



João Luis Teixeira de Mello Guedes Pinto

**Determinação de propriedades
hidráulicas de solos residuais
do Rio de Janeiro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Co-orientador: Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Rio de Janeiro
junho 2013



João Luis Teixeira de Mello Guedes Pinto

**Determinação de propriedades
hidráulicas de solos residuais
do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes Vargas do Amaral Junior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Co-orientadora

EDCTC – PUC-Rio

Prof. Tácio Mauro Pereira Campos

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a Denise Maria Soares Gerscovich

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de junho de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

João Luis Teixeira de Mello Guedes Pinto

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica PUC-Rio – Rio de Janeiro, em 2010. Em 2011 ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa em solos não saturados

Ficha Catalográfica

Pinto, João Luis Teixeira de Mello Guedes

Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro / João Luis Teixeira de Mello Guedes Pinto ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. ; co-orientador: Raquel Quadros Velloso – 2013.

169 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Solos não-saturados. 3. Solos residuais. 4. Condutividade hidráulica. 5. Curva característica. 6. Problema inverso. 7. Ensaio de campo. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. II. Velloso, Raquel Quadros. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Ao meu avô, pessoa do qual recebi muito amor até mesmo na sua ausência

Agradecimentos

À Deus, pela fé e o resgate dos perrengues.

Ao meu avô José Alexandre.

Aos meus pais e à minha irmã pela força motivacional, tendo sido o maior apoio nestes anos de superação.

Aos meus orientadores, Prof. Eurípedes Vargas Junior, pela sua orientação, paciência e cobrança para o desenvolvimento deste trabalho e a Prof^a. Raquel Velloso, pela orientação, dedicação, e pelas longas discussões acerca dos mais variados problemas. Agradeço profundamente a todos os professores aos conhecimentos transmitidos durante o curso de pós-graduação.

Aos professores Cláudio Amaral, Franklin e Tácio pela ajuda relativa aos campos.

Ao amigo de labuta, Breno.

Ao pessoal do laboratório.

À Andressa, que foi para mim um alicerce que transmitiu muito amor e carinho. E pelas discussões geológicas sempre de grande valor da futura geóloga.

À Marlene pela ajuda na iniciação do trabalho. Sendo sempre solícita e me corrigindo alguns enganos dos mais simples aos mais complexos.

Aos todos os meus amigos da PUC pela amizade, e um grande sentimento fraternidade e sabedoria desenvolvido. Em especial aos que me favoreceram a obtenção de um coração internacional. Salve, salve a América Latina.

À PUC, por estar comigo há mais de meia década;

À CAPES, pelo apoio financeiro;

À Rita, pelo auxílio em todos os momentos burocráticos.

À todos os outros colaboradores.

Aos meus avós.

Resumo

Pinto, João Luis Teixeira de Mello Guedes Pinto.; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Orientador); Velloso, Raquel Quadros (Co-orientadora). **Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2013. 169.p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A cidade do Rio de Janeiro apresenta relevo acidentado e clima tropical. Os processos intempéricos que ocorrem na litologia geram os solos residuais e coluvionares. Tendo em vista a limitação espacial de áreas planas, a ocupação antrópica se direciona as áreas de encosta, onde estes solos estão presentes. Ao longo dos anos tem-se estudado que a maioria dos movimentos de massa da cidade do Rio de Janeiro estão relacionados à perda de sucção mátrica do solo. O presente trabalho visa, portanto, a obtenção de parâmetros hidráulicos dos solos não-saturados de maneira simples, rápida e pouco onerosa a fim de viabilizar estudos da infiltração de água em taludes. Para isso, foram estudadas 6 áreas ao longo do Rio de Janeiro, onde a escolha se baseou na rocha de origem formadora dos solos residuais. Os ensaios do trabalho utilizados foram o Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM) e caracterização física, e para efeitos comparativos também foram executados alguns ensaios de Guelph, papel filtro e permeabilidade saturada triaxial. O modelo de interpretação não-saturado usado foi o modelo de van Genuchten-Maulem, e a obtenção de três dos cinco parâmetros foi feita através de uma análise inversa. A curva a ser retroanalizada no ensaio é a série temporal da sucção mátrica.

Palavras-chave

Solos não-saturados; solos residuais; condutividade hidráulica; curva característica; problema inverso; ensaio de campo.

