

Propriedades Hidromecânicas de uma Argila Porosa do Distrito Federal

Emerson Batista Silva

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, emersonbs.engcivil@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva

Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rafael.silva@unb.br

Larissa Reis Silva

Graduanda Eng. Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, larissareis1174@gmail.com

Otávio Alfama Neto

Graduando Eng. Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, otavioalfama.2015@gmail.com

Rafael Lima de Carvalho

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, lc.rafael98@gmail.com

RESUMO: Os solos lateríticos são abundantes no Distrito Federal (DF), cuja predominância de relevo mais plano associado ao clima favoreceu um intemperismo mais acentuado, gerando camadas de solos mais profundas sujeitas ao processo de lixiviação. Os solos em função das suas características físico-químicas originárias do processo de formação, apresentam alta porosidade, apresentando distribuição de poros bimodal dividida predominantemente em macro e microporos. Estes solos são denominados como solos colapsíveis, que dependem de atenção devido à mobilização de rupturas súbitas quando solicitados por obras projetadas sem levar em consideração as particularidades de suas propriedades mecânicas e hidráulicas. No artigo são apresentados e discutidos os resultados de ensaios em amostras de argila porosa retiradas em diferentes horizontes de um perfil de intemperismo típico do DF. As granulometrias com e sem defloculante e a agregação relativa (AR) indicam as agregações das partículas finas. Por meio das curvas características solo-água (CCSA), evidenciou-se a distribuição bimodal de poros, e obteve a curva de permeabilidade relativa que define a condutividade hidráulica do solo na condição não saturada. Já as envoltórias de resistência demonstraram relação com a estrutura do solo, isto é, as parcelas friccional e coesiva da resistência está relacionada com as agregações e presença de finos.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Tropicais, Argila Porosa, Estrutura Bimodal.

ABSTRACT: Lateritic soils are abundant in the Federal District (DF), where the predominance of flatter terrain associated with the climate has favored more pronounced weathering, resulting in deeper soil layers subject to leaching processes. Due to their physicochemical characteristics originating from the formation process, these soils exhibit high porosity, with a bimodal pore distribution predominantly divided into macro and micropores. These soils are referred to as collapsible soils, which require attention due to the potential for sudden ruptures when subjected to construction projects that do not take into account the particularities of their mechanical and hydraulic properties. The article presents and discusses the results of tests on samples of porous clay taken from different horizons of a typical weathering profile in the DF. Particle size distribution with and without defloculant, and relative aggregation (RA) indicate the aggregation of fine particles. The soil-water characteristic curves (SWCC) showed the bimodal distribution of pores and obtained the relative permeability curve, which defines the soil's hydraulic conductivity in the unsaturated condition. The resistance envelopes showed a relationship with the soil structure, i.e. the frictional and cohesive parts of the resistance are related to aggregations and the presence of fines.

KEYWORDS: Tropical Soils, Porous Clay, Bimodal Structure.

1 INTRODUÇÃO

A geomorfologia do Distrito Federal (DF), com predominância de relevo mais plano associada ao clima, favoreceu um intemperismo mais acentuado, gerando camadas de solos mais profundas sujeitas ao processo de lixiviação. Nessas condições, a lixiviação de sais solúveis e óxidos é intensa, fazendo com que grande parte das camadas superficiais dos solos da região sejam extremamente porosas e possuam características colapsíveis. A concentração de hidróxidos de ferro e alumínio por acumulação relativa forma concreções lateríticas pela desidratação e cristalização desses elementos (Araki, 1997).

As camadas superficiais possuem granulometria típica de solos arenosos, mas referem-se à formação de grumos de partículas de argila. Os agregados são conectados por ligações cimentícias (pontes de argila, óxido de ferro, alumínio ou carbonatos), sendo sensíveis à presença de água (Paixão e Camapum de Carvalho, 1994). A sensibilidade dessas ligações cimentícias pode ser desfavorável para o comportamento do terreno. Devido às suas características físico-químicas, originárias do processo de formação, esses solos apresentam alta porosidade, com distribuição de poros bimodal, predominantemente dividida em macro e microporos. Conforme Gurjão et al. (2012), os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar na curva característica de retenção de água: o primeiro referente à entrada de ar nos macroporos e o segundo nos microporos, respectivamente, para valores de sucção pequenos e mais elevados. Nos solos tropicais, os macroporos ocorrem interagregados, enquanto os microporos estão intra-agregados, podendo estes muitas vezes apresentar volume total maior que o dos macroporos (Cardoso, 2002).

