

Análise Experimental e Modelagem da Curva de Retenção de Água de um Solo Laterítico da Formação Itapecuru sob Diferentes Índices de Vazios Iniciais

Felipe Santos de Almeida

Engenheiro Geotécnico, Doutorado, POLI-USP, São Paulo, Brasil, almeida.felipe@usp.br

Luiz Felipe Goulart Fiscina

Engenheiro Geotécnico, Doutorado, POLI-USP, São Paulo, Brasil, luizfiscina@usp.br

Marcos Massao Futai

Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: Este estudo avaliou o comportamento da curva característica de retenção de água (SWCC) de um solo laterítico da Formação Itapecuru sob diferentes índices de vazios iniciais. As curvas de retenção de água foram obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980), com excelente desempenho ($R^2 > 0,97$). Sequencialmente, quatro modelos semi-físicos foram calibrados com base nas diferentes densidades iniciais, sendo o modelo de Haverkamp & Parlange (1986) o que apresentou os melhores resultados estatísticos ($R^2 > 0,98$; $RMSE < 0,021$; $MAE < 0,017$). Após, aplicou-se o modelo proposto por Gao et al. (2023), que incorpora os efeitos de capilaridade e adsorção, permitindo a calibração com base em dados experimentais e a geração de novas curvas de retenção de água a partir da variação do índice de vazios inicial. Os resultados confirmam a capacidade do modelo em representar adequadamente o impacto da densidade na SWCC, viabilizando sua aplicação em análises de fluxo que considerem a variabilidade da compactação. Essa abordagem se mostra promissora para estudos de confiabilidade e retroanálises em aterros de obras lineares, com base no controle do grau de compactação ao longo da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Solos lateríticos; Solos não saturados; Curva de retenção de água; Modelagem semi-física; Índice de vazios; Aterros compactados.

ABSTRACT: This study evaluated the soil-water characteristic curve (SWCC) behavior of a lateritic soil from the Itapecuru Formation under different initial void ratios. The retention curves were experimentally determined and fitted using the van Genuchten (1980) model, showing excellent performance ($R^2 > 0.97$). Subsequently, four semi-physical models were calibrated based on the different initial densities, with the Haverkamp & Parlange (1986) model yielding the best statistical results ($R^2 > 0.98$; $RMSE < 0.021$; $MAE < 0.017$). The model proposed by Gao et al. (2023) was then applied, incorporating capillarity and adsorption effects. This model enables the generation of new retention curves based solely on variations in the initial void ratio, once calibrated with experimental data. The results confirmed the model's ability to adequately represent the influence of density on the SWCC, supporting its application in flow analyses that consider compaction variability. This approach is promising for reliability studies and back-analyses in embankments for linear infrastructure, based on monitoring compaction levels throughout construction.

KEYWORDS: Lateritic soils; Unsaturated soils; Soil water retention curve; Semi-physical modeling; Void ratio; Compacted embankments.

1 INTRODUÇÃO

Obras lineares, como rodovias e ferrovias, frequentemente demandam a construção de aterros em regiões com presença de solos lateríticos. Esses materiais são empregados devido à disponibilidade local e ao desempenho satisfatório em processos de compactação (Kumar et al., 2022). No entanto, suas particularidades microestruturais, químicas e mineralógicas afetam significativamente o comportamento hidráulico e mecânico, exigindo uma caracterização criteriosa para aplicação em obras de infraestrutura (Camapum de Carvalho et al., 2015).

Mesmo com controle construtivo adequado, aterros em regiões tropicais permanecem suscetíveis a instabilidades devido à elevada variabilidade climática. Esse cenário reforça a importância do conhecimento das propriedades hidráulicas dos materiais em condição não saturada, uma vez que a geração de poropressões excessivas pode ocorrer não apenas pela elevação do nível freático interno, mas também pelo efeito da infiltração de água das chuvas no maciço. Tais processos reduzem as tensões efetivas e comprometem a resistência ao cisalhamento, favorecendo mecanismos de instabilidade (Zhong et al., 2022; Xu et al., 2023).

