

PREVISÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO POR CORRELAÇÕES COM PROPRIEDADES DOS SOLOS

RETENTION CURVES ESTIMATION BY SOIL PROPERTIES CORRELATIONS

Alfran Sampaio Moura¹, Francisco Chagas da Silva Filho², Silvrano Adonias Dantas Neto³

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Geotecnia

¹Doutor em Engenharia Civil, Geotecnia. E-mail: alfransampaio@ufc.br

²Doutor em Geotecnia. E-mail: fchagas@ufc.br

³Doutor em Geotecnia. E-mail: silvrano@ufc.br.

RESUMO

Este artigo apresenta uma breve revisão acerca de conceitos básicos sobre a sucção e a capacidade de retenção de solos não saturados. Foi montado um banco de dados de 50 curvas de retenção, as quais foram ajustadas por 6 modelos propostos na literatura. Os parâmetros de ajuste dos modelos foram determinados pela minimização do erro entre as curvas experimentais e as previstas de forma iterativa. Em seguida, foram realizadas correlações entre os parâmetros de ajuste dos modelos e algumas propriedades dos solos. Por fim, são apresentadas comparações entre as curvas de retenção experimentais de alguns solos e as correspondentes curvas estimadas a partir dos modelos ajustados. Os modelos de Willians *et al.* (1983), Brooks e Corey (1964), Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958) proporcionaram os melhores ajustes dentre todos os considerados.

Palavras-chave: curva característica, solo não saturado, curva de retenção de água.

ABSTRACT

This paper presents, at first, an abbreviation revision concerning basic concepts about the suction and the capacity of retention of soils unsaturated. A database of 50 characteristic curves was set up, whose curves were adjusted for 6 models proposed in the literature. Parameters of adjustment of the models were determined by the reduction of error among the experimental curves in an iterative way. Subsequently, correlations were accomplished between the parameters of adjustment of the models and some properties of the soils. Finally, there were undertaken comparisons among the experimental characteristic curves of some soils and the corresponding estimated curves from the adjusted models. The models of Willians *et al.* (1983), Brooks and Corey (1964), Fredlund and Xing (1994) and Gardner (1958) provided the most consistent adjustments.

Keywords: characteristic curve, unsaturated soil, water retention curve.

1 – INTRODUÇÃO

O Brasil está localizado em uma zona de clima tropical e apresenta solos residuais e não saturados. Os solos não saturados são de natureza bastante diversa e quando sujeitos a variações de umidade, principalmente, por alterações nas condições climáticas, apresentam alterações nos seus parâmetros de resistência ao cisalhamento e variação volumétrica, originando fenômenos como colapso e expansão.

O conceito teórico da sucção dos solos foi inicialmente desenvolvido na física dos solos no início do Século XX visando o entendimento do sistema solo-água-planta. O estudo da sucção como tentativa de explicar o comportamento mecânico dos solos não saturados com relação a problemas de engenharia foi introduzido por laboratórios de pesquisas da Inglaterra.

A sucção constitui uma das variáveis de tensão necessárias para definir o estado de tensão dos solos. Dessa forma, o estudo das formas de medidas de sucção é importante por propiciar uma melhor compreensão dos fundamentos do comportamento dos solos não saturados.

A existência da sucção em solos não saturados é decorrente de efeitos combinados de capilaridade, de adsorção

A sucção total tem duas componentes, denominadas de sucção matricial e sucção osmótica. A componente matricial, ou capilar, é a parte da energia de retenção de água devida à matriz do solo. A componente osmótica é a parte da energia de retenção d'água devido aos sais dissolvidos na água presente no solo. Dentre as principais técnicas para a medida ou controle da sucção destacam-se as seguintes: psicrômetro, papel filtro, tensiômetro, sensores de condutividade elétrica e térmica e a técnica de translação de eixos.

A curva de retenção é dada pela relação entre o teor de umidade do solo e a sua sucção, fornecendo informações importantes do fluxo de água em solos não saturados.

A determinação da distribuição da sucção e uma consequente variação em maciço de solo não saturado é necessário para modelagem do comportamento tensão-deformação de solos não-saturados. Entretanto, o procedimento de determinação da sucção no campo é muito complexo, sendo a utilização da umidade a

alternativa prática e de fácil obtenção. Com a definição dos valores de umidade são usados os modelos de curvas de retenção para determinação da sucção.

Fredlund (2002) discute a forma de se representar a curva de retenção. Em princípio, dados de sucção matricial são os de maior interesse. Por outro lado, os dados de sucção total para baixos teores de umidade, menores do que 15%, se confundem com os próprios dados de sucção matricial. Dessa forma a composição de uma curva híbrida que combina dados de sucção matricial e sucção total, é conveniente, pois os dados de sucção matricial são os de interesse para baixas sucções.

