



APLICAÇÃO DE UM MODELO DE PREVISÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA A SOLOS TROPICAIS BIMODAIS

Jordana Portilho Neves

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, jordanapn@hotmail.com

Roberto Dutra Alves

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, roberto.dutra@hotmail.com

Gilson de F. N. Gitirana Jr.

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gilsongitirana@ufg.br

Thiago Augusto Mendes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, Brasil, thiago.mendes@ifg.edu.br

RESUMO: Os solos tropicais possuem características bastante peculiares, sendo uma delas relacionada ao enriquecimento do solo com óxidos de ferro e alumínio capazes de formar aglutinações das suas partículas conhecidas como agregações. Em função destas agregações, o solo tropical pode apresentar curva característica solo-água (CCSA) bimodal. A CCSA de um solo contém as informações mais importante de solos não saturados das quais é possível extrair parâmetros hidromecânicos tais como condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e parâmetros de deformabilidade. Porém, medir CCSA é trabalhoso, envolve custo, tempo e complexidade de procedimento. Diversas equações para prever CCSA são encontradas na literatura. No entanto, a maioria dessas equações foram propostas para solos granulares ou solos finos com estrutura unimodal. Neste artigo, verificou-se a aplicabilidade do método de previsão proposto por Satyanaga et al. (2013) em solos tropicais com CCSA bimodais. Os resultados obtidos revelam que os parâmetros das equações para curva de distribuição de tamanho de grãos (GSD) são capazes de descrever bem as propriedades físicas do solo tropical bimodal, porém eles não são capazes de produzir previsões razoáveis, resultando em sucções subestimadas.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Tropicais, Curva Característica Solo-Água, Gradação do Solo, Comportamento Bimodal.

ABSTRACT: Tropical soils have very peculiar characteristics, one of which is related to the enrichment of the soil with iron and aluminum oxides capable of forming agglutinations of its particles known as aggregations. Due to these aggregations, the tropical soil can present a bimodal soil-water characteristic curve (SWCC). The SWCC of a soil contains the most important information of unsaturated soils from which it is possible to extract hydromechanical parameters such as hydraulic conductivity, shear strength and deformability parameters. However, measuring SWCC is laborious, involves cost, time and procedure complexity. Several equations to predict SWCC are found in the literature. However, most of these equations have been proposed for granular soils or fine soils with unimodal structure. In this article, the applicability of the forecasting method proposed by Satyanaga et al. (2013) in tropical soils with bimodal SWCC. The results obtained reveal that the parameters of the grain size distribution curve (GSD) equations are able to describe well the physical properties of the bimodal tropical soil, but they are not able to produce reasonable predictions, resulting in underestimated suctions.

KEYWORDS: Tropical Soils, Soil-Water Characteristic Curve, Soil Gradation, Bimodal Behavior.

1 Introdução

Solos tropicais são encontrados normalmente em regiões de clima tropical úmido que apresentam propriedades advindas de processos geológicos e/ou pedológicos típicos dessas regiões. Esses solos possuem características bastante peculiares revelando comportamentos mecânico e hidráulico distintos



ocasionados pelo processo de laterização, onde acontece a lixiviação dos cátions básicos passando a apresentar grande concentração de óxidos de ferro e de alumínio capazes de formar agregações estáveis na presença de água atuando como agentes cimentantes naturais entre as partículas (SANTOS; PARREIRA, 2015).

Em função da corriqueira agregação das partículas, esses solos desenvolvem comportamentos marcados por dois estágios que definem a macro e micro estrutura dos solos tropicais, também denominados de comportamento bimodal. A distribuição bimodal dos poros é constantemente relacionada com a qualidade da graduação da curva característica do solo ou com a estrutura de solos, podendo apresentar patamares motivado pela ausência de poros definidores da faixa de sucção deste patamar específico (FURMAN, 2019). As curvas características solo-água (CCSA) são de extrema eficácia para representar esse comportamento, onde é definida pela relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água (sucção), sendo a propriedade mais importante do solo não saturado (FREDLUND, 2006).

