

*XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP*



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Curvas Granulométricas e de Retenção de Água em Solos Colapsíveis e Expansivos

Ruth Maria da Silva Santos

Mestranda em Geotecnia na UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil,
ruth.santos@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira

Professor da UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

RESUMO: Os solos colapsíveis e expansivos são solos não saturados que possuem como característica inerente à variação de volume quando ocorre a variação de umidade. A curva de retenção de água é muito importante no estudo dos solos não saturados, ela consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água. Esse trabalho tem por objetivo utilizar formulações matemáticas presentes na literatura capazes de descrever a curva de retenção de água de um solo, como também outros métodos propostos que correlacionam a curva de retenção de água com a distribuição granulométrica, para obter o melhor ajuste que represente curvas de retenção de água de solos colapsíveis e expansivos. Utilizam-se dados de curvas granulométricas e de retenção de solos colapsíveis e expansivos da literatura; relaciona e compara com as obtidas pelo método de Mohammadi e Vanclooster (2012) e aplica-se as formulações numéricas de ajustes das curvas de retenção proposta por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004) para descrever a curva de retenção de água dos solos. A proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012) faz ajuste melhor aos dados experimentais das curvas granulométricas em solos arenosos em especial aos bem graduados do que em solos argilosos. Solos que apresentam granulometria aberta e comportamento bimodal têm as curvas de retenção de água melhores ajustadas pela proposta Gitirana Jr. e Fredlund (2004) do que pela proposta de Van Genuchten (1980).

PALAVRAS-CHAVE: Curva de Retenção de Água, Solos Colapsíveis, Solos Expansivos.

ABSTRACT: Collapsible and expansive soils are unsaturated soils that have the inherent characteristic of volume variation when moisture variation occurs. The water retention curve is a very important in the study of unsaturated soils, it consists of the relationship between the amount of water present in the porous material and the energy needed to remove this water. This work aims to use mathematical formulations present in the literature capable of describing the water retention curve of a soil, as well as other proposed methods that correlate the water retention curve with the particle size distribution, to obtain the best fit that represents the curves. of water retention in collapsible and expansive soils. Data from granulometric curves and retention of collapsible and expansive soils from the literature are used; relates and compares with those obtained by the method of Mohammadi and Vanclooster (2012) and applies the numerical formulations for fitting the retention curves proposed by Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. and Fredlund (2004) to describe the retention curve of water from the soils. The proposal by Mohammadi and Vanclooster (2012) makes a better fit to the experimental data of the particle size curves in sandy soils, especially well graded ones, than in clayey soils. Soils that present open particle size and bimodal behavior have the water retention curves better adjusted by the proposal Gitirana Jr. and Fredlund (2004) than by the proposal of Van Genuchten (1980).

KEYWORDS: Water Retention Curve, Collapsible Soils, Expansive Soils.

1 Introdução

Os solos não saturados podem apresentar variações volumétricas em geral quando sofrem mudanças de umidade, essas variações podem ser tanto de redução (colapso estrutural ou deformação oriunda da redução da sucção), os solos onde ocorre esse fenômeno são chamados de solos colapsíveis; quanto de



aumento de volume (expansão estrutural ou mineralógica), que são chamados de solos expansivos. Nos solos não saturados se faz necessário compreender a distribuição, retenção e liberação de água nas diversas situações as quais o solo pode estar sujeito. A atuação da água nesses solos pode ser representada pela curva de retenção de água, que consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água. A curva de retenção segundo Fredlund (2002) e Fredlund (2006) apud Junior et al. (2015) é uma relação chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia. Dependendo do material as curvas de retenção podem apresentar formatos diferentes que são influenciados por diversos fatores físicos e eletroquímicos. As curvas se dividem em dois grupos: unimodais (aquelas que apresentam um único trecho de dessaturação, típicos de materiais altamente plásticos) e bimodais (apresentam dois trechos de dessaturação). Na literatura é possível encontrar algumas equações de ajustes que podem ser utilizadas para se obter uma estimativa da curva de retenção de água, a possibilidade de estimar essa relação é de grande valia em planejamentos de obras, norteados tomadas de decisões iniciais ao desenvolvimento de projetos, entre outras utilidades, além de serem utilizadas em modelos de comportamento do solo. Dentre os diversos ajustes presentes na literatura esse trabalho vai utilizar os ajustes propostos por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004) e Mohammadi e Vanclooster (2012).

