

Avaliação dos Parâmetros Físicos da CCSA Obtidos Através de Modelos de Previsão com Ênfase em Solos Tropicais

Fernando Carolino da Silva

MSc. e Engenheiro Civil Geotécnico, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, fernandocarolinodasilva@hotmail.com

José Camapum de Carvalho

Pesquisador Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

Gilson de F. N. Gitirana Jr.

Ph.D e Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gilsongitirana@ufg.br

Renato Marques Cabral

Dr. e Engenheiro Civil Geotécnico e Professor, Eletrobrás Furnas e Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, Brasil, renatocabral591@gmail.com

RESUMO: A curva característica solo-água é fundamental na determinação do comportamento hidromecânico em solos não saturados. Diversos modelos de previsão desta curva foram propostos na literatura. Entretanto, existem poucos estudos na literatura que verificam o desempenho destes modelos quando aplicados aos solos tropicais brasileiros. Este artigo tem por objetivo avaliar o desempenho de modelos de previsão da curva característica desenvolvidos em países de clima temperado, na previsão dos parâmetros de retenção de solos tropicais em sua zona de macroporos. Utilizou os modelos de Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989), Aubertin *et al.* (2003) e Wang *et al.* (2017) e empregando um banco de dados composto por 42 solos brasileiros. As análises mostram que nenhum dos modelos é satisfatório nas previsões avaliadas, entretanto, observa-se casos no qual os valores reais se aproximam dos valores medidos. O modelo de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) apresentou casos de aproximação em amostras compactadas bimodais e indeformadas unimodais para valor de entrada de ar dos macroporos. Para amostras indeformadas, compactadas bimodais e unimodais, Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989) e Aubertin *et al.* (2003) apresentou valores previstos próximos dos reais da declividade do trecho de dessaturação. Já o modelo de Wang *et al.* (2017) não apresentou previsões satisfatórias em nenhum dos casos avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Curva Característica, Curva Granulométrica, Modelos de Previsão, Solos Tropicais.

ABSTRACT:

The soil-water characteristic curve is fundamental in determining the hydromechanical behavior of unsaturated soils. Several models for predicting this curve have been proposed in the literature. However, there are few studies in the literature that verify the performance of these models when applied to Brazilian tropical soils. The aim of this article is to evaluate the performance of characteristic curve prediction models developed in temperate countries in predicting the retention parameters of tropical soils in their macropore zone. It used the models of Arya and Paris (1981), Arya and Dierolf (1989), Aubertin *et al.* (2003) and Wang *et al.* (2017) and employed a database consisting of 42 Brazilian soils. The analyses show that none of the models is satisfactory in the predictions evaluated, however, there are cases in which the actual values are close to the measured values. The model by Arya and Paris (1981) and Arya and Dierolf (1989) showed cases of approximation in bimodal compacted and unimodal undeformed samples for the value of air entering the macropores. For undeformed, compacted bimodal and unimodal samples, Arya and Paris (1981), Arya and Dierolf (1989) and Aubertin *et al.* (2003) presented predicted values close to the real ones for the slope of the desaturation section. On the other hand, the model by Wang *et al.* (2017) did not provide satisfactory predictions in any of the cases evaluated

KEYWORDS: Characteristic Curve, Particle Size Curve, Prediction Models, Tropical Soils.

1 INTRODUÇÃO

Em diversos estudos geotécnicos realizados no Brasil e no mundo, pesquisadores constataram que a curva característica solo-água (CCSA) é uma das propriedades do solo mais importantes quando se trata de condições não saturadas, uma vez que diversas propriedades do solo podem ser obtidas a partir dela, como a condutividade hidráulica e a resistência do material. No entanto, os solos tropicais apresentam particularidades microestruturais que devem ser consideradas quando das análises das curvas características e estimativas de outras propriedades.