Esses solos são denominados como solos colapsíveis, que requerem atenção devido à mobilização de rupturas súbitas quando solicitados por obras projetadas sem levar em consideração as particularidades de suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Assim, no DF, a presença de solos colapsíveis representa um desafio para a engenharia geotécnica. As intervenções de geotecnia interceptam ou estão assentadas, em grande maioria, no horizonte de solo colapsível, que está sujeito a mudanças no estado de tensão e no comportamento hidromecânico. Portanto, é importante considerar essas condicionantes nos projetos de geotecnia. As redistribuições de tensões, decorrentes da intervenção, e as variações do teor de umidade no terreno, ao longo das estações do ano, devem estar dentro de limites aceitáveis para evitar o colapso do maciço, que comprometeria a integridade da obra. Dependendo da alteração no estado de tensões, ocasionada, por exemplo, por sobrecargas ou descompressões promovidas por escavações, poderá ocorrer colapso. Dessa forma, o rearranjo estrutural, somado à redução da resistência ao cisalhamento, pode mobilizar um colapso no terreno, levando a problemas de recalques e deformações em estruturas construídas sobre esses solos. Outros problemas referem-se à mobilização de processos erosivos, que podem causar perdas de vidas ou, na melhor das hipóteses, danos materiais.

De acordo com Araki (1997), o processo de colapso ocorre devido à diminuição localizada na resistência ao cisalhamento dos vínculos que mantêm a estrutura metaestável dos solos colapsíveis, ou devido à aplicação de tensões, ou mesmo alterações do estado de tensões que superem a resistência limite desses vínculos. Conforme Collares (1997), para a ocorrência do colapso, é necessário que o solo possua uma estrutura com elevada porosidade associada a uma situação de equilíbrio metaestável entre suas partículas. Essa estrutura é mantida pela presença de algum vínculo capaz de conferir ao solo uma resistência temporária. Portanto, é importante conhecer como as propriedades hidromecânicas desses solos podem afetar o comportamento de um maciço frente às diferentes condições de contorno, sejam estas advindas de agentes naturais, como chuvas, ou antrópicos, como intervenções de engenharia. Nesse contexto, o artigo apresenta e discute os resultados de ensaios de campo e laboratoriais de amostras de argila porosa do DF, retiradas em diferentes profundidades ao longo de uma escavação contida por cortina de estacas com ancoragens.

2 METODOLOGIA

O local de estudo se situa na Asa Sul da cidade de Brasília/DF. Na Figura 1 tem-se o registro fotográfico do perfil do solo exposto pela escavação em execução para implantar obra de contenção destinada para uma garagem subterrânea. Nota-se que até a profundidade escavada o solo varia pouco em extensão e profundidade, sendo a argila porosa tipicamente encontrada no DF. Resultados de sondagens à percussão (SPT) indicam presença de argila siltosa porosa com coloração vermelha, até a profundidade de 6 m. Já entre 6 m e 9 m de profundidade há uma camada de transição de silte arenoso, de coloração vermelha-amarela. Subsequente tem-

se o início de uma zona saprolítica com uma matriz siltosa de alta resistência. O lençol freático encontra-se a 10 m de profundidade, próximo da cota de piso da garagem projetada. Na Figura 2 apresenta-se o perfil geotécnico obtido por meio de seis furos de sondagem.



Figura 1. Vista do primeiro horizonte de solo, exposto pela escavação, caracterizado como argila porosa.