Abstract

Pinto, João Luis Teixeira de Mello Guedes.; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Advisor); Velloso, Raquel Quadros (Co-Advisor). **Determination of hydraulic properties residual soils in Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2013. 169p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro city is sited on a rugged relief and has a tropical climate. The meteoric processes that take place on its lithology generate the residual and transported soils. Accounting for its limited flat urban space, its habitants tend to live in steep slope areas where such soils are present. For a long time studies have taken place to characterize mass movements and their conclusions relate most of them to the loss of soils matric suction. Therefore the study aims to obtain the unsaturated soil parameters in a simple, rapid and low cost way, which may help future studies of water infiltration on slopes. And thus, 6 locations in Rio de Janeiro were chosen based on the criteria of soil formation, attending different types of gneissic bedrocks. The constitutive model used was the van Genuchten and the method to obtain three of its five parameters was by solving an inverse problem. The curve to be optimized comes from the monitored infiltration test which consists on the record of the matric suction over a constant head infiltration test.

Keywords

Unsaturated soils; residual soils; hydraulic conductivity; characteristic curve; inverse problem; field test.

Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Motivação e Objetivos	19
1.2.	Estrutura da Dissertação	22
2	Teoria de fluxo em solos não saturados	23
2.2.	Teoria de fluxo – equação governante não saturada	28
2.3.	O problema inverso e o método de estimativa de parâmetros	29
2.4.	Ferramentas para a análise inversa em problemas de otimização	33
3	Ensaio em solos não saturados	36
3.1.	Obtenção das propriedades hidráulicas não saturadas	36
3.2.	Revisão – Ensaio inversos	47
4	Ensaio de Infiltração Monitorada [EIM] Equipamentos e Metodologia de ensaio	52
4.1.	Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM)	52
4.2.	Equipamentos e Metodologia	56
5	Solos Residuais e descrição/localização dos ensaios	64
5.1.	Solos residuais, formação e classificação	64
5.2.	Descrição de Campo, Geologia, Clima e precipitação	67
6	Resultados	82
6.1.	Resultados da caracterização	82
6.2.	Comentários gerais; Caracterização Física	95
6.3.	Resultados de campo e laboratório	96
6.4.	Comentários gerais; Parâmetros hidráulicos	105
6.5.	Avaliações comparativas segundo algumas classificações	114
6.6.	Estudos de infiltração sob precipitação em 1D	119

6.7. Considerações sobre a definição do problema de EIM	128
7 Conclusões	139
7.1. Característica dos solos	139
7.2. Aplicação do EIM	139
7.3. Sugestões para trabalhos futuros	144
8 Referências	146

Lista de figuras

Figura 1 - Curvas características tipo para solos arenosos, siltosos e argilosos. (Fredlund e Xing 1994)	24
Figura 2 - Definição dos termos de uma curva característica (Fredlund e Xing 1994).....	25
Figura 3 - Variação dos parâmetros do modelo de Van Genuchten (Adaptado de Leong e Rahardjo, 1997)	28
Figura 4 - Sensibilidade dos parâmetros a variação de carga em um tensiômetro no experimento de infiltração circular (Simunek, 1996).....	34
Figura 5 - Função objetivo com a variável dependente carga no plano $K_{sat} \times n$, Simunek, 1996.....	35
Figura 6 - Curvas de calibração de diferentes lotes do papel filtro Whatman (Apud Marinho, 2005)	42
Figura 7 - Aparato para medição da condutividade hidráulica (de Klute, 1965a).	41
Figura 8 - Controle de sucção osmótico(Soto, 2004)	41
Figura 9 - Controle de sucção por umidade relativa (Soto, 2004).....	42
Figura 10 - Resumo dos ensaios de campo para medição da condutividade hidráulica saturada- (Knödel, Lange, & Voigt).....	44
Figura 11 - Infiltrômetro de tensão adaptado de Anguro-Jaramillo <i>et al.</i> , 2000. .	45
Figura 12 - Princípio do método de funcionamento do permeâmetro de Guelph - Giakoumakis & Tasakiris, 1999 (Apud Knödel, Lange & Voigt, 2007).	46
Figura 13 – Nós de observação na cápsula porosa	53
Figura 14 – Esquema do ensaio de infiltração monitorada	53
Figura 15 – Interface do programa Hydrus 2D/3D.....	54
Figura 16 - Configuração ensaio proposto no trabalho de Velloso (Velloso, 2000)	55
Figura 17 – (a) Descrição do Guelph - Brochura SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. 0898-2800K1 (May 2012)	56
Figura 18 - Tensiômetro Irrrometer	57
Figura 19 - Tensiômetro T5.....	57

