XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/45

Contribuição para Estudos e Projetos de Fundações Profundas em Perfis de Intemperismo Tropical

Renato Marques Cabral
Professor, Universidade Estadual de Goiás - UEG, Anápolis, Brasil, renatocabral@ueg.br

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Professora, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, marciamascarenha@ufg.br

José Camapum de Carvalho
Profissional Liberal, Brasília, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

RESUMO: Devido à presença de manto de intemperismo comumente espesso em regiões de clima tropical, como é o caso de grande parte do Centro-Oeste brasileiro, as fundações profundas têm sido muito utilizadas em obras geotécnicas implantadas nestas regiões. O dimensionamento destas fundações é quase sempre feito tomando-se como base resultados de ensaios SPT e SPT-T sendo de modo menos frequente utilizados outros ensaios de campo e ensaios de laboratório. Após as determinações das capacidades de carga das estacas com fundamento nos estudos realizados é elaborado o projeto da obra e provas de carga são executadas objetivando a averiguação das capacidades de carga definidas. Os estudos de campo e laboratório são, pelas suas próprias especificidades, quase sempre pontuais no tempo e no espaço, o que amplia a relevância de se entender de modo mais amplo o comportamento dos solos que integram o perfil de intemperismo. Nesse sentido, o presente artigo além de apresentar resultados de análises de composição mineralógica e estrutural e do comportamento mecânico do perfil de solo estudado por meio de ensaios de laboratório, apresenta resultados de SPT-T e provas de carga sobre estacas executadas a trado no trecho do perfil correspondente aos solos profundamente intemperizados e de transição em situação não saturada. As provas de carga executadas foram do tipo lento com repetições de ensaios sobre as mesmas estacas em diferentes épocas do ano de modo a se analisar o impacto das variações sazonais da sucção presente no solo sobre o comportamento das estacas.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento Mecânico, Estacas Escavadas, Microestrutura, Mineralogia, Sucção.

ABSTRACT: Due to the presence of a commonly thick weathering mantle in tropical climates, such as much of the Brazilian Midwest, deep foundations have been widely used in geotechnical works implemented in these regions. The design of these foundations is almost always based on the results of SPT and SPT-T tests, with other field and laboratory tests being used less frequently. After determining the load-bearing capacities of the piles based on the studies carried out, the project design is developed and load tests are performed to verify the defined load-bearing capacities. Field and laboratory studies, due to their specific characteristics, are almost always punctual in time and space, which increases the relevance of understanding more broadly the behavior of the soils that make up the weathering profile. In this sense, this article, in addition to presenting results of mineralogical and structural composition analyses and the mechanical behavior of the soil profile studied through laboratory tests, presents results of SPT-T and load tests on piles executed with an auger in the section of the profile corresponding to deeply weathered and transitional soils in an unsaturated situation. The load tests performed were of the slow type with repetitions of tests on the same piles at different times of the year in order to analyze the impact of seasonal variations in soil suction on the behavior of the piles.

KEYWORDS: Mechanical Behavior, Bored Piles, Microstructure, Mineralogy, Suction.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos, projetos e execução de fundações profundas no manto de solo tropical profundamente intemperizado requer cuidados especiais devido, em especial, às suas particularidades mineralógicas, estruturais e de umidade inferior à de saturação e a seu comportamento predominantemente colapsível. Tais

particularidades conferem a estes solos certa dinâmica espacial e temporal quando da implantação de uma obra, sendo que, nestes solos, é comum o uso de estacas escavadas em edificações em que se gera pequenas cargas nas fundações.

Guimarães (2002) fez um amplo estudo sobre o comportamento de estacas escavadas a trado no manto não saturado de um perfil de intemperismo tropical. Para melhor entendimento do comportamento das estacas foram realizados ensaios SPT-T em diferentes épocas do ano e ensaios de laboratório destinados a caracterizar os solos quanto às propriedades químico-mineralógicas e físicas e quanto ao comportamento mecânico.

Algumas vezes em nível de pesquisa torna-se necessária a repetição das provas de carga em uma mesma estaca. Voltando o olhar para uma obra já concluída e sendo usada, a repetição de carregamentos e descarregamentos a partir de um determinado nível de carga é muitas vezes frequente sob imposição do próprio uso da edificação. Mascarenha (2003) realizou provas de carga repetidas ao longo do ano sobre estacas escavadas apresentando 30 cm de diâmetro e profundidade variando entre 7,5 m e 8 m assentes no início da transição para o solo saprolítico. Estas estacas foram implantadas no mesmo local e são similares às utilizadas por Guimarães (2002). Os autores citados também realizaram provas de carga em diferentes épocas do ano para averiguar o impacto da sucção no comportamento das estacas.

Estudos mais recentes como o realizado por Ayala (2020) apontam para o fato de que não só a sucção como também a alteração do solo com o tempo pode intervir na capacidade de carga das estacas implantadas neste tipo de solo. Silva *et al*. (2008) constataram uma significativa perda de capacidade de carga ao analisarem o comportamento de tirantes alguns anos após suas implantações. Esses estudos indicam a necessidade de se considerar particularidades relacionadas às propriedades químico-mineralógicas e estruturais destes solos e a possibilidade de sua degradação ao longo do tempo.