A equação proposta por Van Genuchten (1980) é apresentada na Equação (1) e o índice m é calculado pela Equação (2):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha^* s)^n]^m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Onde: θ – Umidade volumétrica; θ_s – Umidade volumétrica de saturação; θ_r – Umidade volumétrica residual; s – sucção; α – Índice de ajuste; m – Índice de ajuste; n – Índice de ajuste.

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propõem duas equações para representar as curvas de retenção, uma para as curvas unimodais e outra para as bimodais. Os índices de ajuste escolhidos são os valores de entrada de ar, a sucção residual, o grau de saturação residual e um índice que controla a suavidade das curvas.

A Equação (3) foi proposta para as curvas unimodais e a Equação (4) para as bimodais:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d} + S_2 \quad (3)$$

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b1} \psi_{res1}})^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{res1} \psi_{b2}})^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b2} \psi_{res2}})^{d_3}} + S_4 \quad (4)$$

Onde: S é o grau de saturação; ψ a sucção matricial; ψ_{res} a sucção residual e ψ_b o valor de entrada de ar.

Mohammadi e Vanclooster (2012) propõe um método de estimar a curva de retenção de água no solo baseado na distribuição do tamanho da partícula (curva granulométrica). Os autores dividem a curva granulométrica em n frações de tamanhos diferentes e consideram que as partículas do solo são esféricas, utilizam como dados de entrada a umidade de saturação e o índice de vazios. Esse método subestima a umidade, quando em altas sucções, essa tendência foi atribuída a dessorção incompleta da água residual que reveste as partículas do solo ou a água retida dentro das partículas não esféricas que possuem uma alta energia superficial. O método é descrito matematicamente pelas equações Equações (5), (6) e (7).

$$\theta_j = \theta_{sat} \sum_{j=1}^{j=i} p_j \quad (5)$$

$$s_j = \frac{5,43 \cdot 10^{-5}}{R_j} \xi \quad (6)$$



$$\xi = \frac{1,9099}{1+e} \quad (7)$$

Onde: θ_j – Umidade volumétrica de uma dada fração da curva granulométrica; θ_{sat} – Umidade volumétrica de saturação; p_j – Massa que passa em cada fração “j” da curva granulométrica; i – número de frações em que a curva granulométrica foi dividida, s_j – sucção da fração “j” da curva granulométrica; ξ – coeficiente de empacotamento das partículas; e – índice de vazios; R_j – Raio da fração “j” da curva granulométrica.

2 Materiais e Métodos

Foi realizada uma revisão bibliográfica em busca de compreender os ajustes para as curvas de retenção, desenvolvidos por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004), como também o método desenvolvido por Mohammadi e Vanclooster (2012). Outra revisão bibliográfica foi realizada em busca de artigos, teses e dissertações que abordasse solos colapsíveis e expansivos e apresentasse além da caracterização física dos solos também a curva de retenção dos mesmos. Foi utilizado como ferramenta para realizar os ajustes, planilhas do Excel. Os resultados dos ajustes foram relacionados com as curvas de retenção e granulométricas obtidas, para verificar o melhor ajuste para cada tipo de solo. Foram selecionados 20 solos, sendo 10 colapsíveis e 10 expansivos, de onde foram obtidas as características geotécnicas e as curvas de retenção. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas dos solos colapsíveis sendo cinco granulares (SP, SM, SC) e cinco de textura fina (ML, MH, CL). Os solos expansivos apresentaram uma textura fina, oito dos dez solos foram classificados como argila (CL, CH) e os outros dois como silte (MH), na Figura 2.

