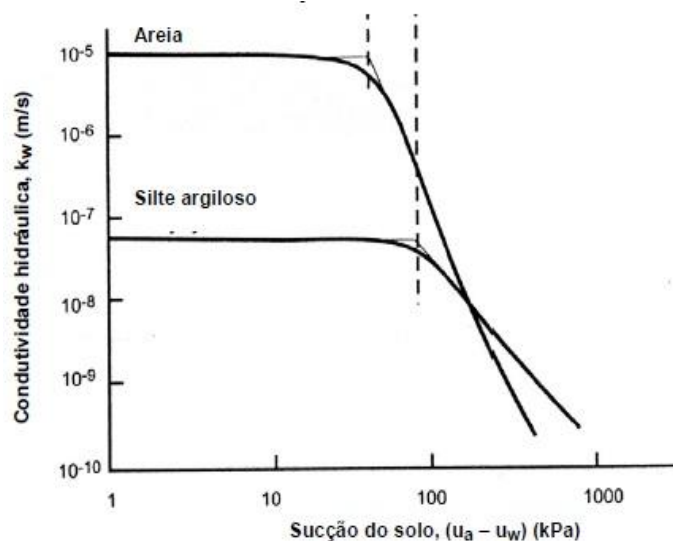
Ao contrário da curva de retenção, a curva de condutividade hidráulica, quando expressa em termos de umidade volumétrica ou grau de saturação, tem pequena histerese. Quando a curva de condutividade hidráulica é expressa em termos da sucção matricial, a histerese da curva de retenção é transmitida a esta (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada pode ser feita por meio de ensaios de campo, laboratório e por meio de métodos indiretos. A determinação realizada por ensaios de laboratório, em caso de solos não saturados colapsíveis, exige amostras indeformadas de boa qualidade, caso haja micro fissuras durante o processo de amostragem poderá falsear o resultado. Além disso, outra questão bastante discutida é o efeito escala que dificulta a extrapolação dos resultados (Conciani et al. 1997). A obtenção por ensaios de campo de acordo com Conciani et al. (1997), esbarram em dificuldades como, por exemplo, a definição das condições de contorno e medidas confiáveis do avanço da frente de infiltração da água no solo. É especialmente difícil também, em parte devido à sua variabilidade no solo e em parte porque a medição deste parâmetro é custosa e demorada. Assim, vários pesquisadores têm, por estes motivos, desenvolvido modelos para calcular a condutividade hidráulica não saturada a partir da curva de retenção (van Genuchten, 1980).

Fredlund et al. (1997) observaram que uma das razões para isso é que a condutividade hidráulica dos solos tem estreita relação com a curva de retenção (Figura 16). A condutividade hidráulica para os solos da Figura 16 permanece relativamente constante até o valor de entrada de ar (e neste caso o solo está saturado e a condutividade hidráulica é igual ao coeficiente de permeabilidade).



(a)



(b)

Figura 16: Esquema de funções de permeabilidade e curvas de retenção para areia e silte argiloso. (Fredlund et al., 1997). Em (a) curva de retenção para solo arenoso e silte argiloso em (b) a representação da condutibilidade hidráulica para os mesmos solos.

Após esse ponto, a condutividade hidráulica decresce rapidamente. Fredlund (2002) afirma que, para valores de sucção em torno do valor residual os dados na literatura são escassos para confirmar os valores da condutividade hidráulica dos solos não saturados.

A lei de Darcy, conforme apresentada na eq. 8, não descreve satisfatoriamente o fluxo em um meio não saturado. Isso porque o coeficiente de condutividade hidráulica não é mais uma constante e decresce com a redução do grau de saturação. Entretanto, se a condutividade hidráulica é uma função da saturação e do índice de vazios do solo, a lei de Darcy aplica-se também para o fluxo de água através do solo não saturados. Esta função depende se a saturação foi atingida por umedecimento ou secagem (Masrouri et al. 2011). Assumindo que k seja uma função do teor de umidade volumétrica (Θ), do grau de saturação (S) ou da sucção (Ψ), a lei de Darcy pode ser reescrita como:

$$v = k(\theta) \times i \quad (13)$$

onde $k(\theta)$ é uma função que representa a variação da condutividade com o teor de umidade volumétrica (função de condutividade hidráulica). A lei de Darcy foi generalizada para solos não saturados (Eq. 13) por Buckingham em 1907 e por isto quando aplicada a solos não saturados é chamada em várias publicações de equação de Darcy- Buckingham.

A figura 16b apresenta uma comparação entre as curvas de condutividade hidráulica de um solo arenoso e de um solo siltoso não saturados. Verifica-se que na condição de saturação completa, o solo arenoso possui condutividade hidráulica (K) superior ao solo siltoso na ordem de aproximadamente 10^3 vezes. No entanto, para valores de sucções maiores que a “pressão de entrada de ar” do solo, o valor de $K(S_e)$ do solo arenoso decresce rapidamente, invertendo essa situação. O decréscimo do tamanho dos grãos, conseqüentemente um solo com “canalículos mais finos”, suaviza a curva de retenção, garantindo a manutenção do fluxo por mais tempo durante o processo de drenagem, resultado direto da teoria de capilaridade discutida anteriormente. Esta disparidade interessante e fundamental da condutividade hidráulica influência tem grande aplicação no sistema de barreiras capilares.

Existem publicadas várias propostas para determinação da curva de condutividade hidráulica utilizando o coeficiente de permeabilidade (solo saturado) e a curva de retenção solo-água. A tabela 8 resume algumas proposições.

Tabela 8: Proposições para a modelagem da curva de condutividade hidráulica (Gerscovich e Guedes, 2002).

Modelo	Equação	Definição de Variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left(\frac{\psi}{\rho_w g} \right)^n}$	ψ = sucção; a e n = parâmetros de ajuste; ρ_w = densidade da água; g = aceleração gravitacional;
Brooks e Corey (1968)	$\begin{cases} k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^n \rightarrow \psi > \psi_b \\ k(\psi) = k_{sat} \rightarrow \psi \leq \psi_b \end{cases}$	ψ = sucção; ψ_b = sucção de entrada de ar; n = parâmetros de ajuste;
Arbhabhirama e Kridakorn (1968)	$k = \frac{k_{sat}}{\left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{n'} + 1}$	ψ = sucção; ψ_b = sucção de entrada de ar; n' = parâmetros de ajuste;
Davidson <i>et al.</i> (1969)	$k = k_{sat} e^{[\beta(\theta - \theta_s)]}$	θ_s = teor de umidade saturado; β = parâmetro de ajuste;
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2\beta+3}$	θ_s = teor de umidade saturado; β = parâmetro de ajuste;
Mualem (1976)	$\frac{k}{k_{sat}} = \frac{\left[1 - (\alpha\psi)^{m,n} (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m} \right]^2}{\left[1 + (\alpha\psi)^n \right]^{1/2}} \rightarrow \psi > 0$	ψ = sucção; m, n e α = parâmetros de ajuste;
Mualem e Dagan (1978)	$\frac{k}{k_{sat}} = S \frac{\left(\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi^{1+b}} \right)^2}{\left(\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi^{1+b}} \right)^2}$	ψ = sucção; θ = teor de umidade volumétrico; b = fator de tortuosidade;
Van Genuchten (1980)	$k(\theta) = k_{sat} \cdot S^l \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$ $S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	S = grau de saturação; $l = 0,5$; m = parâmetro de ajuste;
Leong e Rahardjo (1998)	$\frac{k}{k_{sat}} = \Theta^p \rightarrow \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	Θ = teor de umidade normalizado; p = parâmetro de ajuste;
Vanapalli e Lobbezoo (2002)	$\frac{k}{k_{sat}} \approx 10^{(7,9 \cdot \log S^\gamma)}$ $\gamma = 14,08(IP)^2 + 9,4(IP) + 0,75$	IP = índice de plasticidade

Em geral, os modelos matemáticos requerem o conhecimento prévio dos teores de umidade saturado e residual, da sucção de entrada de ar e da condutividade hidráulica saturada, além de parâmetros de ajustes.

3 APRESENTAÇÃO BANCOS DE DADOS

3.1 Comentários iniciais

A equação de van Genuchten (1980) foi proposta para representar analiticamente a curva de retenção da água no solo e possibilita a determinação de uma expressão analítica para a função de condutividade hidráulica de solos não saturados a partir dos modelos propostos por Burdine (1953) ou Mualem (1976). Essas funções são não lineares e necessárias nos modelos numéricos utilizados para prever a distribuição umidade e sucção nos solos não saturados.

O presente trabalho utilizou o banco de dados fornecido pelo programa Rosetta (Schaap et al., 2001) para quantificar a variação dos parâmetros de ajuste das equações de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica desses solos. Esses dados, com valores dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para diferentes solos sedimentares de regiões de clima temperado, foram selecionados neste trabalho por ser um banco de dados extenso (2134 amostras de diferentes solos) e por ser muito citado na literatura. Entretanto, os dados foram determinados por diferentes métodos experimentais, e apresentam informação incompleta das propriedades geotécnicas dos solos, mas isto também é observado na maior parte dos bancos de dados publicados na literatura.

Os valores dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) propostos para solos sedimentares de outras regiões de clima temperado e solos residuais de clima tropical sugeridos por Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002) também foram utilizados neste trabalho para verificar se a forma limitada (apenas baseada em textura) pode ser utilizada para estimar valores desses parâmetros.

Este capítulo apresenta os detalhes do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e dos dados publicados por Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002) analisados neste trabalho.

3.2 Banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001)

O programa Rosetta (Schaap et al., 2001) utiliza cinco funções “pedotransfer” (PTFs) para estimar a curva de retenção, a condutividade hidráulica saturada e a função de condutividade hidráulica não saturada. A fim de tornar a PTF amplamente aplicável quanto possível, Schaap et al. (2001) obtiveram um grande número de dados hidráulicos de diferentes solos e correspondentes propriedades. O conjunto de dados contém 2134 amostras de solo para a retenção de água com um total de 20574 pontos referentes à função $\Theta(h)$. A maioria das amostras são principalmente solos sedimentares da América do Norte e Europa (Schaap et al., 2001). A condutividade hidráulica saturada foi avaliada para 235 amostras de solos com um total de 4117 pontos. A hierarquia das PTFs permite previsões dos parâmetros hidráulicos usando uma forma limitada que considera apenas a classificação por textura ou granulometria e outra que inclui a densidade do solo, e /ou um ou dois pontos da curva de retenção solo-água na entrada de dados. Além disso, baseado em análises de redes neurais combinadas com o método de “bootstrap” (técnica desenvolvida para determinar certos tipos de inferências estatísticas, ou seja, afirmar algo a partir de um conjunto representativo (amostra) sobre o universo) permite-se estimar incertezas dos parâmetros hidráulicos (Schaap et al., 2001).

As estimativas de parâmetros são menos precisas quando se utilizam solos diferentes do grupo para os quais as equações ou modelos foram propostos. Assim, neste trabalho, os solos do Banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) foram separados em subgrupos utilizando o critério de classificação apenas baseado em textura, que é um termo empregado para designar a proporção relativa das frações argila, silte ou areia no solo. Estes se diferenciam entre si pelo tamanho de suas partículas (granulometria). A textura é, geralmente, determinada em laboratório através dos ensaios de peneiramento e/ou sedimentação.

Desde o século XIX foram propostas várias classificações baseadas na dimensão das partículas. Entre as mais conhecidas podemos citar as de Udden, de Wentworth, de Atterberg (que em 1927 foi adotada pela Comissão Internacional de Ciência dos Solos) e a de Bourcart. Observa-se na classificação dos sedimentos a ausência de definições dos limites dimensionais das classes texturais. Por exemplo, existe quase uma unanimidade no referente ao limite dimensional inferior da classe textural "areia", que é de 63μ (mais precisamente, $62,5\mu$), já o mesmo não se verifica para o limite superior onde encontram-se limites variando entre 1mm, 2mm ou 4mm. Deve-se levar em consideração que os diagramas triangulares para definição da classe textural do solo são limitados, uma vez que, não levam em consideração a forma da curva granulométrica (importante para solos grossos) e a plasticidade (importante para os solos finos); e uma boa classificação para a Geotecnia deve considerar esses dois parâmetros. Além disso, os ensaios de peneiramento ou sedimentação frequentemente utilizados para determinar o tamanho das partículas ou grãos de solo podem ser inadequados para solos com formas irregulares de grãos ou partículas.

A Figura 17 apresenta as distribuições texturais do conjunto de dados para a retenção de água, K_s e $K(se)$ para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). A figura 17d fornece à distribuição de classe textural baseado no USDA (Schaap et al., 2001).

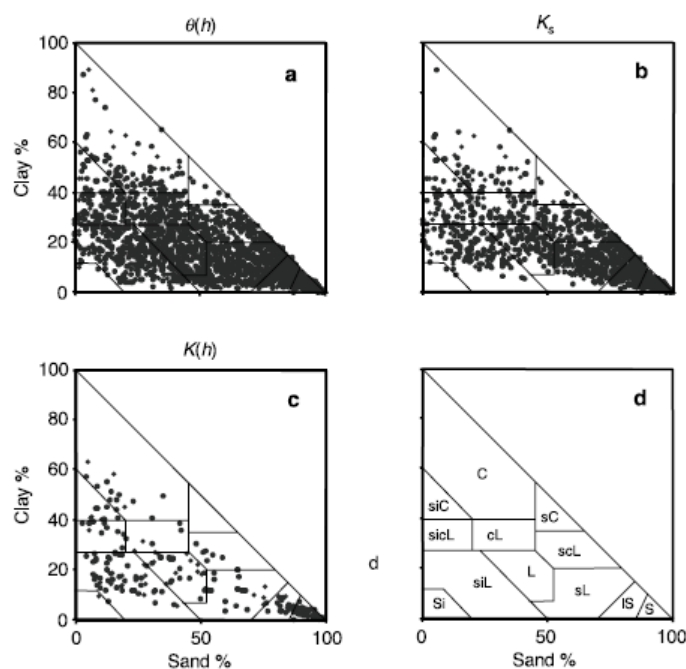


Figura 17: Distribuição textural para amostras para Curvas de retenção (a), para o subconjunto para condutividade hidráulica (K_s) (b) e para o subconjunto da condutividade hidráulica não saturada ($K(h)$) (c). A fig. 17d retrata as classe texturais: S: areia, LS: Areia lemosa, sL: Lemo arenoso, scL: Lemo argilo arenoso, sC: argila arenosa, L: Lemo, SiL: Lemo siltoso, Si: Silte, sicL: Lemo argiloso siltoso, SiC: Argila siltosa, cL: lemo argiloso, C: argila (Schaap et al. 2001).

3.3 Banco de dados HYPRES

A Tabela 4 do capítulo 2 (item 2.5.3) apresentada por Wosten et al. (1999) tem como banco de dados o HYPRES (*Hydraulic Properties of European Soils*) que, para a sua formulação, contou com a participação de 20 instituições de 12 países da Europa e contempla um total de 5521 amostras de solos (Tabela 9). As 5521 amostras foram retiradas de 1777 locais diferentes de clima temperado.

Esta base de dados tem uma estrutura flexível capaz de manter uma grande diversidade de dados. Diferentes sistemas de classificação do solo são utilizados em toda a Europa, resultando em incompatibilidades nos intervalos de classe utilizados para descrever a distribuição do tamanho de partículas do solo. Para conseguir a compatibilidade dentro do banco de dados HYPRES e com banco de dado des solos

de outros países europeus, Wosten et al. (1999) separam os dados em cinco sub-grupos considerando dois limites de tamanho de partículas ou grãos de solo: argila, definida como a fração de tamanho de partícula $<2\mu\text{m}$ e areia, a fração entre 50 e $200\mu\text{m}$ (FAO, 1990; USDA, 1951 citado por Wosten et al., 1999).

Tabela 9: Origem do banco de dados HYPRES (Wosten e al. 1999)

País	Instituição	Quantidade amostras
Holanda	The Winand Staring Centre	659
Holanda	Wageningen Agricultural University	72
Espanha	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas	54
França	Institut National de la Recherche Agronomique-Orléans	105
França	Institut National de la Recherche Agronomique-Montpellier	66
Inglaterra	Soil Survey and Land Research Centre	423
Escócia	Macaulay Land Use Research Institute	170
Dinamarca	The Danish Institute of Plant and Soil Science	350
Itália	Istituto di Idraulica Agraria Universidad' degli Studi di Napoli	194
Alemanha	Technische Universitat Berlim	42
Alemanha	Technische Universitat Braunschweig	172
Alemanha	GSF- Forschungszentrum fur Umwelt und Gesundheit	106
Alemanha	Zentrum fur Agrarlandschafts und Landnutzungsforschung	462
Alemanha	Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe	1527
Grécia	Aristotle University of Thessaloniki	72
Grécia	Agricultural University of Atenas	66
Portugal	Estação Agronómica Nacional	104
Belgica	Catholic University Leuven	785
Suécia	Swedish University of Agricultural Sciences	19
Irlanda do Norte	Department of Agriculture	15
Eslováquia	Soil Fertility Research Institute	58
Total		5521

Valores de partículas entre 2 e $50\mu\text{m}$ (silte) são deficientes no banco de dados HYPRES. Maiores detalhes da parametrização deste banco de dados podem ser encontrados no artigo de Wosten et al. (1999). A tabela 10 apresenta o resultado da padronização feita para o banco de dados HYPRES. Detalhes sobre o método de padronização são encontradas em Wosten et al. (1999).

Tabela 10: Classificação de texturas usadas no banco de dado HYPRES (Wosten et al.,1999).

Textura do solo	Definição
Grossa	Argila<18% e areia>65%
Média	18%<argila<35% e 15%< areia ou argila<18% e15%< areia<65%
Média fina	Argila<35% e areia<15%
Fina	35%<argila<60%
Muito Fina	60%<argila

Segundo Wosten et al. (1999) a mesma necessidade de padronização da classe textural foi necessária para os parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980), uma vez que, estes foram determinados por vários métodos diferentes. O teor de água volumétrica, Θ , e a condutividade hidráulica, $K(h)$, como função da sucção, h , foram parametrizadas com a equação proposta por van Genuchten (1980). Os parâmetros independentes foram determinados usando o programa RETC (van Genuchten, 1991). Estes parâmetros foram usados para gerar o teor de água volumétrica e a condutividade hidráulica para valores de sucção variando entre 0 e -16000 cmH₂O. Para cada classe textural calculou-se a média e o desvio padrão dos resultados obtidos variando-se a sucção. Em seguida, esses valores médios foram recalculados utilizando as equações de van Genuchten (1980) para gerar valores típicos dos parâmetros (tabela 4).

3.4 Tabelas apresentadas por Gerscovich e Sayão (2002)

Georscovich e Sayão (2002) avaliam o uso de 4 equações (entre elas encontra-se a de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994)) de curva retenção solo-água para solos brasileiros (região tropical) . A Tabela 11 relaciona o tipo de solo, o local e a referência de cada amostra.

Os solos residuais são predominantemente arenosos enquanto os coluviais possuem grandes porcentagens de argilas devido aos processos de intemperismo (Gerscovich e Sayão, 2002). Os solos sedimentares da região de São Carlos foram obtidos de duas diferentes profundidades (3m test #9 e 5m test #10). No mesmo local, solo residual foi investigado (8m test #5) (Gerscovich e Sayão, 2002).

Tabela 11: Descrição dos locais dos solos e caracterização das amostras (Gerscovich e Sayão, 2002).

Test #	Solo	Local	Referencia
1	Residual	Vista Chinesa, Rj	Delgado 1993
2	Residual	Querosene, Rj	Souza1995
3	Residual	Lagoa, Rj	Fonseca 1991
4	Residual	Salvador, BA	Machado e LimaJr 2001
5	Residual	São Carlos, SP	Machado e Vilar 1998
6	Residual	Porto Alegre, RS	Oliveira et al. 2001
7	Coluvial	Vista Chinesa, Rj	Delgado 1993
8	Coluvial	Querosene, Rj	Souza 1995
9	Sedimentar	São Carlos, SP	Machado e Vilar 1998
10	Sedimentar	São Carlos, SP	Machado e Vilar 1998
11	Sedimentar	Brasilia, DF	Peixoto et al. 2001

Segundo Georscovich e Sayão (2002) os parâmetros independentes Θ_r e Θ_s relacionados na Tabela 7, capítulo 2, foram diretamente inferidos a partir de dados experimentais. O número total de dados experimentais também é apresentado (N). Na condição de saturação completa a relação entre a porosidade, n , e o conteúdo de água volumétrica é igual a 1. Na condição de umedecimento testes indicam que o valor de Θ_s é menor do que a porosidade, n , para sucção igual a zero. Θ_s foi considerado como sendo igual a $0,9n$, devido à falta de dados. Para os testes realizados com ambos os caminhos de teste de adsorção e drenagem, foi estimado como $0,95n$ valores de entrada de ar foram assumidos como 1KPa iguais para todos os testes, apesar de diferentes percentagens de materiais finos. É muito difícil definir este parâmetro com base em dados experimentais, por causa de limitações de uso de técnicas de laboratório para a aplicação de sucções inferiores a 1 KPa.

Georscovich e Sayão (2002) observaram a mesma tendência de variação de erro para todas as amostras, o que sugere baixa qualidade dos dados experimentais. Deve ser notado que a qualidade das previsões da curva, não é influenciada somente pelos dados experimentais de sucção e umidade volumétrica, mas também pelos valores de porosidade ou umidade volumétrica saturada.

3.5 Critérios de separação para o banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001)

Para verificar se a forma limitada (apenas baseada em textura ou granulometria) pode ser usada para estimar valores dos parâmetros de ajuste da equação proposta por van Genuchten (1980) para definir a curva de retenção solo água e a função de condutividade hidráulica não saturada, utilizou-se o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) que forneceu 554 amostras de diversos solos.

Neste trabalho foram feitas duas separações segundo textura (ou granulometria) para os dados de forma a quantificar a variação dos parâmetros de ajuste das equações de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica desses solos. Na primeira, as amostras de solos do programa Rosetta (Schaap et al., 2001), compostas por percentuais, em diferentes proporções em massa, de areia, silte e argila, foram separadas pelos percentuais de silte e argila, definido como percentual de finos (%finos), e posteriormente ordenados em ordem crescente. A partir dessa ordenação, as amostras foram então divididas em 10 (dez) subgrupos: 0-10%; 10-20%; 20-30%; 30-40%; 40-50%; 50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90%; 90-100% de finos, a partir dos quais foram realizadas as análises. Esta separação foi feita para verificar a influência do % finos na variação dos parâmetros de ajuste das equações de van Genuchten (1980).

Foram calculados os valores médios e as medianas dos quatro parâmetros independentes (θ_s , θ_r , α , e n_v) da equação proposta por van Genuchten (1980) para a curva de retenção e da condutividade hidráulica saturada para os dados dos 10 subgrupos avaliados neste trabalho. No Anexo 1 apresentam-se as tabelas com os resultados para cada um dos 10 (dez) subgrupos estudados com: a quantidade de solos de cada subgrupo, o valor mínimo, máximo, médio, a mediana e o desvio padrão dos parâmetros.

Após análise das curvas de retenção obtidas a partir dos 10 subgrupos criados neste trabalho usando os dados do Banco Rosetta (Schaap et al., 2001) foi realizada uma nova separação do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) em 5 sub-grupos utilizando a classificação textural sugerida por Wosten et al. (1999). O objetivo foi comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados publicados por Wosten et al. (1999) para o banco de dados Hypres. Não foi utilizada a separação de solos superficiais e subsolos por não possuir esta informação no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Assim, foram calculados valores médios e as medianas dos quatro parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) (Θ_s , Θ_r , α , n_v) e da permeabilidade (condutividade hidráulica saturada). No Anexo 2 apresentam-se as tabelas com os resultados para cada um dos 5 (cinco) subgrupos criados com os seguintes dados: a quantidade de solos de cada subgrupo, o valor mínimo, o valor máximo, o valor médio, a mediana e o desvio padrão dos parâmetros.

A partir dessas duas classificações, foram obtidas as curvas de retenção hipotéticas (obtidas a partir dos valores médios e medianas dos parâmetros de ajustes da equação de van Genuchten, 1980), a variação dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) e a condutividade hidráulica saturada por meio das quais pode-se avaliar a influência textural e a variação dos parâmetros para a equação em estudo.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Várias equações têm sido propostas na literatura para descrever a curva de retenção solo água e detalhes dessas equações podem ser obtidos em Leong e Rahardjo (1997). Entre elas têm-se as de Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) já apresentadas e discutidas no capítulo 2 (revisão bibliográfica). Neste trabalho escolheu-se avaliar a equação proposta por van Genuchten (1980) para definir a curva de retenção e a equação proposta por van Genuchten (1980), Burdine (1953) e Mualem (1976) para definir a função de condutividade hidráulica devido à simplicidade, a flexibilidade e a popularidade das equações que possuem pequeno número de parâmetros e extensos bancos de dados publicados. As curvas de retenção avaliadas neste trabalho são curvas de retenção de secagem.

O presente trabalho tem como base o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) por ser um banco de dados extenso (amostras de diferentes solos) e muito citado na literatura.