Este estudo teve como objetivo caracterizar a curva de retenção de água (SWCC) de um solo laterítico da Formação Itapecuru, avaliando seu comportamento sob diferentes índices de vazios. Inicialmente, foi utilizado o modelo bimodal de Van Genuchten (1980) para ajustar as curvas experimentais das quatro amostras. Em seguida, foram calibrados quatro modelos semi-físicos clássicos, com o propósito de verificar sua capacidade de representar o comportamento hidráulico do solo sob diferentes densidades iniciais. Posteriormente, aplicou-se o modelo de Gao et al. (2023), que incorpora o índice de vazios como variável explícita na formulação matemática.

Os resultados demonstraram que, uma vez calibrado, o modelo de Gao *et al.*, (2023) é capaz de representar adequadamente a variação da SWCC em função do índice de vazio inicial do solo. Essa capacidade amplia seu potencial de aplicação em análises de confiabilidade, permitindo estimativas mais precisas do comportamento da SWCC em diferentes condições de densidade. Além disso, a modelagem possibilita retroanálises de fluxo com base no histórico construtivo e no grau de compactação de cada camada do aterro. Dessa forma, o modelo se mostra útil para representar uma variável construtiva importante, contribuindo para análises de fluxo mais realistas.

2 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

A Formação Itapecuru ocorre na Bacia do Parnaíba e tem origem predominantemente estuarino-lagunar, composta principalmente por arenitos avermelhados a acinzentados, além de siltitos, folhelhos e conglomerados (Pedrão, 1996; Campbell et al., 1949). Segundo Menezes et al., (2023), a deposição dos sedimentos da Formação Itapecuru ocorreu sob um ambiente de floresta úmida, com temperaturas entre 10,9 e 11,8 °C, fatores que contribuíram na pedogênese dos solos desta unidade.

Uma característica marcante do solo pertencente à Formação Itapecuru é o seu elevado grau de laterização, decorrente dos intensos processos de intemperismo a que está submetido. Esse processo origina um perfil com três horizontes distintos: na superfície, encontra-se um horizonte ferruginoso, rico em concreções; abaixo dele, um horizonte predominantemente argiloso; e, por fim, um horizonte pálido ou de transição, situado próximo à rocha matriz (Costa, 1991).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1a estão ilustradas as curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de hexametáfosfato de sódio como dispersante, enquanto na Figura 1b estão expostos os três pontos da curva de compactação do ensaio Proctor, do qual as amostras utilizadas no programa experimental foram coletadas. As propriedades geotécnicas gerais do solo, bem como os valores iniciais de índice de vazios e massa específica seca das amostras utilizadas nos ensaios de retenção, estão sintetizadas na Tabela 1.

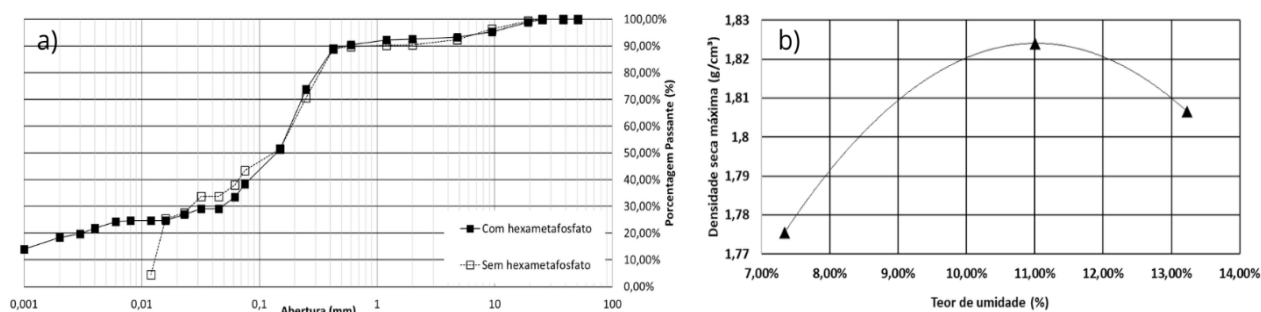


Figura 1 - a) Curvas granulométricas obtidas com e sem o uso do hexametáfosfato; b) Pontos utilizados da curva de compactação (Proctor Normal).