A CCSA pode ser utilizada para estimar propriedades dos solos não saturados para a análise do comportamento das propriedades mecânicas (Fredlund e Rahardjo, 1993) e a partir dela pode-se estabelecer correlações com outras propriedades físicas como a resistência ao cisalhamento, permeabilidade e módulo de resiliência.

Existem vários métodos para obtenção da CCSA em laboratório que envolvem custos, complexibilidade de procedimento e tempo relativamente alto para realização dos ensaios (RODRIGUES, 1997).

Inúmeros métodos de previsão de CCSA podem ser encontrados na literatura, a saber Arya & Paris, 1981; Haverkamp & Parlange, 1986; Arya & Dierolf, 1989; Fredlund et al., 2002; Aubertin et al., 2013; entre outros. Em sua grande maioria, estes modelos foram propostos para solos granulares ou solos finos com estrutura unimodal. Não foram apresentadas na literatura muitas equações que representassem curvas características bimodais. Apenas Fredlund & Xing, 1994; Gitirana Jr. & Fredlund, 2004 e Leong, 2016 apresentaram modelos de ajuste para curvas bimodais Satyanaga et al., 2013 e Li et al., 2004 propuseram uma equação para modelar curvas características bimodais.

Dessa forma, a modelagem da CCSA visa oferecer uma estimativa para estudos preliminares ou para casos nos quais uma maior variabilidade dos dados é permitida. Ao passo que modelar CCSA pode ser vantajoso para a obtenção de propriedades do solo, reduzindo o tempo utilizado em análises laboratoriais na ausência de CCSA medida (Satyanaga et al., 2013). Embora tal previsão não substitui em muitos casos a medição da CCSA, torna-se bastante útil para a implementação da mecânica dos solos não saturados na engenharia geotécnica (Li et al., 2014).

Grande parte dos métodos de previsão que existem se baseiam na hipótese da obtenção indireta da distribuição do tamanhos dos poros através da curva granulométrica, ou seja, as curvas características refletem as geometrias dos poros do solo relacionadas à distribuição do tamanho dos grãos do solo (Gitirana et al., 2005). Questiona-se a validade dessa hipótese para solos tropicais que apresentam propriedades peculiares e de comportamento.

Um estudo preliminar sobre um método de previsão da curva de distribuição de tamanho de grãos e da curva característica aos solos tropicais típicos de regiões tropicais úmidas é apresentado nesse artigo. É utilizado o método de Satyanaga et al. (2013). São consideradas curvas granulométricas com e sem defloculante, de forma a investigar que tipo de curva oferece uma melhor previsão.

Dessa forma, o objetivo desse estudo é verificar a aplicabilidade desse método de previsão proposto para solos bimodais aplicado em solos tropicais com características bimodais, uma vez que os modelos de previsão propostos na literatura são para solos de regiões com clima predominantemente temperado e restritos às características desses solos.

2 Teoria

2.1 Modelo de Satyanaga et al. (2013)

Satyanaga et al. (2013) propos modelar a GSD e CCSA que incorporaram parâmetros que estão relacionados às propriedades físicas do solo. Foi proposta uma equação matemática para prever CCSA para solos com características bimodais. No desenvolvimento da equação para prever CCSA, Satyanaga et al.



(2013) propuseram uma nova equação para descrever GSD bimodal apresentando parâmetros com significado físico, capazes de representar as variáveis do GSD do solo.

2.1.1 Equação proposta para ajuste da GSD

De acordo com o método proposto por Satyanaga et al. (2013) para obtenção de uma equação para representar GSD bimodal leva-se em conta a representação de variáveis do GSD do solo, tais como o diâmetro máximo de partícula, desvio padrão de GSD e porcentagem de partículas nas misturas de solo por meio da equação 6, considerando que a curva GSD possui semelhança com a curva de distribuição lognormal (Figura 1):