A CCSA fornece o elo necessário para a aplicação da ciência da mecânica dos solos não saturados a estudos e projetos geotécnicos com o solo em estado não saturado, fornecendo uma compreensão conceitual, entre a quantificação de água no solo e o estado de energia da fase água, conhecido como sucção, através de uma relação inversamente proporcional. Vale ressaltar que essas percepções focam na sucção matricial, onde a química do meio não se altera significativamente, porém, vale frisar que nos casos em que a química do meio passa por modificações, há necessidade de uma melhor análise da sucção osmótica nas propriedades e comportamento dos solos. Um outro fator relevante diz respeito a alterações nas interações entre partículas agregadas presentes nos solos tropicais quando da introdução de compostos químicos no solo lembrando que estes podem migrar do ponto onde foram introduzidos (Ayala, 2020)

Em regiões tropicais, como o Brasil, a condição não saturada do solo é muito significativa, tornando inadequada a utilização apenas de conceitos e teorias concernentes à mecânica dos solos clássica voltada para os solos saturados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

A determinação de uma CCSA é feita a partir de métodos que vão desde a medição direta dessa propriedade até a sua estimativa indireta com base nas propriedades de um solo, sendo esta última objeto deste artigo. É importante ressaltar que modelos de previsão não devem substituir a determinação direta experimental da CCSA. Curvas obtidas via métodos de previsão, no entanto, são fundamentais em estudos preliminares e para a própria interpretação das relações entre os parâmetros físicos dos materiais. Por exemplo, o uso desses modelos pode permitir estimar o efeito da mudança de certos parâmetros, como porosidade, na CCSA, o que muitas vezes experimentalmente pode ser considerado inviável.

Existem diversos modelos de previsão da CCSA na literatura. As técnicas de estimativa da CCSA se enquadram em três grandes categorias, baseadas em: (i) estimativas estatísticas dos teores de umidade volumétrica em várias sucções do solo (Gupta e Larson, 1979), (ii) estimativa de parâmetros de solo para uma função algébrica para a CCSA (Rawls e Brakensiek, 1985; Vereecken *et al.*, 1989; Scheinost *et al.*, 1997), e (iii) modelos físico-empíricos em que curvas de distribuição de tamanho de partículas e outras propriedades físicas do solo são usadas em previsões da CCSA. Estes modelos de previsão são baseados em bancos de dados de solos muito limitados, e não há muitos estudos na literatura que validem o desempenho desses modelos para solos tropicais.

Diante do exposto, o objetivo geral deste artigo é avaliar o desempenho de modelos propostos na literatura para a previsão de dois parâmetros muito importantes quando se tem as curvas características solo-água de um material, que são: valor de entrada de ar dos macroporos do solo e inclinação do primeiro trecho de dessaturação do material. Os modelos de previsão escolhidos para este artigo foram: Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989), Aubertin *et al.* (2003), Wang *et al.* (2017). Os modelos físico-empíricos foram escolhidos porque levam em consideração propriedades físicas do solo, e essas informações são de fácil determinação.

A escolha dos dois parâmetros a serem avaliados neste artigo, deve-se ao fato de que a maioria das curvas previstas apresentaram a região inicial dos macroporos, ou seja, assumiu-se apenas os parâmetros relacionados ao trecho de maiores poros do material e a energia necessária para sua dessaturação. A análise contemplou 23 tipos distintos de amostras indeformadas, 10 tipos de amostras compactadas bimodais e 9 tipos de amostras indeformadas unimodais.

2 METODOLOGIAS E MATERIAIS UTILIZADOS

2.1 Modelos de Previsão da CCSA

Os quatro modelos físico-empíricos, escolhidos para desenvolvimento deste artigo, buscam estimar a CCSA de solos tropicais a partir de análises baseadas em conceitos físicos do solo, que relacionam a

distribuição de granulométrica de um material com suas propriedades físicas e distribuição de tamanhos de poros. A seguir será apresentada uma síntese das considerações feitas pelos autores dos modelos de predições, sendo que suas formulações completas podem ser encontradas em Silva (2022).