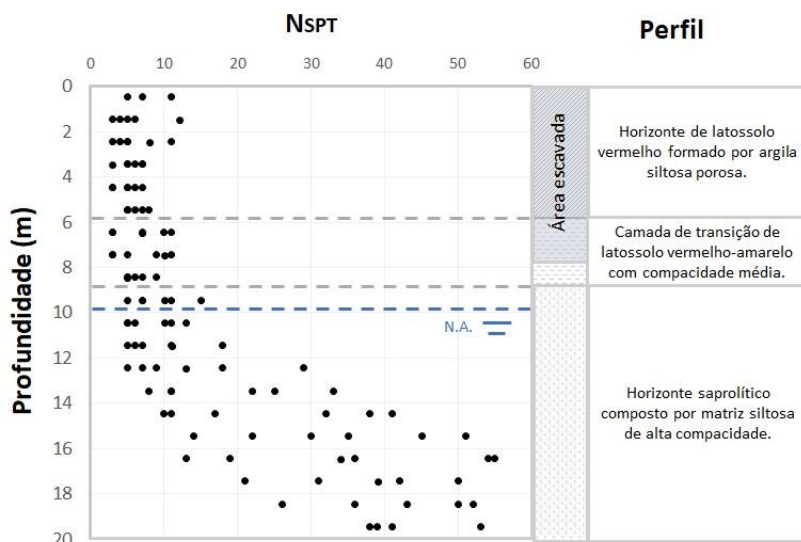


Figura 2. Perfil geotécnico obtido por meio de 6 sondagens à percussão (Carvalho, 2023).

Mediante o programa experimental realizou-se ensaios de caracterização física e hidromecânica de corpos de provas (CP) de diferentes profundidades (3m e 6 m) do perfil do solo apresentado na Figura 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas dos solos nas profundidades de 3 m e 6 m com e sem uso de defloculante, CD e SD, respectivamente. Nota-se com os ensaios SD que o solo mais superficial apresenta uma granulometria *in situ* mais grosseira, o que pode está relacionado com os processos de lixiviação e laterização das partículas. Já os ensaios CD demonstraram que as granulometrias dos solos nas duas profundidades são semelhantes, podendo assim afirmar que o solo mais superficial possui mais agregações que são desfeitas com o uso do defloculante.

Para avaliar a presença de agregações no solo, calculou-se a agregação relativa (AR), conforme a Equação 1 apresentada por Otálvaro *et al.* (2015). Verificou-se AR de 71,8% para o solo de 3 m de profundidade e 62,3% para o de 6 m. Estes resultados são coerentes com Otálvaro *et al.* (2015) que encontraram AR de 65% e Massocco (2023) que encontrou 64% em uma amostra e 74% em outra amostra. O maior percentual encontrado na amostra de 3 m mostra como a agregação das partículas são maiores em proximidade com a superfície.

$$AR = \frac{\sum \%Ret_{semdispersante} - \sum \%Ret_{comdispersante}}{\sum \%Ret_{comdispersante}} \quad (1)$$

Onde, $\%Ret_{semdispersante}$ é a percentagem acumulada na curva sem dispersante; $\%Ret_{comdispersante}$ é a percentagem acumulada na curva com dispersante.

A análise granulométrica é essencial, pois a textura interfere no comportamento do solo afetando os parâmetros hidráulicos e mecânicos. Neste caso, apesar da estrutura do solo ser formada praticamente por partículas de siltes e argilas, o comportamento hidromecânico é típico de solos arenosos, pois a condição *in situ* (SD) é de agregado: falsos grãos de areia, formados pela cimentação de partículas de silte e argila. Assim, conforme ressaltado por Jacintho *et al.* (2012), deve-se levar em conta não só a granulometria das partículas individualizadas, como também e principalmente a correspondente ao estado agregado, pois é este que define em maior grau o comportamento do solo. Dessa forma, a partir de ensaios de laboratório foram obtidas as curvas granulométricas do solo de estudo nas profundidades de 3 m e 6 m, como são demonstradas na Figura 3. Observa-se na distribuição um alto teor de silte no material, sendo perceptível a presença de argila nos ensaios realizados com defloculante.