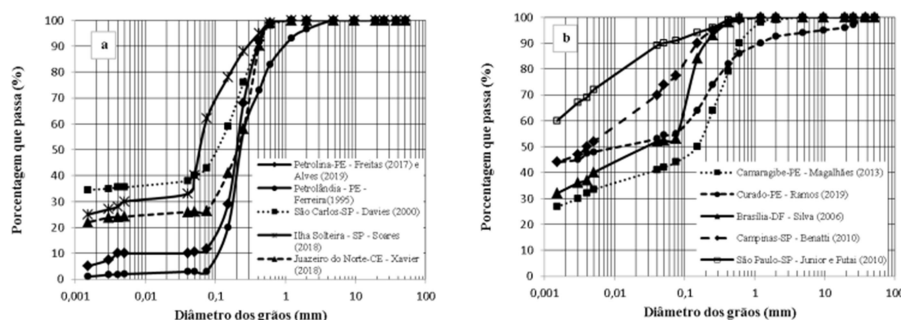


Figura 1. Curvas granulométricas dos solos colapsíveis - a) solos granulares, b) solos finos.

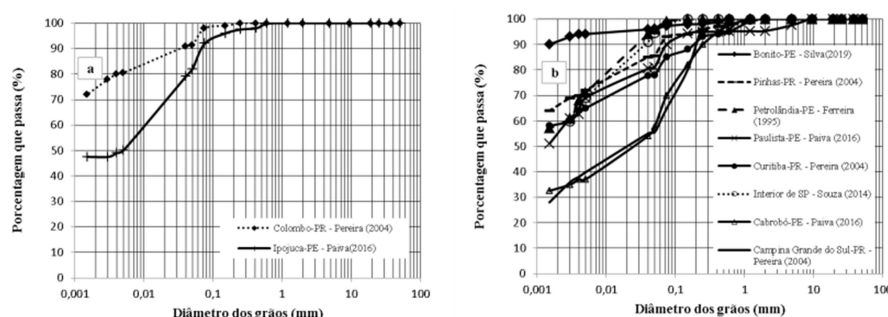


Figura 2. Curvas granulométricas dos solos expansivos – a) solos siltosos, b) solos argilosos.

3 Resultados e Discussões

3.1 Ajustes das curvas de retenção dos solos colapsíveis

A Figura 3 apresenta dados experimentais da relação umidade-sucção, as curvas dos ajustes pelas propostas de Van Genuchten (1980), Gitirana e Fredlund (2004) e a curva de ajuste por Mohammadi e



Vanclooster (2012) obtida a partir dos dados da granulometria para os solos colapsíveis granulares, os índices utilizados nos ajustes das curvas e os coeficientes de correlações também se encontram na Figura 3. Os solos colapsíveis arenosos com comportamento unimodal na curva característica (Figura 3a, 3b, 3c, 3d), no ajuste proposto por Van Genuchten (1980) apresentaram coeficientes de correlação variando de 0,84 e 0,98, (Figura 3a, 3b, 3c, 3d) e no ajuste proposto por Gitirana e Fredlund (2004) os coeficientes de correlação variaram de 0,83 e 0,98 (Figura 3a, 3b, 3c, 3d). Para este tipo de curva unimodal a proposta de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004) apresentaram coeficientes de ajustes com a faixa de variação muito próxima. O método de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresenta bom ajuste tanto no formato da curva quanto nos valores de sucção e umidade volumétrica, esse resultado pode ser atribuído ao fato desses solos apresentarem partículas em formatos mais subarredondados ou arredondados, se aproximando da simplificação feita pelos autores que consideraram as partículas do solo esféricas em sua formulação. Além disso, o solo arenoso tem baixa capacidade de retenção de água, ou seja, ocorre uma grande variação de umidade, em pequenas variações de sucções, isso faz com que esses solos apresentem um melhor ajuste a esta proposta segundo os autores, entretanto a proposta apresenta limitações para altas sucções, essa tendência foi atribuída a dessorção incompleta da água residual que reveste as partículas do solo ou a água retida dentro das partículas não esféricas que possuem uma alta energia superficial. O solo colapsível arenoso com comportamento bimodal na curva característica (Figura 3e) também apresentou boa concordância dos ajustes com os dados experimentais, na proposta de Van Genuchten (1980) o valor do coeficiente de correlação foi de 0,90 (Figura 3e) e por Gitirana e Fredlund (2004) o valor foi de 0,96 (Figura 3e). Para a curva bimodal o ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) foi mais eficiente, o que já era esperado já que os autores apresentaram uma equação especificamente para este tipo de curva. Já o método de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresentou um resultado similar ao das curvas com comportamento unimodal se mostrando eficiente quando comparado com os outros dois métodos.