2.2.1 Modelo de Arya e Paris (1981)

O modelo proposto por Arya e Paris (AP) (1981) usa a curva granulométrica, massa específica do solo e a massa específica das partículas, como parâmetros de entrada para prever a CCSA. Segundo os autores, o modelo foi proposto a partir da observação da similaridade entre a forma curva de distribuição granulométrica e a CCSA do solo. As previsões do modelo proposto foram originalmente verificadas para apenas cinco tipos de materiais, demonstrando proximidade com os dados experimentais. O método considera que a curva granulométrica pode ser dividida em n frações arbitrárias. Cada fração possui um determinado volume compondo o volume total de poros e diâmetro médio de poro. Tal diâmetro corresponde a uma respectiva CCSA idealizada, a qual é definida pelo seu valor de entrada de ar e por uma drenagem total e abrupta. O valor de entrada de ar de cada fração é determinado pela equação de capilaridade.

2.2.2 Modelo de Arya e Dierolf (1989)

O modelo de previsão proposto por Arya e Dierolf (AD) (1989) reavaliou o modelo original de Arya e Paris (1981), introduzindo o parâmetro empírico (α^*) buscando melhorar a equação original do modelo que relaciona o raio dos poros ao raio das partículas. Segundo Arya e Dierolf (1989), o parâmetro empírico α^* representa o comprimento efetivo do poro associado a cada fração granulométrica das partículas. O parâmetro α^* remove o número de partículas da equação que relaciona os raios dos poros aos raios das partículas. Os autores verificaram que o modelo era menos sensível à α^* , do que o modelo usando a variável α proposto por Arya e Paris (1981). Os autores utilizaram os mesmos materiais do modelo de Arya e Paris (1981) e mostraram que α^* varia em uma faixa relativamente estreita de valores de 0,3 a 1,5 cm, e que um valor de 0,938 cm foi assumido como o de melhores predições.

2.2.3 Modelo de Aubertin, Mbonimpa, Bussière e Chapuis (2003)

Aubertin *et al.* (2003) propuseram um conjunto de equações para prever a CCSA do solo. O modelo foi desenvolvido apenas para materiais isotrópicos e homogêneos, sob uma trajetória de secagem, e fatores de influência como microestruturas internas, anisotropia e variações volumétricas não foram levados em consideração.

No modelo proposto pelos autores, o grau de saturação (S_r) inclui dois componentes que atuam em conjunto: um é produzido pela capilaridade (S_{r_c} – para materiais granulares), que é mais importante em sucções relativamente baixas, e o outro está relacionado a adsorção (S_{r_a} – para materiais finos) que contribui principalmente para maiores sucções, e ambos são expressos como funções da ascensão capilar equivalente no meio poroso (h_{co}) e sucção matricial. Além disso ambos os componentes podem ser avaliados a partir das propriedades básicas (normalmente disponíveis) do material, incluindo índice de vazios (e), densidade de grãos (ρ_s), diâmetro efetivo (D_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u) para os solos granulares e o limite de liquidez (w_L) para solos plásticos coesivos. Os dois componentes atuam simultaneamente e, portanto, são incluídos nas medições feitas para determinar a relação $\theta - \psi$. Em se tratando de solos tropicais profundamente intemperizados duas particularidades merecem destaque: os seus grãos resultado de agregações possuem geralmente significativa equidimensionalidade se aproximando dos solos granulares, porém, essa situação de agregação afasta o valor determinado do limite de liquidez do valor real como mostrado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021).

2.2.4 Modelo de Wang, Hu, Françoise e Lambert (2017)

Usando o modelo de ajuste da CCSA proposto por van Genuchten (1980) como fundamento, os autores propuseram um modelo para estimar a CCSA de solos granulares com base em uma abordagem semifísica e semiestatística. A equação de van Genuchten (1980) foi apresentada em termos de grau de saturação efetivo. Os autores utilizaram a análise dimensional para propor a equações para as variáveis n e α (de van Genuchten,

1980), que estão relacionadas a C_U e D_{60} , através de dois parâmetros de ajustes $C_1 \approx 1,07$ e $C_2 \approx 12,07$ obtidos para um conjunto de CCSAs extraídas do banco de dados UNSODA.