Os valores de K_s (condutividade hidráulica saturada ou coeficiente de permeabilidade) para as amostras avaliadas neste banco de dados variam de $1,62 \times 10^{-6}$ cm/s a $3,65 \times 10^{-5}$ cm/s, que correspondem a valores típicos de permeabilidade de areia siltosa. A Figura 18 apresenta a variação dos valores de K_s com o percentual de finos para os 10 sub-grupos criados neste trabalho. Verifica-se uma tendência na diminuição do valor de K_s com o aumento do percentual de finos para valores de finos menores que aproximadamente 30%. Para teores de finos maiores que 30% observa-se que a variação de K_s com o teor de finos é indefinida e

dispersa. Estes resultados podem ser devido aos finos preencherem todos os vazios dos solos arenosos e neste caso a permeabilidade passa a ser definida pela permeabilidade do solo fino, e o tipo de solo fino (e a micro estrutura do solo) varia no extenso banco de dados analisado neste trabalho e não é considerado na classificação baseada apenas na textura ou granulometria dos grãos.

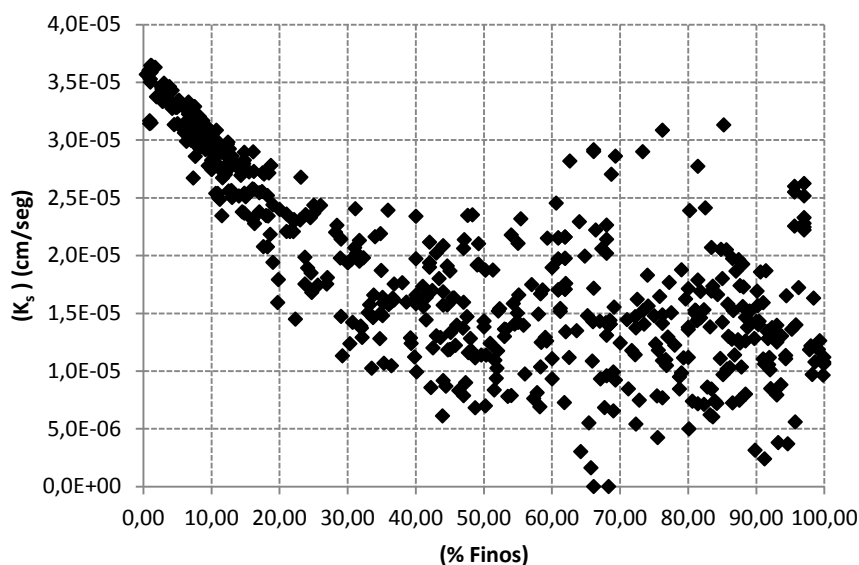


Figura 18: Variação dos valores K_s com a porcentagem de finos para as 554 amostras de solos do banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001).

Os solos do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) foram separados em sub-grupos segundo dois critérios de classificação baseados na textura ou granulometria desses solos. Inicialmente, com o objetivo de quantificar a influência do teor de finos na variação dos parâmetros de ajuste de van Genuchten (1980), foi feita uma separação dos dados em dez sub-grupos baseados na porcentagem de finos (silte+argila). Posteriormente os dados são também separados conforme a classificação textural utilizada por Wosten et al. (1999), e os resultados obtidos para as curvas de retenção hipotéticas dos solos sedimentares do Banco de Dados Rosetta (Schaap et al., 2001) são comparados com os resultados obtidos por Wosten et al. (1999) para o banco de dados HYPRES. Os valores dos parâmetros de van Genuchten (1980) sugeridos por Gerscovich e Sayão (2002) para solos brasileiros (região de clima tropical), por apresentar o tipo de solo, são utilizados para análises das influências da composição mineralógica e estados de tensão na

equação de van Genucthen (1980). Hodnett e Tomasella (2002) utilizam uma classificação textural bem diferente da apresentada por Wosten et al. (1999) e da separação adotada para o banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001), tornando difícil a comparação das curvas de retenção obtidas com os valores propostos e as demais curvas. Assim, os valores apresentados serão utilizados para comparações entre os parâmetros independentes.

4.2 Análise do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) - Primeira classificação textural.

A distribuição percentual de cada subgrupo criado neste trabalho, ou seja, 10 (dez) subgrupos 0-10%; 10-20%; 20-30%; 30-40%; 40-50%; 50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90%; 90-100% baseados na porcentagem de finos (silte+argila), considerando o número total das amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) (ou seja, 554 amostras) são apresentados na Figura 19 e na Tabela 12.

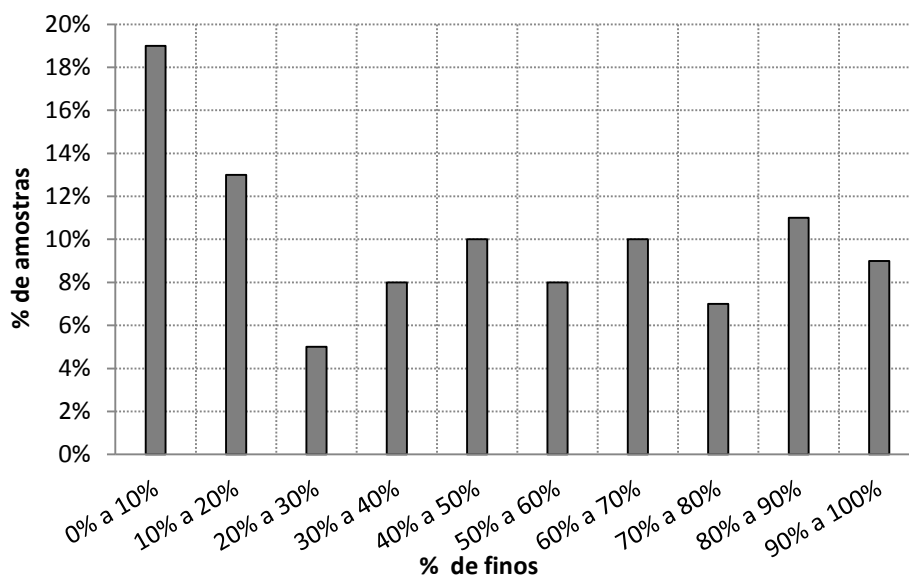


Figura 19: Distribuição da porcentagem das amostras do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) de acordo com cada subgrupo (% de finos).

A maioria das amostras (19%) encontra-se localizadas no subgrupo de 0% a 10% de finos. Para o subgrupo com a porcentagem de finos entre 20 a 30% de finos

obteve-se a menor porcentagem (5%) do total das amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). O restante das amostras encontra-se relativamente bem distribuído, variando entre 7% e 13% das amostras em cada subgrupo.

Tabela 12: Representatividade de cada subgrupo (primeira classificação) no banco de dados do programa Rosetta Schaap et al. (2001).

Subgrupo % finos	% no banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001)
0% a 10%	19%
10% a 20%	13%
20% a 30%	5%
30% a 40%	8%
40% a 50%	10%
50% a 60%	8%
60% a 70%	10%
70% a 80%	7%
80% a 90%	11%
90% a 100%	9%

As figuras 20 a 23 apresentam a variação dos valores de cada parâmetro independente da equação de van Genuchten (1980) com a % de finos (silte + argila) para os dez sub-grupos criados neste trabalho, conforme uma classificação limitada baseada só na distribuição granulométrica, para o banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001).

O parâmetro α (cm^{-1}) é proporcional ao inverso do valor de h (carga de pressão ou sucção) a meio caminho entre Θ_s e Θ_r , ou seja, para o valor do grau de saturação efetivo igual a 50% (van Genuchten, 1980; Hodnett e Tomasella, 2002). Pequenos valores indicam uma pequena mudança no teor de água que geralmente é mais provável em solos finos e não estruturados. Grandes valores de α indicam uma mudança repentina no teor de água, com esvaziamento de alguns poros sob valores de entradas de ar muito pequenos: este é geralmente mais típico de areia ou

solos bem estruturados. Em solos sem estrutura, o parâmetro α é determinado pela textura, mas onde a textura não é texturalmente relacionado, α pode ser um pouco independente da textura (Hodnett e Tomasella, 2002). No entanto, a Figura 20 mostra a grande dispersão dos valores de α com o teor de finos, variando entre 0,0003 a $1,0 \text{ cm}^{-1}$ e as maiores variações (entre 0,0003 e $1,0 \text{ cm}^{-1}$) nos valores de α ocorrem para os subgrupos com porcentagens de finos entre 50% e 90%. Os valores de α variam de 0,0003 a $0,3 \text{ cm}^{-1}$ para os subgrupos com %finos entre 0 e 30%.

O parâmetro n_v é adimensional e determina a inclinação da curva de retenção. Se o valor de n_v é grande (por exemplo, 3), a curva é íngreme, com uma diminuição rápida do conteúdo de água e uma pequena distribuição de tamanho de poros, ou seja solos mais uniformes (van Genuchten, 1980). Se o valor de n_v é baixo (por exemplo, 1,1), a alteração no teor de água é muito gradual (Hodnett e Tomasella, 2002).

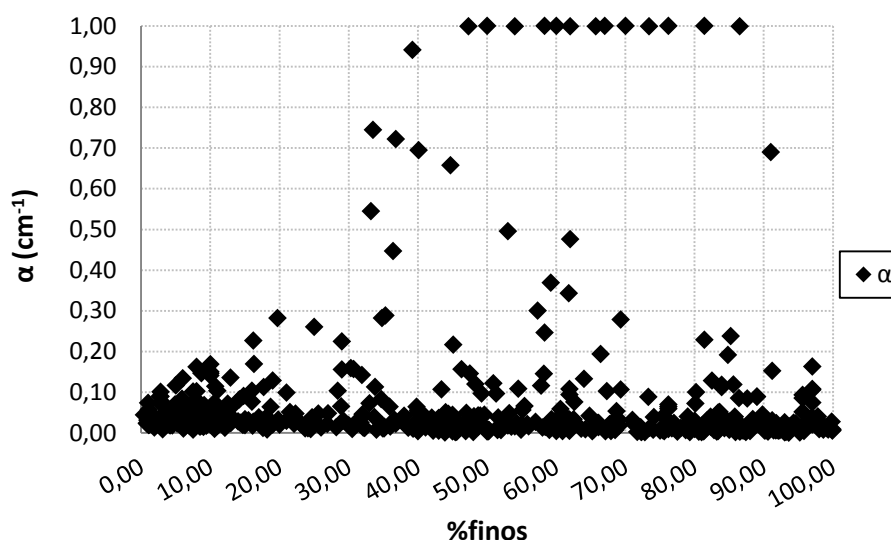


Figura 20: Variação de α (cm^{-1}) com a % de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

A Figura 21 apresenta a distribuição dos 554 valores de n_v de acordo com a porcentagem de finos. Observa-se que há uma redução significativa do valor de n_v até 20% de finos. Após esta porcentagem de finos o valor de n_v praticamente

permanece constante. As amostras estudadas apresentam um valor máximo de 10 e mínimo de 1,01 para o parâmetro n_v .

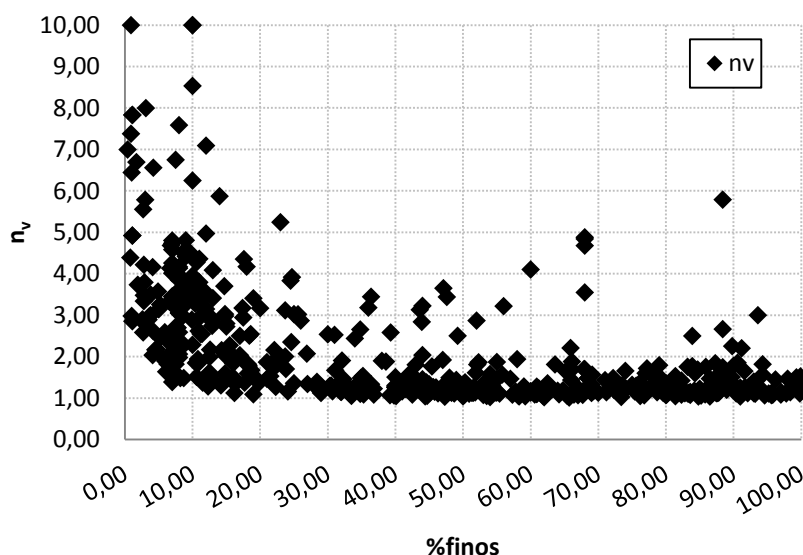


Figura 21: Variação de n_v com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

No contexto da equação van Genuchten (1980), o conteúdo de água residual, Θ_r , é o teor de água em que a inclinação da curva de retenção ($d\theta/dh$) é igual à zero a um valor muito grande de sucção. Segundo van Genuchten (1980), o conteúdo de água residual pode ser medido experimentalmente, por exemplo, pelo teor de água no solo muito seco. Infelizmente, as medições não são feitas rotineiramente, e precisa ser estimado por extrapolação dos dados disponíveis da curva de retenção solo-água. Ao contrário de Θ_s um parâmetro físico (porosidade do solo) que pode ser medido, para a maioria dos fins, Θ_r só pode ser obtido por ajuste de curva (Hodnett e Tomasella, 2002). Para Θ_r o programa Rosetta (Schaap et al., 2001) adota valores entre 0 e 0,3, no entanto, não ficaram claros os critérios para estes valores. (Figura 23). Os valores de Θ_s variam entre 0,26 a 0,82 (Figura 22).

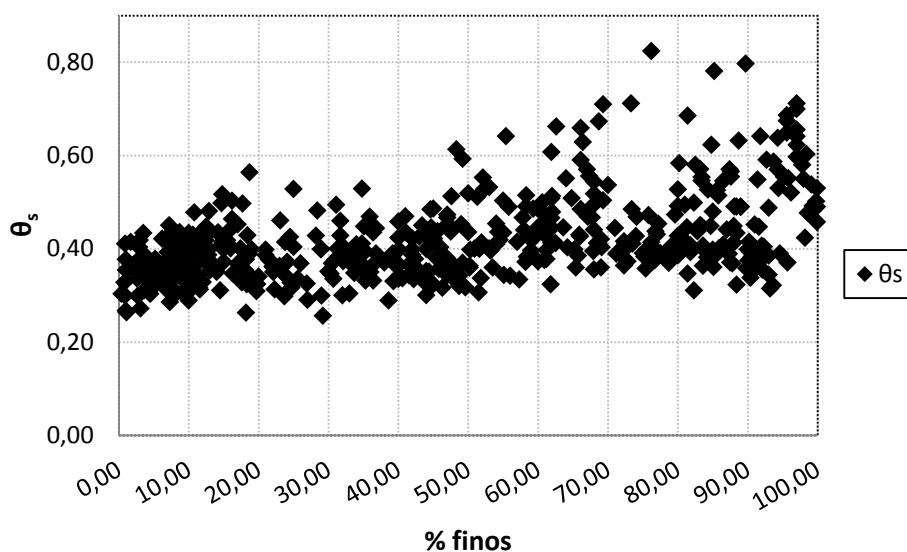


Figura 22: Variação de θ_s com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Com uma distribuição das amostras bem equilibrada (Tabela 12) calculou-se a média e a mediana de cada parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten (1980) das amostras de cada subgrupo, ou seja, obteve-se um valor (média e mediana) de θ_s , θ_r , α , n_v . Assim, as curvas de retenção analisadas são curvas de retenção hipotéticas que representam os dez subgrupos separados segundo o teor de finos considerados neste trabalho.

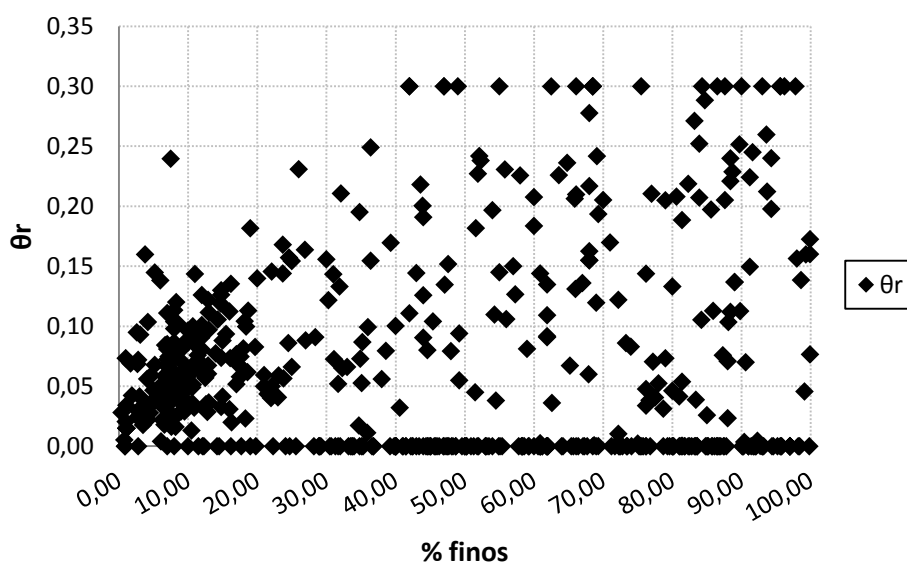


Figura 23: Variação de θ_r com a porcentagem de finos (silte + argila) para as 554 amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

4.2.1 Análise com valores médios

As dez diferentes curvas de retenção hipotéticas obtidas pela a primeira separação textural com os valores médios, são apresentadas nas figuras 24 e 25. O Anexo 1 apresenta os valores médios e medianos dos parâmetros de van Genuchten (1980) correspondentes a cada sub-grupo considerado neste trabalho.

A curva de retenção com limite superior (com maiores valores de sucção) corresponde aos solos com %finos maiores que 90% e a curva de retenção limite inferior (menores valores de sucção) corresponde aos solos com %finos menores que 10%. Observa-se que para uma sucção na ordem de 10^2 cmH₂O (ou 10 kPa) a diferença do grau de saturação da curva limite superior para a curva de limite inferior é de aproximadamente 52%.

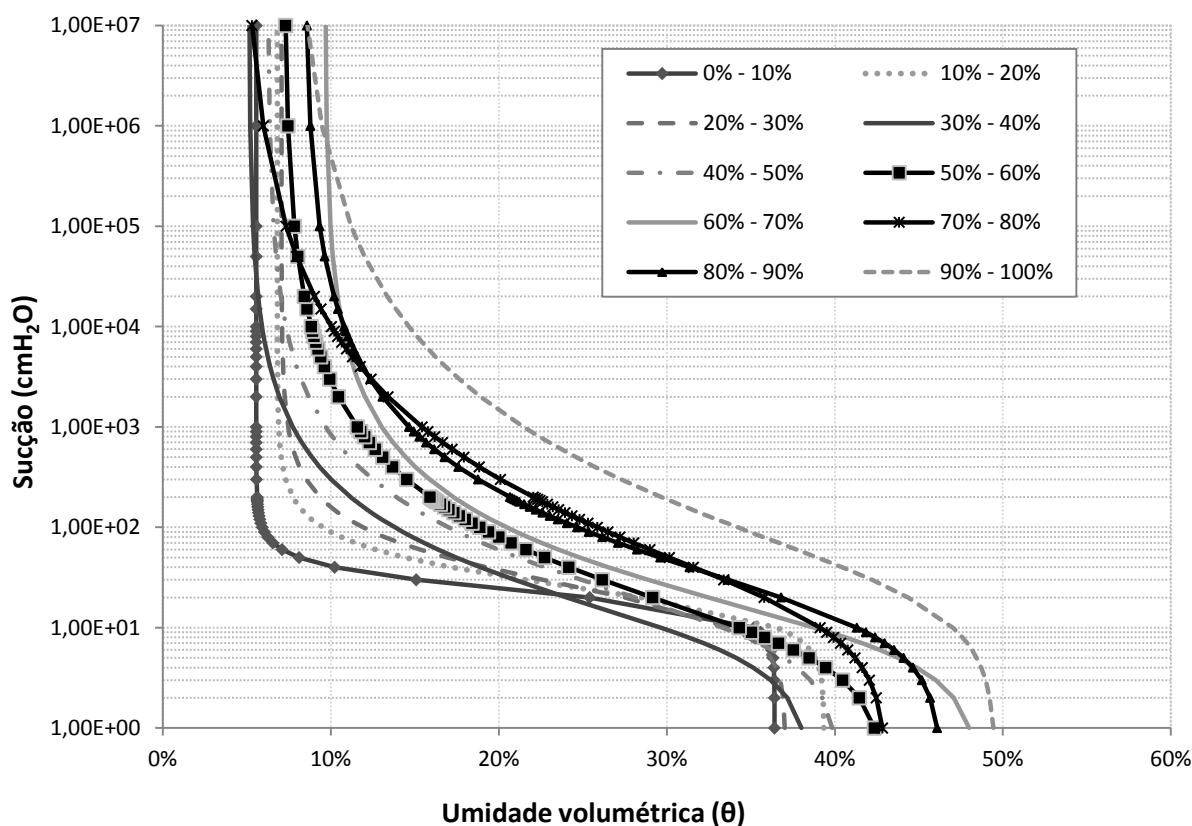


Figura 24: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x umidade volumétrica (θ), definidas a partir dos valores médios dos dez subgrupos (0% - 10%, 10% - 20%, 20% - 30%, 30% - 40%, 40% - 50%, 50% - 60%, 60% - 70%, 70% - 80%, 80% - 90%, 90% - 100% de finos) avaliados neste trabalho.

Quando aumenta a sucção para 10^4 cmH₂O (ou 10^3 kPa), essa diferença diminui para aproximadamente 17%. Verifica-se que os solos com menor percentual de finos apresentam curvas de retenção mais acentuadas, com trechos mais bem definidos. Os solos com maiores percentuais de finos apresentam curvas mais suaves. Fredlund et al. (1997) observam que a previsão da curva de retenção obtida a partir da distribuição granulométrica (ou textural) é mais precisa para os solos arenosos, apenas razoáveis para os solos siltosos, e que a previsão para argilas e “Loans” é mais difícil. Os resultados são mais sensíveis a porosidade e mais pesquisas são necessárias nesta área.

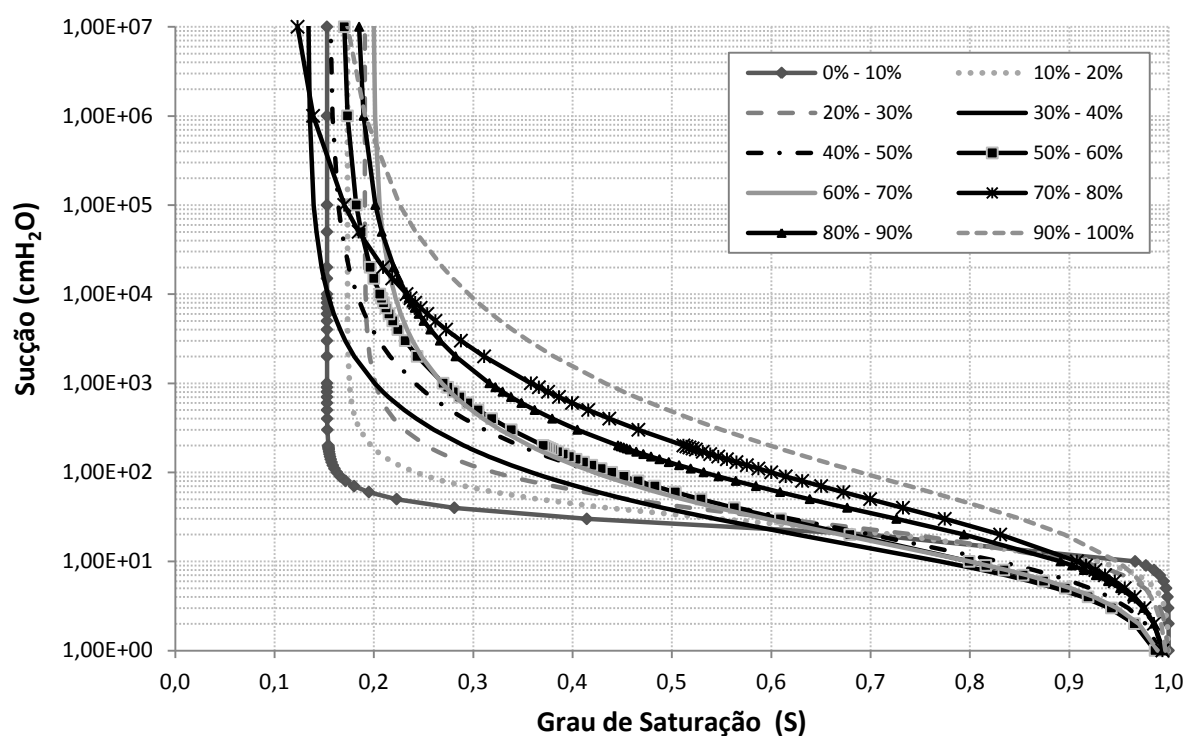


Figura 25: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores médios dos dez subgrupos (0% - 10%, 10% - 20%, 20% - 30%, 30% - 40%, 40% - 50%, 50% - 60%, 60% - 70%, 70% - 80%, 80% - 90%, 90% - 100% de finos) avaliados neste trabalho.

Segundo Barbour (1998), o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva. No entanto, observa-se na Figura 25 que a curva com 0 a 10% de finos obteve

praticamente o maior valor da pressão de entrada de ar, mesmo que com pouca diferença, do que a curva com a maior % finos, o que é incoerente.