Tabela 1 - Propriedades gerais das amostras utilizadas.

Parâmetro	Amostra indeformada	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido
Índice de vazios	0,5	0,49	0,44	0,46
Peso específico seco (g/cm³)	1,79	1,77	1,82	1,81
Massa específica dos grãos de solo (g/cm³)		2,632		
Limite de liquidez (%)		23,51		
Limite de plasticidade (%)		15,42		
Índice de plasticidade (IP)		8,09		

As curvas de retenção de água (SWCC) foram determinadas utilizando quatro métodos distintos: Placa de sucção, Placa de pressão, Hyprop e WP4C. Para o intervalo de sucção inferior a 100 kPa, foram empregados os equipamentos Hyprop e Placa de sucção. Para valores superiores, recorreu-se à Placa de pressão e ao WP4C.

Como particularidade metodológica, as amostras recompactadas foram analisadas utilizando o conjunto Placa de sucção – Placa de pressão, enquanto a amostra indeformada foi submetida ao procedimento combinado Hyprop – WP4C. Os procedimentos experimentais adotados estão descritos com maior detalhamento em Dane & Topp (2002) e Fredlund et al. (2012).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na Figura 2 estão apresentados os ajustes das curvas de retenção para os dados obtidos experimentalmente com o modelo proposto por Van Genuchten (1980) (Eq. 1), no modelo, a , n e m são parâmetros de ajuste do comportamento, ψ é a sucção utilizada para o cálculo do grau de saturação. O modelo foi escolhido após avaliação dos dados experimentais, uma vez que não se observou comportamento marcadamente bimodal, enquanto na Tabela 2 estão resumidos os parâmetros ajustados para cada condição de amostragem. Os resultados indicam excelente aderência do modelo aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,97 em todos os casos avaliados.

$$S_r(\psi) = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad \text{Eq. 1}$$

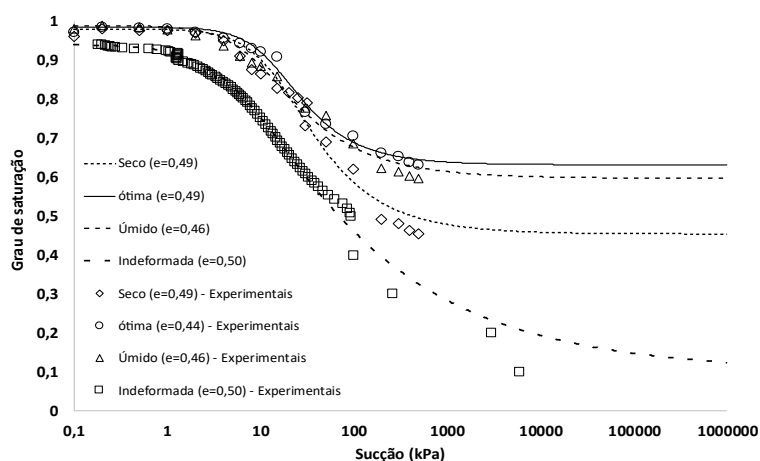


Figura 2 - Curvas de retenção de água das amostras analisadas.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste para as amostras, modelo de Van Genuchten (1980).