2.3 Banco de Dados Utilizados

Silva (2022) elaborou um banco de dados, contemplando solos de diversas regiões do Brasil. O banco de dados utilizado envolveu amostras oriundas dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Goiás, Distrito Federal, Rio Grande do Sul e Minas Gerais, tendo sido obtidas 23 curvas características bimodais para amostras indeformadas e 10 curvas características para amostras compactadas. As curvas características unimodais foram obtidas apenas para 9 amostras indeformadas.

Em sua dissertação, informações como caracterização física dos materiais e curvas características experimentais foram levantadas e discutidas. Embora os referenciais das amostras utilizadas neste artigo estejam presentes na dissertação de Silva (2022), um breve resumo referente à mineralogia, gráficos de granulometria, triângulo textural e curvas características experimentais do banco de dados em estudo é apresentado a seguir:

- i) Os minerais quartzo, caulinita e gibbsita foram observados como os mais comuns no banco de dados. Também se verificou que minerais do tipo 2:1, pertencentes ao grupo das esmectitas, ou seja, minerais expansivos como a montmorilonita, beidelita, nontronita, saponita, sauconita e hectorita, não estão presentes nos materiais que compõem o banco de dados. Portanto, o banco de dados refere-se a solos mais intemperizados, não contendo materiais com características expansivas.
- ii) Verificou-se claramente uma variabilidade elevada nos resultados de granulometria dos solos tropicais estudados.
- iii) Os solos têm característica que varia entre uma areia (classificação A) até um Franco Argiloso Arenosa (Classificação G), ou seja, quando a granulometria dos materiais é determinada sem a presença de defloculante o comportamento em sua grande maioria é de um material mais arenoso. Entretanto quando utilizamos o defloculante para determinar a granulometria dos materiais, agregações que estão presentes no solo começam a se desfazer, e, portanto, a textura dos solos compreende todas as classificações (A ao M).
- iv) A partir dos dados coletados observou-se a variabilidade das curvas características dos solos tropicais brasileiros, considerando os parâmetros: valores de entrada de ar dos macro e microporos, formatos bimodais e unimodais das curvas, variação dos teores de umidade volumétricos saturados

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de avaliar a eficiência da previsão dos modelos estudados neste artigo, resolveu-se usar uma relação gráfica 1:1 entre os valores de entrada de ar dos materiais avaliados e declividade do trecho de dessaturação experimentais e previstos através dos modelos de previsão apresentados. Nesse tipo de relação, quanto menos pontos espalhados em relação à linha principal, maior é a precisão da previsão, o que representa um ajuste perfeito do modelo. É necessária realização de uma interpolação dos dados medidos e previstos para uma correta avaliação dos medidores de aderência (R^2 , R^2 ajustado e RMSE), apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, e os valores apresentados representam a médias de todas as metodologias utilizadas.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as relações encontradas entre os valores de entradas de ar previstos e experimentais das CCSAs a partir dos modelos de previsão utilizados (Figuras a e c) e os valores de declividade do trecho de dessaturação previstos e experimentais (Figuras b e d). As legendas dos gráficos a seguir correspondem aos seguintes modelos e dados de entrada: AP (Arya e Paris, 1981) – D (disperso) e AP (Arya e Paris, 1981) – ND (não disperso); AD (Arya e Dierolf, 1989) – D (disperso) e AD (Arya e Dierolf, 1989) – ND (não disperso); A (Aubertin *et al.*, 2003) – F (solos finos); A (Aubertin *et al.*, 2003) – G (solos granulares) – D (disperso); A (Aubertin *et al.*, 2003) – G (solos granulares) – ND (não disperso); W (Wang *et al.*, 2017) – D (disperso) e W (Wang *et al.*, 2017) – ND (não disperso).