Os valores médios dos parâmetros, para cada subgrupo criado, utilizados para gerar as curvas hipotéticas de retenção solo – água (Figura 25) são apresentados nas figuras 26 a 28.

Os resultados obtidos com as médias do parâmetro α foram inconsistentes. Conforme já mencionado no capítulo 2, quanto maior a porcentagem de finos, maior o valor da entrada de ar e menor deveria ser o valor de α . Observa-se que até 30% de finos, as amostras apresentam um valor médio de α de aproximadamente $0,05 \text{ cm}^{-1}$, entretanto, estes valores apresentaram uma grande dispersão ($0,0077$ a $0,2820 \text{ cm}^{-1}$). Entre 30% e 70% de finos o valor de α apresenta um crescimento considerável com um valor médio de aproximadamente $0,12 \text{ cm}^{-1}$. Entre 70% e 100% de finos o valor de α decresce novamente para um valor médio aproximado de $0,06$. Assim, com a média dos valores de α não foi possível observar uma correlação definida com a granulometria/textura dos solos.

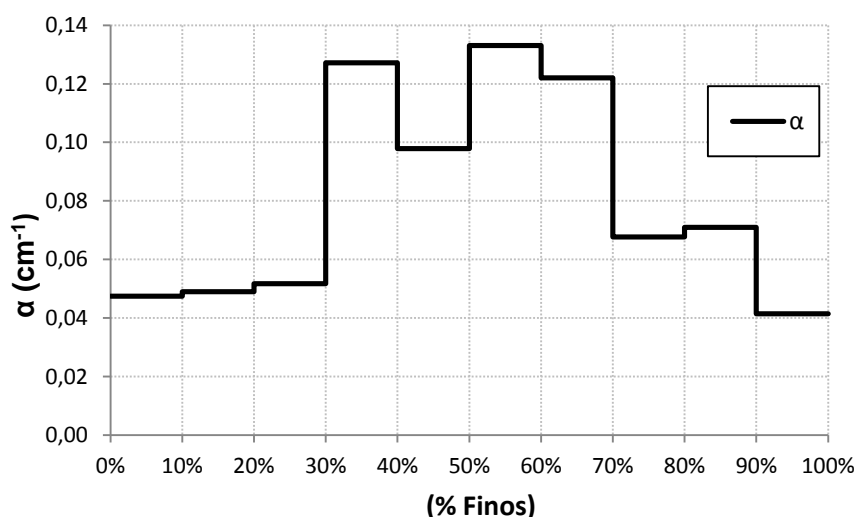


Figura 26: Variação dos valores médios de α (cm⁻¹) com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Para o parâmetro n_v observa-se uma tendência de decréscimo com o aumento % finos do solo, com uma média de 3,85 nas amostras com até 10% de

finos a um valor médio de 1,29 para as amostras com percentual de finos superior a 90%. A média do parâmetro n_v varia de 1,29 a 3,85 (Figura 27). A grande variação deste parâmetro acontece até aproximadamente 30% dos finos, após esse valor ele permanece praticamente constante. Conforme observado na revisão bibliográfica e no capítulo 4.1, se o valor de n_v é grande (por exemplo, 3), a curva é íngreme, com uma diminuição rápida do conteúdo de água, comportamento típico de solos com baixa porcentagem de finos. Se o valor de n_v é baixa (por exemplo, 1,1), a alteração no teor de água é muito gradual típico de solos com grande quantidade de finos.

Quando se compara a Figura 27 com a Figura 18 observa-se que o K_s e o n_v possuem a mesma tendência de decréscimo até 20 ou 30% de finos. Aparentemente o parâmetro n_v é influenciado pela granulometria/textura do solo. Resultado semelhante foi encontrado por Porebska et al. (2006) que ao analisarem os solos “Phaeozems” e “GLeysols” observaram que o parâmetro n_v aumenta significativamente com o aumento do teor de areia e decresce significativamente com a aumento de teor de argila. A partir de 30% de finos o valor de K_s passa a ser determinado pela permeabilidade do solo fino e o tipo de solo fino (micro estrutura). Assim, o mesmo parece acontecer com parâmetro n_v , onde a partir desta porcentagem parece não estar relacionado com a textura/granulometria tornando-se um parâmetro de ajuste. Difícil tentar concluir que para teores de finos maiores que 30% o parâmetro n_v continua a estar relacionado com a permeabilidade saturada, pois essa se apresenta de forma dispersa a partir desta porcentagem de finos (Figura 18). Mais estudos são necessários e com uma maior quantidade de dados, principalmente misturas de um mesmo solo fino e solo granular com diferentes teores e determinados utilizando a mesma metodologia experimental. Observa-se que, para teores de finos maiores que 30%, o valor de n_v varia de 1,5 a aproximadamente 1,3 e estes valores estão de acordo com os valores sugeridos pela Tabela 4 (Hodnett e Tomasella, 2002) para as areias lemo argilosas, siltes lemo argilosos e argilas de solos tropicais indicando que os finos passam a ocupar todos os vazios dos solos arenosos.

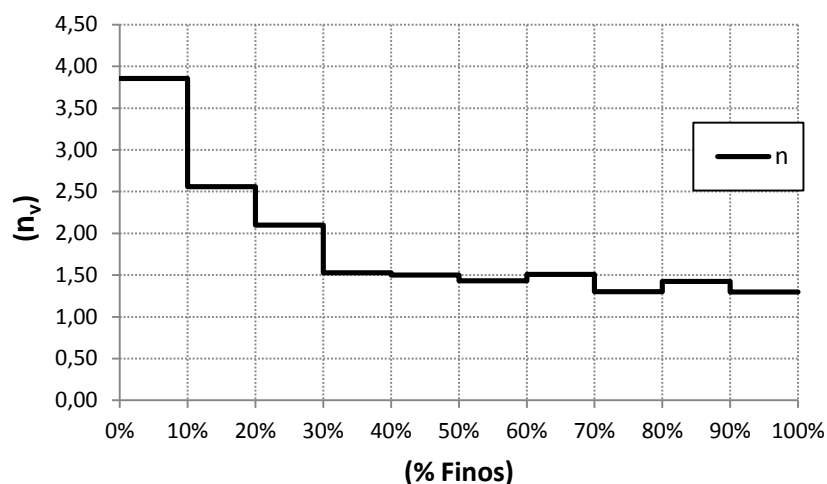


Figura 27: Variação dos valores médios de n_v com o %finos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Ao analisar os valores médios dos parâmetros Θ_r e Θ_s (Figura 28), verificou-se que para os subgrupos com teor de finos superior a 40%, o valor máximo de Θ_r nas amostras avaliadas é 30%. O valor mínimo de Θ_r considerado pelo programa Roseta é 0%.

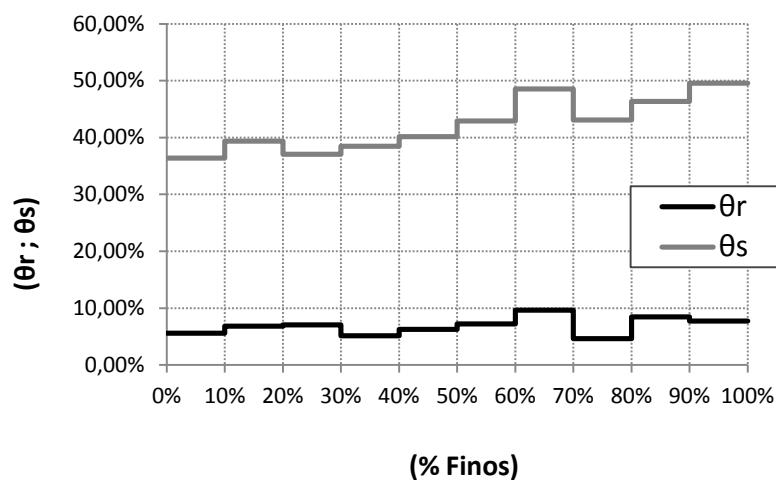


Figura 28: Variação dos valores médios dos parâmetros Θ_r e Θ_s com a % finos.

Em relação à Θ_s (ou porosidade do solo), o valor mínimo encontrado foi aproximadamente 0,26 para o subgrupo com teor de finos entre 0% e 10%. O máximo, no subgrupo com porcentagem de finos entre 60% e 70%, foi aproximadamente 0,84. Observa um crescimento “suave” nos valores de Θ_r e Θ_s . Os valores de Θ_s apresentam maior dispersão nas amostras com teores de finos

superiores a 40%. A partir dessa faixa o conjunto de dados apresenta desvio padrão na ordem de 10% enquanto que, nas amostras com percentual de finos inferior a 40%, o desvio padrão é de aproximadamente 5,5%.

Os diferentes métodos experimentais utilizados para determinar esses dados, a grande variabilidade de solos e regiões diferentes dos dados, a falta de informação completa das propriedades geotécnicas dos solos e a falta de significado físico dos parâmetros de ajuste da equação van Genuchten (1980) não possibilitou definir uma função que quantifique a variação dos parâmetros de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica dos solos analisados neste trabalho. Entretanto, observam-se as seguintes tendências nas análises apresentadas:

- Os valores médios do parâmetro α não estão relacionadas com a granulometria/textura dos solos;
- Os valores médios do parâmetro n_v estão relacionados com a granulometria para uma porcentagem de finos de até 30%. Após este valor não se chegou a nenhuma conclusão.
- Não se observou relação entre θ_r com a granulometria/textura do solo, conforme esperado uma vez que o banco Rosetta (Schaap et al., 2001) assume que θ_r é zero para uma grande quantidade de dados.

4.2.2 Análise com valores da mediana

As dez diferentes curvas de retenção hipotéticas obtidas com a primeira classificação do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001), considerando as medianas dos parâmetros independentes são apresentadas na Figura 29. O anexo 1 apresenta os valores dos parâmetros de van Genuchten (1980) (valores da mediana) correspondentes a cada sub-grupo considerado neste trabalho.

A curva de retenção com limite superior (com maiores valores de sucção) corresponde aos solos com %finos maiores que 90% e a curva de retenção limite inferior (menores valores de sucção) corresponde aos solos com %finos menores que 10%. No entanto, a partir de uma sucção superior a 10^4 cmH₂O (10^3 kPa), observa-se que algumas curvas ultrapassam o limite inferior e superior. Isso acontece porque para tais curvas de retenção hipotéticas a mediana dos valores do grau de saturação residual (θ_r) é zero.

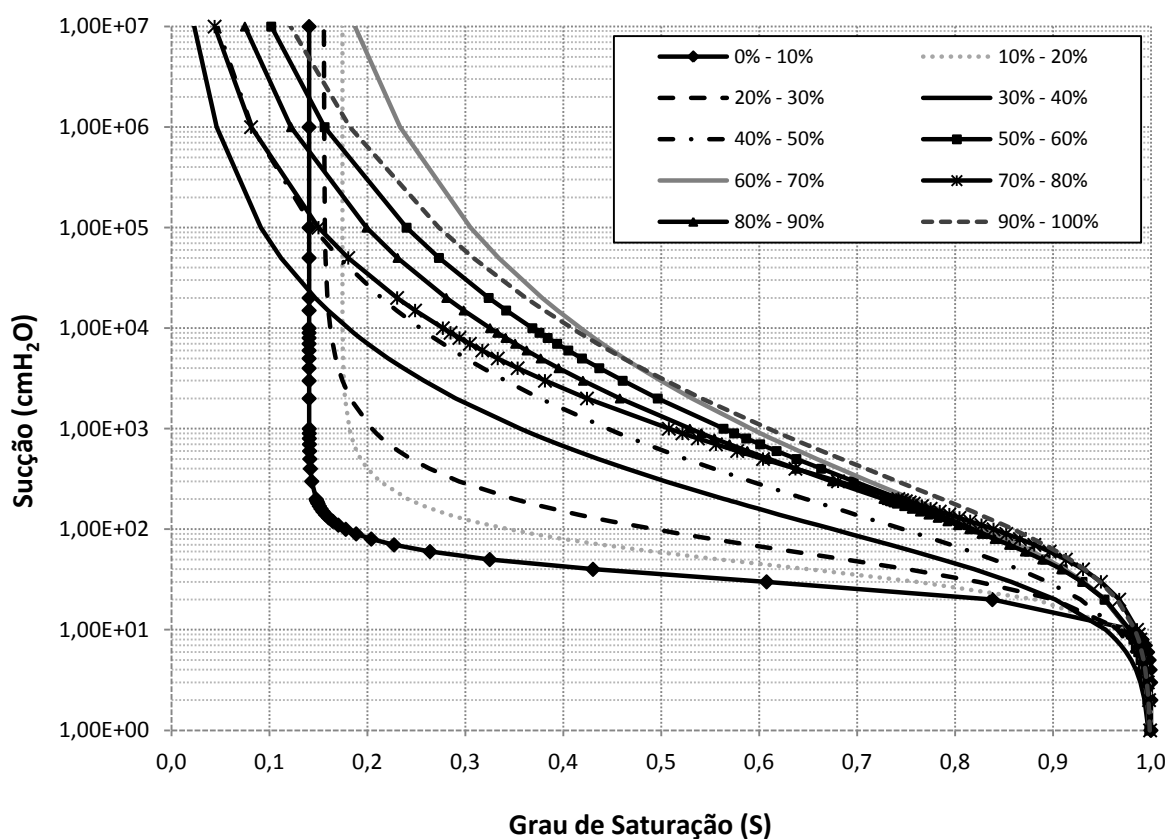


Figura 29: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da *mediana* dos valores dos dez subgrupos do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) avaliados neste trabalho.

Assim, quanto maior a sucção o grau de saturação tende a ir a zero, uma vez que, com θ_r igual a zero, significa que se consegue secar totalmente o solo. Verifica-se que os solos com menor percentual de finos apresentam curvas de retenção mais acentuadas, com trechos mais bem definidos. Como esperado, os solos com maiores percentuais de finos apresentam curvas mais suaves.

Para uma sucção na ordem de 10^2 cmH₂O (10 kPa) a diferença do grau de saturação da curva limite superior para a curva de limite inferior é de aproximadamente 72%, um aumento de 20% em relação às curvas de retenção hipotéticas com as médias dos valores. Quando aumenta a sucção para 10^4 cmH₂O (10^3 kPa), essa diferença diminui para aproximadamente 22%. Observa-se que, em relação às curvas obtidas com as médias dos parâmetros, houve um aumento no valor da entrada de ar para as curvas com % de finos maiores que 10%.

Assim como a média, não foi possível observar uma correlação definida entre a granulometria/textura e os valores da mediana de α . No entanto, quando se analisa, de forma global, a variação dos valores das medianas de α com a porcentagem de finos (Figura 30), observa-se que existe uma tendência de decréscimo com o aumento da quantidade de finos para teores de finos menores que 30%.

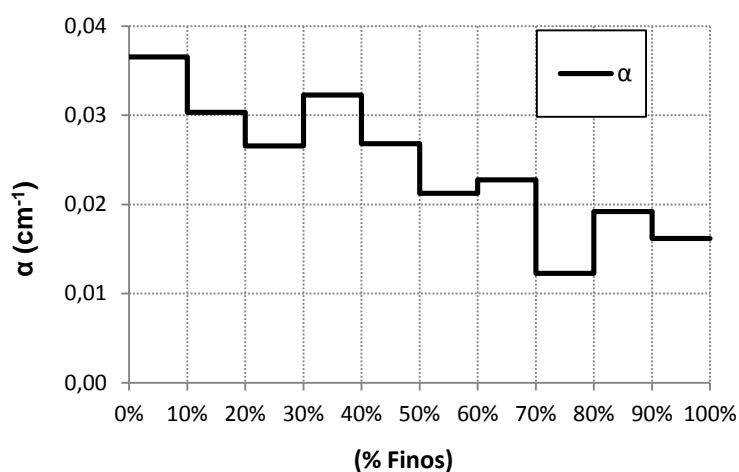


Figura 30: Variação dos valores das medianas de α (cm⁻¹) com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

O comportamento de n_v ao se utilizar a mediana para os valores fornecidos no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) está representado na Figura 31. Observa-se uma tendência de decréscimo com o aumento % finos do solo, com uma mediana de 3,41 nas amostras com até 10% de finos e um valor mediano de 1,17 para as amostras com percentual de finos superior a 90%. Assim como na análise dos valores médios, grande variação de n_v acontece até

aproximadamente 30% dos finos, após esse valor ele permanece praticamente constante.

A mesma comparação realizada para a Figura 27 com a Figura 18, pode ser realizada para a figura 30. Observamos que o K_s e o n_v possuem a mesma tendência de decréscimo até 20 ou 30% de finos. Aparentemente o parâmetro n_v é influenciado pela granulometria/textura do solo. A partir de 30% de finos o valor de K_s passa a ser determinado pela permeabilidade do solo fino e o tipo de solo fino (micro estrutura), o parâmetro n_v parece se tornar um parâmetro de ajuste. Entretanto precisa ser verificado se para solos com o valor da % finos maior que, por exemplo, 30% (valor obtido para os dados analisados neste trabalho) o parâmetro n_v continua a estar relacionado com a permeabilidade saturada, pois essa apresenta-se de forma dispersa a partir desta porcentagem de finos (Figura 18) assim, mais estudos são necessários. O comportamento de n_v para valores da mediana foi semelhante ao comportamento obtido para os valores médios.

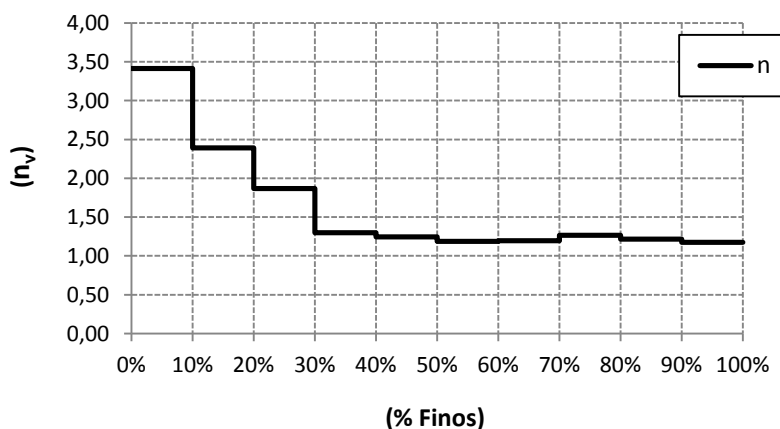


Figura 31: Variação dos valores das medianas de n_v com o %finos para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

O comportamento de Θ_s praticamente permaneceu constante com a análise dos valores das medianas ao compararmos com os resultados obtidos com as médias. Para o parâmetro Θ_r , a partir de 30% de finos seu valor é praticamente zero (Figura 32).

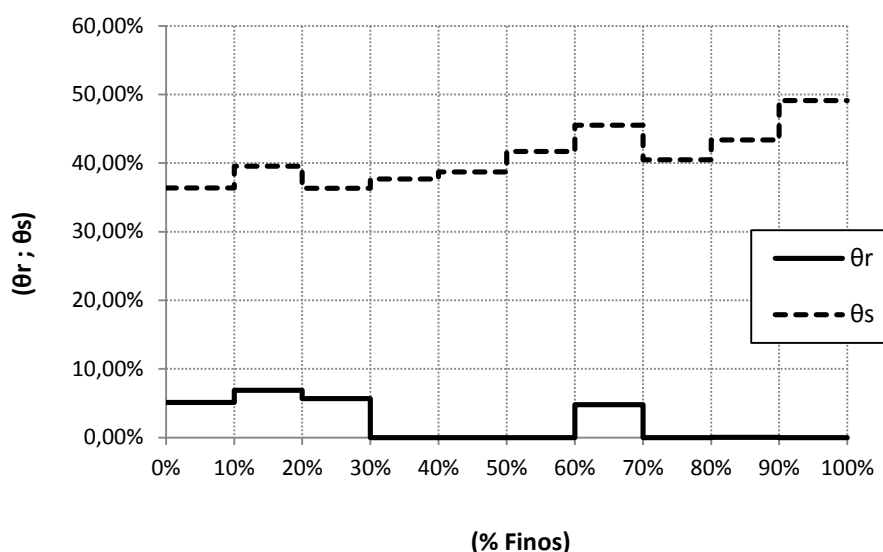


Figura 32: Variação dos valores das medianas de Θ_s e Θ_r com o %finos para as amostras apresentado no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Teoricamente isso significa que toda a água do solo foi retirada. Para Θ_r o programa Rosetta (Schaap et al., 2001) estima valores entre 0 e 0,3. Não ficaram claros os critérios para estes valores. Do ponto de vista prático parece ser suficiente definir Θ_r como o teor de água para algum valor relativamente grande de entrada de ar. Mesmo neste caso, reduções significativas de sucção são suscetíveis, especialmente em solos de textura fina.

A Tabela 13 mostra a variação dos parâmetros quando calculado a média e a mediana para cada subgrupo. Observa-se grande diferença entre os resultados obtidos (média e mediana). Tal resultado mostra a grande dispersão entre as amostras apesar de corresponderem a valores típicos de permeabilidade para areia siltosa. Os resultados obtidos utilizando os valores das medianas foram mais consistentes (de acordo com a literatura) do que os resultados obtidos utilizando a média e a mediana permite definir parâmetros mais representativos de cada subgrupo analisado, considerando a grande heterogeneidade do banco de dados.

Tabela 13: Valores referentes à média e mediana dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para os 10 subgrupos criados com os dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Subgrupo % finos	Θ_r (%)		Θ_s (%)		α (cm-1)		n_v	
	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
0% a 10% de Finos	5,56%	5,11%	36,41%	36,37%	0,047	0,037	3,856	3,412
10% a 20% de Finos	6,82%	6,89%	39,36%	39,56%	0,049	0,030	2,559	2,390
20% a 30% de Finos	7,07%	5,65%	37,05%	36,35%	0,052	0,027	2,099	1,869
30% a 40% de Finos	5,14%	0,00%	38,49%	37,70%	0,127	0,032	1,520	1,297
40% a 50% de Finos	6,25%	0,00%	40,17%	38,72%	0,097	0,027	1,499	1,245
50% a 60% de Finos	7,23%	0,00%	42,93%	41,71%	0,133	0,021	1,430	1,186
60% a 70% de Finos	9,66%	4,80%	48,53%	45,51%	0,122	0,023	1,508	1,194
70% a 80% de Finos	4,63%	0,00%	43,10%	40,48%	0,068	0,012	1,301	1,267
80% a 90% de Finos	8,46%	0,04%	46,35%	43,40%	0,071	0,019	1,424	1,214
90% a 100% de Finos	7,73%	0,00%	49,59%	49,11%	0,041	0,016	1,298	1,176

4.3 Análise do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) - Segunda classificação textural (Proposta por Wosten et al., 1999)

Cada amostra do banco de dados do programa Rosetta apresentado por Schaap et al. (2001) foi classificada de acordo com a Tabela 4, capítulo 2, e depois foram distribuídas em cinco grupos texturais: Grossa, Média, Média fina, Fina e Muita fina. A Tabela 14 e a Figura 33 apresentam a distribuição em porcentagem do banco de dados para a nova classificação textural.

Tabela 14: Distribuição do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001) para a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.

Classificação Textural	% Banco Rosetta (Schaap et al.,2001)
Grossa (Rosetta)	40%
Média (Rosetta)	39%
Média fina (Rosetta)	9%
Fina (Rosetta)	10%
Muito Fina (Rosetta)	1%

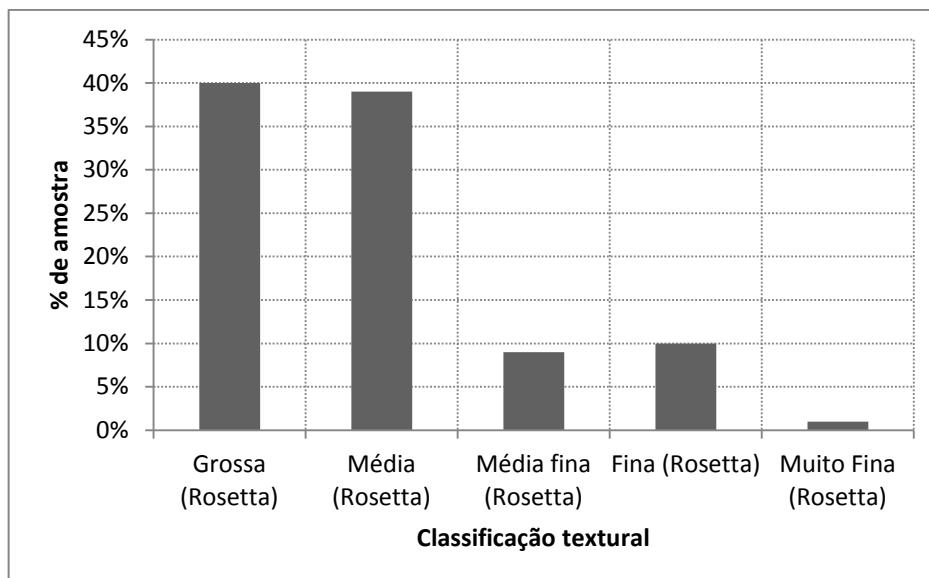


Figura 33: Distribuição da porcentagem das amostras de acordo com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Observa-se que 79% do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) são classificados entre textura grossa e média, 19% para Média fina e fina e apenas 1% apresenta textura muito fina. Um por cento do banco de dados não se encaixa em nenhuma classificação textural apresentada por Wosten et al. (1999). Um exemplo é a amostra que apresenta 15% de areia, 66,80% de silte e 18,20% de argila. Os solos siltosos, não são considerados no banco de dados HYPRES conforme mencionado no capítulo 3. Assim, essas amostras foram desconsideradas nesta análise.