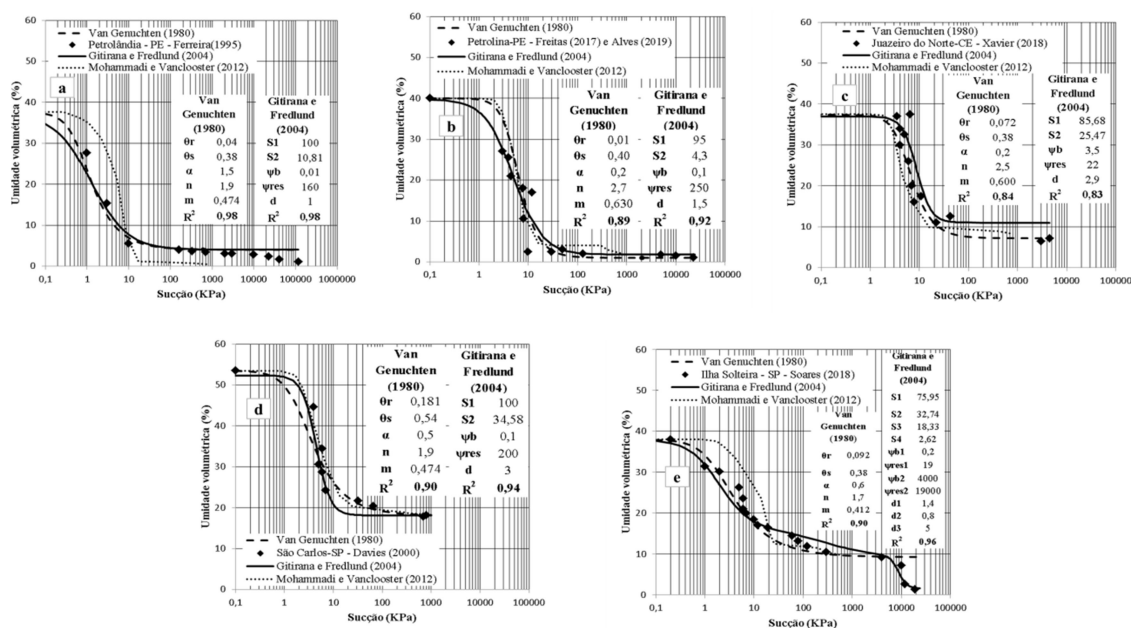


Figura 3. Ajustes dos solos colapsíveis granulares – a) Petrolândia-PE, b) Petrolina-PE, c) Juazeiro do Norte-CE, d) São Carlos-SP, e) Ilha Solteira-SP.

Os solos colapsíveis siltosos (Figura 4) apresentaram curvas de comportamento bimodal bem definido. Os coeficientes de correlação obtidos pelo ajuste de Van Genuchten (1980) variaram 0,85 a 0,91 (Figura 4a, 4b, 4c), porém apesar de apresentar valores de coeficientes relativamente altos, quando se compara as curvas obtidas com os dados experimentais pode-se verificar que o formato das curvas bimodais não foram bem representados, diferente do ajuste pelo método de Gitirana e Fredlund (2004) que apresentou coeficiente 0,99 (Figura 4a, 4b, 4c) para todos os solos, além de representar bem o formato das curvas, se mostrando mais eficiente na representação das curvas com comportamento bimodal. O ajuste de



Mohammadi e Vanclooster (2012) apresentou resultados medianamente satisfatórios, nos solos das Figuras 4a e 4c é possível observar que a curva apresenta valores representativos de umidade e sucção e que o formato da mesma é bem representado, já no solo da Figura 4b a curva obtida pelo método não acompanha o formato dos dados experimentais, nos três solos é possível se verificar que o método apresenta limitação para altas sucções.