Considerando-se as particularidades dos solos tropicais profundamente intemperizados os resultados que serão apresentados no artigo e suas análises contribuirão pela sua amplitude para a melhoria dos estudos e projetos de fundações profundas, em especial das estacas escavadas a trado situadas no manto de intemperismo tropical profundamente intemperizado.

2 PROPRIEDADES MINERALÓGICAS E FÍSICAS DO PERFIL DE SOLO ANALISADO

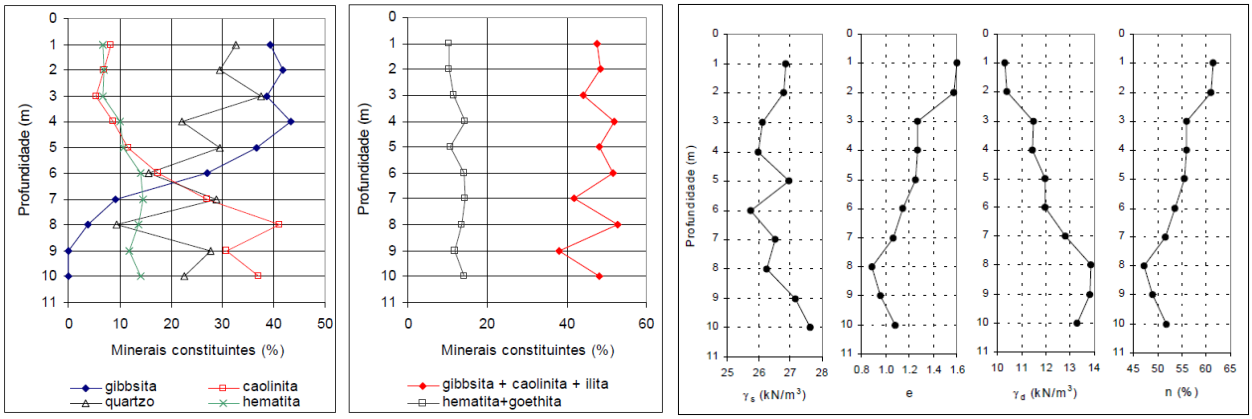
As propriedades mineralógicas e físicas do perfil de solo no qual se implantou as fundações objeto do presente artigo são apresentadas na Figura 1 a seguir. A Figura 1a apresenta a mineralogia do perfil de solo analisado (Carvalho 1995). Merecem destaque nesta figura o fato de que o teor de gibbsita diminui e o de caulinita aumenta com a profundidade assim como o fato da soma dos teores de gibbsita, caulinita e ilita ser praticamente constante com a profundidade apontando assim para a característica residual do perfil.

Nesta mesma figura observa-se certo paralelismo entre o perfil de quartzo e de gibbsita até a profundidade de 6 metros e entre o perfil de quartzo e de ilita a partir desta profundidade, o que sinaliza para a presença de quartzo neoformado. Outro aspecto relevante diz respeito ao perfil correspondente a soma de hematita com goethita manter-se praticamente constante ao longo da profundidade apontando para certa constância do teor de ferro ao longo do perfil cabendo destacar que os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio são geralmente agentes cimentantes que contribuem para a formação de agregados e microagregados nos solos tropicais profundamente intemperizados.

A Figura 1b (Guimarães, 2002), mostra que o peso específico dos grãos varia pouco ao longo do perfil enquanto o índice de vazios e a porosidade diminuem e o específico aparente seco aumenta de modo significativo quando se amplia a profundidade no perfil. Tais comportamentos refletem a relevância da agregação e formação de macroporos no solo intemperizado.