As figuras 34 a 37 apresentam a distribuição de todos os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) com o teor de areia. Obviamente as figuras são, digamos espelhadas das figuras 17 a 23, uma vez que, a primeira separação textural considera a separação % de areia e % de finos (silte + argila). No entanto, os gráficos enfatizando a % de areia são importantes para facilitar a comparação dos resultados, uma vez que, a classificação proposta por Wosten et al. (1999) não considera a % de silte.

Os valores de Θ_r no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) apresentam grande dispersão que variam entre 0 e 0,3 (0 e 30%) (Figura 34). Θ_r apresenta-se de forma caótica, aparentemente sendo somente parâmetro de ajuste. O parâmetro Θ_s (porosidade do solo) apresenta suave crescimento com valores que variam entre 0,26 a 0,82 (26% e 82%). Para classificação textural Grossa Θ_s é menor do que para a classificação textural Muito fina (Figura 35). No contexto da equação van Genuchten (1980), o conteúdo de água residual, Θ_r , é o teor de água em que a inclinação da curva de retenção é igual à zero a um valor muito grande de sucção. Ao contrário de Θ_s um parâmetro físico (porosidade do solo) que pode ser medido, para a maioria dos fins Θ_r só pode ser obtido por ajuste de curva (Hodnett e Tomasella, 2002).

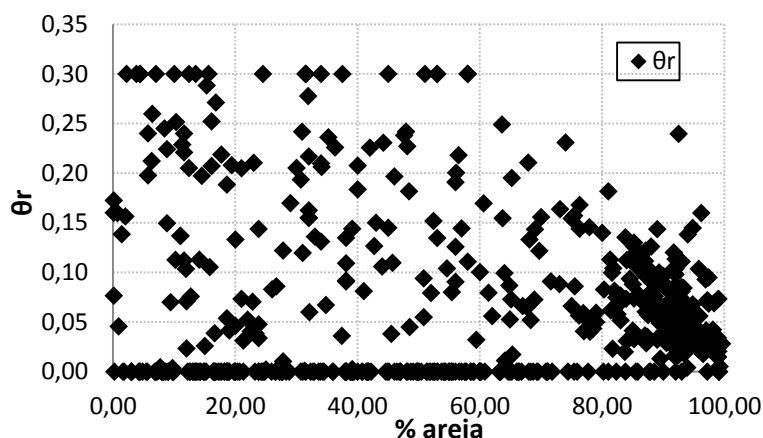


Figura 34: Variação de Θ_r com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

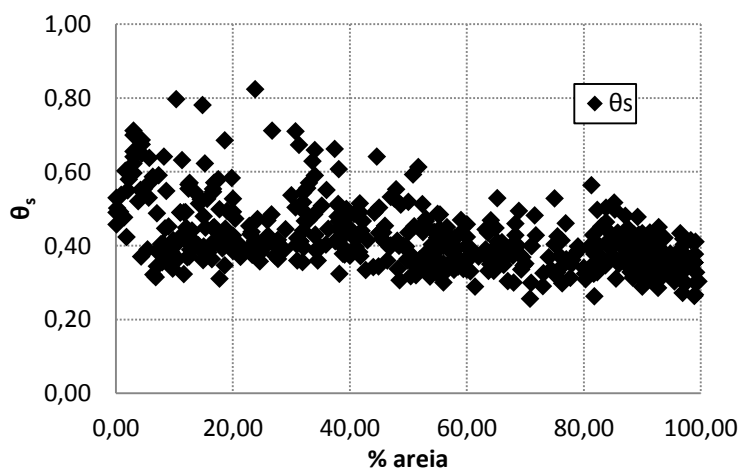


Figura 35: Variação de Θ_s com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

A distribuição do parâmetro n_v é apresentada na Figura 36. Observa-se que para classe textura Grossa (areia >65%) obteve-se os maiores valores. Para as demais classes texturais não observou diferenças significativas. O parâmetro n_v é adimensional e determina a inclinação da curva de retenção. Se o valor de n_v é grande (e.g., aproximadamente 3), a curva é íngreme, com uma diminuição rápida do conteúdo de água. Se o valor de n_v é baixa (e.g., aproximadamente 1,1), a alteração no teor de água é muito gradual (Hodnett e Tomasella, 2002).

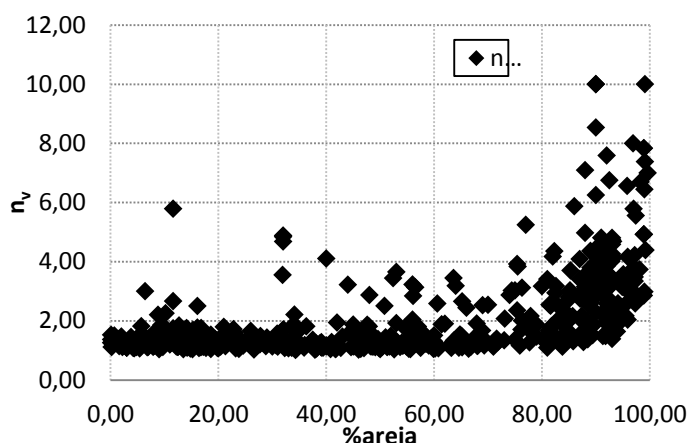


Figura 36: Variação de n_v com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001).

Conforme observado na literatura, pequenos valores de α deveriam indicar uma pequena mudança no teor de água que geralmente é mais provável em solos finos grãos e não estruturados. Grandes valores de α indicam uma mudança repentina no teor de água, com esvaziamento de alguns poros sob valores de entrada de ar muito pequenos: este é geralmente mais típico de areia ou solos bem estruturados. Ao relacionarmos os valores α com a porcentagem de areia, esperava-se que valores altos de α estivesse relacionados com altos teores de areia (<65%, solos com textura Grossa), o que não ocorreu (Figura 37). Os maiores valores de α foram obtidos para solos com classificação textural Média.

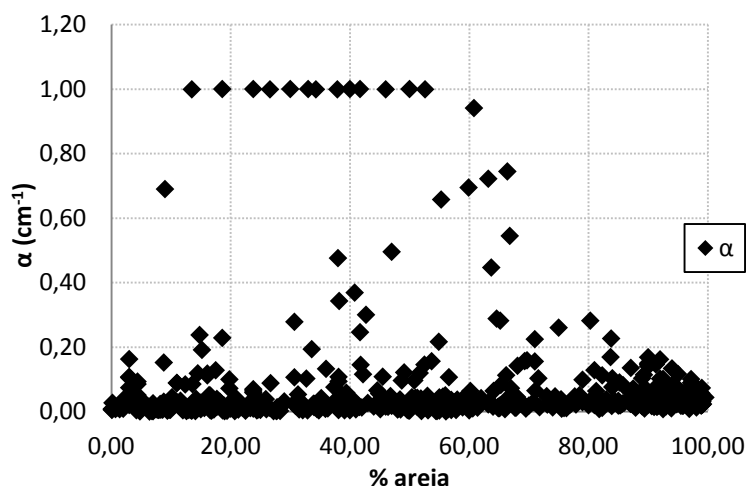


Figura 37: Variação de α (cm^{-1}) com a porcentagem de areia de cada amostra sugerido no banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al.,2001).

4.3.1 Análise com valores médios

As cinco diferentes curvas de retenção hipotéticas obtidas pela a segunda separação textural com os valores médios, são apresentadas na Figura 38. O anexo 2 apresenta os valores dos parâmetros de van Genuchten (1980) correspondentes a cada classe textural considerada neste trabalho.

As curvas de retenção hipotéticas obtidas (Figura 38) com as médias dos parâmetros independentes da equação de van Genhuchten (1980), possuem limite superior formado pelas amostras de textura “muito fina”. O maior valor de entrada de ar, no entanto, se confunde entre as curvas “muito fina”, “média fina” e “grossa” por serem muito aproximados. O limite inferior, até aproximadamente 75% do grau de saturação é obtido com a curva de retenção das amostras com textura grossa. Com um grau de saturação maior, o limite inferior e o menor valor da entrada de ar é definido com a curva de retenção com textura fina, o que é incoerente.

Após a separação das amostras em grupos, obteve-se a média dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980).

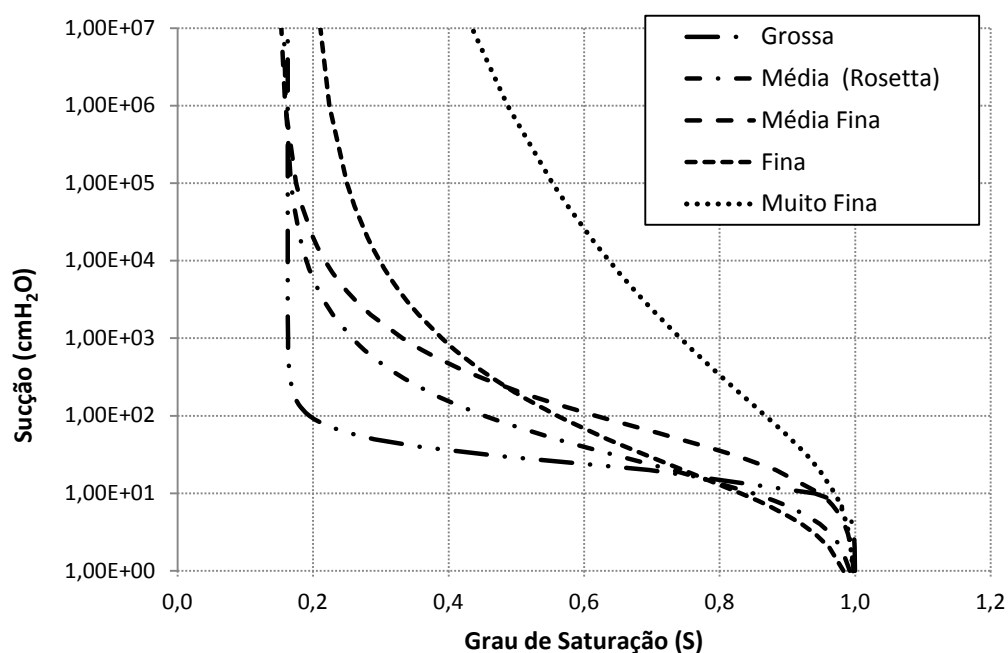


Figura 38: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da *média* dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999).

As figuras 39 a 42 apresentam as análises dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) para a classificação proposta por Wosten et al. (1999).

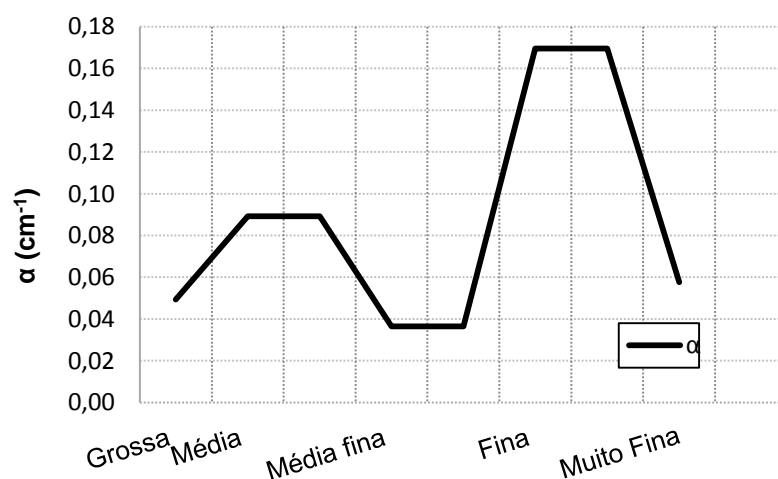


Figura 39: Variação dos valores médio do parâmetro α com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).

Observa-se na Figura 39 que o comportamento do valor médio de α quando relacionado com a classificação textural dos solos é inconsistente. Assim, não foi possível observar uma correlação da classe textural com a média dos valores de α .

Para o parâmetro n_v observa-se uma tendência de decréscimo com o aumento % finos do solo, ou seja, para a classe textural Grossa, observam-se os maiores valores de n_v e para a classe textural Muito fina obtêm-se os menores valores. A grande variação de n_v acontece até a classificação média, após ele permanece praticamente constante. Resultados semelhantes foram observados para a primeira classificação do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) que nos leva a acreditar que, aparentemente, o parâmetro n_v é influenciado pela granulometria/textura do solo para uma determinada % de finos. As análises realizadas neste trabalho sugerem que a determinação desta % é indicada pela variação da condutividade hidráulica saturada com a % finos (Figura 18). Verificou-se que para teores de finos menores que 30% o parâmetro n_v é dependente do valor de k_s e para valores maiores que esta porcentagem de finos, não foi possível observar se existe ou não esta correlação considerando a grande variabilidade dos dados analisados.

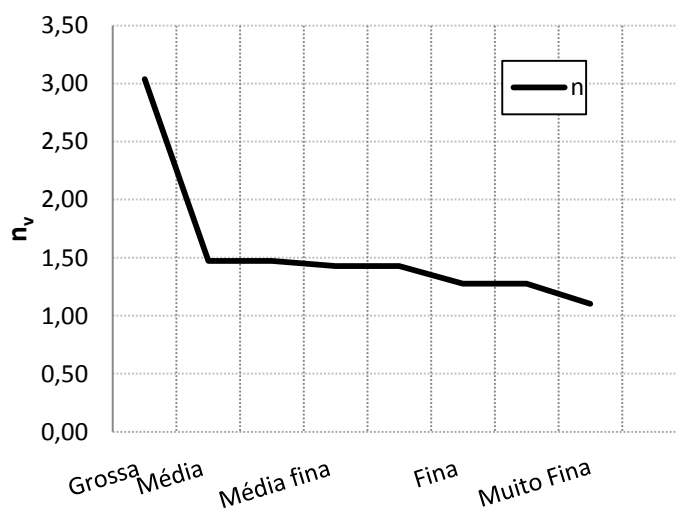


Figura 40: Variação dos valores médio do parâmetro n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.

Ao analisar os valores médios dos parâmetros Θ_r e Θ_s (Figura 41 e Figura 42) verificou-se que para as classes texturais Grossa, Média e Média fina o valor

máximo de Θ_r nas amostras avaliadas é pouco acima de 6%. O menor valor de Θ_r considerado pelo programa Roseta é 0%. Para as classes texturais Fina e Muito Fina o valor está entre 10 e 15%. Em relação à Θ_s (ou porosidade do solo), o valor mínimo encontrado foi na classe textural Grossa e é aproximadamente 38%; o máximo, na classe textural Muito Fina sendo aproximadamente 64%. Observa um crescimento “suave” nos valores de Θ_r e Θ_s . Os valores de Θ_s apresentam maior dispersão nas amostras com alto teor de fino. Para o grupo textural Fino o desvio padrão é de 12% e para o Grupo Muito Fino esse desvio padrão chega a 17,32%.

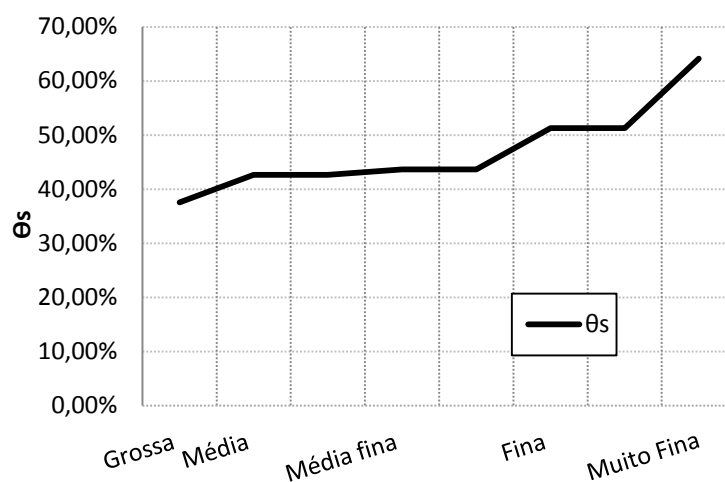


Figura 41: Variação dos valores médios dos parâmetros Θ_s com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.

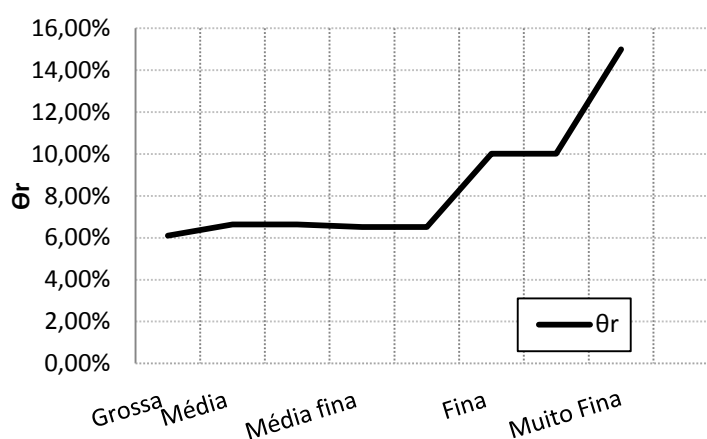


Figura 42: Variação dos valores médios dos parâmetros Θ_r com a classificação textural proposta por Wosten et al. 1999.

4.3.2 Análise da mediana

Para as curvas de retenção na Figura 43, utilizou-se a mediana dos parâmetros independentes. O limite superior até aproximadamente 85% do grau de saturação é definido pela curva de retenção formada pelas amostras de textura muito fina, a partir de aproximadamente 85% do grau de saturação o limite superior e o maior valor da entrada de ar são definidos pelas amostras de textura média fina. Este resultado não é consistente, uma vez que, as maiores porcentagens de finos estão no grupo textural “muito fina”. Fredlund et al. (1997) menciona que a previsão da curva de retenção obtida a partir da distribuição granulométrica (ou textural) é mais precisa para os solos arenosos, apenas razoáveis para os solos siltosos e mais difícil para argilas e “Loans”. Os resultados são mais sensíveis a porosidade e mais pesquisas são necessárias nesta área. O limite inferior formado pela classe textural Grossa está coerente. A curva de retenção formada pelas amostras da classe textural “grossa” possui os menores valores de % de finos o que resulta também no menor valor de entrada de ar. Observa-se que a forma das curvas está consistente com a literatura (ver Figura 8).

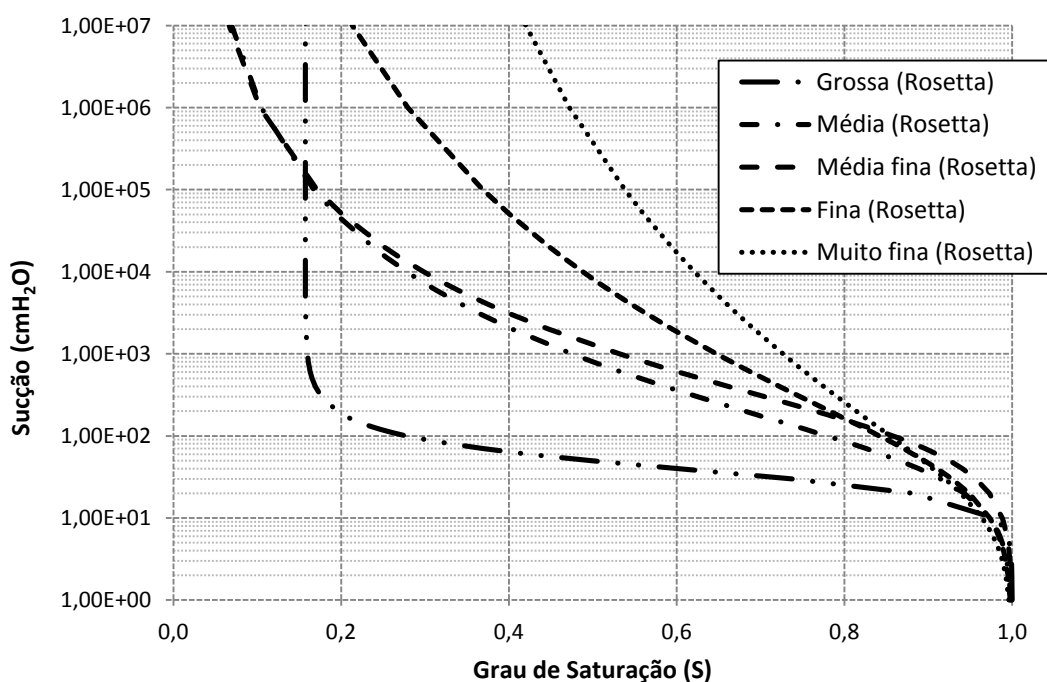


Figura 43: Curvas de retenção hipotéticas, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir da *mediana* dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999).

Ao analisarmos a variação dos valores das medianas de α com cada classe textural (Figura 44), observamos que existe uma tendência de decréscimo até a classificação média fina. Na classificação fina e muito fina o valor de α cresce de 0,1 a aproximadamente 0,7. Esse comportamento não é consistente com o mostrado na literatura.

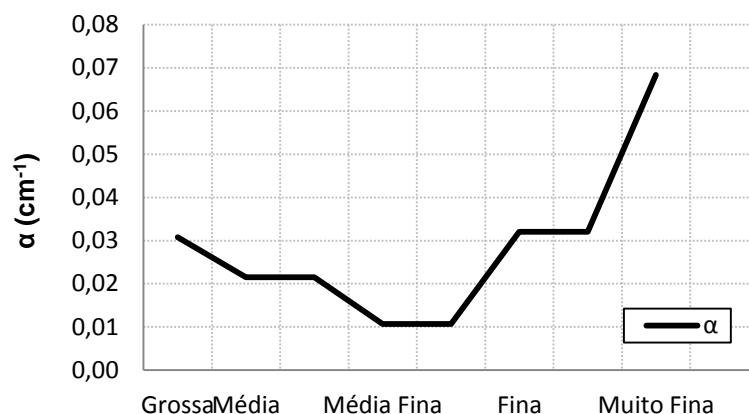


Figura 44: Variação dos valores das medianas do parâmetro α (cm^{-1}) com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).

Para o parâmetro n_v observa-se uma tendência de decréscimo com o aumento % finos do solo. A grande variação de n_v acontece até a classificação média, após ele permanece praticamente constante (Figura 45). O parâmetro n_v comportou-se da mesma forma para todas as classificações, independente se utilizou a média ou a mediana das amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Assim, conforme já mencionado em todas as conclusões preliminares, aparentemente, o parâmetro n_v é influenciado pela granulometria/textura do solo para uma determinada % de finos. No presente trabalho a determinação desta % é definida pela condutividade hidráulica saturada (Figura 18). Após essa porcentagem de finos, o parâmetro n_v parece ser um parâmetro de ajuste.

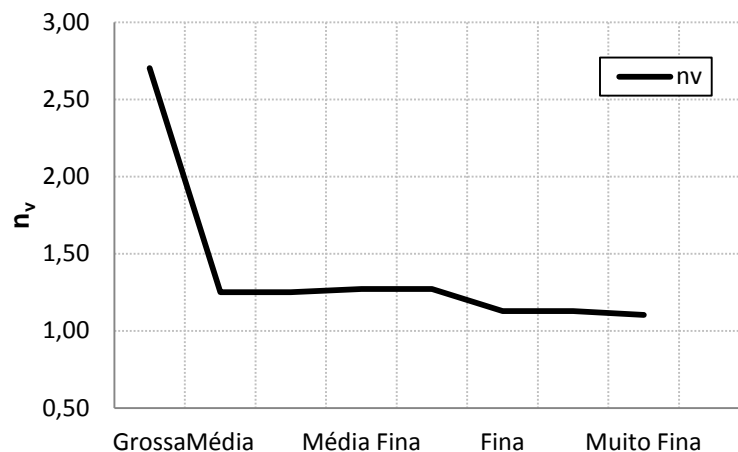


Figura 45: Variação dos valores das medianas do parâmetro n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).

Ao analisar as medianas do parâmetro Θ_s (Figura 46), verificou-se que há um crescimento considerável de acordo com o aumento da % de finos nas amostras. Observa-se que para a classe textural média a fina, o valor de Θ_r é zero (Figura 47).

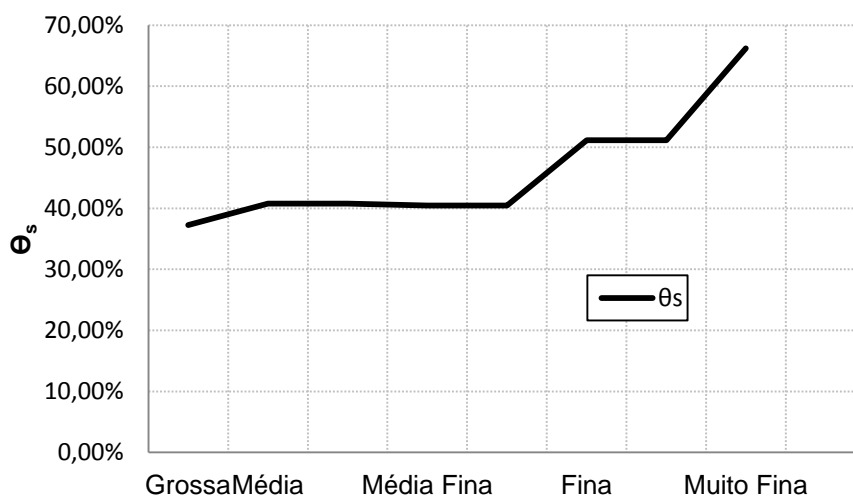


Figura 46: Variação dos valores das medianas dos parâmetros Θ_s com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).