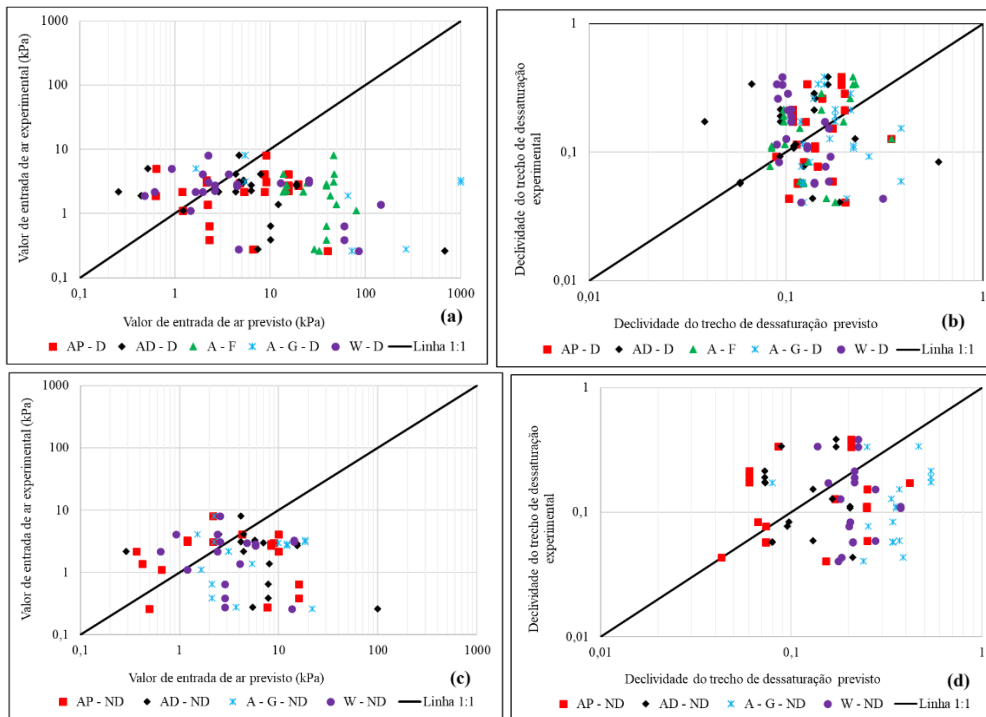


Figura 1. Previsão dos parâmetros da CCSA para solos naturais bimodais: a) valor de entrada de ar empregando granulometria com dispersão; b) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria com dispersão; c) valor de entrada de ar empregando granulometria sem dispersão; d) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria sem dispersão.