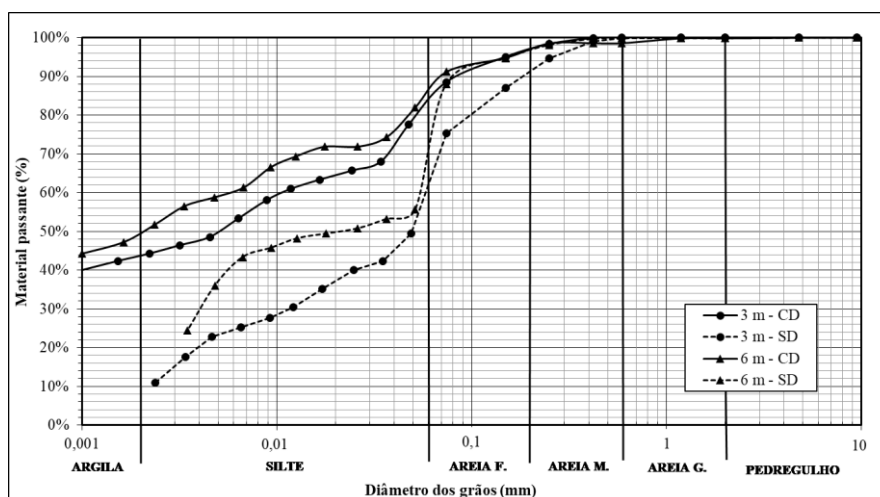


Figura 3. Curvas granulométricas com e sem uso de defloculante dos solos a 3 m e 6 m de profundidade.

Na Tabela 1 apresenta-se os parâmetros físicos do solo, destes parâmetros destacam-se o baixo peso específico (γ) e o elevado índice de vazios (e), que são característicos de solos colapsíveis os quais apresentam uma estrutura altamente porosa devido o processo de lixiviação. Além disso, este processo de lixiviação acarretou em uma elevação de hidróxidos de ferro e alumínio nas camadas superficiais o que justifica a elevada densidade relativa dos sólidos (G_s). Estes resultados da caracterização física são coerentes com os observados por Araki (1997), Mota (2003) e Marques (2006) em amostras de solos retiradas nas proximidades da obra. Além disso, também aparecem na tabela 1 parâmetros como o peso específico saturado (γ_{sat}), o peso específico seco (γ_d), a umidade (w), os limites de liquidez (WL) e plasticidade (WP), juntamente com o índice de plasticidade (IP), essenciais para o estudo das propriedades físicas do solo.

Tabela 1. Parâmetros físicos do solo.

Profundidade da amostra (m)	3	6
w (%)	18,2	26,64
γ_{sat} (kN/m ³)	13,2	15,6
γ_d (kN/m ³)	9,91	8,89
γ_{nat} (kN/m ³)	11,02	11,26
G_s	2,82	2,75
e	2,07	2,04
w_L (%)	43	44
w_P (%)	31	37
IP (%)	12	7

A presença de agregações como observado é um indicativo de uma distribuição de poros bimodal, o que é evidenciado mediante a forma da curva característica solo-água (CCSA). A CCSA, apresentada na Figura 4, foi traçada se baseando nos valores de sucção obtidos pelo método do papel filtro realizado em corpos de prova (CP) indeformados retirados na profundidade de 3 m. Dependendo da CCSA, as variações de umidade podem ter importante impacto sobre o comportamento hidromecânico do solo. Destaca-se a maior resistência ao cisalhamento na condição não-saturada, variações entre os limites da macro e microporosidade influenciando no processo de infiltração, bem como, a secagem do solo podendo provocar redução no seu índice de vazios.