Amostra	α (kPa ⁻¹)	n	Sr mín	Sr máx	R^2
Amostra indeformada	0,173	1,296	0,100	0,940	0,987
Ramo Seco	0,064	1,737	0,453	0,980	0,973
Umidade Ótima	0,071	1,922	0,631	0,985	0,991
Ramo Úmido	0,109	1,666	0,596	0,989	0,984



As curvas ajustadas revelam variações conforme o estado do solo. A amostra seca apresentou transição abrupta ($n=1,737$; $\alpha=0,064$), indicando microestrutura com alta retenção capilar. Na condição ótima, o modelo teve melhor ajuste ($R^2 = 0,0,991$; $n = 1,992$; $\alpha = 0,071$), com distribuição porosa homogênea conforme cita Vanapalli et al. (1996). A amostra úmida exibiu maior α (0,109) e $S_r = 0,989$, com predominância de macroporos. A amostra indeformada apresentou resposta bem ajustada aos pontos iniciais da curva ($n = 1,296$; $\alpha = 0,173$) e $S_r = 0,940$, no entanto os pontos de maior sucção tiveram ajuste prejudicado, atribuído à heterogeneidade estrutural (Romero *et al.*, 1999).

5 MODELOS SEMI-FÍSICOS PARA A PREDIÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Nas últimas décadas, diversos modelos foram propostos para descrever a relação entre teor de umidade e sucção em solos. A predição da SWCC pode seguir abordagens empíricas ou basear-se em correlações com propriedades físicas, como granulometria, peso específico e limites de Atterberg. Modelos semi-físicos integram princípios físicos simplificados com parâmetros ajustáveis, permitindo representar o comportamento hidráulico de forma mais realista e calibrável. Na Tabela 3 estão resumidos os modelos adotados neste estudo e suas respectivas variáveis.

Tabela 3 - Modelos semi físicos para a determinação da SWCC.

Referência	Equações principais	Variáveis
Arya & Paris (1981)	$\theta_{v_i}^* = (\theta_{v_i} + \theta_{v_{i+1}})/2$ $r_i = R_i [4en_i^{(1-\alpha)}/6]^{1/2}$ $\psi_i = 2\gamma \cos \theta / \rho_w g r_i$ $\zeta_i = \omega_i \frac{2\alpha\beta d_i^2}{2\alpha\beta d_i^2 + \frac{\pi}{4} d_i^2}$	$\theta_{v_i}^*$ = teor de umidade volumétrico intra-poros; α = parâmetro de ajuste empírico
Chang & Cheng (2018)	$v_1 = \omega_1 + \sum_2^n \zeta_i$ $v_i = \omega_i - \zeta_i$	α = abertura das fendas; β = comprimento das fendas.
Haverkamp & Parlange (1996)*	$\theta = n \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \left[1 - \frac{\psi_b}{\psi} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \dots \psi > \psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \psi \leq \psi_b$	n = porosidade; λ = parâmetro de ajuste; θ_s = Teor de umidade para condição de saturação natural
Aubertin <i>et al.</i> , (2003)	$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c)$ $S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp [-m(h_{co}/\psi)^2]$ $S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} (\psi/\psi_n)^{1/6}}$	h_{co} = elevação capilar relativa; m = parâmetro de influência para o valor de entrada de ar; ψ_n = parâmetro de normalização e = índice de vazios

* - Considerado somente o equacionamento matemático que representa a curva de retenção de água por meio de secagem.

A calibração dos modelos se deu por meio de um código computacional visando ajustar os modelos para a melhor condição de erro possível, ressalta-se que para o melhor ajuste foram variados os parâmetros empíricos estabelecidos nos modelos, além da inserção do índice de vazios inicial para cada amostra.

Tendo em vista avaliar o desempenho dos modelos na predição de dados foram utilizados três indicadores estatísticos, sendo eles: R^2 - coeficiente de determinação (Eq. 2); RMSE - raiz do erro quadrado médio (Eq. 3); MAE - erro absoluto médio (Eq. 4).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Eq. 4

Na Figura 3 estão apresentados a comparação entre os valores experimentais e os previstos do grau de saturação, obtidos a partir da calibração dos quatro modelos semi-físicos citados anteriormente e aplicados à predição da curva de retenção de água do solo (SWCC): Arya & Paris (1981), Chang & Cheng (2018), Haverkamp & Parlange (1986) e Aubertin et al. (2003). A avaliação foi realizada para quatro condições de amostragem: estado seco, estado úmido, umidade ótima e amostra indeformada, conforme apresentado na metodologia. Os indicadores estatísticos de desempenho dos ajustes estão sintetizados na Tabela 4.