Segundo Gitirana Júnior, Marinho e Soto (2015) a curva de retenção é, de fato, a propriedade mais importante do solo não saturado.

A curva de retenção pode ser apresentada de diversas formas, no entanto, Gitirana Júnior, Marinho e Soto (2015) afirmam que o formato da curva de retenção pode não seguir padrões pré-definidos, sendo sempre um reflexo da sua distribuição de tamanho de poros, mineralogia, dentre outros fatores.

Quanto maior o teor de argila, maior é a retenção de água e, portanto, mais suave é a inclinação da curva característica. Em solos arenosos, com poros maiores, pequenos valores de sucção são suficientes para reduções acentuadas do teor de umidade.

Para uma melhor compreensão do assunto recomenda-se uma leitura do capítulo sobre curvas de retenção publicado por Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012).

Ainda não existe nenhuma teoria que represente corretamente a relação umidade *versus* sucção. No entanto existem propostas na literatura que são válidas para alguns tipos de solos e para determinadas faixas de sucção. Vários pesquisadores propuseram modelos matemáticos, a partir de equações dos dados experimentais, para a modelagem da curva de retenção (GARDNER, 1958; BROOKS; COREY, 1964; van GENUCHTEN, 1980; WILIANS *et al.*, 1983; FREDLUND; XING, 1994; MARINHO, 1994).

Vale destacar que parâmetros dos modelos podem ser estimados a partir de dados físicos dos solos, sem a necessidade da obtenção experimental da curva de retenção.

Vários pesquisadores têm discutido os equipamentos e técnicas existentes para a determinação de valores de sucção (WOLLE; CARVALHO, 1988; PRESA *et al.*, 1988; JUCÁ, 1993; FREDLUND; RAHARDJO, 1993; CAMPOS, 1994; LEE; WRAY, 1995, VILLAR; CAMPOS, 2001; FREDLUND, RAHARDJO; FREDLUND, 2012; BRIAUD, 2013; BLIGHT, 2013; RAHARDJO; CHANG; LIM, 1995). Os métodos para levantamento da curva de retenção utilizam, basicamente, um sistema no qual se impõe certa tensão de sucção a uma amostra de solo e determina-se a umidade correspondente ao equilíbrio sob esta tensão.

Os diversos métodos disponíveis oferecem distintas maneiras, por vezes, redundantes, e, por outras, complementares, de determinação de propriedades e estado de solos não saturados (MARINHO; SOTO; GITIRANA JÚNIOR, 2015).

O presente artigo tem por objetivo o estabelecimento de correlações entre os parâmetros de ajuste de alguns modelos de curvas de retenção e algumas propriedades dos solos buscando propor, a partir daí uma alternativa para a previsão dessas curvas de retenção por correlações.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para a realização do presente artigo constou, de início, da construção de um banco de dados com 50 curvas de retenção coletadas na literatura, as quais foram ajustadas pelos modelos propostos por Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Wilians *et al.* (1983), Fredlund e Xing (1994) e Marinho (1994).

Estes modelos propõem equações matemáticas que foram determinadas a partir de dados experimentais para a previsão do comportamento succional dos solos.

Para a utilização dos referidos modelos foram confeccionadas planilhas eletrônicas que incorporaram os modelos supramencionados e que foram, posteriormente, utilizados nos ajustes dos dados experimentais.

Os parâmetros de ajuste dos modelos foram determinados pela minoração do erro entre as curvas experimentais e as previstas de forma iterativa.

A equação utilizada para o estabelecimento do erro foi a seguinte:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{i,cal})^2 \quad (1)$$

Em que: ε é o erro; θ_i é a umidade medida experimentalmente; θ_{cal} é a umidade prevista pelo modelo e n é o total de pontos experimentados.

Em seguida foram realizadas correlações entre os parâmetros de ajuste dos modelos e algumas propriedades dos solos.

As propriedades dos solos utilizados nas correlações foram as seguintes: o índice de plasticidade (IP), a porcentagem de areia (% areia), a porcentagem de argila (% argila) e índice de vazios inicial (e_0).

As correlações foram efetuadas de forma a estabelecer relações matemáticas entre cada parâmetro dos modelos e as propriedades dos solos. Dessa forma para o estabelecimento das primeiras correlações, foram utilizadas todas as curvas características constantes no banco de dados. Em seguida, as correlações foram efetuadas separando as curvas por tipo de solo.