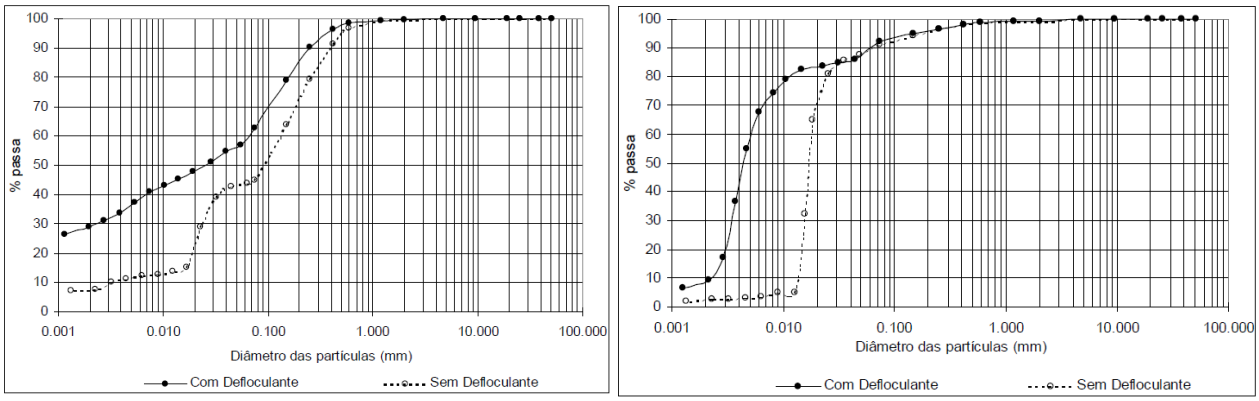
As Figuras 2a e 2b mostram as curvas granulométricas obtidas por meio de análises granulométricas executadas com e sem o uso de defloculante. Observa-se a presença marcante de agregados na amostra coletada a 2 m de profundidade e de pacotes de silte na amostra coletada a 9 m de profundidade. Estas figuras indicam a sensibilidade das agregações a certos agentes químicos, que no caso foi o hexametafosfato de sódio, mas no caso das estacas concretadas *in situ* os agentes químicos oriundos do cimento que compõe o concreto podem atuar desagregando o solo. Ayala (2020) mostrou ao estudar um solo superficial do mesmo local que ele apresentava potencial de desagregação quando em presença de cal hidratada. Destaca-se ainda que os

resultados obtidos por Guimarães (2002) indicam a desagregação e destruição de pacotes de argila para a amostra que integra a zona de transição coletada a 9 m de profundidade.



(a) (b)

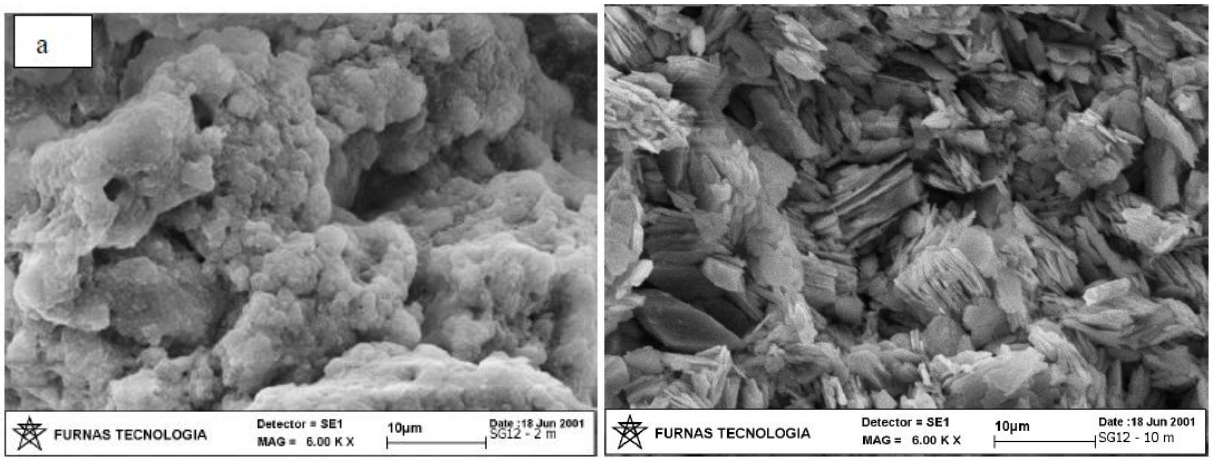
Figura 1. Composição mineralógica (a) e características físicas (b) do perfil de solo analisado. Adaptada de Carvalho (1995) e Guimarães (2002).



(b) (b)

Figura 2. Curvas granulométricas obtidas para 2 m (a) e 9 m (b) de profundidade.

A Figura 3a mostra a presença de agregados e de macro e microporos no solo profundamente intemperizado coletado a 2 m de profundidade. Já a Figura 3b mostra que o solo pouco intemperizado, solo saprolítico, é predominantemente formado por pacotes de silte apresentando maior uniformidade na distribuição de poros.



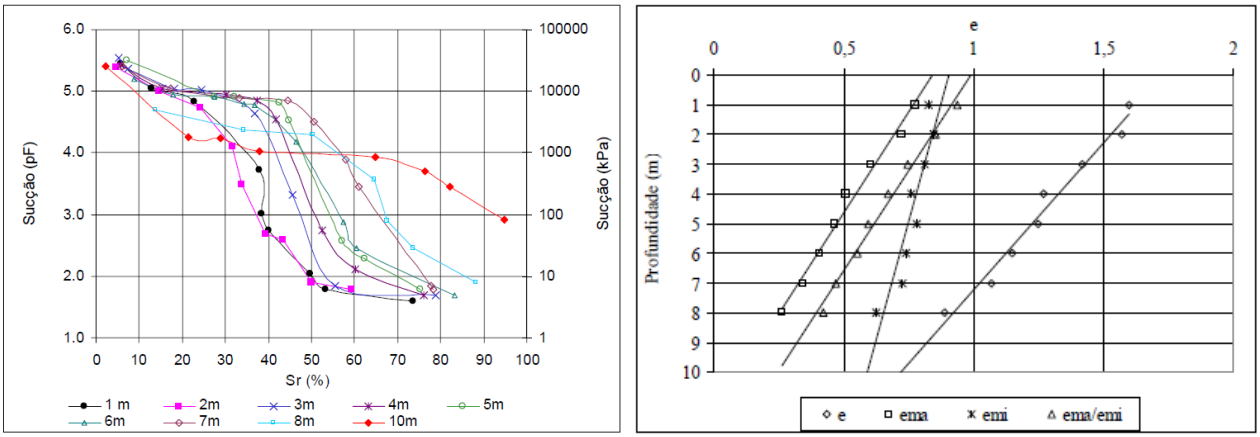
(a) (b)