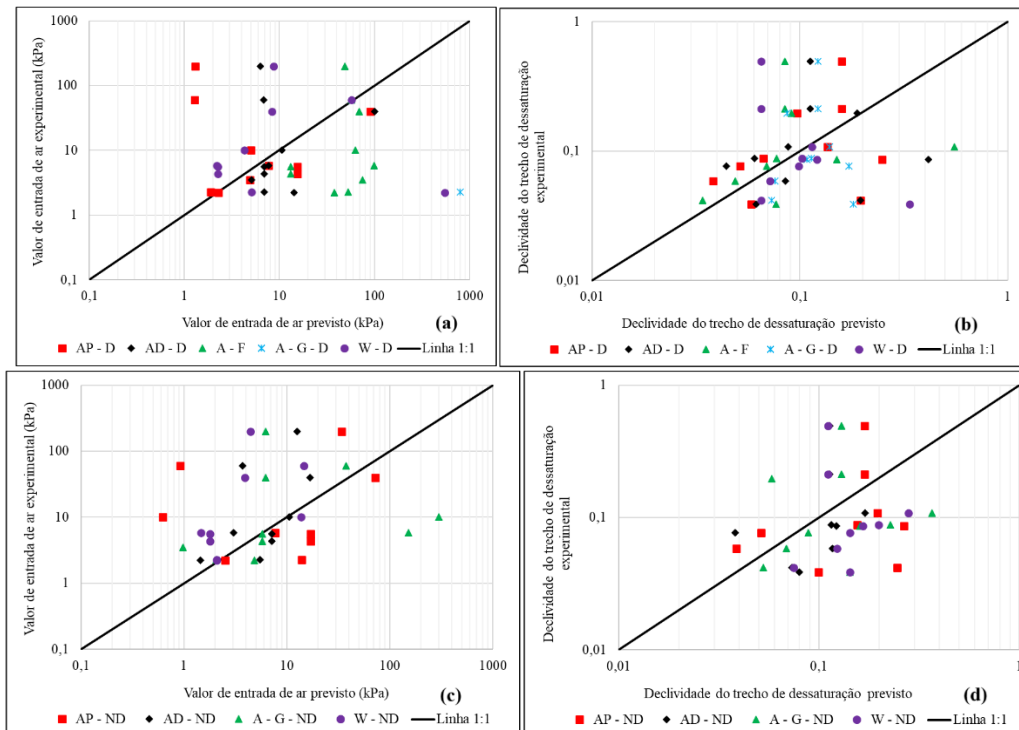


Figura 2. Previsão dos parâmetros da CCSA para solos compactados bimodais: a) valor de entrada de ar empregando granulometria com dispersão; b) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria com dispersão; c) valor de entrada de ar empregando granulometria sem dispersão; d) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria sem dispersão.

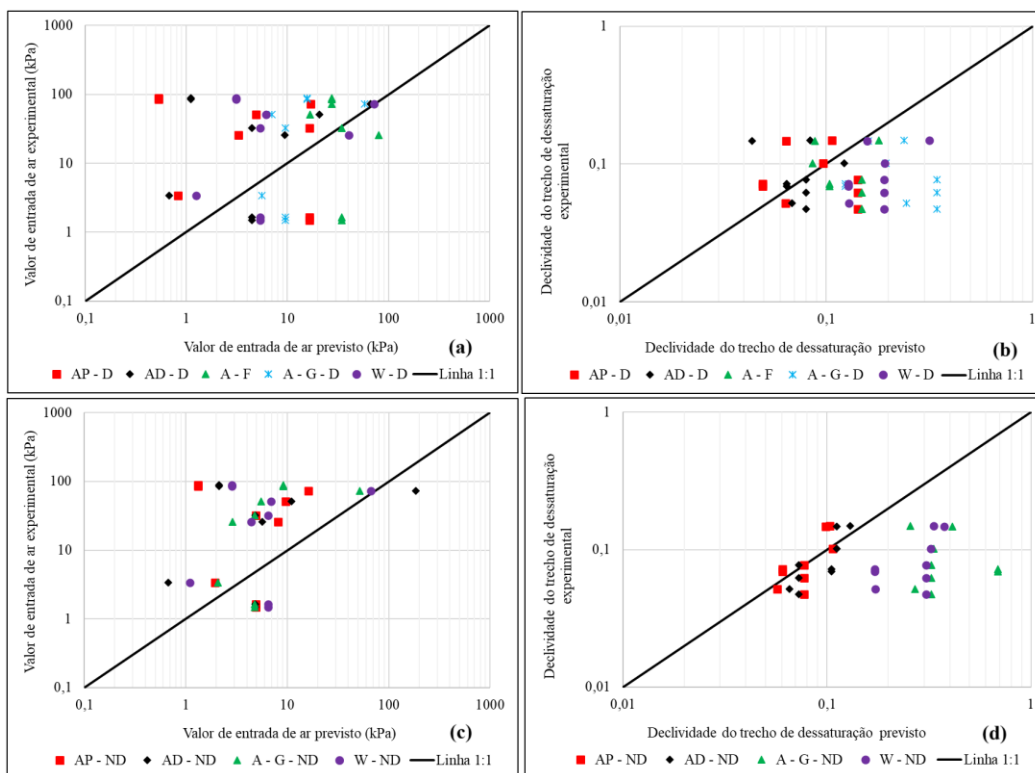


Figura 3. Previsão dos parâmetros da CCSA para solos naturais unimodais: a) valor de entrada de ar empregando granulometria com dispersão; b) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria com dispersão; c) valor de entrada de ar empregando granulometria sem dispersão; d) declividade do trecho de dessaturação empregando granulometria sem dispersão.

Tabela 1. Valores médios dos medidores de aderência para os valores de entrada de ar.