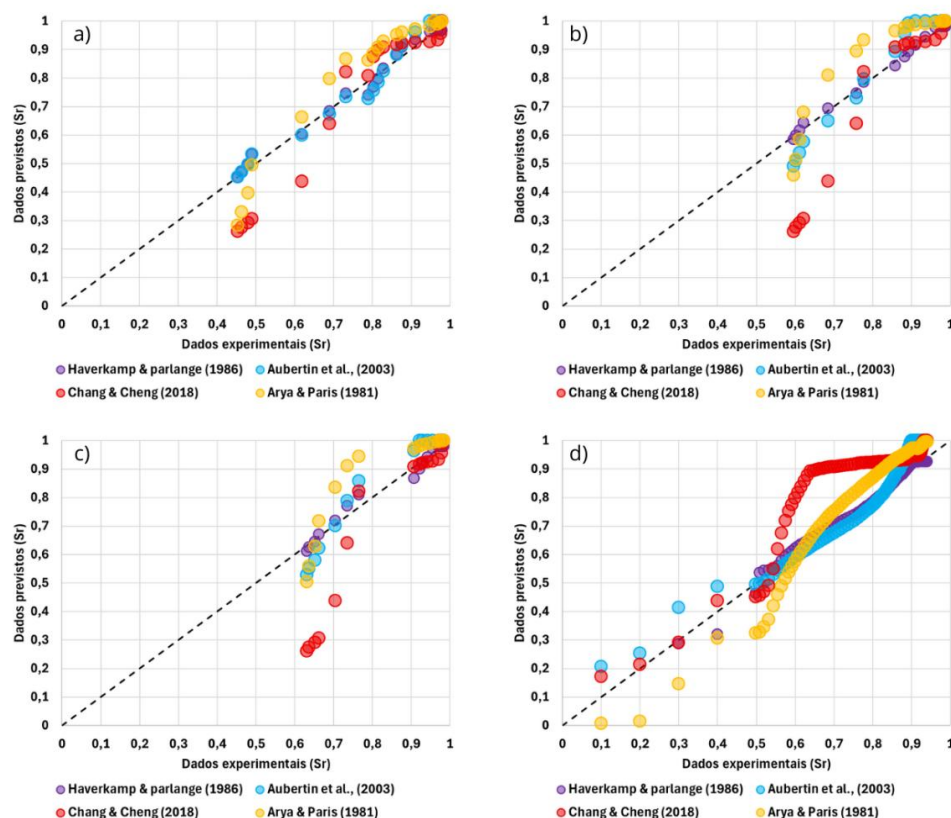


Figura 3 – Valores previstos de Grau de Saturação x Valores experimentais de Grau de Saturação; a) Ramo seco b) Umidade ótima; c) Ramo úmido; d) Amostra indeformada.

Tabela 4 – Resultados dos indicadores estatísticos utilizados.

Indicadores estatísticos	Amostras	Arya & Paris (1981)	Chang & Cheng (2018)	Haverkamp & Parlange (1986)	Aubertin <i>et al.</i> , (2003)
R ²	Ramo Seco	0,646	0,931	0,986	0,969
	Umidade ótima	0,627	0,946	0,979	0,821
	Ramo Úmido	0,791	0,944	0,995	0,831
	Amostra Indeformada	0,807	0,871	0,989	0,913
RMSE	Ramo Seco	0,087	0,173	0,021	0,032
	Umidade ótima	0,084	0,190	0,020	0,058
	Ramo Úmido	0,084	0,103	0,010	0,060
	Amostra Indeformada	0,076	0,126	0,016	0,051
MAE	Ramo Seco	0,073	0,114	0,017	0,027
	Umidade ótima	0,066	0,120	0,015	0,051
	Ramo Úmido	0,071	0,079	0,008	0,051
	Amostra Indeformada	0,068	0,105	0,012	0,041



2 0 2 5

A Figura 3 e a Tabela 4 comparam o desempenho de quatro modelos semi-físicos aplicados à predição da SWCC em diferentes estados de compactação de um solo laterítico.