Por fim, foram realizadas comparações entre as curvas de retenção experimentais de alguns solos e as correspondentes curvas estimadas a partir dos modelos ajustados.

Cada uma das 50 curvas de retenção coletadas na literatura foi reproduzida, padronizando-se em gráficos de eixos semilogarítmicos com umidade, em escala aritmética, *versus* sucção, em escala logarítmica. O banco de dados gerado é composto por curvas características de 36 amostras de solo indeformadas e 14 amostras de solos compactados.

Os dados foram agrupados em dados gerais, dados dos solos e dados da curva experimental. Os dados gerais são correspondentes ao número de cada curva, o tipo de solo, o local de obtenção das amostras, bem como da referência do trabalho em que as informações foram obtidas. Do total, 36 amostras de solos correspondem a solos estudados no território brasileiro, situados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia e no Distrito Federal, 2 amostras são de solos estudados na cidade de Londres, 1 amostra em Singapura e 3 amostras em Madri. O restante das amostras utilizadas não teve o local de origem definido nos trabalhos originais.

Os dados dos solos foram os seguintes: índice de plasticidade (IP), frações granulométricas (% areia e % argila), índice de vazios (e) e grau de saturação inicial (S), dados da compactação, quando era o caso, e Índice de Suporte Califórnia (ISC), densidade real dos grãos (Gs), sucção em campo e a classificação do solo. Quanto ao tipo de solo, 26 solos são arenosos, 21 são argilosos e 3 siltosos. Quanto ao processo de formação, a maioria dos trabalhos não apresentava nenhuma informação.

As curvas características foram estabelecidas pela técnica do papel filtro em 21 amostras, transdutores de alta pressão foram utilizados em 8 amostras, psicrômetro em apenas uma, câmara de pressão de Richards em 4, painéis de pressão e edômetro em 5, e o tensiômetro em 6 amostras.

Na Tabela 1 são ilustradas, a partir do exemplo a curva de número 13, as informações que foram coletadas nos trabalhos utilizados para compor o referido banco de dados, bem como a forma de organização das mesmas.

Tabela 1 – Informações coletadas para a curva de retenção de número 13 para composição do banco de dados

nº da curva	13
Tipo de solo	Areia Argilo siltosa – estação seca
Local	Loteamento Algarve, município de Alvorada, Região Metropolitana de Porto Alegre, RS
Referência	Bastos, Gehling e Bica (1998)
w _L (%)	41
w _P (%)	31
IP(%)	10
pedra (%)	–
areia (%)	45
silte (%)	20
argila (%)	35
e _o	0,99
W _{nat} (%)	25
S _o (%)	67,6
sucção _{campo} (kPa)	32,7
Classificação SUCS	ML
Classificação MCT	LG'
Equipamento utilizado	Transdutor de pressão de alta capacidade em amostra indeformada
Grandeza relacionada com a sucção	umidade gravimétrica

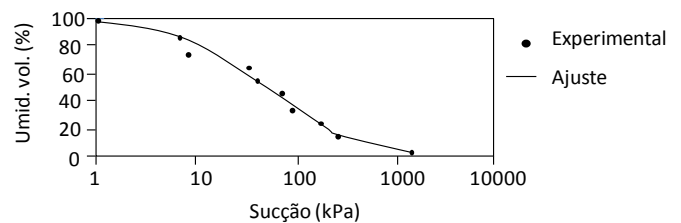
3 – AJUSTES E CORRELAÇÕES REALIZADOS

A seguir são mostrados alguns ajustes realizados e, posteriormente, a forma de organização dos parâmetros e demais informações obtidas com os ajustes das curvas de retenção do banco de dados.

3.1 Ajustes realizados

Na Figura 1 é mostrado o ajuste realizado na curva número 17 com a aplicação do modelo de Gardner (1958).

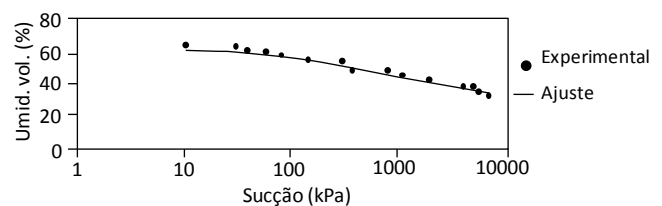
Figura 1 – Ajuste da curva experimental nº 17 por meio da utilização do modelo de Gardner (1958)



O elevado grau de adequação ao modelo, observado na Figura 1, decorre da presença do espaçamento bastante regular dos pontos experimentais quanto aos valores medidos da sucção.