Figura 3. Microestrutura do solo coletado a 2 m (a) e 10 m (b) de profundidade.

Estes resultados são importantes, pois apontam para a necessidade de cuidados especiais quando se estuda e se usa os solos tropicais requerendo que se tenha um olhar distinto daquele convencionalmente adotado para os solos não tropicais. Exemplificando, Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) mostraram que nas análises dos limites de Atterberg deve-se desconsiderar a água presente no interior das agregações.

3 CURVAS CARACTERÍSTICAS

A Figura 4a apresenta as curvas características matriciais obtidas para amostras indeformadas coletadas no perfil de solo analisado e a Figura 4b apresenta os índices de vazios totais (e), dos macroporos (ema), dos microporos (emi) e a relação entre ema e emi. Verifica-se na Figura 4a que o grau de saturação correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos aumenta com o aumento da profundidade, sendo que para a profundidade de 10 m a macroporosidade se torna inexistente, o mesmo ocorrendo para o grau de saturação correspondente a entrada de ar nos microporos, o que reflete em um certo paralelismo entre as curvas características. A distribuição de poros interfere diretamente na curva característica dos solos agregados e conhecê-la torna-se relevante ao se analisar as propriedades e comportamento destes solos (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021), cabendo lembrar que por tratar-se de perfil de solo não saturado a umidade do solo varia ao longo do ano em consequência do regime de precipitação (Figura 5).



(a) (b)

Figura 4. (a) Curvas características; (b) índices de vazios global (e), dos macroporos (ema) e dos microporos (emi) e relação ema/emi.

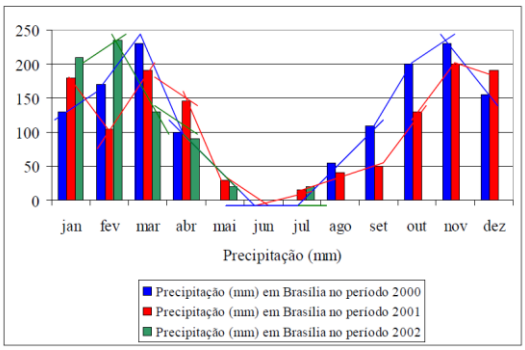
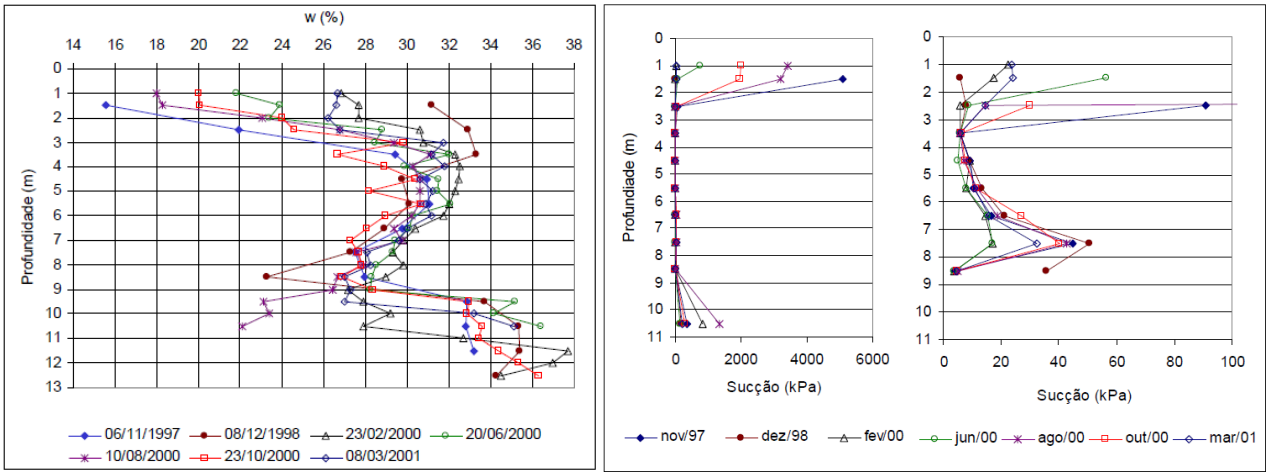


Figura 5. Pluviometria dos anos 2000, 2001 e 2002 (modificado - Instituto Nacional de Meteorologia, 2002).