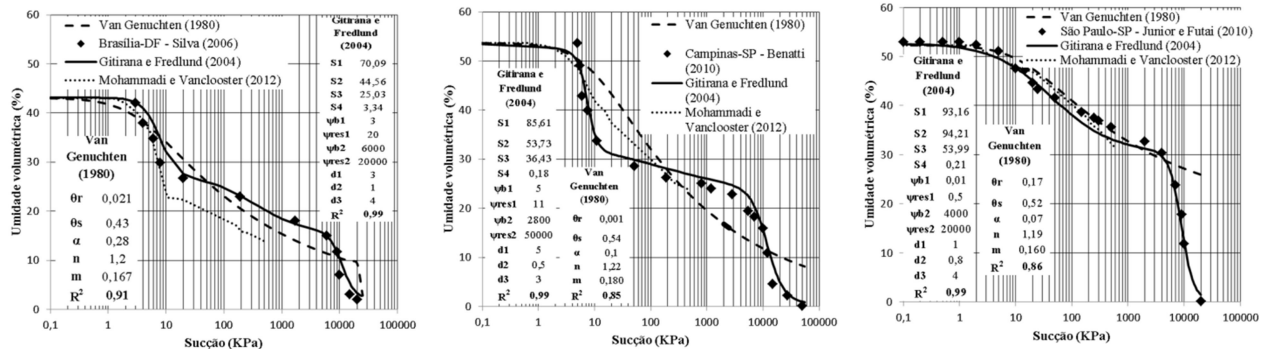


Figura 4. Ajustes dos solos colapsíveis siltosos – a) Brasília-DF, b) Campinas-SP, c) São Paulo-SP..

Por fim os solos colapsíveis argilosos de baixa plasticidade Figura 5, também apresentaram curvas bimodais bem definidas. Pelo método de Van Genuchten (1980) as curvas não tiveram o formato bem representado, pois os patamares das curvas não ficam muito evidentes neste ajuste e os coeficientes de correlação variaram entre 0,86 e 0,88 (Figura 5a,5b), já pelo método de Gitirana e Fredlund (2004) é possível verificar que os patamares são bem representados e o coeficiente de correlação para os dois solos foi 0,99 (Figura 5a,5b). Já pelo método de Mohammadi e Vanclooster (2012), foi possível observar que o ajuste não foi eficiente, pois o formato da curva e os valores de sucção e umidade apresentaram uma diferença muito grande quando comparados aos dados experimentais, esse mesmo comportamento foi observado nos solos expansivos, descritos a seguir, que em geral apresentam textura fina predominantemente argilosa, a estrutura desses solos são formadas por partículas não esféricas, e possuem alta capacidade de retenção de água devido ao efeito de capilaridade e das forças de adsorção; essas características justificam a ineficiência do modelo para esses solos, pois são exatamente contrárias as simplificações adotadas pelos autores.

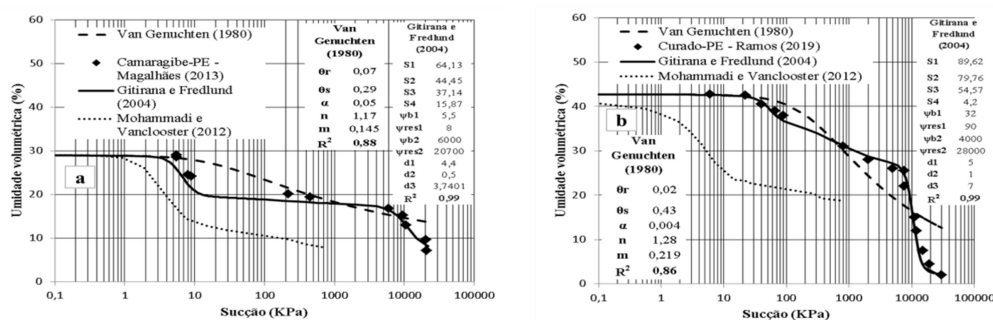


Figura 5. Ajustes dos solos colapsíveis argilosos – a) Camaragibe-PE, b) Curado-PE.