Figura 20 – Esquema (a) e aplicação (b) da cava para acomodação do tripé do permeâmetro de Guelph.....	59
Figura 21 – Tradagem e instalação do tensiômetro na configuração vertical (V).50	
Figura 22 - Configuração de arranjos/orientação do tensiômetro	61
Figura 23 - Classificação de alteração de rochas (ISRM, 1981)	65
Figura 24 - Perfil de alteração de um solo tropical (Blight, 1997).....	66
Figura 25 - Veios na estrutura do solo de Rio Bonito	66
Figura 26 - Solo decapeado e estruturas do solo residual	67
Figura 27 - Bloco individualizado em solo residual jovem de Leptinito - UPP Dona Marta.....	69
Figura 28 - Feições do perfil de Campo Grande	69
Figura 29 - Localização dos pontos de ensaio, visão de satélite	70
Figura 30 - Mapas geológicos	72
Figura 31 - Imagem de satélite - Campo Grande.....	78
Figura 32 - Local dos ensaios - Campo Grande	78
Figura 33 - Imagem de satélite - Costa Brava	78
Figura 34 - Local dos ensaios - Costa Brava.....	78
Figura 35 -, Imagem de satélite - Duque de Caxias.....	79
Figura 36 - Local dos Ensaios - Melanocrático	79
Figura 37- Imagem de satélite - Prainha/Condomínio	79
Figura 38 - Local dos Ensaios - Condomínio	79
Figura 39 - Local dos Ensaios - Prainha.....	80
Figura 40 - Imagem aérea - Coelho	80
Figura 41 – Imagem de satélite Rio Bonito.....	80
Figura 42 - Locais de Ensaio - Rio Bonito	80
Figura 43 - Imagem de satélite - PUC	81
Figura 44 - Local dos Ensaios - PUC - Topo do Talude	81
Figura 45 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Maciel (1991) - solo CB21.....	83
Figura 46 - Perfil encontrado por Maciel (1991).....	84
Figura 47 - Curva granulométrica de Gnaisse Facoidal	84
Figura 48 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Escobar et. al (2012) - solos P21; CM1/CM2; CM3; P23; CO1.....	85
Figura 49 – Curva granulométrica de um tipo de granitóide.....	87

Figura 50 - Curva granulométrica de Escobar e Protasio <i>et al.</i> (2012)	87
Figura 51 - Comparação da caracterização entre o presente estudo e Carvalho (2012) - solos M1 e M2	88
Figura 52 – Curva Granulométrica de Migmatito	89
Figura 53 - Curva granulométrica - Biotita Gnaissé.....	91
Figura 54 - Comparação da caracterização entre o presente estudo, Buback (2008) e Carvalho (2012) - solos RB; RT; 02; 04 e T	92
Figura 55 - Curva granulométrica de rocha alcalina	93
Figura 56 Curva granulométrica de colúvio/Kinzigito.....	95
Figura 57 - Histograma de índice de vazios, Sandroni e Pinto representam os valores do Grande Rio – Adaptado de Sandroni (1973).....	96
Figura 58 - Série temporal - Resultado do EIM - Gnaissé Facoidal - Clube Costa Brava.....	97
Figura 59 - Geometria do ensaio em CB	97
Figura 60 - Série temporal - Resultado do EIM – Granitóide – Nova Friburgo....	99
Figura 61 - Geometria dos ensaios em P2 - as outras geometrias podem ser vistas no apêndice 2.....	99
Figura 62 Série temporal - Resultado do EIM – Migmatito – Duque de Caxias	101
Figura 63 - Geometria dos ensaios em M.....	101
Figura 64 Série temporal - Resultado do EIM – Biotita Gnaissé – Campo Grande	103
Figura 65 – Geometria do ensaio em CG	103
Figura 66 Série temporal - Resultado do EIM – Alcalina – Rio Bonito	104
Figura 67 - Geometria dos ensaios em R.....	104
Figura 68 - Diferenças nas CC obtidas em ensaios de laboratório (direto) e campo (inverso). Simunek, 1998b	107
Figura 69 - CC discriminada por solo	109
Figura 70 - Relação da permeabilidade saturada com a carga aplicada	110
Figura 71 - Figura comparativa de K_{sat} (Laboratório x Guelph x EIM)	111
Figura 72 - Diferença nos valores médios dos parâmetros obtidos (fonte: roseta adaptado Gonçalves <i>et al.</i> , 2011).....	115
Figura 73 - CC separada por rocha de origem e classificação SUCS.....	116
Figura 74 - Carta de plasticidade.....	118
Figura 75 - Separação da CC em grupos	118