O modelo de Arya & Paris (1981) apresentou desempenho moderado (R^2 até 0,81), com superestimação no ramo seco. Chang & Cheng (2018) teve bom ajuste geral (R^2 até 0,95), mas com maior dispersão nos erros (MAE até 0,12). Haverkamp & Parlange (1986) obteve os melhores resultados ($R^2 > 0,97$; MAE $< 0,018$), com forte aderência aos dados. Aubertin et al. (2003) mostrou boa performance (R^2 até 0,97), com leve desvio em faixas intermediárias. Apesar dos bons desempenhos, os modelos apresentam limitações em captar variações estruturais relacionadas ao processo de compactação, o que justifica a busca por modelos mais sensíveis a esse parâmetro. Ressalta-se que durante a execução dos ajustes, os parâmetros foram variados amostra a amostra, tendo em vista representar da melhor maneira possível o ajuste com os dados experimentais, causando a necessidade de ajuste individual para cada amostra avaliada.

8 MODELO UNIFICADO DA CURVA DE RETENÇÃO COM EFEITOS DE ADSORÇÃO E CAPILARIDADE (GAO ET AL., 2023)

Neste estudo, adota-se o modelo proposto por Gao et al. (2023) para representar a curva de retenção da água no solo (SWCC), que considera simultaneamente os efeitos da água adsorvida e da capilaridade. O modelo também incorpora de forma explícita a influência do índice de vazios inicial (e_0) no comportamento hidráulico dos solos não saturados.

Na Tabela 5 estão apresentadas as etapas de cálculos principais para determinação do modelo proposto por Gao *et al.*, (2003) (Eq. 5 a Eq. 8). Os detalhes sobre o modelo podem ser encontrados no artigo de Gao *et al* (2023).

Tabela 5 - Etapas básicas de cálculo do modelo proposto por Gao *et al.*, (2023).

Etapa de cálculo	Equacionamento	Id.
Divisão do teor de umidade total em porções de adsorção de água e capilaridade	$W = W_a + W_c$	Eq. 5
Utilização da equação de Kelvin modificada para a determinar a contribuição da adsorção	$S_{ra} = \frac{w_m}{e_0} C(s) \left[\exp \left(-\frac{s\omega_v}{\rho_w RT} \right) \right]^{\frac{1}{M}}$	Eq. 6
Cálculo da retenção de água por capilaridade.	$S_{rc} = (1 - S_{ra}) C_c(s) \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m}$	Eq. 7
Equação de combinação entre as parcelas da adsorção e capilaridade	$S_r(s, e_0) = (1 - S_{ra}) C_c(s) \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{e_0^b s}{a} \right)^n \right] \right\}^{-m} + \frac{w_m}{e_0} C(s) \left[\exp \left(-\frac{e_0^b s \omega_v}{\rho_w RT} \right) \right]^{\frac{1}{M}}$	Eq. 8

A principal contribuição do modelo proposto por Gao et al. (2023) reside na possibilidade de calibrar os parâmetros do modelo com base em dados experimentais, permitindo a geração de novas curvas de retenção de água a partir da variação exclusiva do índice de vazios. Neste estudo, os dados das amostras com índice de vazios igual a 0,44 (Umidade ótima) e 0,46 (Ramo úmido) foram utilizados no processo de calibração, enquanto os dados da amostra com índice de 0,49 (Ramo seco) foram empregados para avaliar a capacidade preditiva da modelagem ajustada. Na Figura 4a está ilustrado o ajuste entre os dados experimentais e as curvas simuladas, enquanto na Tabela 6 estão apresentados os parâmetros calibrados a partir dos dados observados. O parâmetro b está associado ao ajuste da equação em função do índice de vazios. Os parâmetros a , n e m controlam a forma da curva na região dominada pelos efeitos da capilaridade. Já w_{am} e M são utilizados para representar a porção da curva relacionada à adsorção. Por fim, S_r e S_m correspondem, respectivamente, à sucção residual e à sucção máxima considerada no modelo.