3.2 Ajustes das curvas de retenção dos solos expansivos.

O solo expansivo siltoso da Figura 6a, apresentou comportamento unimodal, o ajuste pelo método de Van Genuchten (1980) teve coeficiente de correlação de 0,95 (Figura 6a), já no ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) o coeficiente foi 0,98 (Figura 6a), ambos os ajustes representaram bem o formato da curva. O método de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresentou uma boa representatividade tanto para os valores de sucção e umidade quanto no formato da curva, porém a mesma limitação para altas sucções pode ser observada. Já o solo expansivo siltoso da Figura 6b, tem comportamento bimodal e o ajuste de Van Genuchten (1980) não se mostrou eficiente ao representar o formato da curva bimodal, apesar de apresentar um coeficiente de



correlação de 0,89 (Figura 6b). O ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) acompanhou bem o formato da curva com um coeficiente de 0,98 (Figura 6b), neste solo o método de Mohammadi e Vanclooster (2012), não se mostrou eficiente, pois tanto os valores de umidade e sucção, quanto o formato da curva não foram bem representados.

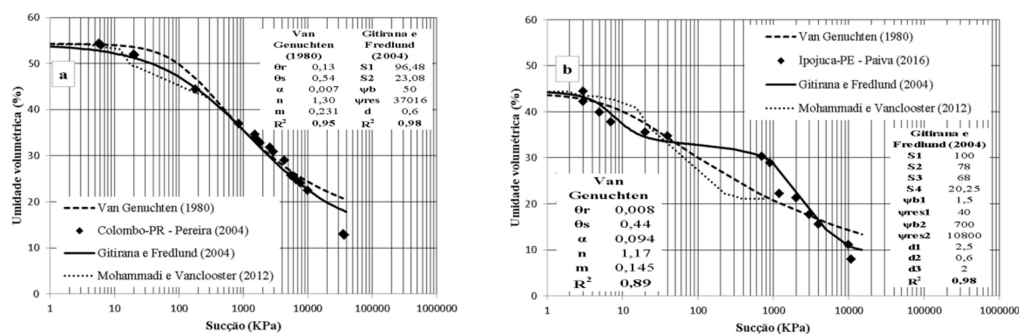


Figura 6. Ajustes dos solos expansivos siltosos - a) Colombo-PR, b) Ipojuca – PE.

Para os solos expansivos argilosos de baixa e média plasticidade, na Figura 7a o solo apresenta comportamento da curva unimodal, o formato da curva é bem representado tanto pelo método de Van Genuchten (1980), com coeficiente de correlação de 0,97 (Figura 7a), quanto pelo método de Gitirana e Fredlund (2004) com coeficiente de 0,99 (Figura 7a). Já pelo método de Mohammadi e Vanclooster (2012) foi possível observar que o ajuste não foi eficiente, pois o formato da curva e os valores de sucção e umidade apresentaram uma diferença muito grande quando comparados aos dados experimentais, esse resultado já era esperado devido às limitações do método para solos de textura fina. Já no solo da Figura 7b que tem comportamento bimodal, pelo ajuste de Van Genuchten (1980) o coeficiente de correlação obtido foi de 0,96 (Figura 7b) e de 0,99 (Figura 7b) para o ajuste de Gitirana e Fredlund (2004), apesar de os dois métodos apresentarem valores de coeficientes altos, o formato da curva foi mais bem representado pelo método de Gitirana e Fredlund (2004). Da mesma forma que o solo da Figura 7a o ajuste proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012), não se mostrou eficiente na representação da curva de retenção.