$$P = \left[1 - \left(0,15 \ln \left(1 + \frac{0,075}{d} \right) \right) \right] \left[W_1 \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{d_{\max 1} - d_{m1}}{d_{\max 1} - d} \right)}{S_{d1}} \right) + W_2 \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{d_{\max 2} - d_{m2}}{d_{\max 2} - d} \right)}{S_{d2}} \right) \right] \quad (1)$$

sendo: P a distribuição granulométrica cumulativa do solo, d o diâmetro da partícula do solo (mm), $d_{\max}$ o parâmetro que representa o diâmetro máximo da partícula do solo (mm), d_m o parâmetro que representa a média geométrica do diâmetro da partícula do solo (mm), W o parâmetro que representa a porcentagem de partícula do solo (granulação grossa ou fina) e s_d o parâmetro que representa o desvio padrão geométrico da curva GSD.

$$S_d = (\%d_{0,001}) \exp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{d_i}{d_m} \right)^2}{n}} \quad (2) \quad d_m = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} \quad (3)$$

onde e % $d_{0,001}$ é a porcentagem da partícula do solo com diâmetro menor que 0,001 mm.

2.1.2 Equação proposta para prever CCSA

De acordo com o método proposto por Satyanaga et al. (2013) para obtenção de uma equação para representar CCSA bimodal (Equação 4) leva-se em conta algumas considerações:

- Os parâmetros considerados na equação podem estar relacionados com as propriedades físicas do solo e representar as variáveis do CCSA, sendo elas: valor de entrada de ar (VEA), ponto de inflexão e teor de água residual do solo, conforme demonstrado na Figura 2;
- O conteúdo de água presente no solo (θ_w) é igual a zero quando o solo atingir sucção igual a 10^6 kPa;
- A forma do CCSA é similar à distribuição lognormal;
- O conteúdo de água saturado (w_{sat}) é conhecido;
- O volume total do solo é considerado constante, onde nenhuma mudança de volume é considerada para o desenvolvimento da equação proposta.

$$\theta_w = \left(1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right) \left[\theta_r + (\theta_{s1} - \theta_{s2}) \left(1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{\psi_{a1} - \psi}{\psi_{a1} - \psi_{m1}} \right)}{S_1} \right) \right) + (\theta_{s2} - \theta_r) \left(1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{\psi_{a2} - \psi}{\psi_{a2} - \psi_{m2}} \right)}{S_2} \right) \right) \right] \quad (4)$$

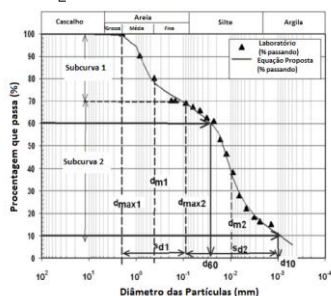


Figura 1. Distribuição de tamanho de grãos com característica bimodal (Satyanaga et al., 2013).

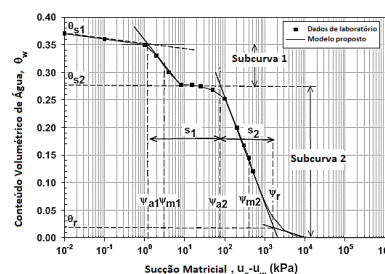


Figura 2. Curva característica solo-água com características bimodais (Satyanaga et al., 2013).



onde θ_w é o teor de água volumétrico calculado, θ_s o teor de água volumétrica saturada (medido em laboratório), ψ a sucção matricial em consideração, ψ_a é o valor de entrada de ar e ψ_m é a sucção matricial no ponto de inflexão e s é o desvio padrão geométrico de CCSA. θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual e ψ_r a sucção matricial correspondente ao conteúdo volumétrico de água residual. Os subscritos 1 e 2 representam as subcurvas 1 e 2, associada a macros e a microporos, respectivamente.