Considerando-se os índices de vazios ao longo do perfil (Figura 1b), os perfis de umidade obtidos ao longo do ano (Figura 6a), as curvas características obtidas para as diferentes profundidades (Figura 4a) analisou-se os perfis de sucção ao longo do ano (Figura 6b), constatando-se que as variações no perfil de solo estudado são mais significativas nos 3 primeiros metros e nas zonas de transição e correspondente ao solo

saprolítico menos intemperizado (7,5 m a 10,5 m). No trecho mais superficial isso ocorre, pois ele corresponde a zona ativa mais susceptível aos efeitos da evaporação e precipitação e no trecho mais profundo isso ocorre devido ao fato do solo ser menos poroso contribuindo para o acúmulo de umidade no período chuvoso.

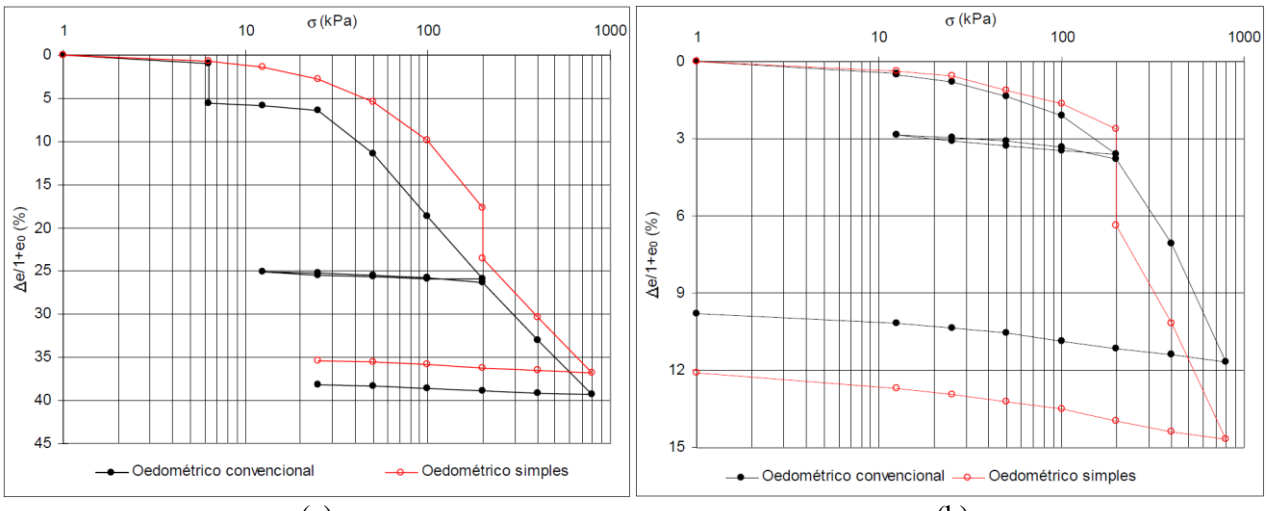


(a) (b)

Figura 6. Variações de umidade (a) e sucção ao longo do perfil (b) que ocorrem entre diferentes datas.

4 COMPORTAMENTO MECÂNICO

As Figuras 7a e 7b confirmam a natureza colapsível do perfil de solo até a profundidade de 8 m. Nestas Figuras o ensaio oedométrico convencional corresponde aos corpos de prova inundados no início dos ensaios e o ensaio oedométrico simples corresponde ao solo inundado após consolidação sob a tensão de 200 kPa. É importante observar a diferença de comportamento entre as duas profundidades ao se comparar as curvas obtidas nos dois experimentos. Elas indicam que vários são os fatores intervenientes e que eles estão a mudar com o nível de intemperização sofrido pelo solo.



(a) (b)

Figura 7. Ensaios oedométricos obtidos para a mostras coletadas a 2 m (a) e 8 m (b) de profundidade.

A Figura 8 apresenta os resultados de coesão obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto realizados nos planos horizontal e vertical e por meio de ensaios triaxiais. As amostras encontravam-se em estado não saturado e foram coletadas ao longo do perfil de intemperismo. As curvas características mostradas na Figura 4a indicam pequenas variações na sucção na zona de macroporosidade o que leva a estas pequenas variações de coesão observadas para as sucções menores que o pF de aproximadamente 2 (Figura 8). Observa-se na Figura 8b que os resultados de coesão obtidos para o cisalhamento no plano vertical tendem a ser

inferiores aos obtidos para o cisalhamento no plano horizontal, apontando para o fato de que se faz necessário analisar a estrutura do solo em suas particularidades. No presente caso o perfil de solo é praticamente horizontal e o fluxo de água se dá de modo predominante na direção vertical, o que justifica a diferença obtida em função da estrutura imposta ao solo pelo fluxo.