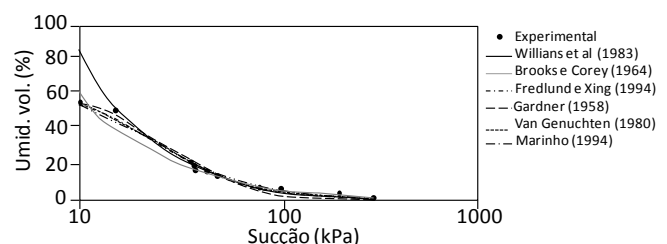
Na Figura 2 é mostrado o ajuste realizado na curva nº 4 com a aplicação do modelo de Fredlund e Xing (1994). No ajuste o erro obtido foi de apenas 2,4. Vale comentar que um erro de 2,4, da forma que foi definida, significa no ajuste da curva da Figura 1 uma diferença média de 0,49 pontos percentuais entre os valores da umidade obtidos experimentalmente e por meio de ajuste.

Figura 2 – Ajuste da curva experimental nº 33 por meio da utilização do modelo de van Genuchten (1980)



Na Figura 3 é mostrado o ajuste da curva de nº 50 por todos os modelos utilizados. Nela observa-se visualmente que, de forma geral, todos os modelos proporcionaram resultados bastante concordantes com a curva experimental. Nesse caso, os erros obtidos variaram de 5 a 90.

Figura 3 – Ajuste da curva característica nº 50 utilizando diversos modelos



3.2 Correlações realizadas

Um total de 52 gráficos foram gerados a partir da correlação de 4 propriedades dos solos com 13 parâmetros de ajuste obtidos com a utilização dos modelos citados na seção 2. A seguir são apresentados os resultados de algumas correlações estabelecidas e os comentários correspondentes.

Vale mencionar que, nas equações obtidas com as correlações realizadas e apresentadas a seguir, x é o parâmetro situado no eixo das abscissas e y é o parâmetro situado no eixo das ordenadas.

Na Tabela 2 é ilustrada a organização dos parâmetros e demais informações obtidas com os ajustes realizados das curvas de retenção do banco de dados.

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste e demais informações obtidas com os ajustes das curvas de retenção nº 42 e 43

nº da curva	42	43	
Willians <i>et al.</i> , 1983	$a_1 =$	21,18	12,45
	$b_1 =$	-5,12	-3,22
	erro =	5,98	3,42
	$R^2 =$	0,96	0,95
	Obs.:	O ajuste não conseguiu simular bem a curva experimental.	A má definição da curva experimental não proporcionou ajuste adequado.
Gardner, 1858	$q =$	0,0038	0,01
	$\eta =$	1,17	1,50
	erro =	25,10	172,11
	Obs.:	Ajuste com elevado grau de adequação ao modelo. Utilizou-se $q_r = 12\%$ e $q_s = 40\%$.	Ajuste inadequado devido a má definição da curva experimental. Adotou-se $q_r = 7\%$ e $q_s = 29\%$.
	Brooks e Corey, 1964	$\lambda =$	0,68
erro =		20,10	48,38
Obs.:		Utilizou-se um $\psi b = 1.100$ kPa que não correspondia a tendência indicada pela curva experimental. O θ_r utilizado foi de 17%.	A má definição da curva experimental não proporcionou ajuste adequado. Utilizou-se um $\psi b = 7\%$ e um $\theta_r = 7\%$.
van Genuchten, 1980	$p =$	3,00E-10	3,00E-08
	$\alpha =$	0,81	0,76
	$\beta =$	5,30	4,20
	erro =	18,07	62,43
	Obs.:	A curva experimental não estava bem definida. Adotou-se $\theta_0 = 60\%$ e $\theta = e = 21\%$.	A curva experimental não estava bem definida. Utilizou-se $\theta_0 = 44\%$ e $\theta_r = 8\%$.
Fredlund e Xing, 1994	$m =$	1,33	1,20
	$n =$	1,15	1,20
	$a =$	132,00	25,00
	erro =	0,29	2,65
	Obs.:	Ajuste com elevado grau de adequação ao modelo.	Modelo proporcionou razoável grau de adequação.

Modelos da curva de retenção

3.2.1 Correlações estabelecidas com o Índice de Plasticidade (IP)

As correlações efetuadas entre os parâmetros de ajuste dos modelos de Willians *et al.* (1983) e Marinho (1994) utilizando todas as curvas de retenção não apresentaram tendência. O mesmo ocorreu nas correlações entre os parâmetros dos modelos com o índice de plasticidade (I_p) apenas dos solos arenosos.