erfc é a função de erro complementar dada por:

$$= \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (5)$$

$$S = (\theta_{s2}) \exp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{\psi_i}{\mu} \right)}{n}} \quad (6)$$

sendo μ a média geométrica da sucção matricial, dada por:

$$\mu = \sqrt[n]{\psi_1 \psi_2 \dots \psi_n} \quad (7)$$

A partir de análises de regressão ψ_{m1} e ψ_{m2} da equação CCSA podem ser determinados usando as seguintes equações:

$$\psi_m = 0,1 \left[\exp \left(\ln(0,149) - \frac{\ln\left(\frac{0,1d_m}{u}\right)}{v} \right) \right] \quad (8)$$

$$u_1 = 0,039 \exp^{(0,088\% \text{ grosso})} \text{ para todos} \quad (9)$$

$$u_2 = 2,102 \ln(d_{\max 2}) + 10,65 \text{ para todos} \quad (10)$$

$$v_1 = 0,701 \exp^{(0,011 w_{\text{sat}})} \text{ para todos} \quad (11)$$

$$v_2 = 0,851 \exp^{(0,003 w_{\text{sat}})} \text{ para todos} \quad (12)$$

% grosso é a porcentagem de partícula de solo com diâmetro maior que 0,075 mm, w_{sat} refere-se ao percentual de água medido quando o solo está totalmente saturado, $d_{\max 2}$, d_{m1} e d_{m2} são parâmetros na equação proposta de GSD bimodal (mm).

O parâmetro ψ_{a1} é uma função de ψ_{m1} e $d_{\max 1}$ (Eq. 13), θ_{s2} é uma função w_{sat} (Eq. 14), ψ_{a2} é função de ψ_{a1} , ψ_{m1} e ψ_{m2} (Eq. 15), θ_r de solo de granulação grossa é uma função da porcentagem de partícula grossa (% grosso) (Eq. 16), θ_r de solo de granulação fina é uma função de w_{sat} (Eq. 17), s_1 é uma função de C_u (Eq. 18 e 19), s_2 é função de w_{sat} (Eq. 20), ψ_r é função da porcentagem de partícula fina (% fina) (Eq. 21).

$$\psi_{a1} = \psi_{m1} / \left(1,114 \exp^{(0,083 d_{\max 1})} \right) \text{ para todos} \quad (13)$$

$$\theta_{s2} = 0,0078 w_{\text{sat}} + 0,008 \text{ para todos} \quad (14)$$

$$\psi_{a2} = \psi_{a1} \exp^{[0,905 (\ln(\psi_{m2} / \psi_{m1}))^{0,704}]} \text{ para todos} \quad (15)$$

$$\theta_r = 0,002\% \text{ grosso} - 0,088 \text{ para } P_{200} \leq 50\% \quad (16)$$

$$\theta_r = 0,0092 w_{\text{sat}} - 0,294 \text{ para } P_{200} > 50\% \quad (17)$$

$$s_1 = 2,063 \exp^{(-0,01 C_u)} \text{ para } P_{200} \leq 50\% \quad (18)$$

$$s_1 = 0,077 C_u - 2,29 \text{ para } P_{200} > 50\% \quad (19)$$

$$s_2 = 0,594 \exp^{(0,034 w_{\text{sat}})} \text{ para todos} \quad (20)$$

$$\psi_r = 3391 (\% \text{ fino})^{-0,36} \text{ para todos} \quad (21)$$

onde % fino é a porcentagem de partículas de solo com diâmetro $\leq 0,075$ mm.

3 Materiais e Métodos

Os solos analisados nesse artigo são caracterizados como solos tropicais, cujos dados experimentais foram retirados do banco de dados selecionados da literatura de pesquisa para testar os modelos GSD e CCSA bimodais propostos, perfazendo um total de 29 solos selecionados, onde foram retirados curvas granulométricas com e sem a utilização de defloculante.

As curvas granulométricas foram utilizadas juntamente com os valores de índice de vazios e massa específica dos sólidos (Tabela 1) para aplicação dos modelos de previsão de GSD e CCSA.



Tabela 1. Índices de vazios, massa específica dos sólidos e conteúdo de água saturado.