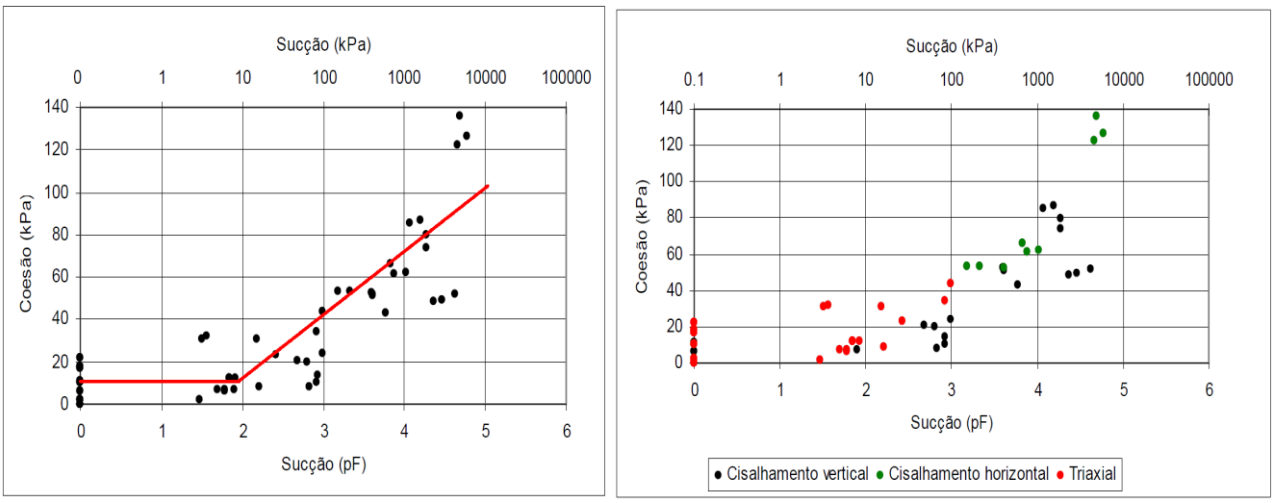
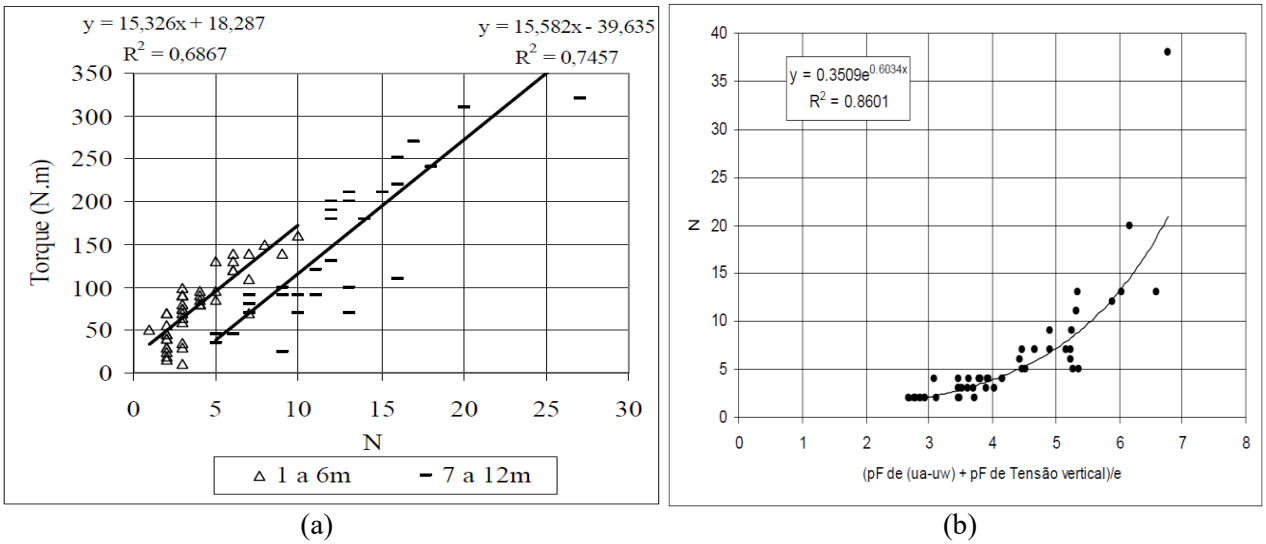


Figura 8. Coesão em função da sucção em pF.