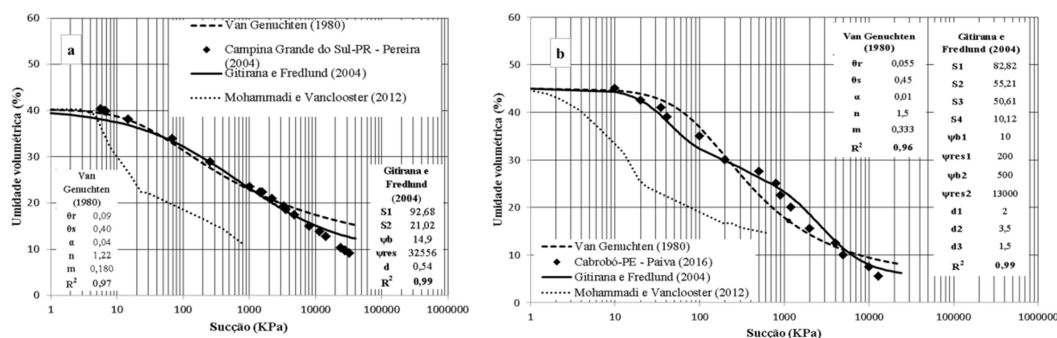


Figura 7. Ajustes dos solos expansivos argilosos de baixa e média plasticidade – a) Campina Grande do Sul-PR, b) Cabrobó-PE.

Os solos expansivos argilosos de alta plasticidade em geral apresentaram curva de retenção com comportamento unimodal (Figuras 8a,8b,8c,8d,8e), para estes solos tanto o ajuste de Van Genuchten (1980), quanto o ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) apresentaram boa concordância com os dados experimentais, tendo como variação dos coeficientes de correlação de 0,84 a 0,98 e 0,87 a 0,99 respectivamente (Figuras 8a,8b,8c,8d,8e). O método de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresentou um resultado similar aos dos solos argilosos anteriores, com uma dispersão considerável nos valores de sucção e umidade, além da limitação da curva para a faixa do solo que possui altas sucções, apenas o solo da Figura 8a, apresentou uma boa concordância na faixa inicial da curva. O solo da Figura 8f tem comportamento bimodal tanto o ajuste de Van Genuchten (1980) quanto o de Gitirana e Fredlund (2004) tiveram correlações altas com valor de 0,93



(Figura 8f) para o primeiro e 0,96 (Figura 8f) para o último, porém o formato da curva foi mais bem representado por Gitirana e Fredlund (2004). No ajuste de Mohammadi e Vanclooster (2012), o comportamento foi similar aos solos das Figuras 8b,8c,8d,8e.