As correlações realizadas com o IP dos solos argilosos apresentaram coeficientes de determinação mais elevados em correlações lineares. Neste caso, os coeficientes de determinação obtidos variaram de 0,5259, parâmetro C do modelo de Marinho (1994), a 0,8490, correspondente ao parâmetro a_1 do modelo de Willians *et al.* (1983).

Nas Figuras 4 e 5 são mostradas as correlações obtidas entre o IP dos solos argilosos e os parâmetros de ajuste, a_1 e b_1 , do modelo de Willians *et al.* (1983).

As correlações entre o IP e os parâmetros de ajuste do modelo de Gardner (1958) utilizando as curvas características de todos os tipos de solos não apresentaram tendência. Separando os solos por tipo foram obtidas correlações apenas para o grupo de solos argilosos. Na correlação do parâmetro de ajuste q , o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,7328.

Para o parâmetro η , considerando novamente apenas os solos argilosos, foi observada uma faixa de variação bastante reduzida, de 0,51 a 0,80, sugerindo a possibilidade de adoção de um valor constante.

Figura 4 – Correlação entre o IP dos solos argilosos e o parâmetro de ajuste a_1 do modelo de Willians *et al.* (1983)

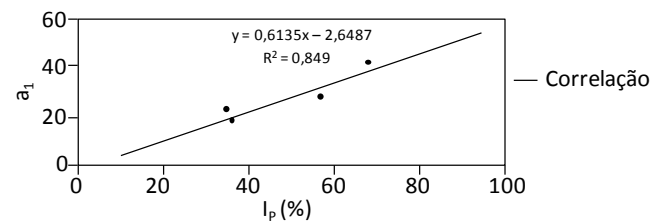
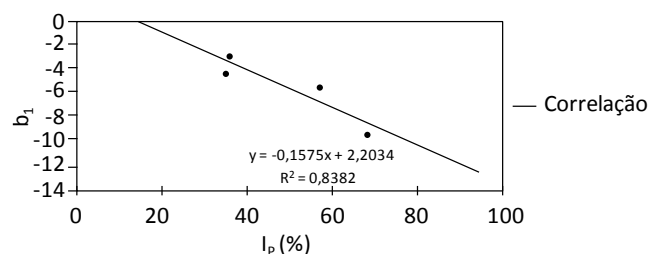


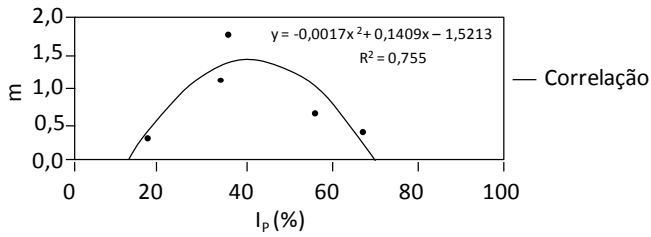
Figura 5 – Correlação entre o IP dos solos argilosos e o parâmetro de ajuste b_1 do modelo de Willians *et al.* (1983)



Para o modelo de Fredlund e Xing (1994) não foi obtida correlação utilizando-se as curvas de todos os solos. Para os solos arenosos apenas, também não foram obtidas correlações adequadas. Para os solos argilosos foram obtidas correlações com coeficiente de determinação que variaram em função do parâmetro considerado. Para o parâmetro m obteve-se R^2 de 0,755 com uma função

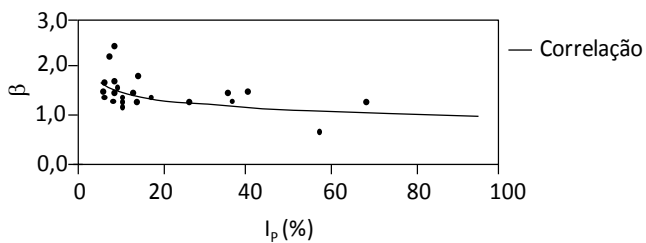
parabólica (Figura 6), nas correlações dos parâmetros n e a , os valores de R^2 obtidos foram inadequadamente reduzidos.

Figura 6 – Correlação entre o I_p dos solos argilosos e o parâmetro de ajuste m do modelo de Fredlund e Xing (1994)



Para o modelo de Brooks e Corey (1964) foi obtida correlação apenas para o grupo de solos argilosos utilizando-se uma função parabólica com R^2 de 0,8493. No modelo de van Genuchten (1980), também se obteve correlação apenas para solos argilosos. O parâmetro p foi correlacionado a partir de um número reduzido de pontos. Na Figura 7 observa-se a tendência de um valor constante para o parâmetro β .