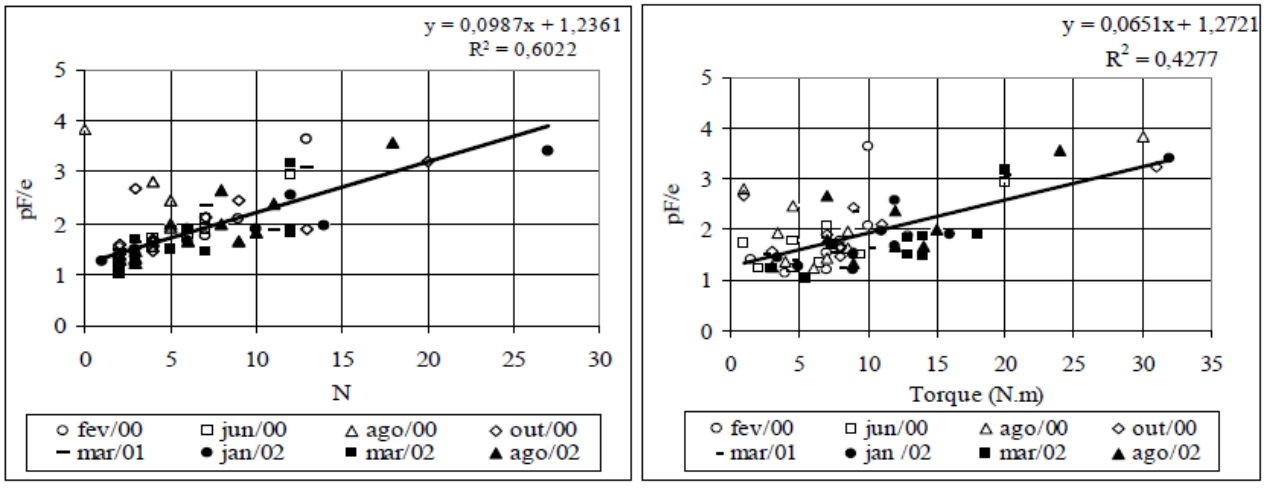
Considerando-se os resultados de SPT-T, a Figura 9a mostra que o torque aumenta com o número de golpes do ensaio SPT, alterando levemente o comportamento entre o solo profundamente intemperizado e o solo menos intemperizado. Na Figura 9b observa-se que este número de golpes aumenta com o somatório do pF da sucção com o pF da tensão vertical normalizado pelo índice de vazios, ou seja, o comportamento de uma estaca implantada no perfil de intemperismo tropical em estado não saturado será função da sucção e do estado de tensões assim como da porosidade e sua distribuição no solo.



(a) (b)

Figura 9. (a) Relação entre o torque e o N SPT; (b) N em função da sucção, da tensão vertical e de e.

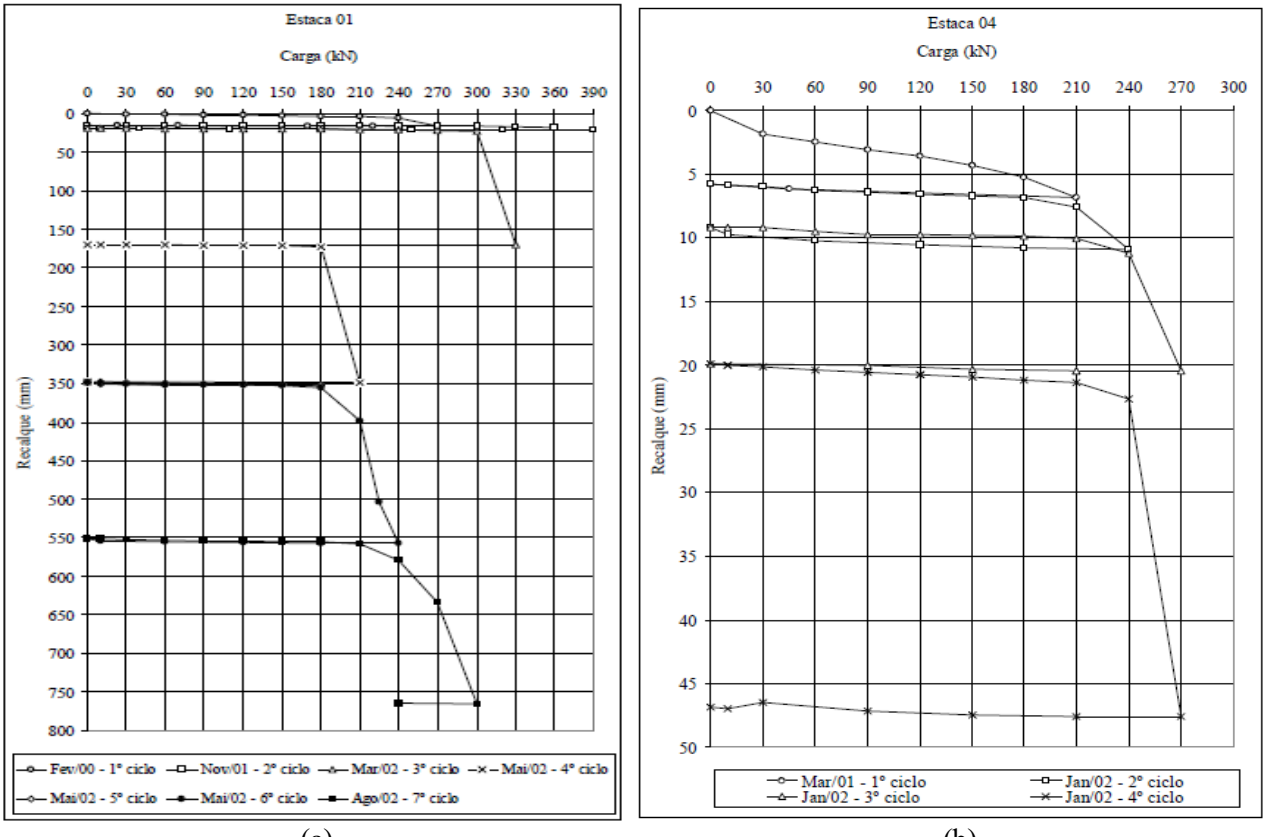
As Figuras 10a e 10b mostram, respectivamente, que o número de golpes (N) e o torque aumentam com a relação pF/e, indicando que tanto a sucção que varia com a umidade do solo ao longo do ano como o índice de vazios que varia ao longo do perfil interferem diretamente no comportamento mecânico do solo e, portanto, do desempenho das estacas implantadas em perfis de solos não saturados