Item	Material	Nom.	e	ρ_s (g/cm ³)	Item	Material	Nom.	e	ρ_s (g/cm ³)	Item	Material	Nom.	e	ρ_s (g/cm ³)
1		1B	0,8	2,7	11		5A	1,6	2,74	22	Motta (2016)	7	0,98	2,61
2	Calle (2013)	1C	0,94	2,56	12		5B	1,57	2,73	23		8U	0,95	2,58
3		1E	0,7	2,55	13		5C	1,27	2,66	24	Furman (2019)	8R	0,97	2,58
4		1F	0,81	2,54	14		5D	1,27	2,65	25		8B	1,12	2,65
5		2A	1,58	2,72	15	Gitirana et al. (2005)	5E	1,22	2,75	26	Fernandes (2016)	9	0,76	2,65
6	Gomes et al. (2015)	2B	1,36	2,72	16		5F	1,15	2,63	27		10CWO	1,65	2,92
7		2C	1,21	2,72	17		5G	1,07	2,7	28	Feuerharmel (2007)	10CW	1,66	2,92
8		2D	1,22	2,72	18		5H	0,89	2,68	29		10U	1,67	2,92
9	Peixoto et al. (2001)	3	1,47	2,96	19		5I	1,08	2,82					
10	Valencia et al. (2011)	4	1,22	2,69	20	Almeida (2014)	6A	0,46	2,8					
					21		6B	1,19	2,88					

Aplicou-se os modelos de previsão das curvas pelos métodos de Satyanaga et al. (2013) aos dados obtidos pela literatura, levando-se em consideração as variáveis de ajuste para a verificação da aplicabilidade desse método em solos tropicais com características bimodais.

4 Resultados e Discussão

4.1 Modelo de Satyanaga et al. (2013)

a) Comparação entre os dados publicados e a equação proposta para GSD

Para a aplicação da previsão da CCSA, primeiramente modelou-se o GSD dos solos selecionados. Determinou-se as variáveis de GSD diretamente a partir dos parâmetros da equação GSD (Equação 01) proposta por Satyanaga et al. (2013), pois estes estão relacionados às propriedades físicas e à forma da GSD dos solos. As Figuras 3 a 8 mostram todos os solos estudados e as demais curvas modeladas para GSD com defloculante (CD) e sem defloculante (SD).

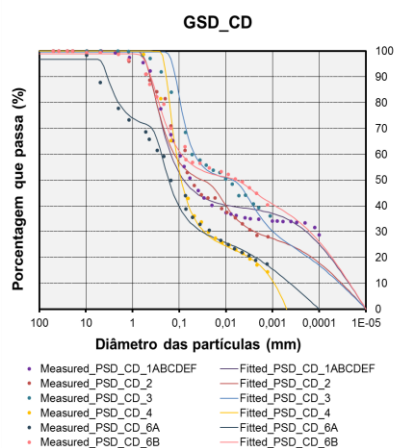


Figura 3. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 1 ao 4 e 6 com defloculante.

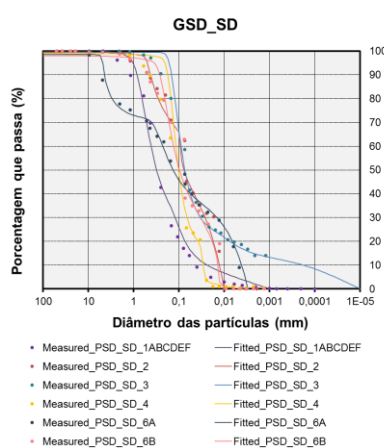


Figura 4. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 1 ao 4 e 6 sem defloculante.

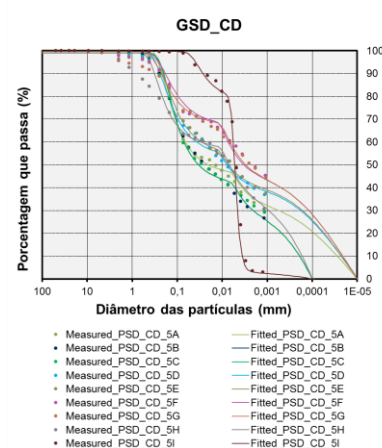


Figura 5. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 5A ao 5I com defloculante.