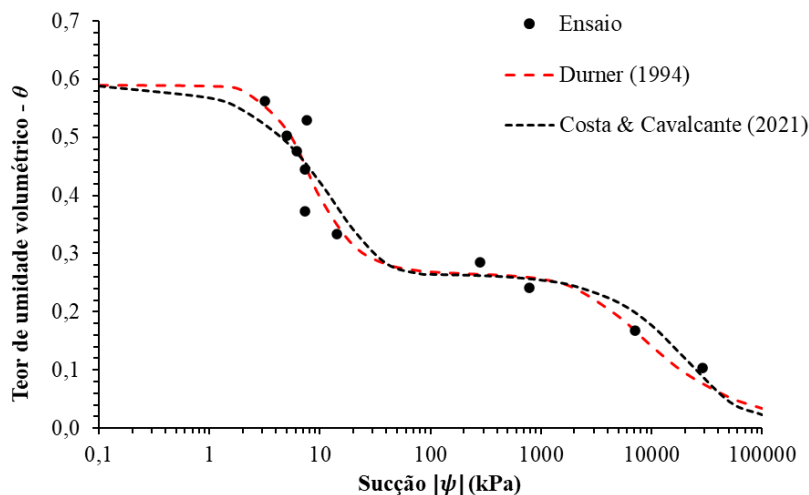


Figura 4. Curvas características solo-água (CCSA) definidas por meio de dois modelos de ajuste.

A CCSA pode ser representada por equações ajustadas a dados obtidos experimentalmente, obtendo-se uma representação matemática da CCSA, que pode ser usada em análises numéricas e previsões de comportamento do solo não-saturado. A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos dois modelos que foram utilizados (Durner, 1994; Costa e Cavalcante, 2021). As CCSA têm as formas atreladas ao arranjo estrutural, que evidenciam uma distribuição bimodal dos poros. Essa estrutura é marcada por microporos no interior dos agregados e macroporos entre eles. Para solos bimodais, ou seja, solos com uma distribuição granulométrica que apresentam um patamar intermediário, têm-se dois valores de entrada de ar e dois valores de umidade residual (Gitirana Jr. e Fredlund, 2004). Nos solos tropicais, os macroporos ocorrem interagregados, enquanto os microporos estão intra-agregados, estes muitas vezes podendo apresentar volume total maior que o dos macroporos (Cardoso, 2002). A CCSA bimodal encontrada nos ensaios está em conformidade com resultados da literatura para amostras indeformadas da argila porosa de Brasília (Silva, 2006; Marques, 2006; Hortegal, 2011; Grau, 2014; Burgos, 2016; Massocco, 2023).

Tabela 2. Parâmetros das CCSA.

Modelo	Durner, 1994	Costa e Calvacante, 2021
θ_s	0,59	0,59
θ_r	0	0,02
w_1	0,55	-
a_1	0,16	-
a_2	0,0002	-
n_1	2,6	-
n_2	1,65	-
λ	-	0,43
δ_1	-	0,00005
δ_2	-	0,073

Ademais, para definir o comportamento hidráulico do solo, além da CCSA é necessário determinar a condutividade hidráulica do material. Sendo representada na condição saturada pelo coeficiente de permeabilidade saturada (k_{sat}). Já na condição não saturada, não existe um coeficiente de permeabilidade, mas

sim, uma função de condutividade hidráulica não saturada que pode ser mensurada de forma indireta a partir da CCSA, aplicando modelos que relacionam as curvas. A Figura 5 apresenta a curva de permeabilidade relativa em função da sucção no solo, obtida relacionando a CCSA com o modelo apresentado por van Genuchten (1980), essa curva é essencial para modelagem de solos na condição não saturada. Como pode ser observado a permeabilidade do solo diminui com a sucção, isso é, quanto menor a saturação do solo, maior a capacidade de retenção de água, reduzindo assim a permeabilidade do solo. Ou seja, quando os poros do solo não estão preenchidos apenas com água (entrada de ar), ocorre uma redução drástica da permeabilidade do solo, formando assim uma curva de formato exponencial.