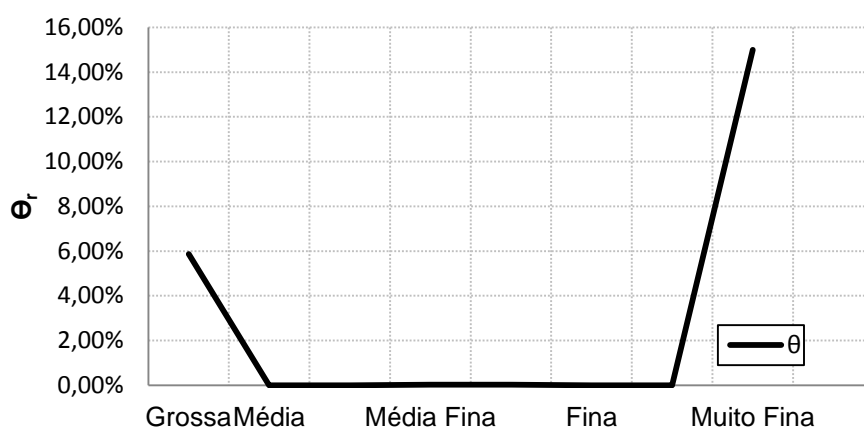


Figura 47: Variação dos valores das medianas dos parâmetros Θ_r , com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999).

A Tabela 15 mostra a variação dos parâmetros quando calculada a média e a mediana para cada subgrupo. Observa-se grande diferença entre os resultados obtidos (média e mediana) para os parâmetros θ_r e α . Tal resultado mostra a grande dispersão entre as amostras apesar de corresponderem a valores típicos (de permeabilidade) de areia siltosa. Os resultados obtidos utilizando os valores das medianas formam mais consistentes do que os resultados obtidos utilizando a média.

Tabela 15: Valores referentes à média e mediana dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para as cinco classes texturais propostas por (Wosten et al. 1999).

Classe textural	θ_r		θ_s		α		n_v	
	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
Grossa	6,11%	5,86%	37,57%	37,25%	0,05	0,03	3,04	2,70
Média	6,64%	0,00%	42,67%	40,79%	0,09	0,02	1,47	1,25
Média fina	6,51%	0,03%	43,63%	40,44%	0,04	0,01	1,43	1,27
Fina	10,02%	0,00%	51,27%	51,15%	0,17	0,03	1,28	1,13
Muito Fina	15,00%	15,00%	64,12%	66,19%	0,06	0,07	1,10	1,10

4.4 Banco de dados HYPRES (Wosten et al. 1999)

As curvas de retenção apresentadas a seguir foram geradas utilizando a equação de van Genuchten (1980) e os parâmetros independentes da tabela 4

capítulo 2 (item 2.5.3), apresentada por Wosten et al. (1999) que tem como banco de dados o HYPRES (*Hydraulic Properties of European Soils*). Este subcapítulo tem como objetivo fundamental dar base ao leitor para entender o próximo subcapítulo onde se apresenta as comparações entre dois bancos de dados (Rosetta (Schaap et al., 2001) e HYPRES (Wosten et al., 1990) para solos temperados com parâmetros independentes diferentes.

A Figura 48 apresenta as curvas de retenção solo água de secagem para o grupo dos subsolos. Pode-se observar que os limites inferiores e superiores estão coerentes. Para um grau de saturação de 60% tem-se uma diferença de mais de 1000 cmH₂O da curva de retenção Muito fina para a Grossa. Pouca diferença observa-se entre as classes Média e Media fina.

A Figura 49 apresenta as curvas de retenção solo água de secagem para o grupo dos solos superficiais. Pode-se observar que as curvas de retenção representadas pelas classes texturais Fina e Muito finas são praticamente iguais. O maior valor para entrada de ar é alcançado pela curva da classe textura Média fina. Para um grau de saturação de 60% tem-se uma diferença de menos de 100 cmH₂O da curva de retenção Muito fina para a Grossa. Pouca diferença observa-se entre as classes Média e Media fina. As curvas para solos superficiais são mais suaves que as representadas para as curvas de solos profundos.

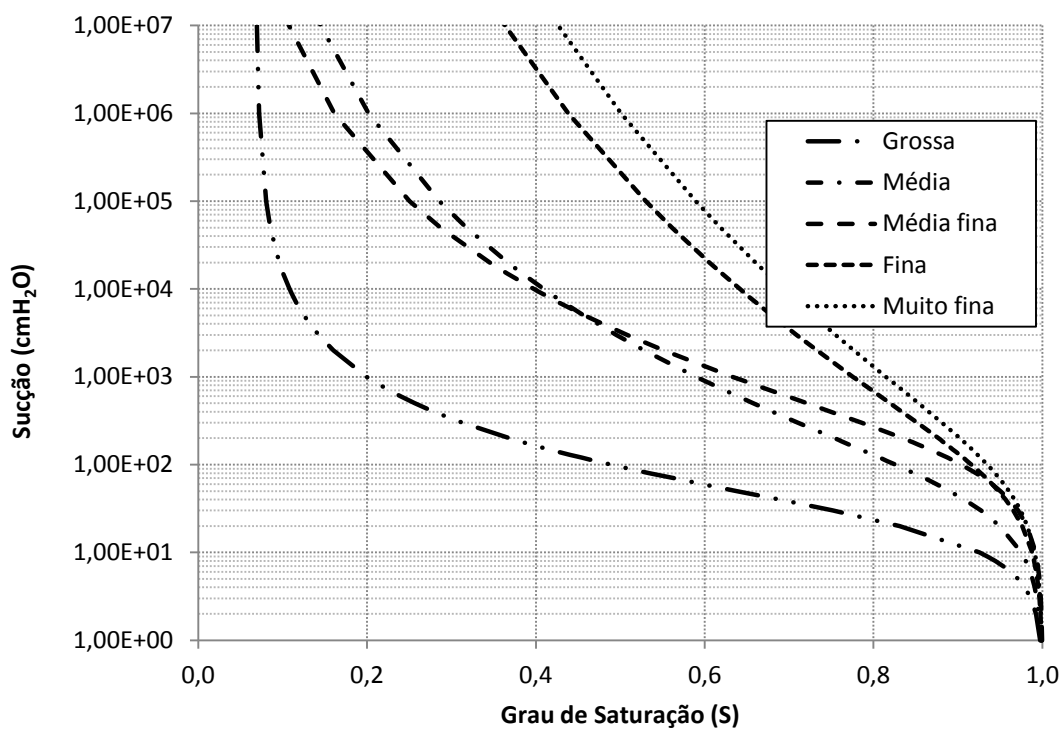


Figura 48: Curvas de retenção, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999) para solos profundos.

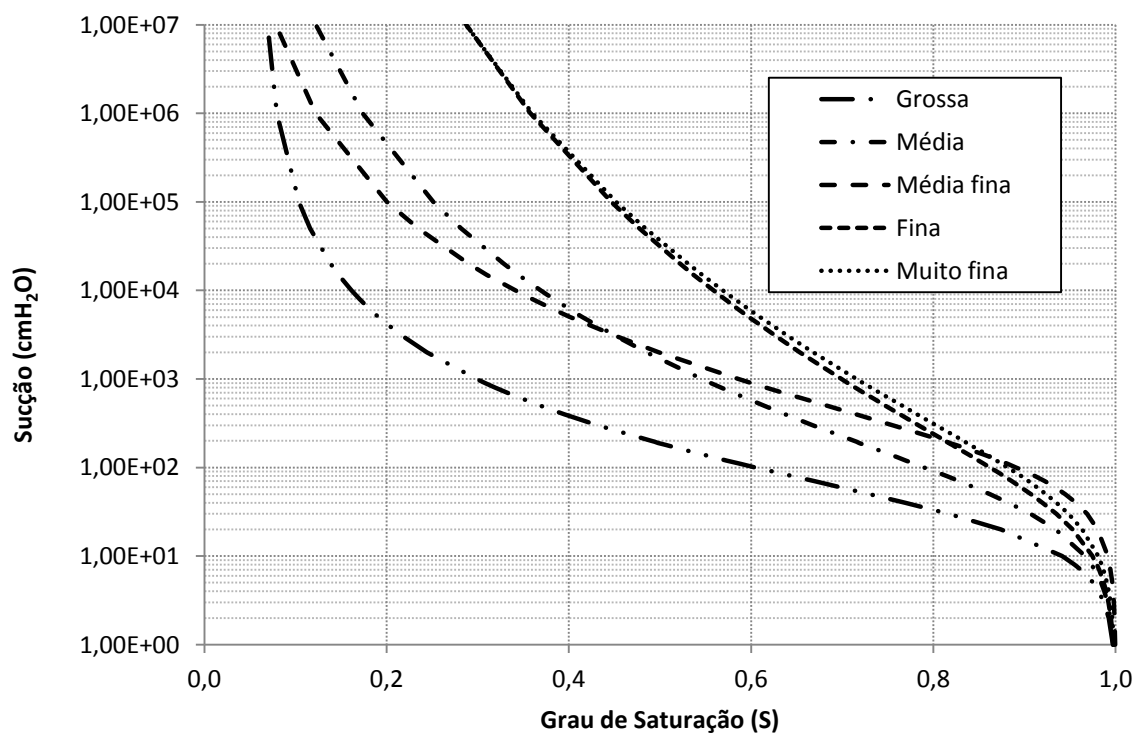


Figura 49: Curvas de retenção, sucção (h) x grau de saturação (S), definidas a partir dos valores dos cinco grupos texturais de Wosten et al. (1999) para solos superficiais.

As figuras 50 e 51 apresentam as variações dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para cada classe textural. Tanto para os solos superficiais quanto para os profundos, o valor de θ_r (a) decresce até a classe textural Média e depois permanece constante com um valor de $0,01\text{cm}^3/\text{cm}^3$. O parâmetro α tem um decréscimo até a classe Média Fina após, apresenta um aumento de forma desorganizada. Há grande diferença entres os valores de α para solos superficiais e profundos quanto à classe Fina e Muito Fina, mas no geral o comportamento é o mesmo. Ao contrário do que se esperava, no entanto, semelhante aos resultados anteriores, o parâmetro α apresenta-se de forma caótica, não possuindo relação com a granulometria dos solos em estudo. Não se observou também relação deste parâmetro com os valores de entrada de ar das curvas de retenção apresentadas nas figuras 48 e 49. Para os demais parâmetros, o comportamento e os valores são razoavelmente semelhantes às análises anteriores.

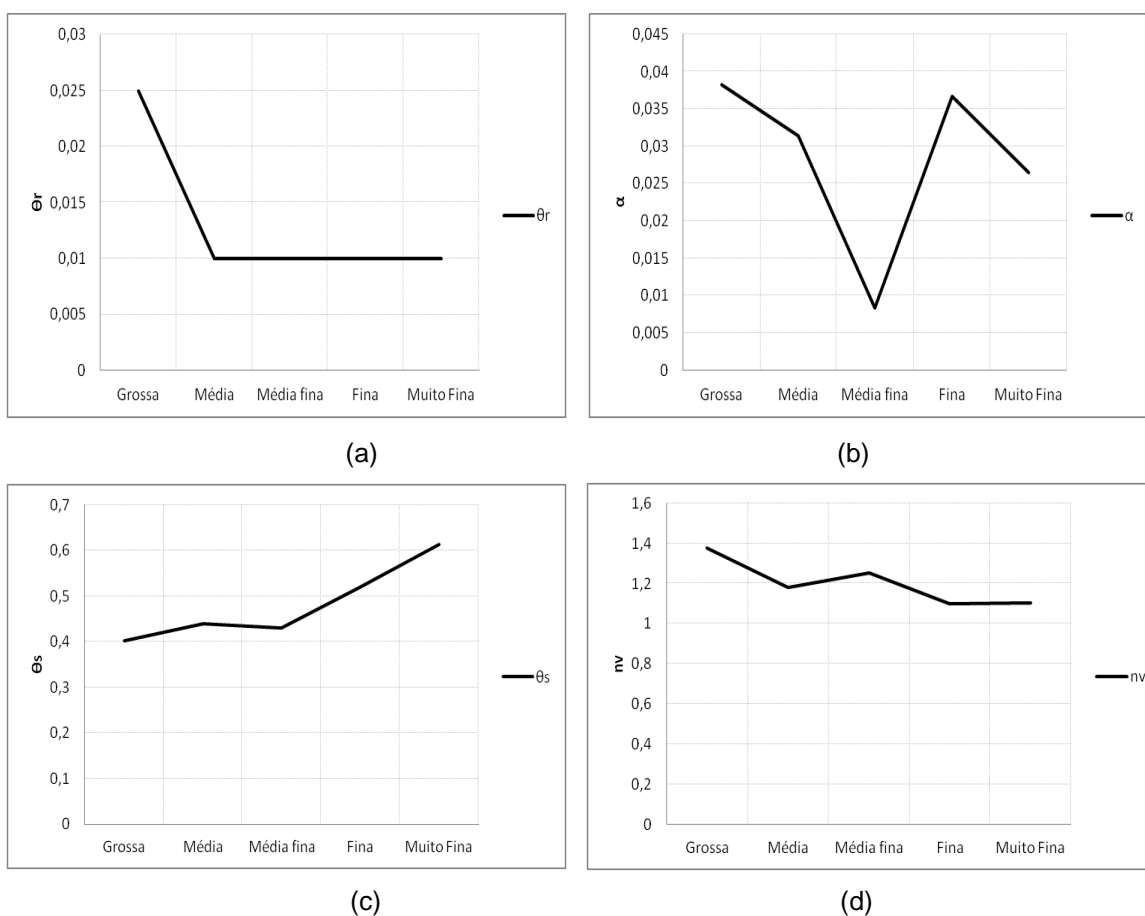


Figura 50: Variação dos valores dos parâmetros (a) θ_r , (b) α , (c) θ_s e (d) n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para solos profundos.

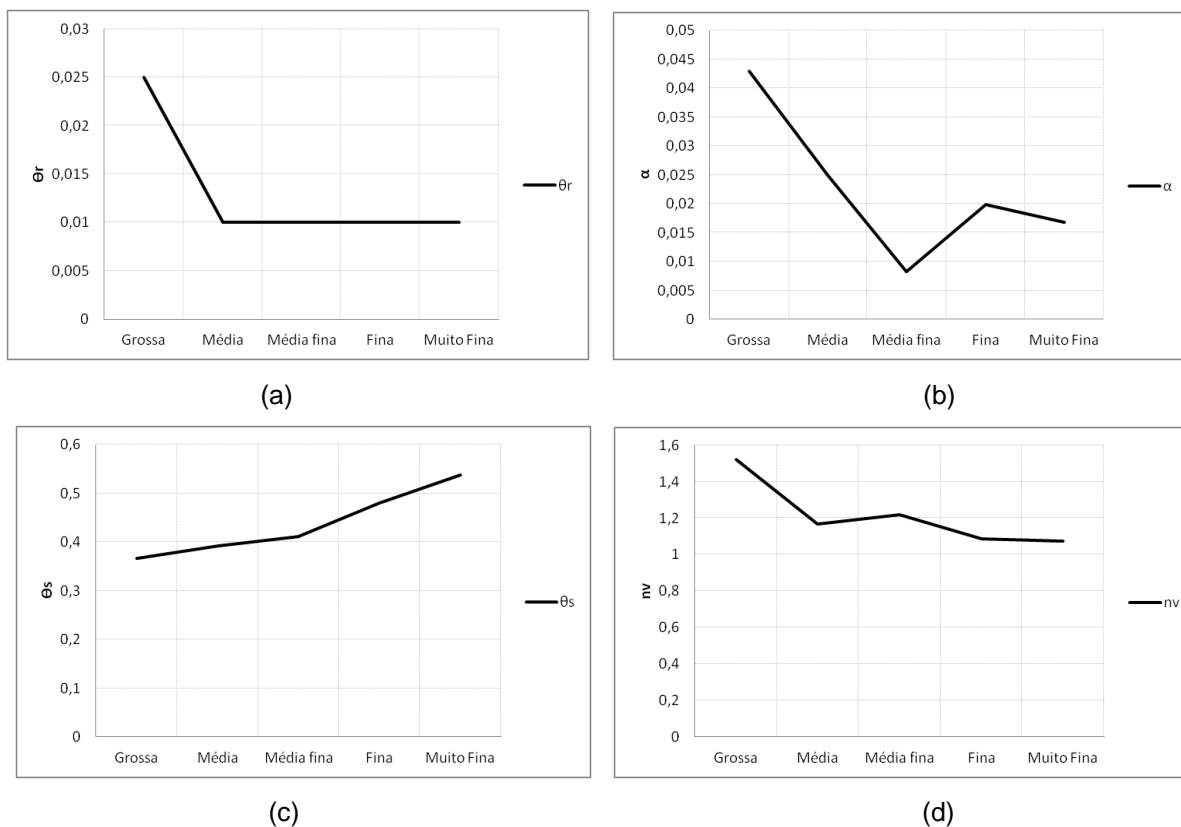


Figura 51: Variação dos valores dos parâmetros (a) Θ_r , (b) α , (c) Θ_s e (d) n_v com a classificação textural proposta por Wosten et al. (1999) para solos superficiais.

4.5 Comparação entre o Banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e valores apresentados por Wosten et al. (1999)

As figuras 52, 53 e 54 apresentam uma comparação entre as curvas de retenção obtidas com os parâmetros propostos Wosten et al. (1999) para o banco de dados apresentados na tabela 4 e as curvas obtidas pelas amostras no banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001). As curvas de retenção, para cada classe textural, geradas utilizando as médias dos parâmetros do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) foram comparadas com as curvas de retenção geradas com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos. Essas comparações podem ser observadas nas figuras 52a, 52c, 53a, 53c e 54a identificadas como “médios”. As curvas de retenção, para cada classe textural, geradas utilizando as medianas dos parâmetros do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) foram comparadas com as curvas de retenção geradas com os

parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos superficiais. Essas comparações podem ser observadas nas figuras 52b e d, 53b e d e 54b identificadas como “medianas”.

As curvas obtidas com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) são mais suaves e possuem os valores de entrada de ar relativamente iguais quando comparado com a mesma classe textural das curvas de retenção obtidas com o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Resultados semelhantes foram obtidos com as curvas de retenção obtidas com a primeira classificação textural para o banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) onde os valores de entrada de ar não diferem muito entre os subgrupos “0 a 10% de finos” e “90 a 100% de finos”. Fredlund et al. (1997) menciona que a previsão da curva de retenção obtida a partir da distribuição granulométrica (ou textural) é mais precisa para os solos arenosos e apenas razoáveis para os solos siltosos, para argilas e “Loans” esta previsão é mais difícil. Os resultados são mais sensíveis à porosidade e mais pesquisas são necessárias nesta área.

Observa-se que nas figuras 52, 53, 54 os valores medianos dos parâmetros do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) se aproximam dos valores sugerido por Wosten et al. (1999). Os valores médios não formam uma boa representatividade do banco de dados para as classes texturais média, média fina e fina.

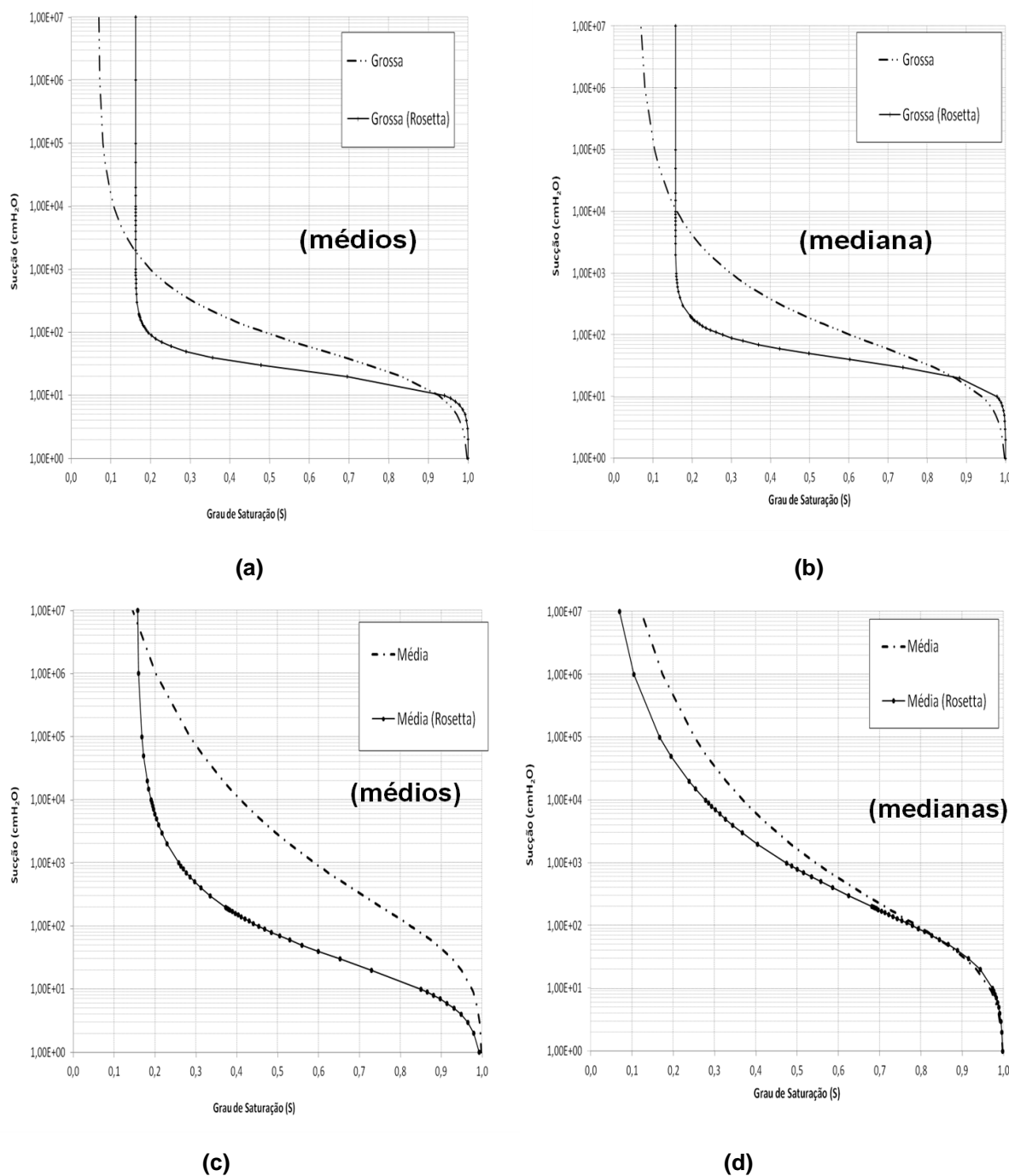


Figura 52: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Grossa obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. (c) e (d) Curvas de retenção para classificação textural Média obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos superficiais e profundos, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4.