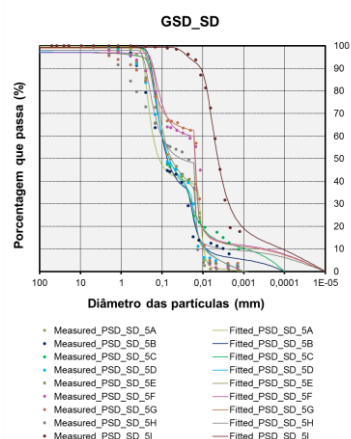


Figura 6. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 5A ao 5I sem defloculante.

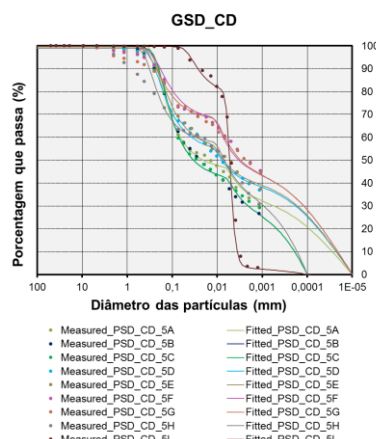


Figura 7. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 7 ao 10 com defloculante.

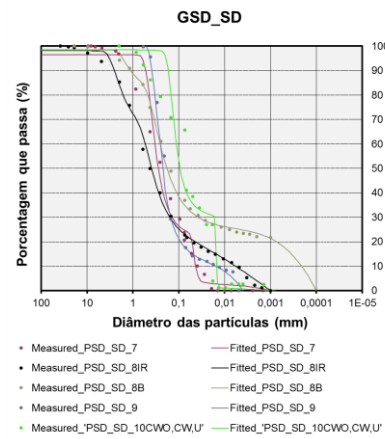


Figura 8. Pontos experimentais e modelagem das GSDs para os solos 7 ao 10 sem defloculante.

Basicamente todos os solos apresentaram um valor de coeficiente de uniformidade (C_u) elevado, apenas para o material “5I” obteve um valor de C_u abaixo do esperado, sendo igual a 2.

b) Comparação entre CCSA prevista usando a equação proposta e os dados de literatura

A previsão das CCSAs foram realizadas utilizando a equação 04, em que os parâmetros foram determinados com base nas relações estabelecidas com as propriedades do solo juntamente com sua GSD correspondente.

Considerando o valor de entrada de ar nos microporos, correspondente a subcurva 2, ψ_{a2} , a CCSA sem defloculante apresentou um valor muito acima do medido, por volta de 1100 kPa. Esse parâmetro foi o mais afetado dentre todos ao comparar as curvas com e sem defloculante.

Os VEAs previstos e os VEAs experimentais não são semelhantes, não conseguindo portanto, representar os valores de VEAs dos solos tropicais bimodais.

Ao relacionar os valores encontrados de ψ_r com os medidos, observa-se que as CCSA previstas não ultrapassam o valor de 1300 kPa.

Em resumo, pôde-se observar que a CCSA prevista a partir da equação proposta por Satyanaga et al. (2013) não concorda, de forma geral, com os dados CCSA medidos experimentalmente para solos tropicais com características bimodais. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) da equação proposta para os dados selecionados são baixos, chegando a obter um valor mínimo de 0,375, caracterizando um mal ajuste das curvas aos dados.

O material “5B” obteve uma fração da variancia total maior que os demais, perfazendo um valor de R^2 menor em todas as análises (sem defloculante para as previsões de GSD e CCSA), conforme ilustrado na Figura 9.

Já o material “8R” (Figura 10) obteve R^2 maiores que os demais e valores relativamente baixos de RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio).

O material “9” relativo a GSD com defloculante superestimou a CCSA (Figura 11), apresentando valores de $\psi_{a1} = 3,38$ kPa, $\psi_{m1} = 6,74$ kPa, $\psi_r = 1103,83$ kPa e demais parâmetros bastante próximos dos medidos, visualmente analisando. Ao se analisar os dados estatísticos, o ajuste obtido foi relativamente aceitável, indicando concordância entre os valores experimentais e os preditos.