Na Figura 4b está ilustrada a variação do índice de vazios de maneira a simular as trajetórias das curvas de retenção de água simulando o caso de diferentes graus de compactação (GC%). Os resultados indicam que a inclusão explícita do índice de vazios na formulação permite representar adequadamente a influência da estrutura do solo no comportamento de retenção de água.

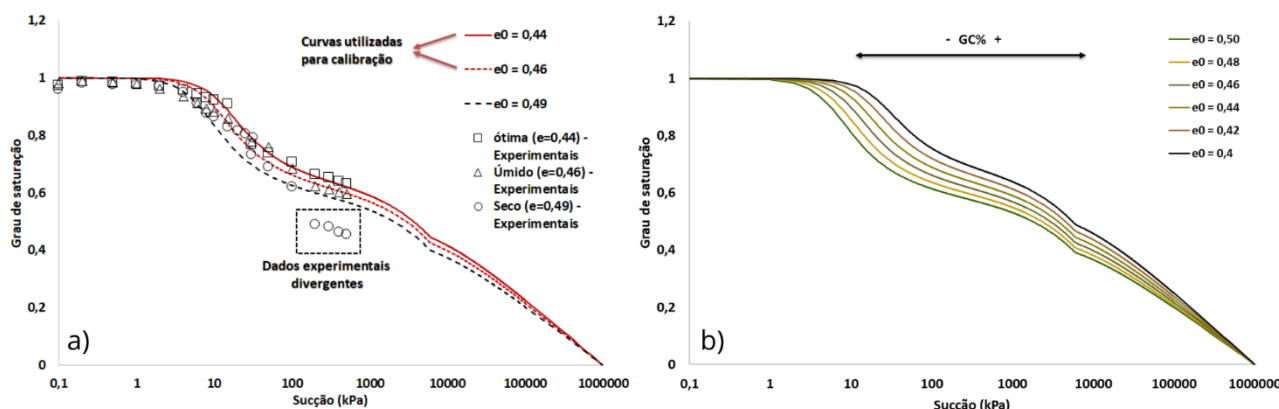


Figura 4 – Curvas de retenção de água obtidas ao utilizar o modelo proposto por Gao *et al.*, (2023); a) Comparação entre os dados experimentais e previstos; b) Comportamento da curva de retenção de água quando da variação do índice de vazios.

Tabela 6 - Parâmetros calibrados e seus respectivos significas na modelagem.

Amostra	b	Wam (%)	M	a	m	n	Sr (Mpa)	Sm (Mpa)
Solo compactado	6,2	10	1	0,07	0,65	2,1	6	1000

O modelo unificado proposto por Gao *et al.* (2023) introduz uma abordagem inovadora ao incorporar explicitamente os efeitos de adsorção e capilaridade na curva de retenção de água (SWCC), considerando também o índice de vazios inicial como variável determinante. Sua aplicação no presente estudo revelou um bom desempenho geral, especialmente nas regiões intermediárias da curva e nas faixas de sucção de maior relevância para o comportamento geotécnico não saturado.

As curvas calibradas para índices de vazios de 0,44 e 0,46 ficaram com ajuste visual satisfatório, embora a calibração de parâmetros como "a" e "m" tenha mostrado sensibilidade a ruídos experimentais, indicando necessidade de cautela em aplicações mais amplas, sugerindo que o modelo é sensível a pequenas variações de estrutura, sendo útil para representar compartimentos com diferentes histórias de compactação.

Os dados experimentais divergentes indicados na Figura 4a podem ser atribuídos a complicações durante o programa experimental, como também a particularidades devido ao ramo de compactação, fato que não é coberto pelo modelo proposto por Gao *et al.*, (2023), cabendo ressaltar que a metodologia de ensaio utilizada para a determinação dos pontos da SWCC para a amostra indeformada apresentada anteriormente tem alto potencial para obtenção de dados fidedignos a realidade, uma vez que é praticamente automatizada, fato que minimiza as chances de erro humano no processo.