Modelo de Previsão	Naturais Bimodais (Figura 1)			Compactados bimodais (Figura 2)			Naturais Unimodais (Figura 3)		
	R ²	R ² ajustado	RMSE	R ²	R ² ajustado	RMSE	R ²	R ² ajustado	RMSE
AP - D	-46,1	-50,8	11,6	-0,33	-0,71	67,6	-1,11	-1,81	48,6
AP-ND	-12,0	-13,3	6,0	0,05	-0,22	57,1	-1,04	-1,71	47,8
AD-D	-7213,5	-7934,9	143,1	-0,29	-0,65	66,4	-0,65	-1,20	43,0
AD-ND	-162,6	-178,9	21,6	-0,13	-0,13	62,4	-1,95	-1,95	57,6
A-F	-411,1	452,3	34,2	-0,29	-0,66	-66,5	-0,52	-1,03	41,3
A-G-D	-10 x 10 ⁻⁶	-11 x 10 ⁻⁶	5409	-183942	-236498	25106	-145,22	-193,96	404,9
A-G-ND	-20,3	-22,4	7,8	-3,2	-4,4	120,0	-0,56	-1,09	41,9
W-D	-547,9	-602,8	39,5	-8,8	-11,7	183,6	-0,68	-1,24	43,4
W-ND	-7,71	-8,58	5,0	-0,22	-0,56	64,6	-0,70	-1,27	43,7

Tabela 2. Valores médios dos medidores de aderência para os valores de declividade do trecho de dessaturação.

Modelo de Previsão	Naturais Bimodais (Figura 1)			Compactados bimodais (Figura 2)			Naturais Unimodais (Figura 3)		
	R ²	R ² ajustado	RMSE	R ²	R ² ajustado	RMSE	R ²	R ² ajustado	RMSE
AP - D	-0,08	-0,19	0,1	-0,04	-0,34	0,13	-1,54	-2,38	0,06
AP-ND	-1,35	-1,58	0,15	-0,38	-0,78	0,15	0,50	0,33	0,02

AD-D	-1,42	-1,66	0,15	-0,70	-1,19	0,17	-0,46	-0,95	0,04
AD-ND	-1,07	-1,07	0,14	-0,21	-0,21	0,14	0,57	0,57	0,02
A-F	0,08	-0,01	0,09	-,134	-2,01	0,20	-1,80	-2,73	0,06
A-G-D	-0,76	-0,94	0,13	-0,12	-0,43	0,13	-24,6	-33,1	0,18
A-G-ND	-5,43	-6,07	0,25	-0,53	-0,97	0,16	-97,2	-129,9	0,36
W-D	-0,81	-0,99	0,13	-0,96	-1,52	0,18	-7,46	-10,27	0,11
W-ND	-1,67	-1,94	0,16	-0,55	-0,99	0,16	-28,77	-38,7	0,20

A partir das Figuras 1 a 3 e das Tabelas 1 e 2, observa-se que em poucos casos e condições especiais, como amostras compactadas e naturais, com curvas unimodais, os modelos apresentam previsões satisfatórias. Avaliando os medidores de aderência, verifica-se que os modelos de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) apresentam previsões semelhantes, quando as amostras estão na condição compactadas, dos valores de entrada de ar e a declividade do trecho de dessaturação do material. Entretanto, o campo amostral deveria ser complementado para averiguar se tais considerações se mantem.

É possível observar na Tabela 1, que ao determinar as previsões dos valores de entrada de ar das amostras naturais, com curvas características bimodais, os modelos são bem precários, mas é possível identificar que ao determinarmos as previsões sem o uso do defloculantes os erros diminuem significativamente quando comparado as determinações com uso do defloculante. Tal justificativa pode decorrer dos modelos ter sido propostos para materiais com características mais granulares, em que o não uso do defloculante preservaria agregações dos solos avaliados.

Observa-se que o modelo de Aubertin *et al.* (2003) utilizando a metodologia de solos granulares teve o pior desempenho, enquanto ao utilizar a formulação para solos finos, apresentou previsões satisfatórias da declividade do trecho de dessaturação das amostras. Vale lembrar que este modelo utiliza uma maior quantidade de parâmetros de entrada, como os índices físicos: índice de vazios, coeficiente de uniformidade e limite de liquidez da amostra. Além disso, o modelo não é baseado apenas na geometria de partículas e poros do solo, pois inclui observações empíricas que permitem considerar a complexidade das interações solo-água, podendo ser uma justificativa da melhor previsão do trecho de dessaturação.