O material “5I-CD”, após os ajustes feitos na GSD, apresentou um valor de coeficiente de uniformidade do solo (C_u) baixo, conforme outrora comentado. Esse valor interferiu significativamente na previsão da CCSA (Figura 12), resultando em um valor de s_1 negativo, pois conforme Satyanaga et al. (2013) s_1 é uma função de C_u . Esse mesmo comportamento também foi observado para os materiais “5D-SD” e “5E-SD”.

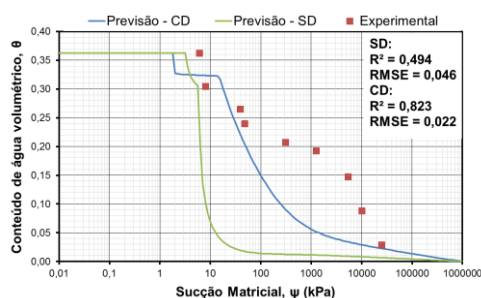


Figura 9. Curva característica solo-água para o material “5B”.

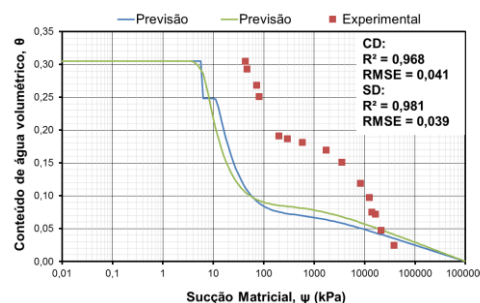


Figura 10. Curva característica solo-água para o material “8R”.

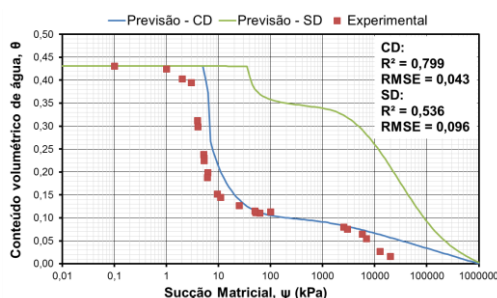


Figura 11. Curva característica solo-água para o material “9”.

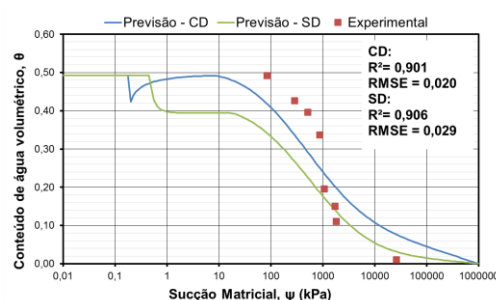


Figura 12. Curva característica solo-água para o material “5I”.

A tabela 2 apresenta o resumo estatístico dos ajustes de GSD e CCSA.

Tabela 2. Resumo estatístico dos ajustes de GSD e CCSA

	RMSE			R²		
	Média	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)	Média	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)
GSD CD	1,48 0	0,745	50,346	0,982	0,019	1,974
GSD SD	3,04 2	4,046	133,010	0,971	0,054	5,557
CCSA CD	0,03 6	0,019	51,871	0,850	0,085	10,012
CCSA SD	0,06 4	0,053	83,969	0,750	0,134	17,818

Através da Tabela 2 observa-se que as GSDs que mais representam os solos tropicais com características bimodais são as medidas com defloculante, pois elas apresentaram forma semelhante aos obtidos experimentalmente, diferente das curvas sem defloculante que não conseguiram acompanhar a CCSA medidas, principalmente com relação à subcurva 2, que faz referência aos microporos do solo e valores médios de R² mais próximos de 1.