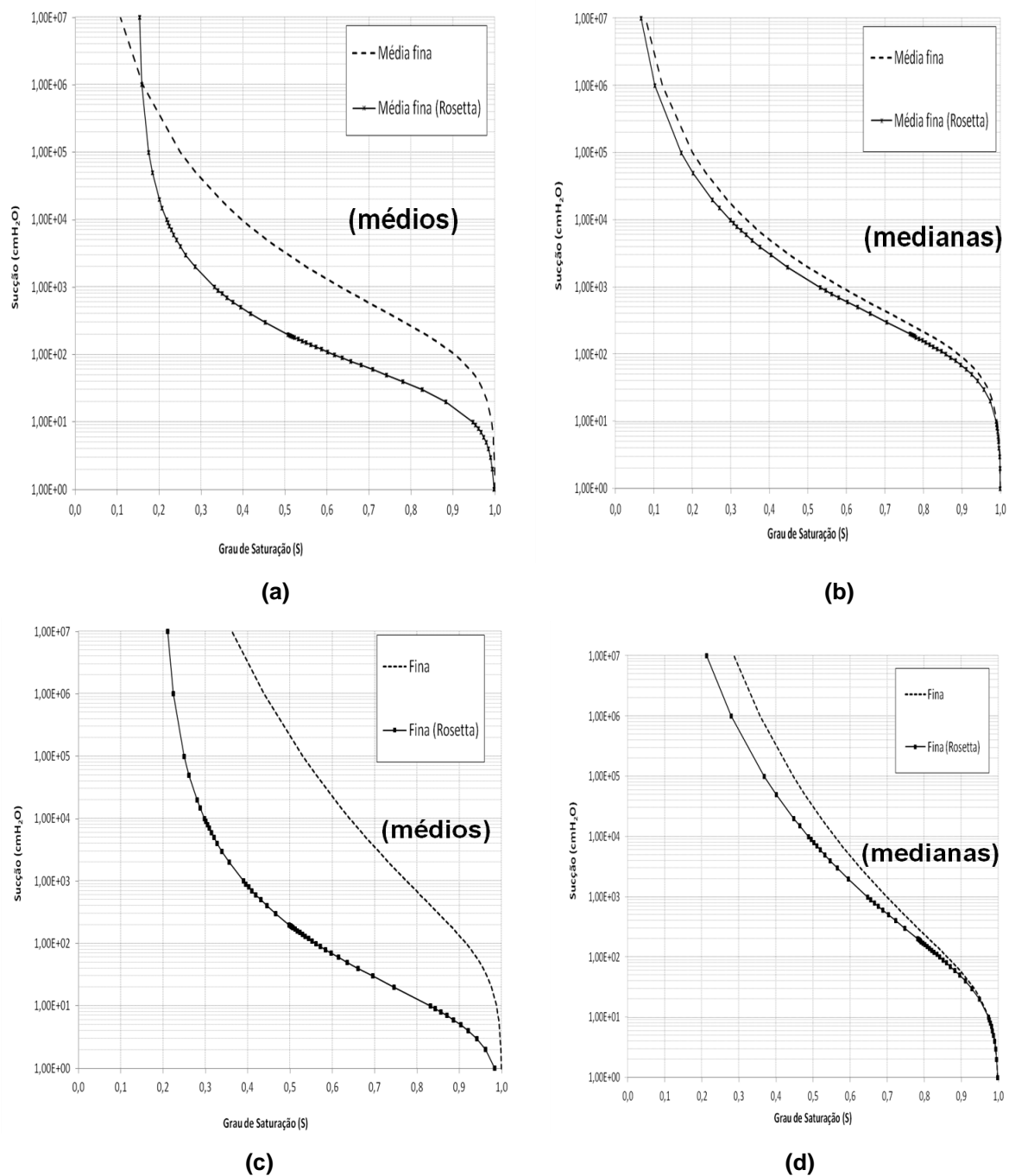


Figura 53: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Média Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4. (c) e (d) Curvas de retenção para classificação textural Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos superficiais e profundos, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4.

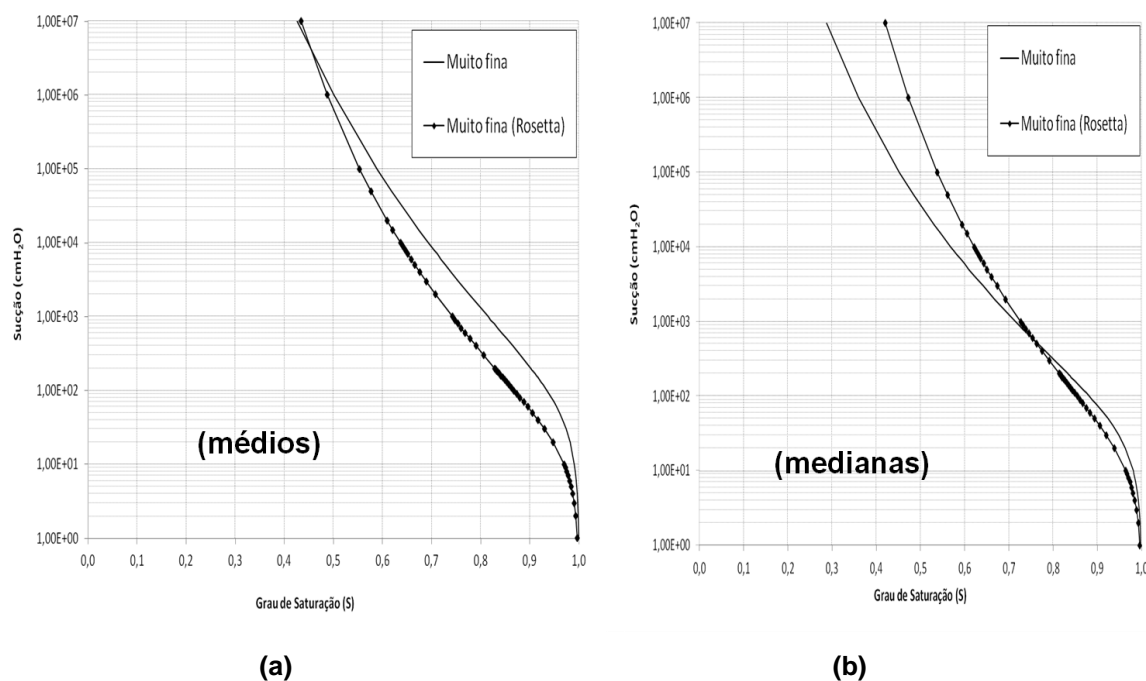


Figura 54: (a) e (b) Curvas de retenção para classificação textural Média Fina obtidas com a média e mediana dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com os parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999) para solos profundos e superficiais, respectivamente, dos valores apresentados na tabela 4.

As tabelas 16 a 19 mostram que os valores obtidos com a mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) se aproximam mais dos parâmetros sugeridos por Wosten et al. (1999). Ao compararmos os valores obtidos para os parâmetros independentes do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) com os propostos por Wosten et al. (1999) observa-se diferença considerável para os valores de α .

Resultado semelhante observa-se para o parâmetro n_v ao considerarmos a classe textural Grossa. Os valores de θ_r possuem grandes diferenças para a classe textural Grossa e Muito fina. Já para o parâmetro θ_s os resultados foram semelhantes ao compararmos os valores médios e as medianas do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) com os valores sugeridos por Wosten et al. (1999).

Tabela 16: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de α .

Classe Textural	Valores de α (cm ⁻¹)			
	Mediana (ROSETTA)	Media (ROSETTA)	Solos profundos (Wosten et al, 1999).	Solos superficiais (Wosten et al, 1999).
Grossa	0,03	0,05	0,04	0,04
Média	0,02	0,09	0,02	0,03
Média Fina	0,01	0,04	0,01	0,01
Fina	0,03	0,17	0,02	0,04
Muito Fina	0,07	0,06	0,02	0,03

Tabela 17: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de n_v .

Classe Textural	Valores de n_v			
	Mediana (ROSETTA)	Media (ROSETTA)	Solos profundos (Wosten et al, 1999)	Solos superficiais (Wosten et al, 1999)
Grossa	2,70	3,04	1,52	1,38
Média	1,25	1,47	1,17	1,18
Média Fina	1,27	1,43	1,22	1,25
Fina	1,13	1,28	1,09	1,10
Muito Fina	1,10	1,10	1,07	1,10

Tabela 18: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Guber Wosten et al. (1999) para os valores de Θ_r .

Classe Textural	Valores de Θ_r (cm ³ /cm ³)			
	Mediana (ROSETTA)	Media (ROSETTA)	Solos profundos Wosten et al. (1999)	Solos superficiais Wosten et al. (1999)
Grossa	0,06	0,06	0,03	0,03
Média	0,00	0,07	0,01	0,01
Média Fina	0,00	0,07	0,01	0,01
Fina	0,00	0,10	0,01	0,01
Muito Fina	0,15	0,15	0,01	0,01

Tabela 19: Comparação entre média e mediana do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e os valores propostos por Wosten et al. (1999) para os valores de Θ_s .

Classe Textural	Valores de Θ_s (cm ³ /cm ³)			
	Mediana (ROSETTA)	Media (ROSETTA)	Solos profundos (Wosten et al. (1999))	Solos superficiais (Wosten et al. (1999))
Grossa	0,37	0,38	0,37	0,40
Média	0,41	0,43	0,39	0,44
Média Fina	0,40	0,44	0,41	0,43
Fina	0,51	0,51	0,48	0,52
Muito Fina	0,66	0,64	0,54	0,61

Os valores medianos dos parâmetros do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) apresentam resultados semelhantes aos propostos por Wosten et al., 1999. Caso não haja dados laboratoriais e o solo em estudo é semelhante ao apresentado no banco de dados, o uso deste banco de dados pode apresentar uma boa estimativa da curva de retenção deste solo.

4.6 Curvas de retenção com os parâmetros propostos por Gerscovich e Sayão (2002)

As curvas de retenção obtidas para cada uma das amostras de solos apresentadas na Tabela 7 no capítulo Revisão Bibliográfica são apresentadas na Figura 55. A tabela 20 apresenta as porcentagens de areia, silte e argila para cada amostra apresentada por Gerscovich e Sayão (2002) e a classificação dessas amostras segundo Wosten et al. (1999). Observa-se que as amostras 7 e 8 (solos coluviais) que possuem as maiores % de argilas apresentaram os mais baixos valores de entrada de ar. O maior valor de entrada de ar é obtido com a amostra do test #3, solo residual que possui 63% de areia. Apesar da classificação de Wosten et al. (1999) ter sido desenvolvida para solos sedimentares, aplicou-se nos solos tropicais apresentados por Gerscovich e Sayão (2002) para observar se os parâmetros são aproximados.

Conforme discutido no capítulo da revisão bibliográfica a curva de retenção de solos argilosos possuem uma maior capacidade de retenção de água em relação aos solos arenosos. Quanto maior a plasticidade das argilas, maior será o valor de entrada de ar e de sucção residual (Fredlund, 1998). As curvas de retenção obtida pelo banco de dados de Gerscovich e Sayão (2002) apresentaram certa incoerência quando se analisa os limites superiores e inferiores. Era esperado que a amostra que apresenta mais porcentagens de finos possuísse maiores valores de sucção, o que não ocorreu.

Tabela 20: Distribuição granulométrica das amostras de solo apresentada por Gerscovich e Sayão (2002) e classificação segundo Wosten et. al. (1999) (adaptado de Gerscovich e Sayão (2002)).

Test #	Solo	Classificação Wosten et al. (1999)	argila (%)	Silte(%)	Areia (%)
1	Residual	Grossa	8,11	11,30	65,60
2	Residual	Grossa	10,00	15,00	75,00
3	Residual	Média	9,50	27,50	63,00
4	Residual	Média	22,00	17,00	61,00
5	Residual	Grossa	17,40	13,70	68,90
6	Residual	Média	14,00	19,00	64,00
7	Coluvial	Fina	41,20	4,50	50,50
8	Coluvial	Fina	59,00	8,00	33,00
9	Sedimentar	Média	27,30	11,90	60,80
10	Sedimentar	Média	27,40	5,90	66,70
11	Sedimentar	Média	14,30	44,60	41,10

No entanto, quando analisamos as curvas de retenção separadas por tipos de solo, ou seja, quando se analisa separadamente os solos residuais, os solos coluviais e os solos sedimentares, observa-se que há coerência quanto aos limites superiores e inferiores, bem quando se avalia os valores da entrada de ar.

Assim como Gerscovich e Sayão (2002), ao analisar as curvas de retenção, foram encontradas diferenças significativas nos solos sedimentares (test#9 e #10) onde as amostras foram extraídas em profundidades diferentes. O comportamento da curva de retenção varia significativamente dentro de uma camada de solo,

possivelmente devido a diferenças na mineralogia do solo, estado de tensão, distribuição de tamanho de poro e / ou a estrutura do solo. Esta análise deve se estendida durante a tentativa de modelar o comportamento do fluxo usando uma única curva de retenção para um dado tipo de solo (Gerscovich e Sayão, 2002).

Segundo Gerscovich e Sayão (2002) a equação em estudo pode ser utilizada para fornecer uma boa estimativa da curva de retenção de solos brasileiros. Destacam ainda que os valores de entrada de ar foram assumidos como sendo igual a 1kPa para todo o teste, apesar de diferentes percentagens de materiais granulares e finos. É muito difícil de definir o valor de entrada de ar baseado em dados experimentais, por causa de limitações de uso de técnicas de laboratório para a aplicação de sucção valores a inferiores a 1 kPa. Não foi observado influencia do valor da entrada de ar sobre o ajuste da curva.

Para os solos brasileiros (Figura 55), no entanto, esperava-se que a curva de retenção da amostra test# 8 possuísse o maior valor de entrada de ar, uma vez que possui 59 % de argila, o que não ocorreu. Resultados semelhantes foram obtidos com as curvas de retenção obtidas com a primeira e segunda classificação textural para o banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001) onde os valores de entrada de ar não diferem muito entre os subgrupos “0 a 10% de finos” e “90 a 100% de finos”.

As curvas de retenção são frequentemente avaliadas sem incluir a estrutura heterogênea dos poros do solo que representam. Dessa forma, as expressões que representam as curvas de retenção assumem distribuição unimodal do tamanho dos poros do solo, ou seja, com o máximo da distribuição dos poros correspondendo a um único diâmetro característico (Lima, 2009).

Segundo Zurmuhl e Durner (1998), a utilização destes modelos pode ser insatisfatória, pois na maioria dos solos naturais a curva de retenção próxima à saturação apresenta uma declividade acentuada, onde o modelo unimodal não consegue reproduzir adequadamente o processo de retenção. Para este tipo de

solo, um modelo sigmodal para estimar a curva de retenção será insatisfatório (Kosugi et al., 2002).

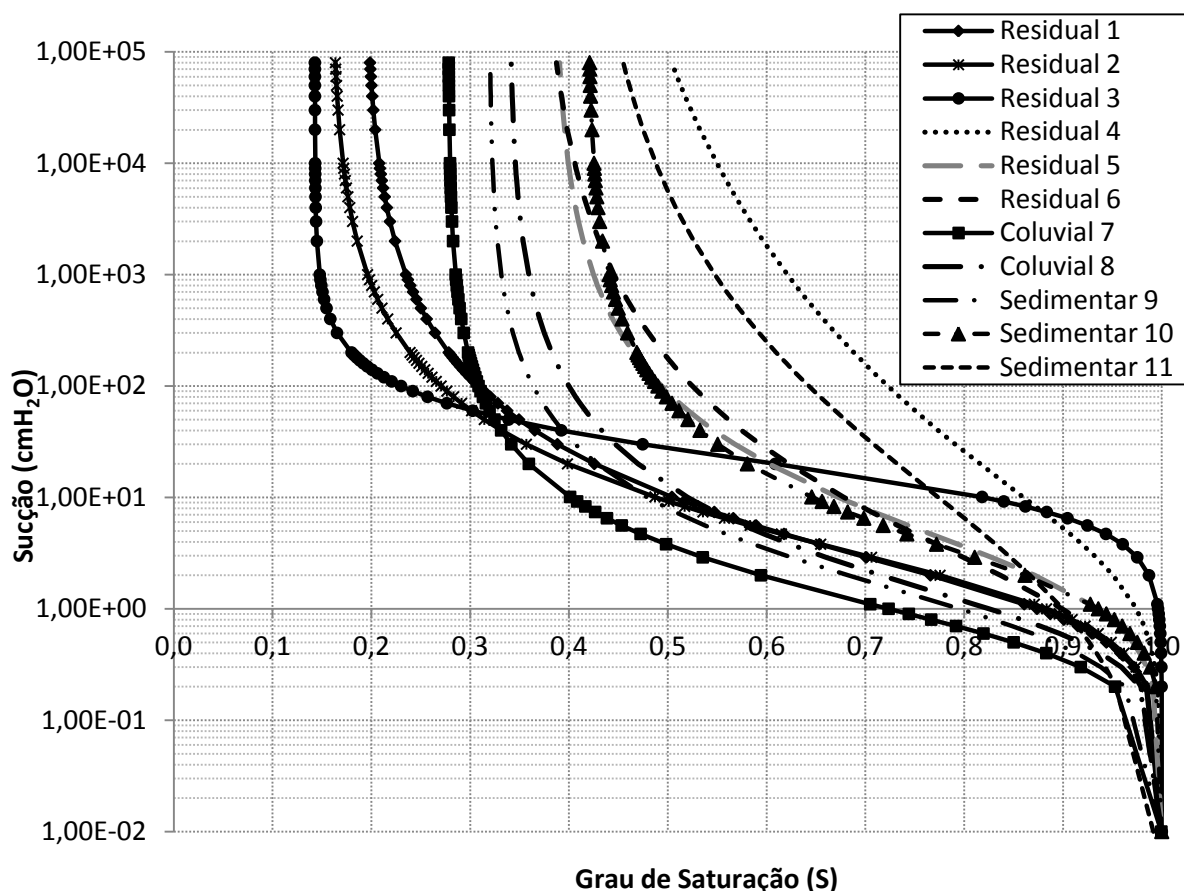


Figura 55: Curvas de retenção dos solos brasileiros obtidos a partir dos parâmetros apresentados por Gerscovich e Sayão (2002).

Rahardjo et al. (2012), no entanto, mostram resultados com misturas de distribuição granulométrica com características bimodais que apresentam curva de retenção unimodal, pois neste caso a porosidade é determinada pela granulometria fina. É muito difícil precisar a porcentagem granulométrica de cada grupo textural para obter um comportamento bimodal. Mais estudos são necessários. O que não se pode afirmar é que uma estrutura bimodal obrigatoriamente gerará uma curva de retenção bimodal, uma vez que ao ocupar os vazios gerados pela granulometria mais grossa, os finos passam a determinar as características de permeabilidade do solo, tornando assim, uma curva de retenção unimodal. Yuan e Ding (2011) mostram que ao misturar cascalho e argila onde a argila representa mais que 50%, a curva de retenção é definida pela argila e pouco afetada pelo cascalho. Se o conteúdo de

cascalho for maior do que 50%, o vazio entre os cascalhos podem não ser preenchidos pela argila, de modo que a água é armazenada entre os vazios do cascalho.

A Tabela 21 (adaptada de Gerscovich e Sayão, 2002) apresenta os parâmetros para cada amostra e o valor da entrada de ar obtido pela Figura 55. Não observou-se relação entre o parâmetro α e o valor de entrada de ar. Ao compararmos os parâmetros da tabela 21 com os propostos por Wosten et al. (1999) para solos sedimentares observa-se que os valores são muito diferentes.

Resultado semelhante foi encontrado por Hodnett e Tomasella (2002) que mostraram que não se pode misturar parâmetros de solos temperados com parâmetros de solos tropicais devido às enormes diferenças nas propriedades físicas entre os solos.

Tabela 21: Parâmetros da curva de retenção (θ_s , θ_r , α , n_v) valor de entrada de ar para as curvas de retenção (VEA) e classificação de Wosten et al. (1999). (Adatado de Gerscovich e Sayão, 2002).

test #	Solo	Classificação Wosten et al. (1999)	θ_s (%)	θ_r (%)	α (cm ⁻¹)	n_v	VEA (cmH ₂ O)
1	Residual	Grossa	52,00	10,00	0,86	1,50	0,3
2	Residual	Grossa	44,00	7,00	0,68	1,45	0,3
3	Residual	Média	49,00	7,00	0,06	1,80	7,0
4	Residual	Média	52,00	20,00	0,46	1,20	0,9
5	Residual	Grossa	39,00	15,00	0,53	1,36	0,4
6	Residual	Média	41,00	15,00	1,00	1,20	0,3
7	Coluvial	Fina	54,00	15,00	1,80	1,60	0,2
8	Coluvial	Fina	59,00	20,00	1,50	1,70	0,5
9	Sedimentar	Média	47,00	15,00	1,30	1,40	0,5
10	Sedimentar	Média	43,00	18,00	0,60	1,60	0,7
11	Sedimentar	Média	45,00	18,00	0,45	0,60	0,5

Com todas as análises referentes ao parâmetro α , podemos observar que este parâmetro não possui significado físico (relacionado com o valor da entrada de ar) nem é relacionado com a classificação textural sendo, portanto, apenas um parâmetro de ajuste. Resultados semelhantes foram encontrados por Rahardjo et al. (2012), que apesar de utilizar a equação de Fredlund e Xing (1994) para solos residuais e misturas, também não encontrou correlação entre o valor da entrada de

ar e o parâmetro α . Além disso, conforme resultados apresentados na Tabela 22 é preciso tomar cuidado ao adotar parâmetros como verdadeiros.

Tabela 22: Variação de α para os mais diversos autores comentados neste trabalho.

Faixa de variação α (cm ⁻¹)			
Autor	Valor máximo	Valor mínimo	Obs.
Rosetta (Schaap et al.,2001) (Mediana)	0,037	0,012	
Rosetta (Schaap et al.,2001) (Média)	0,133	0,047	
Wosten et al. (1999)	0,040	0,010	Solos profundos
Wosten et al. (1999)	0,040	0,010	Solos superficiais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,670	0,017	Solos tropicais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,145	0,008	Solos temperados
Gerscovich e Sayão (2002).	1,800	0,060	Solos tropicais

O parâmetro n_v quando avaliado isoladamente, está aparentemente relacionado com a granulometria/ textura. Quanto maior o teor de areia, maior valor de n_v . A Tabela 23 mostra os valores máximos e mínimos deste parâmetro considerando vários autores. No entanto, mesmo comparando para solos tropicais, os valores de n_v foram muitos diferentes.

Tabela 23: Variação de n_v para os mais diversos autores comentados neste trabalho.

Faixa de variação n_v			
Autor	Valor máximo	Valor mínimo	Obs.
Rosetta (Schaap et al.,2001) (Mediana)	3,41	1,27	
Rosetta (Schaap et al.,2001) (Média)	3,86	1,30	
Wosten et al. (1999)	1,52	1,07	Solos profundos
Wosten et al. (1999)	1,38	1,10	Solos superficiais
Hodnett e Tomasella, 2002	2,39	1,38	Solos tropicais
Hodnett e Tomasella, 2002	2,68	1,09	Solos temperados
Gerscovich e Sayão (2002)	1,80	0,60	Solos tropicais

Os parâmetros α e n_v da equação de van Genuchten (1980), conforme mencionado na literatura, podem ser associados ao valor da entrada de ar tal que, quanto maior o valor de α , menor o valor da entrada de ar que é diretamente associado conforme o modelo capilar ao tamanho das partículas do solo, ou seja,

maior o diâmetro dos poros. Entretanto, além de todas as conclusões ditas anteriormente para o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e para a tabela proposta por Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002), a equação proposta possui várias combinações de α e n_v que fornecem a mesma curva (Figura 56). Isto faz com que os valores de α e n_v determinados por ajuste de curva percam o significado físico assim, a dificuldade senão impossível associar a variação de α e n_v com a granulometria em um banco de dados.

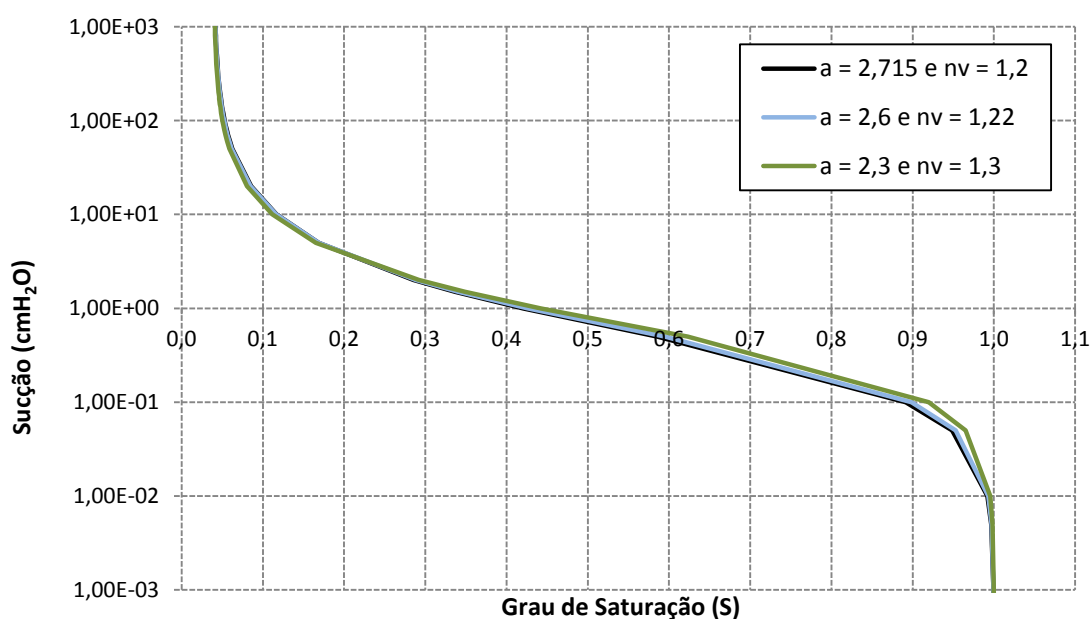


Figura 56: Variação de α (cm^{-1}) e n_v obtendo a mesma curva de retenção. Amostra original: areia argilo siltosa com $\alpha = 2,715$ (cm^{-1}) e $n_v = 1,2$.

O valor de água residual, Θ_r , é o teor de água em que a inclinação da curva de retenção é igual à zero a um valor muito grande de sucção. Segundo van Genuchten (1980), o conteúdo de água residual pode ser medido experimentalmente, por exemplo, pelo teor de água no solo muito seco. Infelizmente, as medições não são feitas rotineiramente, e precisa ser estimado por extrapolação disponíveis, dos dados da curva de retenção solo-água. Ao contrário de Θ_s um parâmetro físico (porosidade do solo) que pode ser medido, para a maioria dos fins, Θ_r só pode ser obtido por ajuste de curva (Hodnett e Tomasella, 2002). Não se observou relação entre Θ_r com a granulometria/textura do solo e houve uma

variação significativa entre as tabelas estudadas neste trabalho e o banco de dados Rosetta (Schaap et al.,2001). Observa-se também variação considerável entre os valores de Θ_r para os solos tropicais (tabela 24).