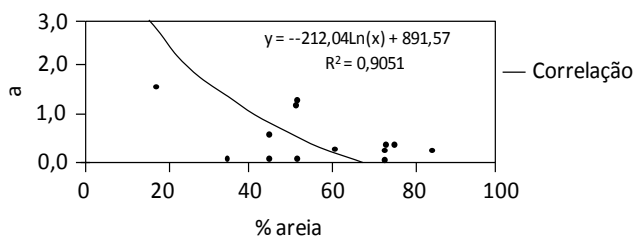
Figura 7 – Correlação entre o IP dos solos argilosos e o parâmetro de ajuste β do modelo de van Genuchten (1980)



3.2.2 Correlações estabelecidas com o percentual de areia, percentual de argila e o índice de vazios

As correlações efetuadas com o percentual de argila e o índice de vazios não apresentaram resultados satisfatórios e, portanto, não foram apresentadas. Com relação ao percentual de areia, foi possível a obtenção de correlação apenas com o parâmetro a do modelo de Fredlund e Xing (1994), conforme mostrado na Figura 8. Neste caso, observa-se a redução do referido parâmetro com a porcentagem de areia e o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,9051.

Figura 8 – Correlação entre o percentual de areia e o parâmetro de ajuste a do modelo de Fredlund e Xing (1994)



Nas Tabelas 3 e 4 são mostradas as expressões obtidas pelas correlações efetuadas entre o índice de plasticidade (IP) e o percentual de areia, que apresentaram os resultados mais concordantes, e os parâmetros de ajustes dos modelos de curva característica utilizados. Na Tabela 4 são mostrados os valores dos coeficientes de determinação obtidos em cada correlação estabelecida.

Pelas Tabelas 3 e 4 observa-se que a quase totalidade das correlações foi estabelecida a partir apenas do índice de plasticidade (IP) e, quase que exclusivamente, para os solos argilosos. Apenas para os modelos de Marinho (1994) e de Fredlund e Xing (1994) foram obtidas correlações com o percentual de areia. Os modelos de Gardner (1958), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) não apresentaram correlações na totalidade de seus correspondentes parâmetros de ajuste.

Tabela 3 – Resumo dos modelos, tipos de solo e parâmetros/índices utilizados nas correlações

Modelo	Parâmetro/ índice do solo	Tipo de solo
Willians <i>et al.</i> (1983)	IP	Argiloso
	IP	Argiloso
Marinho (1994)	IP	Todos
	IP	Argiloso
Gardner (1958)	% areia	Arenoso
	IP	Argiloso
Brooks e Corey (1964)	IP	Argiloso
	IP	Argiloso
van Genuchten (1980)	IP	Argiloso
	IP	Argiloso
Fredlund e Xing (1994)	IP	Argiloso
	IP	Argiloso
	% areia	Todos

Neste caso, os ajustes realizados pelo modelo de Gardner (1958), aplicado apenas para os solos argilosos, indicou que o parâmetro η apresenta variação bastante reduzida, de 0,51 a 0,80, com relação ao Índice de Plasticidade (IP), sugerindo a possibilidade de adoção de um valor constante. A partir dos ajustes realizados com o modelo de Fredlund e Xing (1994), para solos argilosos, o parâmetro n , correlacionado tanto com a porcentagem de argila quanto com o Índice de Plasticidade (IP), apresentou tendência de um valor constante, com valor em média de 1,2.

Somente nos modelos de Willians *et al.* (1983), Marinho (1994) e Brooks e Corey (1964) foram obtidas correlações em todos os seus parâmetros de ajuste. No entanto, destes, apenas nos modelos de Willians *et al.* (1983) e Brooks e Corey (1964) foram obtidos coeficientes de determinação superiores a 0,84.

Tabela 4 – Resumo das correlações efetuadas entre os parâmetros/índices dos solos e os parâmetros de ajuste dos modelos de curva característica

Modelo	Expressão correlacionada	R ²
Willians <i>et al.</i> (1983)	$a_1 = 0,6135.IP - 2,6487$	0,85
	$b_1 = -0,1575.IP - 2,2084$	0,84
Marinho (1994)	$a = 1,1201.IP + 23,559$	0,70
	$a = 1,2896.IP + 18,564$	0,84
	$C = 7,4715.ln IP - 9,0152$	0,54
	$C = -2,8137.ln \%areia + 18,843$	0,55
Gardner (1958)	$q = -0,1242.ln IP + 0,4934$	0,74
	—	—
Brooks e Corey (1964)	$\lambda = -0,0007.IP^2 + 0,0465.IP - 0,2852$	0,85
van Genuchten (1980)	$p = 0,0087.ln IP - 0,0305$	0,84
	$p = -1.10^{-5}.IP^2 + 0,0015.IP - 0,036$	0,99
	—	—
Fredlund e Xing (1994)	$m = 0,0017.IP^2 + 0,1409.IP - 1,5213$	0,76
	—	—
	$a = -2,8877.IP^2 + 240,16.IP - 3139$	0,59
	$a = -212,04.ln \%areia + 891,57$	0,91

Nas Figuras 9 a 12 são mostradas duas curvas de retenção previstas a partir das correlações obtidas neste trabalho.