9 CONCLUSÕES

Os ajustes da curva de retenção de água com o modelo de van Genuchten (1980) apresentaram elevada eficiência ($R^2 > 0,98$), validando a qualidade dos dados experimentais. Entre os modelos semi-físicos avaliados, o de Haverkamp & Parlange (1986) obteve o melhor desempenho, com alta precisão estatística ($R^2 > 0,97$) e baixos valores de erro.

O modelo proposto por Gao *et al.* (2023), ao incorporar explicitamente o índice de vazios e os efeitos combinados de adsorção e capilaridade, mostrou-se promissor para simular a resposta da SWCC em diferentes densidades iniciais. Apesar de pequenas discrepâncias em regiões de baixa saturação, o modelo demonstrou capacidade de representar adequadamente variações estruturais típicas de aterros compactados.

Sua implementação em análises de fluxo permite considerar diretamente a variabilidade do índice de vazios como parâmetro de entrada, favorecendo estudos de confiabilidade. Além disso, sua aplicação em retroanálises possibilita representar a variação do grau de compactação ao longo do maciço, contribuindo para avaliar a resiliência de estruturas geotécnicas frente a cenários climáticos extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Pesquisa GeoinfraUSP, à Cátedra Under Rail - VALE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 1104–1122.
- Campbell, D. F., Almeida, L. A., & Silva, S. O. (1949). Relatório preliminar sobre a geologia da bacia do Maranhão. Conselho Nacional do Petróleo, Boletim Técnico, 1, 159p.
- Chang, C. F., & Cheng, Y. M. (2018). Estimation of the soil water retention curve using the crack network characteristics. *Engineering Geology*, 245, 178–186.
- Costa, M. L. (1991). Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Brazilian Journal of Geology*, 21(2), 146–160.
- Dane, J. H., & Topp, G. C. (2002). *Methods of Soil Analysis – Part 4 – Physical Methods*. Soil Science Society of America.
- de Carvalho, J. C., de Rezende, L. R., Cardoso, F. B. D. F., de FL Lucena, L. C., Guimarães, R. C., & Valencia, Y. G. (2015). Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, 5, 3–19.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521–532.
- Fredlund, D. G., Fredlund, M. D., & Rahardjo, H. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- Gao, Y., Li, Z., Cui, W., Sun, D. A., & Yu, H. (2023). Effect of initial void ratio on the tensile strength of unsaturated silty soils. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3609–3622.
- Haverkamp, R., & Parlange, J. Y. (1986). Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142(6), 325–339.
- Kumar, G. S., Saini, P. K., Deoliya, R., Mishra, A., & Negi, S. (2022). Characterization of Laterite Soil and its Use in Construction Applications: A Review. 16, 200120. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200120>
- Menezes, M. N., Dal'Bó, P. F., Smith, J. J., Borghi, L., Arena, M., Favoreto, J., & Araújo-Júnior, H. I. (2024). Pedogenic processes and climatic conditions from Cretaceous (Albian) tropical paleosols of the Itapecuru Formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 633, 111881.
- Paris, J. F., & Arya, L. M. (1981). A model for predicting the soil–water characteristic curve from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, 45(5), 1023–1030.
- Pedraño, E., Barrilari, I. M. R., & Lima, H. P. (1996). Palynological studies in the Cretaceous of the Parnaíba basin. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 39, pp. 380–383).
- Romero, E., Gens, A., & Lloret, A. (1999). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Engineering Geology*, 54, 117–127.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892–898.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil–water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 379–392.
- Xu, J., Du, X., Zhao, X., & Li, L. (2023). Analytical Stability Analysis of Rainfall-Infiltrated Slopes Based on the Green–Ampt Model. *International Journal of Geomechanics*, 23(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002647](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002647)
- Zhong, W., Zhu, Y. D., & He, N. (2022). Physical Model Study of an Intermittent Rainfall-Induced Gently Dipping Accumulation Landslide. *Water*, 14(11), 1770. <https://doi.org/10.3390/w14111770>