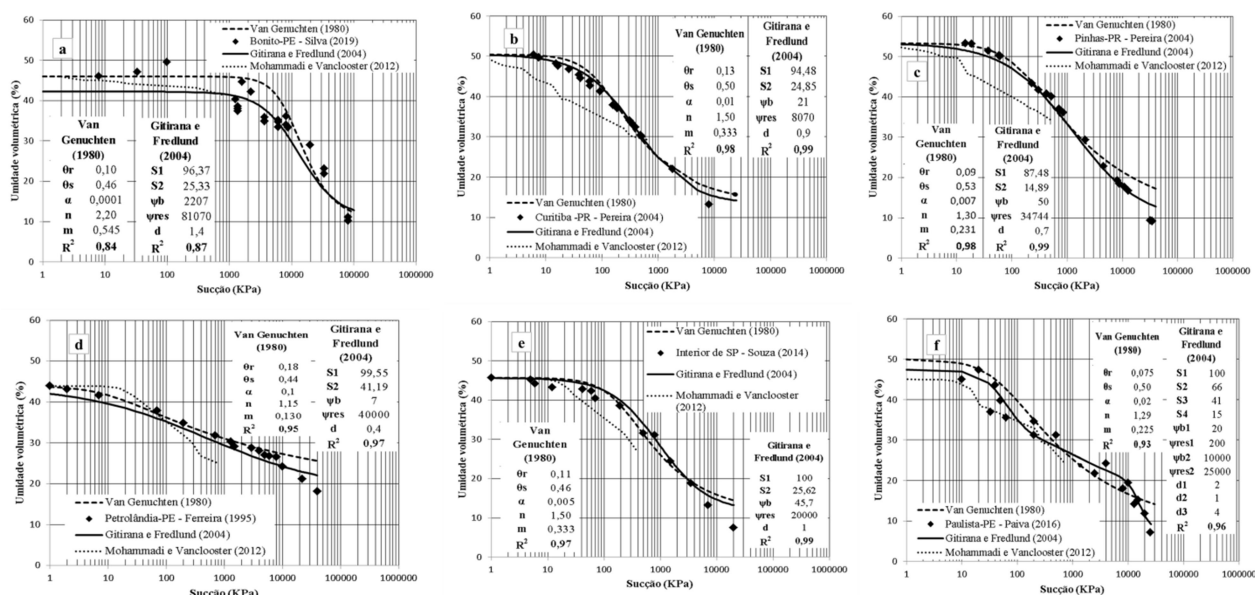


Figura 8. Ajustes dos solos expansivos argilosos de alta plasticidade – a)Bonito-PE, b)Curitiba-PR, c)Pinhas-PR, d)Petrolândia-PE, e)Interior de SP, f)Paulista-PE .

4 Conclusões

A partir dos ajustes realizados foi possível observar na prática a eficiência das equações numéricas para representar as curvas de retenção. O ajuste proposto por Van Genuchten (1980) se mostrou muito eficiente para ambos os solos colapsíveis e expansivos, porém vale ressaltar que para curvas bimodais bem acentuadas, o ajuste mesmo apresentando bons coeficientes de correlação, o formato das curvas não eram bem representado; o que é uma desvantagem em relação ao método de Gitirana e Fredlund (2004) que apresenta uma equação específica para curvas bimodais e com isso os formatos das curvas ficam bem definidos. O método de Gitirana e Fredlund (2004) se mostrou igualmente eficiente na predição das curvas de retenção dos solos colapsíveis e expansivos quando comparado com o ajuste de Van Genuchten (1980), porém como citado anteriormente com uma maior vantagem quando o ajuste é em curvas bimodais. Já o modelo proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012), apresentou resultados não muito eficientes quando comparados com os outros dois ajustes, porém com uma representação melhor nos solos colapsíveis arenosos, e intermediários para solos colapsíveis e expansivos siltosos, nos solos argilosos devido às simplificações usadas neste modelo às curvas apresentaram uma maior dispersão quando comparadas com os dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, I. S.(2019) *Análise microestrutural e numérica de um solo colapsível antes e após o colapso*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 116p.
- Benatti, J.C.B. (2010) *Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.185p
- Davies, G.I. (2000) *Análise e modelagem do comportamento colapsível de um solo arenoso*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP,168p.



- Ferreira, S. R. M. (1995) *Colapso e Expansão de Solos Naturais Não Saturados Devidos à Inundação*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 379p.
- Freitas, M. L. R. A. (2017) *Comportamento geomecânico de um solo colapável de Petrolina - PE avaliado por meio de ensaios de campo e laboratório*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 145p.
- Gitirana JR, G. F. N. e Fredlund, D. G. (2004) Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, p 209-212.
- Junior, G.F.N.G. Marinho, F.A.M. e Soto, M. A. A. (2015). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 205-229.
- Junior, I.R. e Futai, M. M. (2010) Estudo de Caso de um Melhoramento de Solos Colapsíveis com Compactação. *COBRAMSEG*, ABMS.
- Magalhães, J. S. L. A. (2013) *Estudo de estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe-PE*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 107p.
- Mohammadi, M. H. e Vanclooster M. (2011). Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model. *Vadose Zone Journal*, vol 10, p .594-602
- Paiva, S. C. Paiva. (2016) *Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista-PE e de suas misturas com cal*. Tese de Doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 191p.
- Pereira, E. M. (2004) *Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 253p.
- Ramos, M. C. L.S. (2019) *Estudo geológico-geotécnico e análise da estabilidade de uma encosta localizada no bairro do Curado II no município de Jaboatão dos Guararapes – PE*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 196p.
- Silva, J. D. (2006) *Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 141p.
- Silva, T. C. R. (2019) *Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissura de solo expansivo do município de Bonito - PE*. 2019. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 164p.
- Soares, F. V.P. (2018) *Previsão de recalques por colapso de sapatas assentes em solo natural e compactado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 170p
- Souza, R. F. C. (2014) *Estudo da influencia da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com técnica da transferência de vapor*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 242p.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol 44, p. 892-898.
- Xavier, J. M. (2018) *Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 176p.