Figura 9 – Previsão da curva de retenção de um solo argiloso utilizando as correlações obtidas para o modelo de Brooks e Corey (1964)

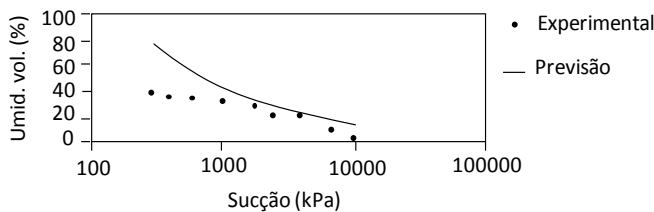


Figura 10 – Previsão da curva de retenção de um solo argiloso utilizando as correlações obtidas para o modelo de Marinho (1994)

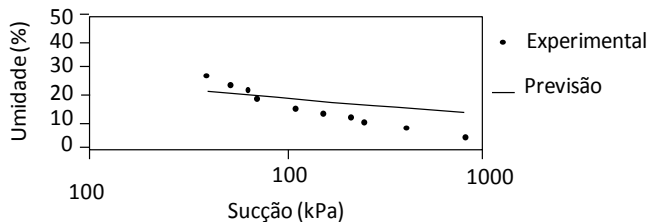
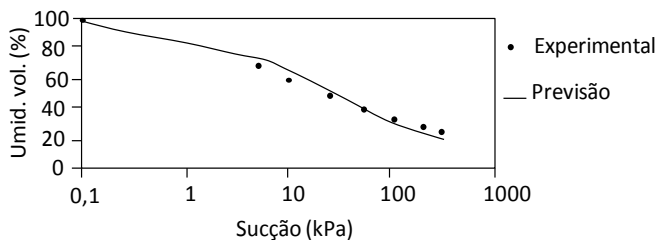


Figura 11 – Previsão da curva de retenção da argila porosa de Brasília utilizando as correlações obtidas para o modelo de Gardner (1958)

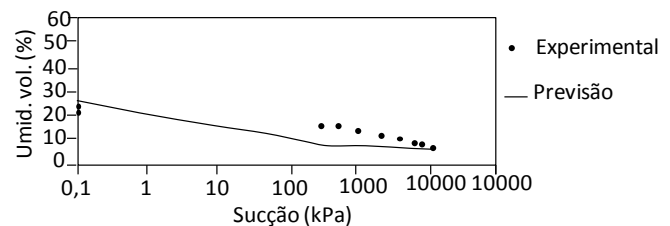


Os dados experimentais mostrados na Figura 9 correspondem à argila azul da cidade de Londres e na Figura 10 correspondem a um solo silteoso, cujas curvas experimentais foram obtidas por Marinho (1998).

Os dados experimentais mostrados na Figura 11 correspondem à argila porosa de Brasília, cuja curva experimental foi obtida por Peixoto *et al.* (2001). A curva experimental da Figura 12 é correspondente a um solo silte argiloso, cuja curva experimental foi obtida por Jucá (1993).

Vale observar que para a previsão da curva de retenção a partir das correlações estabelecidas utilizando-se do modelo de Gardner (1958), o parâmetro η foi fixado em 0,51. Na estimativa efetuada a partir das correlações do modelo de Fredlund e Xing (1994), visando a obtenção de ajustes concordantes, o parâmetro n foi fixado em 1,20.

Figura 12 – Previsão da curva de retenção de um silte argiloso utilizando as correlações obtidas para o modelo de Fredlund e Xing (1994)



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho permitiu o estabelecimento das seguintes conclusões:

- As correlações efetuadas entre o índice de plasticidade (IP) e os parâmetros de ajuste dos modelos de Willians *et al.* (1983) e Marinho (1994) utilizando todas as curvas características não apresentaram tendência. Da mesma forma ocorreu nas correlações entre os parâmetros dos modelos com o índice de plasticidade (IP) apenas dos solos arenosos. As correlações do IP das curvas características dos solos argilosos apresentaram em correlações lineares os melhores resultados;

- A maior parte das correlações obtidas foi estabelecida a partir do índice de plasticidade (IP) e, quase sempre, para os solos argilosos. Apenas pelos modelos de Marinho (1994) e de Fredlund e Xing (1994) foram obtidas correlações com o percentual de areia;