Já o modelo proposto por Wang *et al.*, 2017, não apresentou previsões satisfatória em nenhum dos casos estudados neste artigo. Pelo modelo considerar apenas propriedades físicas simplistas dos materiais, as considerações apresentadas por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), das principais propriedades de solos tropicais como: i) peso específico dos grãos; ii) distribuição granulométrica; iii) estrutura dos poros; iv) limites de Atterberg; v) porosidade; vi) teor de umidade gravimétrica e vii) mineralogia, deveriam ser abordadas com maior profundidade nos modelos, e poderia levar a previsões mais assertivas.

4 CONCLUSÕES

Este artigo avaliou a capacidade de previsão de parâmetros da curva característica de quatro modelos propostos na literatura geotécnica. Os modelos escolhidos foram: Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989), Aubertin *et al.* (2003) e Wang *et al.* (2017). Esses modelos são físico-empíricos e utilizam como parâmetros de entrada propriedades físicas do solo como granulometria, índice de vazios, peso específico dos grãos e limite de liquidez. Foi utilizado um banco de dados de solos tropicais brasileiros. Os modelos testados são baseados em simplificações da geometria de distribuição de poros do solo e foram desenvolvidos para prever apenas curvas de secagem dos materiais. Visualmente, o modelo de Arya e Paris (1981) em pouquíssimos casos apresentou um bom desempenho na previsão dos parâmetros escolhidos, pois foram os dados que mais se aproximaram da linha 1:1. Enquanto os demais métodos sobestimam e subestimam os parâmetros escolhidos para as verificações.

Uma vez que os modelos de previsão não apresentaram bons resultados, buscou na literatura geotécnica avaliar conceitos específicos que não são considerados nos modelos e que podem ter um grande impacto nas previsões que se busca fazer.

Portanto, de maneira geral os modelos de previsão de CCSA não apresentaram capacidade preditiva satisfatória para o banco de dados de solos tropicais analisados. E uma possível incorporação de informações que afetam diretamente a forma da CCSA, como agregações presentes em solos tropicais, bem como capilaridade e adsorção, e forças de interação entre minerais e fluidos circundantes, seja em modelos existentes ou novos, possivelmente levaria a melhores previsões de tais parâmetros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Deus, à WALM BH Engenharia, à Universidade de Brasília, à Universidade Federal de Goiás, à Eletrobrás Furnas e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio ao desenvolvimento dos estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arya, L.M. and Dierolf, T.S. (1989). Predicting soil moisture characteristics by particle-size distributions: an improved method to calculate pore radii from particle radii. Proc. of the Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, p. 115-124.

Arya, L.M. and Paris, J.F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. In: Soil Science Soc. Am. J., 45, p. 1023-1030.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. and Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. Can. Geotech. J., 40(6): 1104–1122.

Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G.F.N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A.; Filho, F.C.S. (2015). Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). 805p.

Camapum de Carvalho, J. and Gitirana Jr.(2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. In Soils and Rocks. Vol 44 (3), pp. 1-25.

LLANQUE AYALA, R.J. (2020) Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola. Tese de Doutorado, Publicação G.DT 159/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300 p.

Gupta, S. C. and Larson W. E (1979). Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research. Volume15, Issue6,1633-1635.

Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L. (1985). Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Proceedings of the American Society of Civil Engineers Watershed Management in the Eighties Symposium, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 293–299.

Scheinost, A. C., Sinowski, W., and Auerswald, K. 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. Geoderma, Vol. 78, Nos. 3–4, pp. 129–143.

Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. Soil Science Journal, Vol 148, No. 6, pp. 389–403.

M. Th. van Genuchten, “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” in Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5), pp. 892-898.

Silva, F. C. (2022). Estimativa de Curvas Características de Solos Tropicais Brasileiros Via Métodos Indiretos. Dissertação de Mestrado, Publicação - 372/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 236p.

Wang, J.-P., Hu, N., Françoise, B. and Lambert, P. (2017). Unsaturated sandy soils from basic soil gradation parameters. Water Resour. Res., 53: 6069–6088.