Tabela 24: Variação de Θ_r para os mais diversos autores comentados neste trabalho.

Faixa de variação Θ_r			
Autor	Valor máximo	Valor mínimo	Obs.
Rosetta (Mediana)	0,069	0,000	
Rosetta (Média)	0,097	0,046	
Wosten et al. (1999)	0,025	0,010	Solos profundos
Wosten et al. (1999)	0,025	0,010	Solos superficiais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,270	0,034	Solos tropicais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,100	0,045	Solos temperados
Gerscovich e Sayão (2002)	0,200	0,070	Solos tropicais

Os valores de Θ_s por ser um parâmetro físico (porosidade do solo) estão relacionados com a granulometria/textura do solo de forma que quanto maior a porcentagem de finos maior o valor de Θ_s . Os valores apresentados na

Tabela 25 apresentam uma coerência entre si. Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002) apresentam resultados muito semelhantes para os solos tropicais. Não houve diferença entre os valores da média e mediana do parâmetro Θ_s encontrados no banco de dado Rosetta (Schaap et al.,2001). Os valores entre Hodnett e Tomasella (2002) e os valores do Banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) também foram semelhantes.

Tabela 25: Variação de Θ_s para os mais diversos autores comentados neste trabalho.

Faixa de variação Θ_s			
Autor	Valor máximo	Valor mínimo	Obs.
Rosetta (Mediana)	0,49	0,37	
Rosetta (Média)	0,50	0,36	
Wosten et al. (1999)	0,54	0,37	Solos profundos
Wosten et al. (1999)	0,61	0,40	Solos superficiais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,58	0,42	Solos tropicais
Hodnett e Tomasella, 2002	0,45	0,36	Solos temperados
Gerscovich e Sayão (2002)	0,59	0,39	Solos tropicais

Precisa-se tomar cuidado ao adotar parâmetros como verdadeiros para as curvas de retenção. De acordo com Hodnett e Tomasella (2002) o uso de uma

tabela de consulta irá depender da disponibilidade de dados, e se a classe de solo em particular é representada no banco de dados. Além disso, parâmetros de solos temperados e parâmetros de solos tropicais não podem ser misturados devido as enormes diferenças nas propriedades físicas entre os solos. Experimentos de laboratórios não podem ser desconsiderados para se obter exatamente a curva de retenção do solo em estudo. Além do mais, é importante observar que muitos parâmetros tabelados não são bem explicados para quais tipos de solos fazem referência. Obter claramente o significado físico dos parâmetros ou a definição se é ou não um parâmetro de ajuste é importante para descrevermos adequadamente a curva de retenção especialmente com respeito ao valor de entrada de ar do solo (apud Rahadjaro et al. 2012).

4.7 Conclusões Parciais

Solos arenosos possuem pequena capacidade de retenção de água por apresentarem grandes poros interconectados em sua estrutura. Assim, a entrada de ar ocorre para pequenos valores de sucção. Os solos siltosos, por sua vez, apresentam comportamento intermediário entre os solos arenosos e argilosos que possuem alta capacidade de retenção de água. Entretanto, isto não foi observado para os estudos realizados com o banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) e com as tabelas apresentadas por Gerscovich e Sayão (2002), Wosten et al. (1999) e Hodnett e Tomasella (2002).

Os diferentes métodos experimentais utilizados para determinar esses dados, a grande variabilidade de solos e regiões, a falta de informação completa das propriedades geotécnicas dos solos e a falta de significado físicos dos parâmetros de ajuste da equação van Genuchten (1980) não possibilitou definir uma função que quantifique a variação dos parâmetros de van Genuchten (1980) com a distribuição granulométrica dos solos analisados neste trabalho. Entretanto, observam-se as seguintes tendências nas análises apresentadas:

- O parâmetro α não está relacionado com a granulometria/textura dos solos nem com o valor de entrada de ar e não deve ser interpretado como tal;
- O parâmetro n_v parece estar relacionado com a granulometria para solos granulares para uma porcentagem de até 30% de finos. Após este valor não se chegou a nenhuma conclusão, e o efeito da distribuição granulométrica no valor do parâmetro não é bem definido para os dados analisados;
- Não se observou relação entre Θ_r com a granulometria/textura do solo. Muitas vezes é utilizado como um parâmetro de ajuste e não é determinado (Leong e Rahardjo, 1997).

4.8 Função de Condutividade hidráulica não saturada

Conforme apresentado no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica), a condutividade hidráulica para solos não saturados depende de variáveis como o índice de vazios, a porosidade, a densidade, a viscosidade, o teor de água e o grau de saturação. A função de condutividade hidráulica é tipicamente descrita em termos de sucção matricial, grau de saturação ou conteúdo volumétrico de água (Lu e Likos, 2000).

Os valores médios da condutividade hidráulica saturada para os dados dos 10 subgrupos avaliados neste trabalho variam de $1,62 \times 10^{-6}$ cm/s a $3,65 \times 10^{-5}$ cm/s, que correspondem a valores típicos de permeabilidade de areia siltosa.

A função de condutividade hidráulica não-saturada do solo, $K(Se)$, é estimada usando a equação de van Genuchten (1980) combinada com as equações propostas por Burdine (1953) e Mualem (1976), tal que:

$$K(Se) = K_s Se^\lambda \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}}) \right]^2 \quad (14)$$

$$Se = \left[1 + (ah)^{n_v} \right]^{-m} \quad (15)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica saturada (grau de saturação igual a 100% e sucção nula), λ = constante empírica, considerado neste trabalho igual a 0,5 (Muallen, 1976), α e n_v são os parâmetros de ajuste da equação de van genuchten (1980).

Para o conjunto de dados, obtido a partir do Programa Rosetta (Schaap et al., 2001) relativos a 554 amostras de diversos solos, foram calculados os valores médios e as medianas dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para cada um dos 10 (dez) subgrupos avaliados neste trabalho (considerando a primeira classificação textural baseada no teor de finos). As Figura 57 à 60 apresentam as relações “K(Se) x sucção (h)” e “K(Se)/Ks x sucção (h)”, para os valores médios e medianas dos parâmetros da equação 15 e 16 respectivamente.

A Figura 57 mostra que apesar das pequenas diferenças observadas entre os valores da condutividade hidráulica saturadas para os subgrupos avaliados neste trabalho (Figura 18), grandes variações são observadas entre os valores da condutividade hidráulica não saturada, tal que para mesmo valor de sucção a condutividade hidráulica não saturada das amostras com até 10% de finos pode ser até 10^{12} vezes menor que a condutividade hidráulica não saturada das amostras com percentual de finos superior a 90%. Nota-se pouca diferença entre o K(Se) entre os subgrupos com “30% - 40%”, “40 - 50%”, “50 - 60%” e “60 - 70%” de finos. Entre os subgrupos “70% - 80%”, “80% - 90%”, e “90 - 100%” de finos também se observa pouca diferença da condutividade hidráulica não saturada.

A Figura 58 apresenta a variação da condutividade hidráulica não saturada com a correspondente sucção para os valores das medianas dos parâmetros dos dez subgrupos para a primeira classificação textural. Observa-se que há um valor maior de sucção para a mesma condutividade hidráulica não saturada quando comparados aos valores obtidos com a média dos parâmetros. Além disso, nota-se

pouca diferença de condutividade hidráulica não saturada para as amostras com os finos variando entre 30 a 100% da amostra.

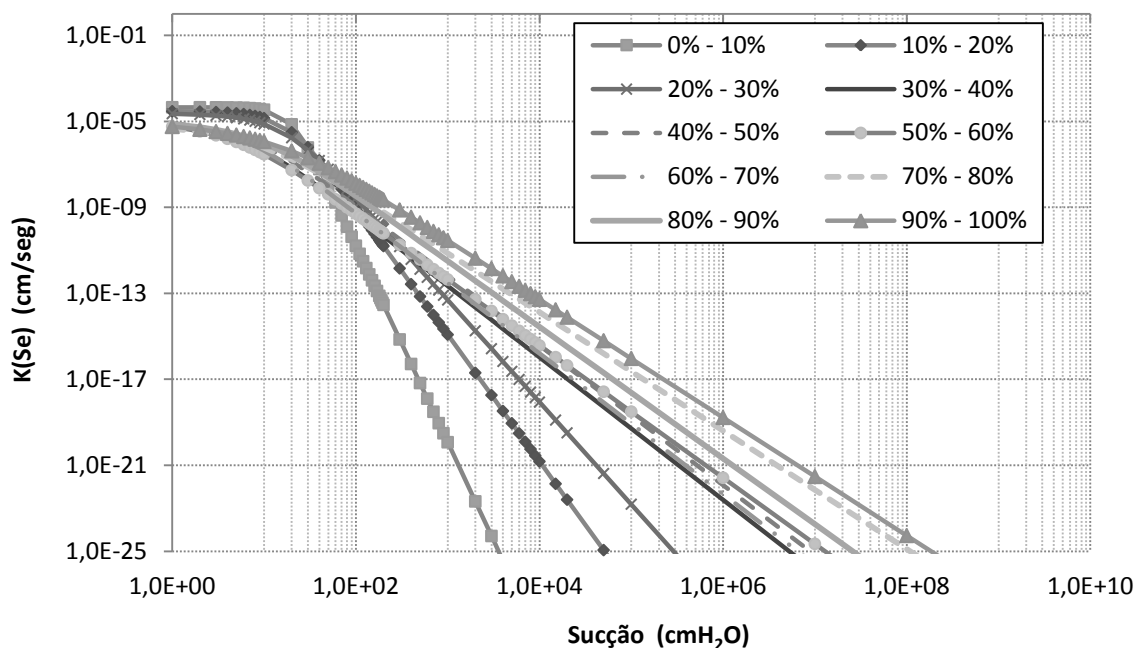


Figura 57: Relações entre Condutividade Hidráulica não saturada ($K(Se)$) e Sucção (h) definidas para os valores médios dos dez subgrupos avaliados neste trabalho.

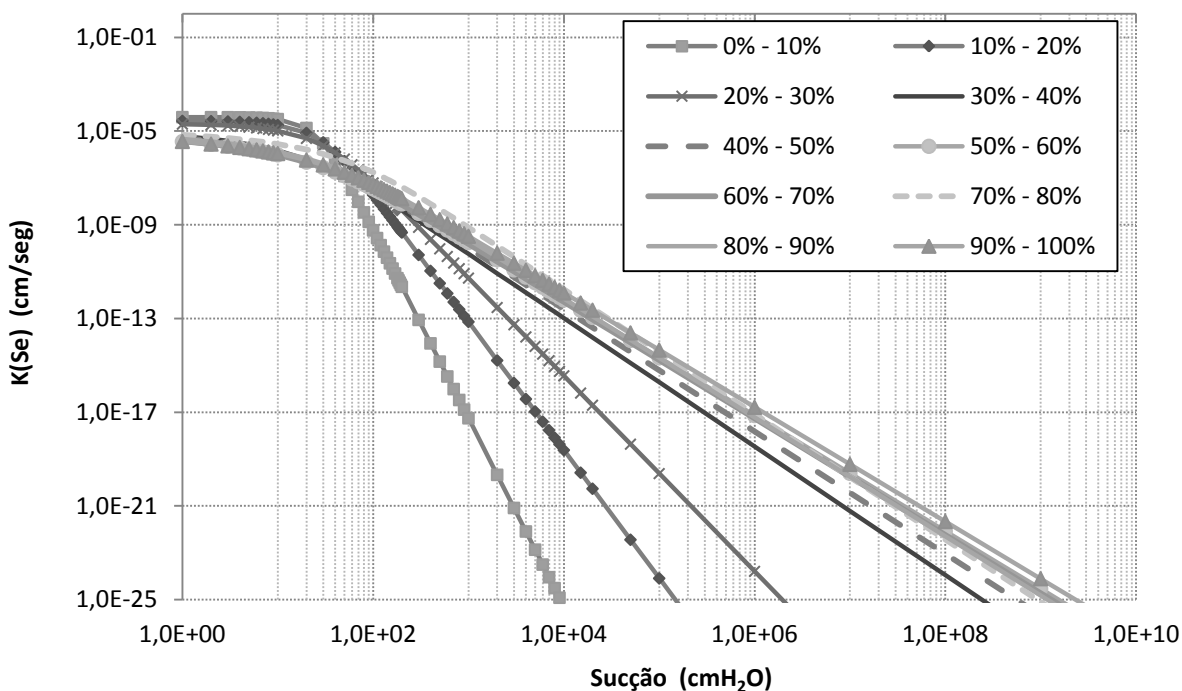


Figura 58: Relações entre Condutividade Hidráulica não saturada ($K(Se)$) e Sucção (h) definidas para os valores das medianas dos dez subgrupos avaliados neste trabalho.

Nas figuras 59 e 60 temos os gráficos referentes à condutividade hidráulica relativa utilizando os valores médios e medianos dos parâmetros respectivamente. O comportamento se assemelha muito com as figuras 57 e 58. A sucção para uma mesma condutividade hidráulica relativa é maior quando se utiliza a mediana dos parâmetros. Além disso, pouca diferença foi observada para os subgrupos variando a porcentagem de finos de 30 a 100% (Figura 60). A diferença da condutividade hidráulica relativa entre os subgrupos de “0 - 10%” e “90 - 100%” de finos é de aproximadamente 10^{16} para valores de carga de pressão (sucção) de 10^4 cmH₂O (Figura 59).

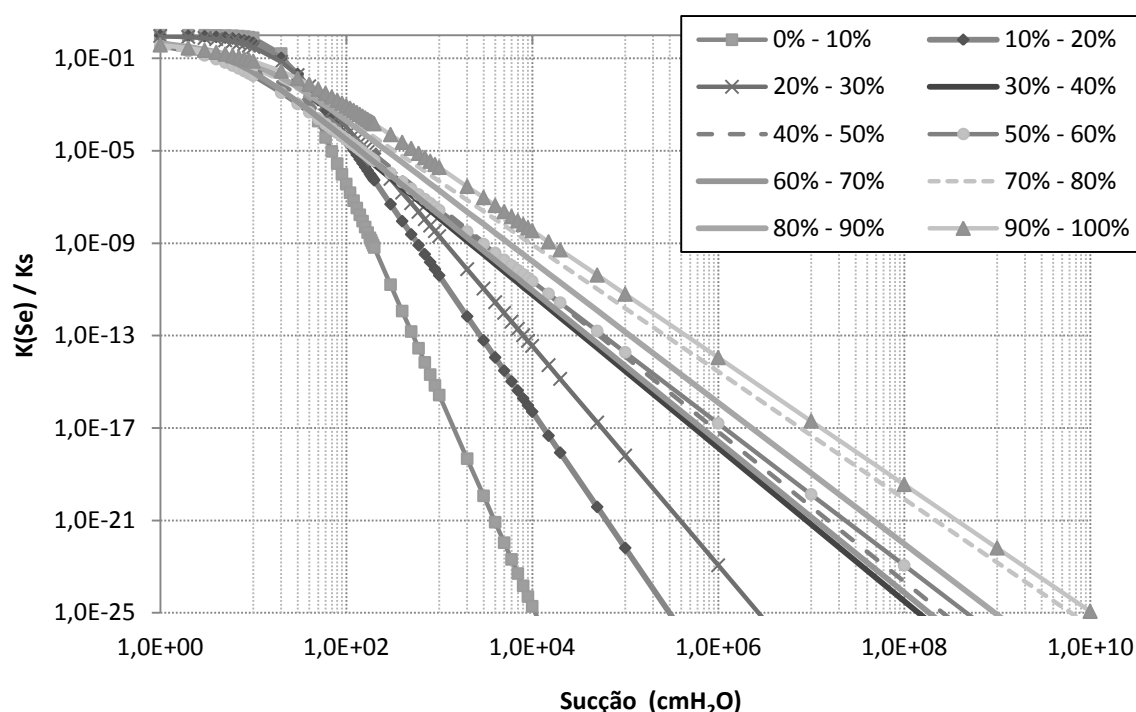


Figura 59: Relações entre a condutividade hidráulica relativa ($K(Se)/K_s$) e sucção (h) definidas para os valores médios dos dez subgrupos avaliados neste trabalho

Nas análises realizadas neste trabalho, observa-se que significativas alterações de comportamento dos gráficos para curvas de retenção, para variações dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980), condutividade hidráulica não saturada e condutividade hidráulica relativa acontecem quando a porcentagem de finos é maior que 30%. Para % finos maiores que aproximadamente 30% também é observado na figura 18, que a variação dos valores de K_s com o

percentual de finos, é indefinida e dispersa. Conforme já discutido anteriormente, estes resultados podem ser devido aos finos preencherem todos os vazios dos solos arenosos e neste caso a condutividade hidráulica passa a ser definida pelas propriedades do solo fino. E, o tipo de solo fino (e a micro estrutura do solo) varia muito no extenso banco de dados analisado neste trabalho e não é considerado na classificação baseada apenas na textura ou granulometria dos grãos. Os resultados sugerem que o valor da condutividade hidráulica saturada tem papel importante na estimativa do comportamento da curva de retenção, na determinação dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) e na função de condutividade hidráulica não saturada de solos granulares com finos.

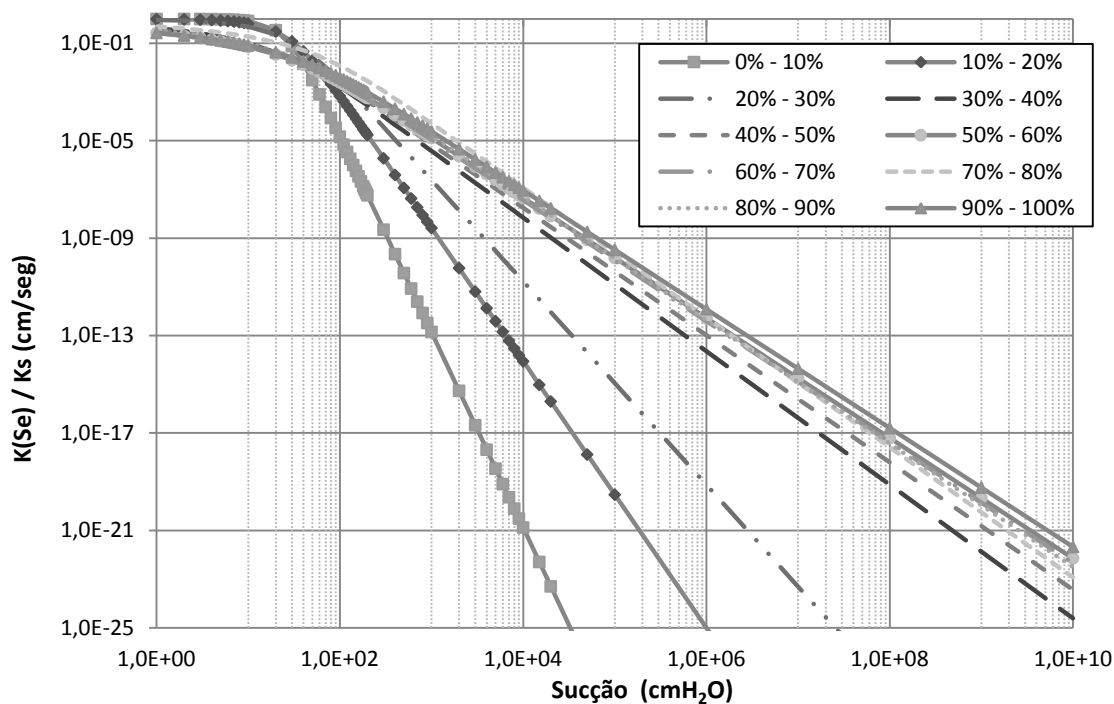


Figura 60: Relações entre a condutividade hidráulica relativa ($K(Se)/K_s$) e sucção (h) definidas para os valores das medianas dos dez subgrupos (% de finos) avaliados neste trabalho.

Fredlund et al. (1997) observaram a dependência entre da condutividade hidráulica não saturada e a curva de retenção. No entanto, quando relacionamos essas duas curvas hipotéticas para as amostras do banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001) considerando 0 a 10% de finos e 90 a 100% de finos (valores das medianas – primeira classificação textural) observamos que há uma

diferença entre aos valores de entrada de ar para o subgrupo de 0 a 10% de finos. O subgrupo 90 a 100% de finos os valores de entrada de ar coincidiram (figura 61).

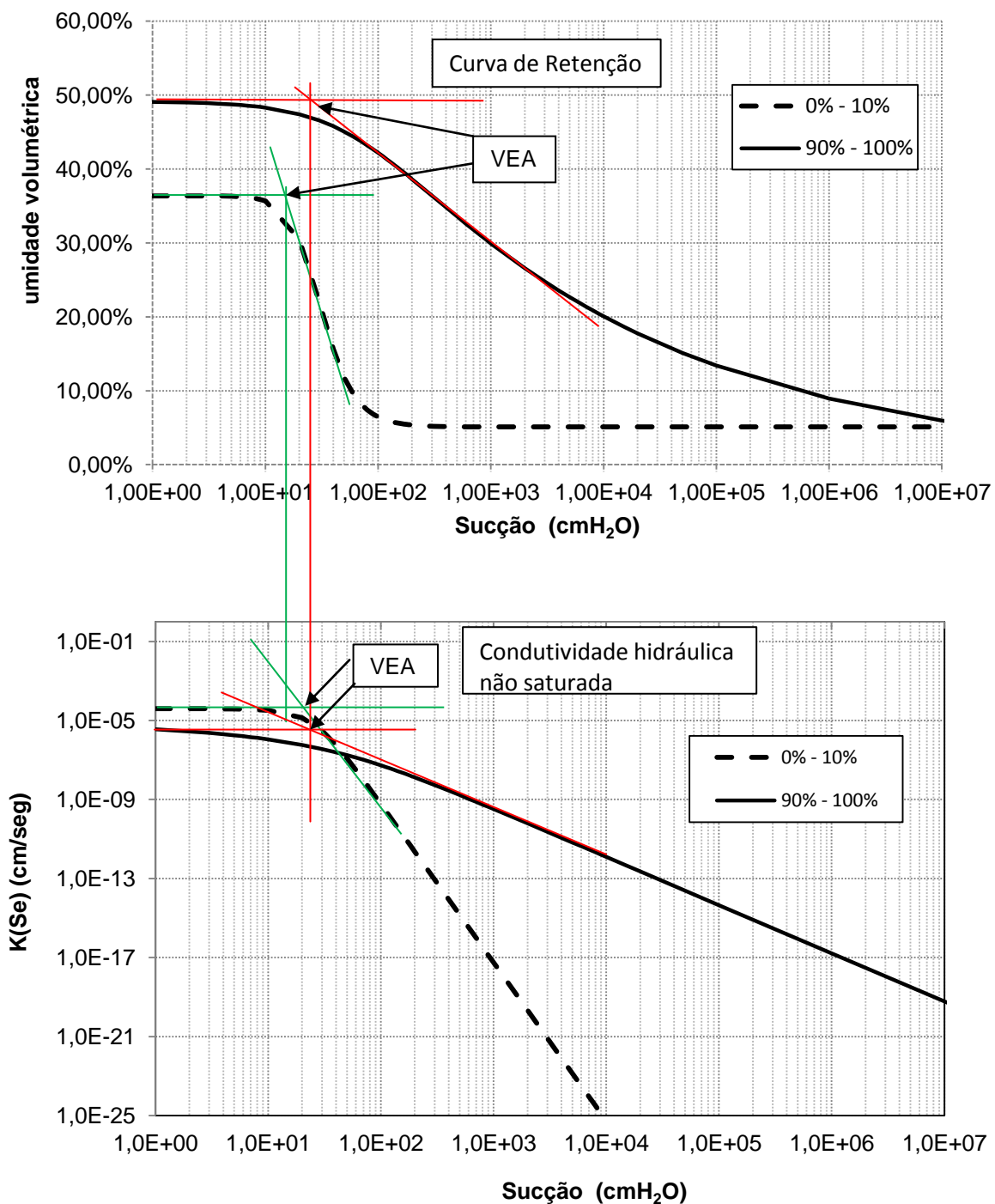


Figura 61: Visualização da relação entre função de condutividade hidráulica não saturada e curva de retenção solo-água.

Ao repetirmos o mesmo estudo da figura 61 para os demais subgrupos da primeira classificação textural observa-se que essa diferença entre os valores de entrada de ar acontecem para os subgrupos com até 30% de finos.

Em uma primeira análise, essa diferença nos valores de entrada de ar parece estar relacionada com a condutividade hidráulica saturada (figura 18). Obsevamos durante todo presente trabalho que a condutividade hidráulica (diretamente proporcional à condutividade hidráulica não saturada – eq. 15) está relacionada com o comportamento dos parâmetros da equação de van Genutchen (1980) e, portando, com as curvas de retenção até uma porcentagem de finos. No entanto, Corey (1994) menciona a diferença, para a curva de retenção (secagem superior), entre a sucção que ocorre a primeira desaturação (P_d) e a sucção que ocorre a desaturação significativa (P_b). Alguns pesquisadores não fazem esta distinção e definem tudo como “pressão de entrada de ar”. Chiu and Shackelford (1998) mencionam a dificuldade de identificar P_d e P_b na prática principalmente em alguns solos. Assim, existe a dificuldade da determinação destes parâmetros e associá-los em função da permeabilidade.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas das análises realizadas neste trabalho e as sugestões de trabalhos futuros para continuidade da pesquisa.