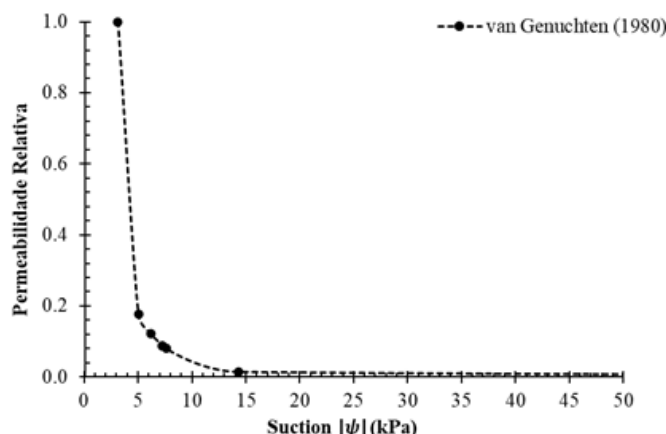


Figura 5. Curva de permeabilidade relativa em relação a sucção.

Os parâmetros de resistência foram definidos a partir de ensaios de cisalhamento direto executados em corpos de prova (CP) indeformados e inundados, submetidos às tensões normais de 10 kPa, 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. A velocidade do cisalhamento dos CP foi determinada pelos resultados da fase de adensamento, sendo de 0,08 mm/min, utilizando o critério de Gibson e Henkel (1954), recomendado por Head (1994). As envoltórias de resistência dos horizontes de solo à 3 m e 6 m são apresentadas na Figura 6 e os parâmetros de resistência na Tabela 3.

Observa-se que os parâmetros de resistência são relativamente próximos, o que evidencia a homogeneidade do perfil de solo da escavação até atingir a camada de transição entre o solo laterítico e saprolítico. Além disso, ressalta-se que o solo mais superficial (3m) possui a parcela friccional da resistência mais evidenciada, que é coerente com o observado estruturalmente, com a presença de agregações que acarreta em um comportamento semelhante a solos arenosos. Por outro lado, o solo coletado em maior profundidade (6m) apresentou a parcela coesiva mais expressiva, o que pode estar relacionado com a maior presença de finos.

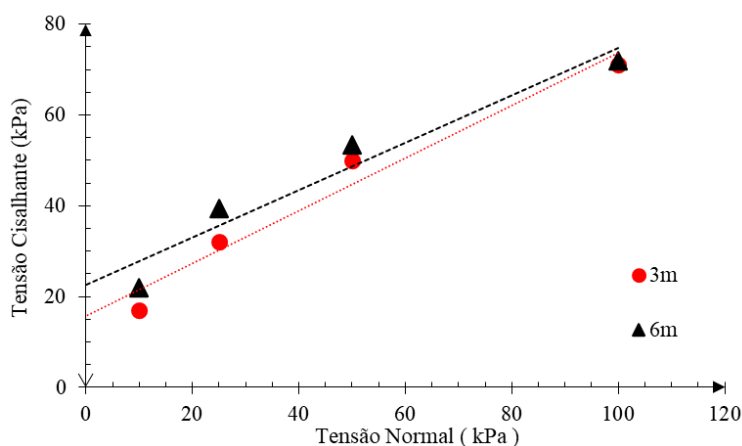


Figura 6. Envoltórias de resistência para diferentes horizontes de solo (3m e 6m).

Tabela 3. Parâmetros de resistência dos horizontes de solo.

Profundidade da amostra (m)	3	6
ϕ (°)	30	27
c (kPa)	15,7	22,6

4 CONCLUSÕES

O perfil de solo estudado consiste em um latossolo vermelho escuro resultante de intemperismo principalmente químico, associado a processos de lixiviação e laterização, sendo conhecido pelos geotécnicos locais como argila porosa colapsível de Brasília. Esse solo possui peculiaridades devido esses processos de formação, tendo assim uma estrutura bastante porosa, metaestável, com altos índices de vazios e, conseqüentemente, baixos pesos específicos, além de uma elevada densidade relativa dos sólidos devido a concentração de hidróxidos de ferro e alumínio, essas características foram evidenciadas mediante a caracterização física apresentada.

Ademais, a estrutura desse solo consiste em agregações de partículas de silte e argilas, com ligações cimentícias. Essas agregações ficaram perceptíveis ao analisar as curvas granulométricas com e sem defloculante. Sendo assim, um indicativo para outra característica deste solo, que é uma estrutura definida como bimodal, ou seja, dois tamanhos de poros dominantes: macroporos e microporos. Essa estrutura bimodal foi comprovada por meio da curva característica solo-água (CCSA).