Figura 76 - Precipitação usada na simulação referente a fevereiro de 1988 na vista chinesa	120
Figura 77 - Frente de umedecimento no solo residual jovem (média dos parâmetros).....	121
Figura 78 Propriedades hidráulicas dos solos residuais jovens (média dos parâmetros).....	121
Figura 79 Pontos críticos para o avanço da frente de umedecimento	122
Figura 80 Ponto crítico para o avanço da frente de umedecimento na curva de condutividade hidráulica.....	122
Figura 81 - Tipos de perfis de umidade encontrados em análises de infiltração 1D segundo Santos (2004)	123
Figura 82 –Frente de umedecimento no solo saprolítico (média dos parâmetros)	124
Figura 83 - Propriedades hidráulicas dos solos saprolíticos (média dos parâmetros)	124
Figura 84 - Chuva dos dias 17 e 18 de março com leituras a cada 15 minutos na estação Quitandinha, região de Petrópolis (Fonte INEA)	125
Figura 85 - Runoff sob chuva de alta intensidade	125
Figura 86 - Frente de umedecimento do solo saprolítico sob chuva intensa com medidas a cada quinze minutos	125
Figura 87 – observação em um nó da influência da condutividade hidráulica na série temporal	126
Figura 88 – observação em um nó da influência dos parâmetros α e n	127
Figura 89 - Frente de umedecimento do solo residual com condição inicial de saturação do material (60%).....	128
Figura 90- Frente de umedecimento do solo saprolítico com condição inicial de saturação do material (60%).....	128
Figura 91 Influência da razão carga/profundidade na variação dos parâmetros.	130
Figura 92 Influência do raio em relação a carga na variação dos parâmetros.....	130
Figura 93 - Função objetivo com e sem os pontos da curva característica do PF133	
Figura 94 - Análise de sensibilidade radial – solo P23	137
Figura 95 - Curva $\Psi(t)$ do ensaio radial do solo P23	137
Figura 96 - Estação pluviométrica de Seropédica ano 2012 km 47 INMET -	

http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_aut_o_graf	155
Figura 97 - Estação pluviométrica de Seropédica 16/05 a 16/08(data da medição)	
km	47
INMET	-
http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_aut_o_graf	156
Figura 98 Estação pluviométrica de Copacabana relação com Gávea (PUC)	
http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_aut_o_graf	156
Figura 99 Estação pluviométrica de Copacabana relação com Gávea (PUC)	
http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_aut_o_graf	157
Figura 100 - Estação ponte Tanguá relacionada com Rio Bonito	157
Figura 101 – curva característica – Gnaisse Facoidal	166
Figura 102 - curva característica - Granitóide CM.....	166
Figura 103 - Condutividade hidráulica – Gnaisse Facoidal	166
Figura 104 – Condutividade hidráulica – Granitóide CM.....	166
Figura 105 - curva característica - Granitóide - P	167
Figura 106 – curva característica – Granitóide - CO.....	167
Figura 107 – Condutividade hidráulica – Granitóide - P.....	167
Figura 108 – Condutividade hidráulica – Granitóide - CO	167
Figura 109 – curva característica - Migmatito.....	168
Figura 110 – curva característica – Alcalina	168
Figura 111 – Condutividade hidráulica - Migmatito	168
Figura 112 – Condutividade hidráulica - Alcalina	168
Figura 113 – curva característica – Colúvio/Kinzigito.....	169
Figura 114 – Condutividade hidráulica – Colúvio/Kinzigito	169

Lista de tabelas

Tabela 1 - Modelos constitutivos para a curva característica	26
Tabela 2 - Descrição do problema direto e inverso.....	30
Tabela 3 - Resumo das técnicas comuns para se medir e controlar a sucção (Masrouri <i>et al.</i> , 2008)	37
Tabela 4 - Metodologias de ensaio para obtenção de Condutividade hidráulica (Masrouri, 2008)	40
Tabela 5 - Revisão sobre o método do perfil instantâneo (Adaptado de Moncada, 2008).....	43
Tabela 6 - Revisão das pesquisas em problemas inversos em propriedades hidráulicas (Adaptado de Vrugt e Bouten, 2003).....	48
Tabela 7 – Tabela de montagem do ensaio por etapas.....	58
Tabela 8 – Tabela de execução do ensaio por etapas.....	58
Tabela 9 Litologia correspondente aos solos residuais estudados	67
Tabela 10 - Caracterização do solo residual de Gnaiss Facoidal	83
Tabela 11 - Caracterização do solo residual de Granitóide.....	86
Tabela 12 - Caracterização do solo residual de Migmatito – Melanocrático e Leucocrático.....	89
Tabela 13 - Caracterização do solo residual de Biotita Gnaiss	91
Tabela 14 - Caracterização da Rocha Alcalina	93
Tabela 15 - Caracterização Gnaiss Kinzigito/Colúvio.....	94
Tabela 16 - Reprodutibilidade do ensaio em solo saprolítico - CB21; CB21	98
Tabela 17 - Reprodutibilidade do ensaio em solo saprolítico - CM1; CM2	99
Tabela 18 - Reprodutibilidade do ensaio em solo maduro e jovem – CM3; P23	100
Tabela 19 - Reprodutibilidade do ensaio em solo maduro e jovem – M1; M2	102
Tabela 20 – Resultado do Ensaio de Infiltração Monitorada nos solos RB; RT – Alcalina – Rio Bonito	104
Tabela 21 – Revisão Bibliográfica comparativa com os solos Brasileiros	106