(a) (b)

Figura 10. (a) Relação N x pF/e; (b) Relação Torque x pF/e.

As Figuras 11a e 11b apresentam os resultados obtidos em provas de carga realizadas de modo repetitivo em duas estacas distintas. Observa-se nestes resultados que, por tratar-se de um perfil de solo colapsível ,os recalques gerados pelo carregamento são predominantemente irreversíveis. Observa-se ainda que, na estaca 1 ,os resultado das provas de carga correspondentes ao 4º e 6º ciclos realizadas em maio de 2002 assim como o 2º, 3º e 4º ciclos de provas de cargas realizadas na estaca 4 apresentam para cada estaca comportamentos similares, no entanto, ao se comparar para a estaca 1 estes resultados com os obtidos em agosto de 2002 verifica-se uma significativa melhoria no comportamento quando a prova de carga foi realizada em período de seca, indicando a relevância da sucção para o comportamento destas fundações implantadas em perfis de solos tropicais não saturados.



(a) (b)

Figura 11. (a) Provas de carga realizadas na estaca 1; (b) Provas de carga realizadas na estaca 4.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste artigo constam das dissertações de mestrado de Guimarães (2002) e Mascarenha (2003). Eles mostram de modo objetivo e claro que as propriedades mineralógicas e físicas e o comportamento dos solos tropicais profundamente intemperizados variam ao longo do perfil segundo o grau de intemperismo sofrido pelo solo. Eles mostram ainda que o comportamento mecânico nestes perfis de solo não saturados sofre influência direta da sucção atuante sendo relevante considerar ainda a distribuição de poros e não apenas a porosidade do solo. A Figura 12 mostra que de modo simplificado e estimativo ser possível considerar o impacto do índice de umidade (IHU) obtido com valores da evaporação real (ER) no comportamento de estacas implantadas neste tipo de solo.

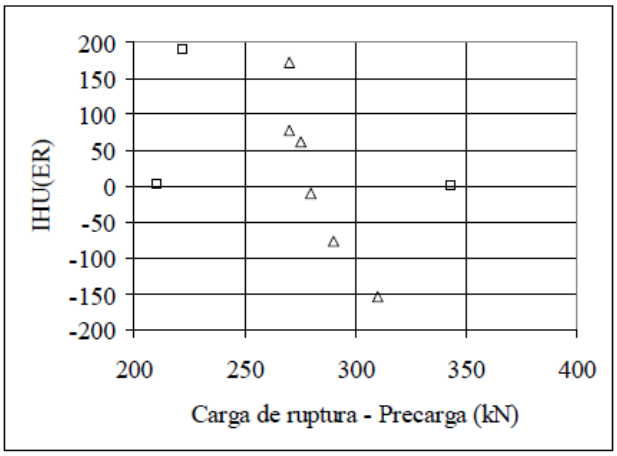


Figura 12. Influência do índice de umidade na carga de ruptura de estacas.

AGRADECIMENTOS

Os autores(a) agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio dado no desenvolvimento das pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, R. J. L. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Brasília: Tese de Doutorado, G.TD-159/2020, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 272 p.

Camapum de Carvalho, J., Gitirana Jr, G.F.N. (2021) Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, v. 44, n. 3, p. 1-25. DOI: 10.28927/SR.2021.068121. www.soilsandrocks.com

Carvalho, M. N. (1995). Análise mineralógica de um perfil de solo do Distrito Federal através de raios X. Seminário sobre Geotecnia dos Solos Tropicais. Universidade de Brasília, pp 1-7

Guimarães, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-091A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.

Instituto Nacional de Meteorologia (2002). Climatologia, Gráficos. Consultada em www.inmet.gov.br no dia 01/02/2003.

Mascarenha, M. M. dos A. (2003). Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 165p.

Silva, C. M., Cordão Neto, M. P., Ribeiro, L. F. M. & Soares, E. (2008). Perda da capacidade de carga de tirantes executados na argila porosa de Brasília. Proc. *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. ABMS, BÚZIOS. 367-372.