- Os ajustes realizados pelo modelo de Gardner (1958), aplicado para os solos argilosos, indicou uma tendência de valor constante para o parâmetro η , com relação ao Índice de Plasticidade (IP);

- O parâmetro n , do modelo de Fredlund e Xing (1994), para os solos argilosos do banco de dados deste trabalho, correlacionado tanto com a porcentagem de argila quanto com o Índice de Plasticidade (IP), indicou uma tendência de valor também constante, em média de 1,2;

- Dentre os modelos utilizados, as correlações mais concordantes foram obtidas para as propostas de Willians *et al.* (1983), Brooks e Corey (1964), Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958).

AGRADECIMENTO

O primeiro autor, em particular, agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio para a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento de Solos Residuais. **Anais...** Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL'98, Porto Alegre, 1998.

BLIGHT, G. E. **Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Engineering**. CRC Press, 2013, 606 p. <https://doi.org/10.1201/b15239>.

BRIAUD, J. L. **Geotechnical Engineering Unsaturated and Saturated Soils**. Wiley. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 998 p. <https://doi.org/10.1002/9781118686195>.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous Media**. Colorado State University, Hydrology paper n. 3, 1964.

CAMPOS, T. M. P. de. Equipamentos e Técnicas para a Determinação da Sucção no Campo. **Anais...** 2º Simpósio sobre Solos Não Saturados, Recife, 1994.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>.

FREDLUND, D. G. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. **Anais...** In: Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002. Recife, v. III, p. 887-902, 2002.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 521-532, 1994. <https://doi.org/10.1139/t94-120>. <https://doi.org/10.1139/t94-061>

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soils Mechanics for Unsaturated Soils**. Wiley – Interscience Publications, 1993. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>.

GARDNER, W. R. Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application Evaporation from a Water Table. **Soil Science**, v. 85, n. 4, p. 228-232, 1958. <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>.

GITIRANA JÚNIOR, G. de F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. **Anais...** In: Solos não saturados no contexto geotécnico. José Camapum de Carvalho *et al.* org. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2015.

JUCÁ, J. F. T. **Comportamento de los Suelos Parcialmente Saturados Bajo Succión Controlada**.

Tesis (Doctorales), Universidad Politécnica de Ingenieros de Caminhos, Canales e Puertos, Madrid, 1993.

LEE, H. C.; WRAY, W. K. Techniques to Evaluate Soil Suction – A Vital Unsaturated Soil Water Variable. **First International Conference on Unsaturated Soils**. Alonso e Delage, ed. Paris, 1995.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A.; GITIRANA JÚNIOR, G. de F. N. A. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. José Camapum de Carvalho *et al.*, org. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2015.

MARINHO, F. A. M. **Mecânica dos Solos Não Saturados**. Notas para o Curso de Mecânica dos Solos Não Saturados da Escola Politécnica da USP. Versão Parcial. São Paulo, 1998.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage Behaviour of Some Plastic Clays**. PhD thesis. Imperial College, University of London, 1994.

PEIXOTO, R. J.; FEITOSA, J. H. P.; GITIRANA JÚNIOR, G. de F. N.; CUNHA, R. P.; DE CARVALHO, J. C. Superfície de Estado do Solo Poroso Colapsível do Distrito Federal (Brasil). SAT'2001. **Anais...** 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, 2001.

PRESA, E. P.; LINS, A. H. P.; de CAMPOS, L. E. P.; IGNATIUS, S. G.; de CARVALHO, J. C.; DIAS, R. D. **Anais...** Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro, 1988.

RAHARDJO, H. H.; CHANG, M. F.; LIM, T. T. Shear Strength and in Situ Matric Suction of a Residual Soil. **First International Conference on Unsaturated Soils**. Alonso e Delage (ed.), Paris, 1995.

van GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

VILLAR, L. F. de S.; CAMPOS, T. M. P. de. Obtenção de Uma Curva Característica de Sucção pelo Uso Combinado de Técnicas Diversas. SAT'2001. **Anais...** 4. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Alegre, 2001.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R. E.; WILLIAMS, W. T.; HIDNETT, C. T. **The Influence of Texture, Structure and Clay Mineralogy on the Soil Moisture Characteristic**. Australian Journal of Soil Research, v. 21, p. 15-32, 1983. <https://doi.org/10.1071/SR9830015>.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Medidas “In Situ” de Tensões de Sucção. **Anais...** In: Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório em Geotecnia. Rio de Janeiro, v. 2, p. 645-665, 1988.