Tabela 22 - Coeficientes de correlação obtidos no EIM	108
Tabela 23 - Parâmetros retroanalizados a partir de estimativas iniciais diferentes	108
Tabela 24 – Quadro resumo dos parâmetros obtidos em campo pelo EIM.	109
Tabela 25- Aspectos relevantes sobre a geometria dos ensaios	112
Tabela 26 - Diferença entre parâmetros obtidos pelo Rosetta e o EIM	115
Tabela 27 - Valores médios usados na análise	120
Tabela 28 - Variação dos parâmetros retroanalizados em 1D em relação a 2D	130
Tabela 29 - Coeficientes de correlação com pontos da CC do PF na função objetivo	132
Tabela 30 - Parâmetros com adição de pontos da CC na função objetivo.	133
Tabela 31- Quadro comparativo de K_{sat} (Laboratório x campo direto e inverso)	136
Tabela 33 – Efeito da variação do parâmetro θ_s nos coeficientes de correlação e parâmetros	138
Tabela 34 – Coordenadas das cápsulas porosas e geometria do furo	162

Lista de Símbolos

∇	Operador diferencial de primeira ordem
α	parâmetro do modelo de Van Genuchten
α'	Exponete da curva log normal de condutividade hidráulica.(Gardner, 1958)
α_p	fator de forma relacionado com um tamanho de poros funcional (Philip, 1987)

d_k	direção de busca
$\Delta \mathbf{p}^k$	Variação dos parâmetros no k-ésimo passo
g	gradiente da função objetivo
h	carga hidráulica total / carga constante aplicada no ensaio [L]
K	condutividade hidráulica [LT^{-1}]
k	permeabilidade [LT^{-1}]
k_{sat}	permeabilidade saturada [LT^{-1}]
l	Fator de conectividade dos poros
m	número de medidas
m	massa [M]
n	coeficiente da curva característica do modelo de Van Genuchten [L^{-1}]
n_p	número de parâmetros a estimar
p	vetor de parâmetros
S	sortividade [$LT^{-1/2}$]
u_a	Pressão de ar [$ML^{-1}T^{-2}$]
u_w	Pressão de água [$ML^{-1}T^{-2}$]
v_a	volume de ar [L^{-3}]
v_t	volume total [L^{-3}]
v_v	volume de vazios [L^{-3}]
w_{ii}	Matriz de pesos
y^*	Dados observados
Ψ_{VG}	Pressão de entrada de ar para o modelo de van Genuchten
z	Cota [L]
θ	Umidade volumétrica
θ_r	Umidade volumétrica residual
θ_s	Umidade volumétrica saturada
ρ	densidade [ML^{-3}]
$\Psi(t)$	Curva de carga em função do tempo obtida no EIM
Ψ/Ψ_i	Sucção [L](cm) ou [$ML^{-1}T^{-2}$] (KPa) / Sucção inicial
Ψ_{VEA}	Pressão de entrada de ar

Letras maiúsculas

BC	Brooks e Corey (modelo)
CC/C(Ψ)	Curva característica
K(Ψ)	Condutividade hidráulica
CP	Corpo de prova
C _y	Matriz de covariância
EIM	Ensaio de Infiltração Monitorada
F	função
F(p), FO	Função objetivo
H	Configuração horizontal do tensiômetro
KS	Kosugi (modelo)
K _{sat}	Permeabilidade saturada
PNL	Programação não linear
r	Raio dos poros
R	Configuração radial do tensiômetro
S _e , Θ	Saturação relativa
TDR	Time domain reflectometer
V	Configuração vertical do tensiômetro
VG	Van Genuchten (modelo)