Mediante a elaboração da curva de permeabilidade relativa do solo, e os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, ficou evidente a relação entre a estrutura do solo e o comportamento hidráulico e mecânico, onde apesar de ser denominado como uma argila, este apresenta características de solo arenoso, como: (i) uma elevada condutividade hidráulica que reduz drasticamente na condição não saturada, e (ii) uma elevada parcela friccional da resistência ao cisalhamento, porém, possui uma parcela coesiva considerável que está relacionada com as ligações cimentícias entre os agregados. Acerca da análise em profundidade nota-se uma homogeneidade do perfil de solo, distinguindo ligeiramente devido a maior agregação das partículas na camada mais superficial, e maior presença de finos na mais profunda e, conseqüentemente, maior parcela coesiva nesta.

Por fim, com este programa experimental evidenciou-se a importância da caracterização física, hidráulica e mecânica da argila porosa de Brasília, promovendo um melhor entendimento do comportamento colapsível deste solo, o que é primordial para elaboração de qualquer projeto geotécnico na região, contribuindo assim para futuras análises e mitigação de riscos.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), EMBRE Empresa Brasileira de Engenharia e Fundações Ltda, CEUB e Supera Engenharia Ltda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araki, M.S. (1997) *Aspecto relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.
- Burgos, J. F. (2016). *Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.
- Cardoso, F. B. F. (2002). *Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.
- Carvalho, R.L. (2023). *Análise da Estabilidade de Escavação em Solo Poroso do Distrito Federal*. Seminário de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 16 p.

- Collares, A.C.Z.B. (1997). *A Influência de características químicas do fluido de saturação no colapso dos solos*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 97p.
- Costa, M.B.A.D., Cavalcante, A.L.B. (2021). Bimodal soil–water retention curve and k-function model using linear superposition. *International Journal of Geomechanics*, 21(7), 04021116.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2): 211-223.
- Gitirana Jr, F.N., G., Fredlund, D.G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2), 209-212.
- Gibson, R.E., Henkel, D.J. (1954) Influence of duration of tests constant rate of strain on measured “drained” strength. *Géotechnique*, v. 4, n. 1, p. 6–15.
- Grau, E. D. A. (2014). *Efeito da Variação de Umidade no Cálculo do Empuxo em Solos Tropicais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.
- Gurjão, C.M.C., Chrusciak, M.R., Silva, J.P.D., Carvalho, J.C.D. (2012). Estruturas superficiais de infiltração: colchões drenantes. Carvalho, José Camapum de; Gitirana Junior, Gilson de Farias Neves; Carvalho, Eufrosina Terezinha Leão. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais, 4, 331-352.
- Head, K.H. (1980). Permeability, shear strength and compressibility tests. *Manual of soil laboratory testing*, 2, 747 p.
- Hortegal, M.V. (2011). *Avaliação do Comportamento de Estacas Hélice Contínua a Partir de Resultados de Laboratório e de Campo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173 p.
- Jacinto, E., Carvalho, J., Cardoso, F., Guimarães, R. (2012). Perfil de intemperismo e infiltração. Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, GFN; Leão de Carvalho, ET (Org.). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- Massocco, N.S. (2023). *Avaliação do efeito da estrutura na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.
- Marques, F.E.R. (2006). *Comportamento de túneis superficiais escavados em solos porosos o caso do metrô de Brasília/DF*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 462 p.
- Mota, N.M.B. (2003). *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- Otálvaro, I. F., Neto, M. P. C., Caicedo, B. (2015). Compressibility and microstructure of compacted laterites. *Transportation Geotechnics*, 5, 20-34.
- Paixão, M. N. O. N., & Camapum de Carvalho, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. *II Simpósio sobre solos não saturados*, Recife, PE, 1, 105-110.
- Silva, J. D. (2006). *Estudo da Colapsibilidade da Argila Porosa de Brasília pelo Fluxo de Contaminantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of American Journal*, v.44, pp. 892-898.