5 Conclusão

O modelo de previsão proposto por Satyana et al. (2013) é capaz de representar adequadamente a GSD, porém não se produz resultados satisfatórios de previsão da CCSA, resultando em sucções subestimadas. Dessa forma, foi observado que o modelo analisado, desenvolvido para solos bimodais, não consegue representar bem solos tropicais. Além disso, foi observado alguns fatores que são importantes pontuar:

- Nem todo solo que possuiu melhor ajuste para GSD tiveram as melhores previsões para CCSA;
- A densidade seca, conteúdo volumétrico de água saturada e variáveis na equação GSD proposta afetam



consideravelmente os parâmetros da equação CCSA analisada de distintas maneiras;

- O R^2 da equação proposta para GSD é bastante alto para muitos solos, no entanto mostra-se pequeno para a equação proposta para CCSA, chegando a valores menores que 0,5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J. G. R. (2013). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO. *Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás*, Goiânia, GO, p. 135.
- Araújo, A. G. de; Souza, J. C.; Alves, E. C. e Correchel, V. (2017). Aplicação de modelos de ajustes de curvas características solo água em solos tropicais, *Revista Mirante*, Vol. 10, n. 5, p. 50-61.
- Calle, I. F. O. (2013). Comportamento hidromecânico de um solo tropical compactado. *Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília*, Distrito Federal, p. 143.
- Carvalho, J. C. de; Gitirana Jr, G. de F. N.; Machado, S. L.; Mascarenha, M. M. Dos A.; Filho, F. C. da S. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. *Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo, ISBN 9788567950037, p. 792.
- Feuerharmel, C. (2007). Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral. *Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, p. 332.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*, John Wiley & Sons, New York.
- Fredlund, D.G. (2006). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*, The 2005 Terzaghi Lecture: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(3): 286-321.
- Fuman, J. (2019). Avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais Brasileiros não saturados da Serra do Mar – Trecho PR-SP. *Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal de Paraná*, Curitiba, p. 114.
- Gitirana Jr, G. de F. N.; Carvalho, J. C. de e Neto, M. P. C. (2005). *Previsão de Curvas Características de um Perfil de Solo Colapsível de Brasília Utilizando Curvas Granulométricas*, 6f.
- Gitirana Jr, G. de F. N.; Fredlund, D. G. (2004). *A soil water characteristic curve equation with independent properties*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130-2, p. 209-213.
- Gomes, A. C.; Gitirana Jr, G. de F. N.; Vargas, C. A. L. (2015). Curva Característica Solo-Água para um Solo Natural na Cidade de Goiânia: Comparação entre Diferentes Metodologias de Ensaio. *8º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados: solos não saturados: da caracterização as aplicações*, Fortaleza, CE, ed. Gráfica Fotolaser, ISBN 978-85-66118-02-5 [e-book], p. 51-58.
- Li, X.; Li, J. H. e Zhang, L. M. (2014). Predicting bimodal soil–water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters, *Computers and Geotechnics*, Vol. 57, p. 85-96.
- Motta, M. F. B (2016). Caracterização físico-hídrico-estrutural e efeito do aumento da pressão de ar na resistência de solos tropicais não saturados. *Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio*, Rio de Janeiro, p. 350.
- Peixoto, R. J.; Feitosa, J. H. P.; Gitirana Jr, G. de F. N.; Vargas, C. A. L.; Cunha, R. P.; Carvalho, J. C. de. (2001). Superfície de estado do solo poroso colapsível do Distrito Federal (Brasil). *4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Porto Alegre, RS, p. 93-109.
- Rodrigues, R. M. (1997). Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 124 f.
- Santos, E. F. D.; Parreira, A. B. (2015). Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. In: *44ª RAPV – Reunião Anual de Pavimentação e 18º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Foz do Iguaçu, ago. 12 p.
- Satyanaga, A.; Rahardjo, H.; Leong, E. C. e Wang, J. Y. (2013). Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution, *Computers and Geotechnics*, Vol. 48, p. 51-61.
- Valencia, Y. G.; Carvalho, J. C. de.; Bello, M. C. (2011). Estudo da melhoria da resistência de um solo tropical natural por meio de biotecnologia. *VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Pirenópolis, GO, Vol. 01, p. 323-329.