5.1 Conclusões

O presente trabalho foi desenvolvido de modo a atender os seguintes objetivos: estudar as curvas de retenção, os parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) e as curvas de condutividade hidráulicas obtidas pelo banco de dados do programa Rosetta (Schaap et al., 2001). Esta pesquisa analisou inicialmente as curvas de retenção obtidas pelo banco de dados do programa Rosetta apresentado em Schaap et al. (2001) e pelas tabelas publicadas por Wosten et al. (1999), Hodnett e Tomasella (2002) e Gerscovich e Sayão (2002), contendo valores dos parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980) para diferentes solos. Além disso, os resultados foram comparados variando as classificações texturais. Posteriormente, utilizando os mesmo bancos de dados, foram avaliadas as variações dos quatro parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980). Por fim, analisou-se curvas de condutividade hidráulica não saturada hipotéticas geradas pelos valores médios e medianas dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para cada um dos 10 (dez) subgrupos avaliados neste trabalho (considerando a primeira classificação textural baseada no teor de finos).

Neste trabalho verificou-se que os resultados dos valores da condutividade hidráulica saturada ou permeabilidade (K_s) das amostras de diferentes solos (554

amostras) do banco de dados Rosetta (Schaap et al., 2001) variam de $1,62 \times 10^{-6}$ cm/s a $3,65 \times 10^{-5}$ cm/s, que correspondem a valores típicos de permeabilidade de areia siltosa. No estudo da variação dos valores de K_s com o percentual de finos para os dez sub-grupos criados neste estudo, verifica-se uma tendência de diminuição do valor de K_s com o aumento do percentual de finos para valores de finos menores que 30%. Para teores de finos maiores que 30% a variação de K_s com o teor de finos é indefinida e dispersa. Estes resultados podem ser devido aos finos preencherem todos os vazios dos solos mais grossos e neste caso a permeabilidade passa a ser definida pela permeabilidade do solo fino e não existe uma dependência do valor de K_s com o teor de finos dos solos.

As curvas de retenção obtida pelo banco de dados de Gerscovich e Sayão (2002) apresentaram inconsistência quando se analisa os limites superiores e inferiores. Era esperado que a amostra com maiores porcentagens de finos possuísse maiores valores de sucção para o mesmo teor de umidade, e isto não foi observado. No entanto, quando analisamos as curvas de retenção separadas por tipos de solo, ou seja, quando se analisa separadamente os solos residuais, os solos coluviais e os solos sedimentares, observa-se que há coerência quanto aos limites superiores e inferiores, bem quando se avalia os valores da entrada de ar. Isso se deve ao fato da formação e composição mineralógica influenciarem na curva de retenção não sendo, portanto, possível considerar apenas a classificação textural/granulometria como fator determinante da curva de retenção.

Ainda sobre as curvas de retenção, observa-se que são avaliadas sem incluir a estrutura heterogênea dos poros do solo. Dessa forma, as expressões que representam as curvas de retenção geralmente assumem distribuição unimodal do tamanho dos poros do solo. Assumir que são unimodais ou bimodais é extremamente difícil, pois não se consegue definir exatamente para qual % de finos o comportamento dos solos é determinado por eles ou não e para qual % de finos o solo possui comportamento determinado pelos mais diferentes tipos de poros. Aparentemente a condutividade hidráulica saturada tem papel importante na estimativa do comportamento das curvas de retenção, dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) e da condutividade hidráulica não saturada.

As análises, realizadas neste trabalho, da variação do parâmetro α com o teor de finos, sugerem que para teores de finos maiores que 20% ou 30% os finos passam a preencher os vazios dos solos mais grossos (figura 17 e Figura 30). Neste caso, não existe uma dependência do valor do parâmetro α com o teor de finos de solos granulares com finos, e a classificação baseada apenas na textura ou granulometria dos grãos não deve ser utilizada para estimar os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980). Assim, para solos granulares com alto teor de finos (maior que 30%) o parâmetro α não está relacionado com a granulometria/textura e nem com o valor de entrada de ar, que define o ponto da curva de retenção em que os maiores vazios do solo começam a desaturar ($S < 100\%$).

O parâmetro n_v parece estar relacionado com a granulometria para uma porcentagem de até 30% de finos. Após este valor não se chegou a nenhuma conclusão, além disso, a equação proposta possui várias combinações de α e n_v que fornecem a mesma curva de retenção (56). Isto faz com que os valores de α e n_v determinados por ajuste de curva percam o significado físico assim, há dificuldade de associar a variação de α e n_v com a granulometria dos solos em um banco de dados.

Não se observou relação entre Θ_r com a granulometria/textura dos solos analisados neste trabalho. O valor de Θ_r define o ponto da curva de retenção em que é extremamente difícil retirar água do solo não saturado e, portanto, é um parâmetro importante para estimativa da curva. Mas, como muitas vezes é utilizado como um parâmetro de ajuste ou assumido zero recomenda-se cautela ao adotar este parâmetro baseado em tabelas publicadas na literatura.

Quanto ao Θ_s , por ser um parâmetro físico (porosidade do solo), não existe uma dependência direta entre Θ_s e o teor de finos dos solos analisados neste trabalho.

Verifica-se que os solos que não apresentam uma diferença significativa na permeabilidade (condutividade hidráulica saturada) podem apresentar grandes

variações nos valores da condutividade hidráulica não saturada dependendo do teor de finos desses solos, tal que para altos valores de sucções a permeabilidade relativa das amostras com até 10% de finos pode ser até 10^{16} vezes menor que a das amostras com percentual de finos superior a 90%.

Não foi observada uma dependência entre o teor de finos/textura e os parâmetros da equação de van Genuchten (1980). Quando o percentual de finos é tal que preenche todos os vazios das partículas mais grossas a classificação exclusivamente por textura não pode ser usada para estimar os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980). Entretanto, devido a grande variabilidade dos solos do banco de dados analisado não foi possível definir o teor de finos que isto acontece. O tipo de solo fino (e a micro estrutura do solo) varia no extenso banco de dados analisado neste trabalho e não é considerado na classificação baseada apenas na textura ou granulometria dos grãos.

É importante observar que o volume, tamanho, configuração e distribuição dos poros controlam as propriedades de engenharia dos solos não saturados e as análises da variação dos valores de K_s , Θ_s , Θ_r , n_v , α com o teor de finos sugerem que para solos granulares com alto teor de finos (maior que 20% ou 30% para os solos analisados neste trabalho) a classificação baseada apenas na textura ou granulometria dos grãos não deve ser utilizada para estimar a condutividade hidráulica saturada e os parâmetros de ajuste da equação de van Genutchen (1980).

Não se podem desconsiderar os experimentos de laboratórios utilizados para determinar as curvas de retenção dos solos em estudo. O uso de um programa para estimar a curva de retenção baseado em pedotransfer (PTFs) combinadas com o método “bootstrap” (técnica desenvolvida para determinar certos tipos de inferências estatísticas, ou seja, afirmar algo a partir de um conjunto representativo (amostra) sobre o universo) como o programa Rosetta (Schaap et al. 2001) ou uma tabela de consulta irá depender da disponibilidade de dados, e se a classe de solo em particular está bem representada no banco de dados. Foi observada uma grande variação entre os parâmetros independentes para os bancos de dados analisados neste trabalho. As diferenças são significativas até quando se trabalha com o

mesmo banco de dados e varia a forma de estimar os parâmetros. Assim, é insuficiente e necessita-se cautela ao utilizar somente a classificação textural/granulometria para estimar a curva de retenção e condutividade hidráulica não saturada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões são feitas para os trabalhos futuros:

- Avaliar experimentalmente a variação das curvas de retenção e de condutividade hidráulica com o teor de finos para misturas de solos grossos e finos.
- Avaliar os modelos propostos na literatura e, se necessário, definir um novo modelo para simular os resultados experimentais.
- Avaliar o tipo de solo fino e determinar a % de finos que preenche os solos de granulometria mais grossa para diferentes tipos de misturas de solos grossos e finos.
- Avaliar através de modelos numéricos utilizados para prever a distribuição de umidade e sucção nos solos não saturados, a sensibilidade dos resultados à variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) observada neste trabalho para os bancos de dados analisados.

6 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Barbour, S.L.(1998). Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquion: The Soil-Water Characteristic Curve: A Historical Perspective. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, p873-894.

K.V. Bicalho, K.F. Cupertino & A.I. Bertolde (2013) Evaluation of the suction calibration curves for Whatman 42 filter paper. First Pan-American Conference on UNSATURATED SOILS, 20-22. Cartagena de Indias, Colombia.

Bishop, A. W. (1959). The Principle of Effective Stress. Publish in Teknisk Ukeblad, Vol. 106, n 39, p. 859-863.

Blight, G. E. (1967). Effective Stress Evaluation for Unsaturated Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. Proceedings ASCE, N SM2, Vol. 93, p 125-148.

Burdine, N.T., (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. Journal of Petroleum Technology, 5, 71-78.

Campbell, G.S. (1988). Soil Water Potential Measurement: An Overview. Irrigation Scienci, 9, 265-273.

Conciani, W., Carneiro, B. J. I, Machado, S. L. (1997). Estimativa da Condutividade Hidráulica de Solos Não Saturados Através do TDR. 3 Simpósio de solos não saturados. Rio de Janeiro. p. 221-229.

Duarte, A. P. L, Campos, T. M. P. e Araruna, J. T. (2004). Efeitos da temperatura na relação umidade-sucção de dois solos, Nsat2004.

Edlefsen, N. E.; Anderson, A. B. C (1943). Thermodynamics of soil moisture. HILGARDIA; A Journal of Agricultural Science, vol. 15, n.2, pp. 31-298.

Fernandes, M. A. (2011). Condutividade hidráulica não saturada de um solo arenoso: aplicação de infiltrômetro de disco. p. 159. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos

Ferreira, A. M., (2010). Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do Comportamento de Solos Residuais Não Saturado. Dissertação de Mestrado. Universidade do estado do rio de Janeiro (UERJ).

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. (1997). Stress State Variables for Unsaturated Soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol 103, n GT%, p. 447-466.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., (1993). Soil mechanics for unsaturated soil. John Wiley e Sons, INC, New York.

Fredlund, D. G., Xing, A., (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31,521-532.

Fredlund, D. G., Fredlund, D. G., Wilson, G. W., (1997). Prediction of soil-water characteristic curve from grain size distribution and volumetric mass properties. III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Rio de Janeiro, Vol. 1, p. 13-23.

Fredlund, D. G. (1998). Bringing unsaturated soil mechanics into Engineering Practice. 2nd International Conference on Unsaturated soil, Vol. 2, p 1-36, Beijing, China.

Fredlund, D. G.; Sheng, D.; Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. NRC Research Press Web site at cgj.nrc.ca. Canadian Geotechnical Journal, 48, 186-198.

Gardner, R. (1937). A method of measuring the capillary tension of soils. *Frist International Conference on Usaturated Soil, Paris, vol. 3, 1179-1200.*

Georgetti, G. B., (2010). Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW). *Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.*

Gerscovich, D. M., Sayão, A. S. F. J. (2002). Evaluation of the Soil-Water Characteristic Curve Equations for Soils form Brazil. *Proceeding of Third International Conference on Unsaturated Soils. Vol. 1, p. 295-300.*

Guber, A. K., Pachepsky, Y. A., (2010). Multimodeling with pedotransfer functions. *Documentation and user manual for PTF calculator. Version 2.0, Environmental Microbial and Food Safety Laboratory, Hydrology and Remote SensingLaboratory, Beltsville Agricultural Research Center, USDA-ARS.*

Hansen, H. C. (1926). The Water- Retaining Power of the Soil. *The Journal of Ecology. Vol. XIV, pp. 111-119.*

Hassan, A.; Mehdi, M.; Mehdi, R. (2012). Comparison of Fitting Quality and Changes Trend of Moisture Curve Parameters of Mualem- van Genuchten Model at Different compaction Treatments of Sandy Loam and Clay Loam Soils. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 3, 299-304.*

Hillel, D. (1971). *Soil and water: Physical principels and process.* New York: Academic Press, p. 5-127.

Hodnett, M. G., Tomasella, J. (2002). Marked differences between van Genuchten soil water- retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropicals soils. *Goederma. p. 155-180.*

Kawai, K., Karube, D., Kato, S., (2000). The Model of Water Retention Curve Considering Effects of Void Ratio. In: Rahardjo, H., Toll, D.G., Leong, E.C.(Eds.), Unsaturated Soils for Asia. Balkema, Rotterdam, 329-334.

Jennings, J. E. B.; Burland, J. B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, v. 48, n5, p. 681-687, 1998.

Libardi, P. L. (1995). *Dinâmica da água no solo*. 1. Ed. Piracicaba: USP/ESALD – Departamento de Física e Meteorologia. p. 497.

Lima, V. C. G. da R. (2009). *Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 170p.

Livingston, B. E. (1906). The relation of desert plants to soil moisture and to evaporation. *Carnegie Inst. Publ.* n. 50.

Livingston, B. E.; Koketsu, R (1920). The water-supplying power of the soil as related to wilting of plants. *Soil Science*, 9 – pp. 469-485.

Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley e Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. p. 556.

Marinho, F.A.M, e Stuermer M. M., (2000), The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. *Geotechnical Special Publication 99, ASCE*, 125-141.

Marinho, F.A.M,(2005). *Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados*. Dissertação de Livre Docência, USP.

M.Asce, C. J. M.; A.M.Asce, N.Y.; Yaldo, K.; Merayyan, S. (2002). Impacto f Soil Type and Compactios Soil Water Characteristic. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering. 733-742.

Masrouri, F., Bicalho, K. V., Kawai, K. (2005) Hydraulic testing in unsaturated soils Submitted to Geotechnical and Geological Engineering, Special Issue on "Laboratory and Filed Testing of Unsaturated Soils",

Mualem Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porus media. Water Resour. Res., 12, 513-522.

Nimmo, J. R. (1991). Comment on the treatment of residual water content in "A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the Subsurface" by Luckner et al., Water Resour. Res., 27, 661-662.

Oliveira, O. M (2004). Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Porebska, D.; Slawinski, C.; Lamorski, K., Walczak, R. T. (2006). Relationship between van Genuchten's parameters of the retention curve equation and physical properties of soil solid phase. Institute of Agrophysics, Polish Academy os Sciences, Doswiadczalna 4, P.O. Box 20. P. 153-159.

Reichardt, K. (1985). Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4.ed. Campinas: Fundação Cargill. p. 466.

Schaap, M. G.; Leij, F. J.; van Genuchten, Th. (2001). Rosetta (Schaap et al.,2001): a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology. 251,163-176.

Silva, A. M. (2005). Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros. Dissertação de Mestrado, São Carlos.

Shull, C. A. (1916). Measurement of the surface forces in soils. *The Botanical Gazette*, vol LXII, n.1, pp. 1-31.

van Genuchten, M. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci.*44, 5, 892-898.

Vanapalli, S. K., Pufahl, D.E., Fredlund, D.G., (1999). The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till. *Geotechnique*, 49,143-159.

Vilar, O. M. (2002), *Resistencia ao Cisalhamento (Apostila)*. Escola de Engenharia de São Carlos.

Watabe, Y.; Leroueil, S.; Le Bihan, J.P. (2000). Influence of compaction conditions on pore size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till. *Canadian Geotechnical Journal* 37 (6): pp. 1184-1194.

Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90:169–185.

Yang, H.; Rahardjo, H.; Leong, E.C.; Fredlund, D.G. (2004). Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curve of sandy soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 908-920.

Yuan, J. P; Ding, G. (2011). Size effect in soil-water characteristic curve of clay-gravel mixture. *Unsaturated soils: Theory and Practice*. Kasetsart University, Thailand, ISBN 978-616-7522-77-7.

Zapata, C.E., Houston, W.N., Houston, S.L., and Walsh, K.D. (2000). Soil-Water Characteristic Curve Variability. In C.D. Shackelford, S.L. Houston, & N-Y Chang (eds), *Advances in Unsaturated Geotechnics*. Geotechnical Special Publication No. 99. Also Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000, August 5-8, 2000, Denver: ASCE Geo-Institute. pp. 84-124.

Zapata, C. E.; Houston, W. N.; Houston, S. L.; Walsh, K.D. (2000). Soil-Water Characteristic Curve Variability. pp. 84- 124.

Zhou, J.; Yu, J.L. (2005). Influences affecting the soil-water characteristic curve. Journal of Zhejiang University SCIENCE. 6A(8), 797-804.

Zurmuhl, T.; e Durner, W. (1998). Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse modeling. Soil Sci, Am. J. v. 62, p874-880.

ANEXO 1

0% a 10% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	105	105	105	105	105
Valor mínimo	0,00%	26,42%	0,008	1,389	1,60E-05
Valor máximo	23,96%	45,05%	0,169	10,000	1,15E-04
Media	5,56%	36,41%	0,047	3,856	4,46E-05
Mediana	5,11%	36,37%	0,037	3,412	3,94E-05
Desvio Padrão	3,82%	4,01%	0,036	1,916	2,21E-05
10% a 20% de Finos					
10% a 20% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	70	70	70	70	70
Valor mínimo	0,00%	26,33%	0,008	1,092	1,264E-05
Valor máximo	18,17%	56,40%	0,282	7,093	8,209E-05
Media	6,82%	39,36%	0,049	2,559	2,96E-05
Mediana	6,89%	39,56%	0,030	2,390	2,766E-05
Desvio Padrão	4,21%	5,64%	0,049	1,161	1,344E-05
20% a 30% de Finos					
20% a 30% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	29	29	29	29	29
Valor mínimo	0,00%	25,66%	0,009	1,125	1,302E-05
Valor máximo	23,09%	52,83%	0,260	5,245	6,071E-05
Media	7,07%	37,05%	0,0517	2,099	2,43E-05
Mediana	5,65%	36,35%	0,027	1,869	2,163E-05
Desvio Padrão	6,72%	5,98%	0,062	1,002	1,160E-05
30% a 40% de Finos					
30% a 40% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	43	43	43	43	43
Valor mínimo	0,00%	28,94%	0,004	1,055	1,221E-05
Valor máximo	24,91%	52,90%	0,941	3,447	3,989E-05
Media	5,14%	38,49%	0,127	1,52	1,77E-05
Mediana	0,00%	37,70%	0,032	1,297	1,501E-05
Desvio Padrão	6,88%	5,17%	0,221	0,579	6,699E-06
40% a 50% de Finos					
40% a 50% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	53	53	53	53	53
Valor mínimo	0,00%	30,08%	0,001	1,034	1,197E-05
Valor máximo	30,00%	61,33%	1,000	3,653	4,228E-05
Media	6,25%	40,17%	0,097	1,499	1,74E-05
Mediana	0,00%	38,72%	0,027	1,245	1,441E-05
Desvio Padrão	9,82%	6,85%	0,222	0,642	7,427E-06

50% a 60% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	K_s (cm/s)
Quantidade de pontos	42	42	42	42	42
Valor mínimo	0,00%	30,67%	0,004	1,026	1,187E-05
Valor máximo	30,00%	64,15%	1,000	4,104	4,751E-05
Média	7,23%	42,93%	0,133	1,430	1,66E-05
Mediana	0,00%	41,71%	0,021	1,186	1,373E-05
Desvio Padrão	9,67%	6,87%	0,265	0,621	7,185E-06
60% a 70% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	K_s (cm/s)
Quantidade de pontos	56	56	56	56	56
Valor mínimo	0,00%	32,40%	0,004	1,014	1,174E-05
Valor máximo	30,00%	83,80%	1,000	4,881	5,650E-05
Média	9,66%	48,53%	0,122	1,508	1,75E-05
Mediana	4,80%	45,51%	0,023	1,194	1,382E-05
Desvio Padrão	11,07%	10,82%	0,260	0,881	1,020E-05
70% a 80% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	K_s (cm/s)
Quantidade de pontos	41	41	41	41	41
Valor mínimo	0,00%	35,79%	0,002	1,029	1,191E-05
Valor máximo	30,00%	82,40%	1,000	1,795	2,077E-05
Média	4,63%	43,10%	0,0677	1,3011	1,51E-05
Mediana	0,00%	40,48%	0,012	1,267	1,466E-05
Desvio Padrão	7,20%	8,68%	0,215	0,181	2,090E-06
80% a 90% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	K_s (cm/s)
Quantidade de pontos	63	63	63	63	63
Valor mínimo	0,00%	31,10%	0,002	1,040	1,204E-05
Valor máximo	30,00%	79,70%	1,000	5,790	6,701E-05
Média	8,46%	46,35%	0,071	1,424	1,65E-05
Mediana	0,04%	43,40%	0,019	1,214	1,405E-05
Desvio Padrão	10,76%	10,00%	0,177	0,654	7,567E-06
90% a 100% de Finos	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	K_s (cm/s)
Quantidade de pontos	52	52	52	52	52
Valor mínimo	0,00%	31,51%	0,000	1,040	1,203E-05
Valor máximo	30,00%	71,18%	0,690	3,001	3,473E-05
Média	7,73%	49,59%	0,041	1,298	1,50E-05
Mediana	0,00%	49,11%	0,016	1,176	1,361E-05
Desvio Padrão	11,02%	11,43%	0,099	0,332	3,840E-06

ANEXO 2

Grossa (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	221	221	221	221	221
Valor mínimo	0,00%	25,66%	0,01	1,09	1,13E-05
Valor máximo	23,96%	56,40%	0,54	10,00	3,65E-05
Média	6,11%	37,57%	0,05	3,04	2,75E-05
Desvio Padrão	4,73%	5,07%	0,05	1,73	5,55E-06
Média (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Média (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	215	215	215	215	215
Valor mínimo	0,00%	28,94%	0,00	1,01	1,62E-06
Valor máximo	30,00%	82,40%	1,00	4,88	3,09E-05
Média	6,64%	42,67%	0,09	1,47	1,51E-05
Desvio Padrão	9,25%	8,33%	0,20	0,66	5,27E-06
Média fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Média fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	48	48	48	48	48
Valor mínimo	0,00%	32,33%	0,00	1,04	3,15E-06
Valor máximo	30,00%	78,11%	0,69	5,79	3,13E-05
Média	6,51%	43,63%	0,04	1,43	1,32E-05
Desvio Padrão	9,20%	8,18%	0,10	0,69	4,30E-06
Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	58	58	58	58	58
Valor mínimo	0,00%	31,51%	0,00	1,02	2,40E-06
Valor máximo	30,00%	79,70%	1,00	3,00	2,62E-05
Média	10,02%	51,27%	0,17	1,28	1,31E-05
Desvio Padrão	12,00%	10,18%	0,32	0,38	5,81E-06
Muito Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Muito Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	4	4	4	4	4
Valor mínimo	0,00%	55,43%	0,00	1,07	1,36E-05
Valor máximo	30,00%	68,66%	0,09	1,13	2,60E-05
Média	15,00%	64,12%	0,06	1,10	2,19E-05
Desvio Padrão	17,32%	6,00%	0,04	0,02	5,74E-06

Grossa (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	221	221	221	221	221
Valor mínimo	0,00%	25,66%	0,01	1,09	1,13E-05
Valor máximo	23,96%	56,40%	0,54	10,00	3,65E-05
Mediana	5,86%	37,25%	0,03	2,70	2,89E-05
Desvio Padrão	4,73%	5,07%	0,05	1,73	5,55E-06
Média (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Média (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	215	215	215	215	215
Valor mínimo	0,00%	28,94%	0,00	1,01	1,62E-06
Valor máximo	30,00%	82,40%	1,00	4,88	3,09E-05
Mediana	0,00%	40,79%	0,02	1,25	1,48E-05
Desvio Padrão	9,25%	8,33%	0,20	0,66	5,27E-06
Média fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Média fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	48	48	48	48	48
Valor mínimo	0,00%	32,33%	0,00	1,04	3,15E-06
Valor máximo	30,00%	78,11%	0,69	5,79	3,13E-05
Mediana	0,03%	40,44%	0,01	1,27	1,28E-05
Desvio Padrão	9,20%	8,18%	0,10	0,69	4,30E-06
Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	58	58	58	58	58
Valor mínimo	0,00%	31,51%	0,00	1,02	2,40E-06
Valor máximo	30,00%	79,70%	1,00	3,00	2,62E-05
Mediana	0,00%	51,15%	0,03	1,13	1,25E-05
Desvio Padrão	12,00%	10,18%	0,32	0,38	5,81E-06
Muito fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))					
Muito fina (Rosetta (Schaap et al.,2001))	Θ_r (%)	Θ_s(%)	α(cm⁻¹)	n_v	Ks (cm/s)
Quantidade de pontos	4	4	4	4	4
Valor mínimo	0,00%	55,43%	0,00	1,07	1,36E-05
Valor máximo	30,00%	68,66%	0,09	1,13	2,60E-05
Mediana	15,00%	66,19%	0,07	1,10	2,40E-05
Desvio Padrão	17,32%	6,00%	0,04	0,02	5,74E-06