

Capacidade de Carga em Estacas Escavadas e Executadas em Diferentes Estações Climáticas

Mariane Cardoso da Silva Aguiar
Engenheira Civil, Mestre Geotecnia, PPGGECON/EECA/Universidade Federal de Goiás,
Goiânia-GO, Brasil, maricardoso.eng@gmail.com

Maurício Martines Sales
Professor, EECA/ Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

Renato Resende Angelim
Professor, EECA/Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, angelim@ufg.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um comparativo do comportamento carga *versus* recalque entre estacas escavadas mecanicamente e ensaiadas em diferentes estações climáticas em um solo tropical do campo experimental da EECA/UFG em Goiânia-GO. O objetivo foi comparar o comportamento destas estacas, visto que, conforme já referenciado por Sales *et al.* (2015), após o umedecimento do solo não saturado, ocorre uma variação de 23% a 71% na capacidade de carga. De uma amostragem de 3 estacas ensaiadas, uma foi ensaiada na estação seca e duas na estação chuvosa. Destas, em 2 estacas foi possível realizar o ensaio de prova de carga instrumentada em 4 níveis, a fim de obter os dados de transferência de carga ao longo da profundidade. As provas de carga apresentaram ruptura convencional. A estaca executada na estação seca apresentou uma capacidade de carga 41% maior em relação à média da capacidade de carga das duas estacas ensaiadas na estação chuvosa.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas escavadas, prova de carga instrumentada, solo tropical.

ABSTRACT: This paper presents a comparison of the load-settlement behavior between mechanically excavated piles and tested in different climatic seasons in a tropical soil of Goiânia-GO. The objective was to compare the behavior of these piles, since, as already mentioned by Sales *et al.* (2015), after wetting the unsaturated soil, there is a variation of 23% to 71% in the load capacity. From a sample of 3 pile tests, one was tested in the dry season and two in the rainy season. Of these, in 2 piles it was possible to carry out instrumented load tests with 4 levels, in order to obtain load transfer data along the depth. The load tests showed conventional rupture. The pile executed in the dry season presented a load capacity 41% higher in relation to the average load capacity of two piles tested in the rainy season.

KEYWORDS: Cast-in-situ pile, pile load test, tropical soil.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

A dinâmica complexa dos solos tropicais e suas características geográficas distintas têm um impacto significativo no comportamento e na eficácia das fundações utilizadas em diferentes regiões do Brasil. As propriedades únicas dos solos presentes nas áreas de clima tropical, moldados pela intensidade do clima quente e das chuvas moderadas a intensas, introduzem desafios particulares na engenharia de fundações. A mineralogia desses solos, composta por partículas resistentes de areia e pedregulho, bem como a prevalência de hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio, resultam em uma complexa rede de microporos e macroporos. A interação entre as características dos solos lateríticos e as fundações implantadas na camada conhecida como zona ativa demonstra a influência das variações sazonais no grau de saturação e umidade do solo no comportamento das fundações.

Apesar da importância desses aspectos, as considerações de solos não saturados têm sido menos frequentes nos projetos de fundações, tanto profundas quanto rasas. Para fundações profundas, a avaliação da capacidade de carga e a compreensão da distribuição de carga ao longo das estacas ou tubulões representam desafios substanciais. A literatura técnica e científica nacional e internacional oferece *insights* valiosos nesse campo, evidenciando a busca incessante por métodos precisos de avaliação de carga e deslocamento.

No contexto da investigação do comportamento de estacas instaladas em solo tropical, um estudo conduzido por Cunha e Sales (1998) apresentou resultados reveladores. O estudo concentrou-se em duas estacas escavadas a trado, cada uma com um diâmetro (D) de 150 mm e comprimento (L) de 5 m, no Campo Experimental da Universidade de Brasília (UNB). O objetivo primordial foi avaliar como a variação da umidade do solo influencia o comportamento dessas estacas em um ambiente caracterizado por um perfil geotécnico composto por uma argila tropical, porosa e não saturada, conhecida por suas características colapsíveis.

Os experimentos realizados por Cunha e Sales (1998) envolveram ensaios de prova de carga com instrumentação, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12131 (ABNT, 2006). Os achados dessa pesquisa contribuem para uma compreensão mais profunda das interações entre as estacas e os solos tropicais, especialmente aqueles com características colapsíveis e influências significativas da variação da umidade. Esses resultados são de alta relevância e contribuíram para o desenvolvimento deste artigo.

2 Campo Experimental

Foram realizadas diversas sondagens e ensaios para caracterizar o perfil do solo no Campo Experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizado em Goiânia-GO.

2.1 Características geológico-geotécnicas

Machado *et al.* (2018) conduziram sondagens SPT durante a estação chuvosa e Rezende e Rocha (2020) realizaram o mesmo ensaio durante a estação seca. A Tabela 1 apresenta os resultados das sondagens, incluindo o número de golpes (N_{SPT}), comprimentos das amostras recuperadas (Li), eficiência dos golpes (η) e umidade (%). Observa-se uma relação entre a umidade e o N_{SPT} , onde camadas mais úmidas exibem um menor N_{SPT} .

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Tabela 1. Resultado do N_{SPT} , comprimento das amostras recuperadas (Li), eficiência dos golpes (η) e umidade na estação chuvosa e seca.

Prof. (m)	N_{SPT} (golpes)		Li (cm)		η (%)		Umidade (%)	
	chuvosa	seca	chuvosa	seca	chuvosa	seca	chuvosa	seca
0,30 a 0,75	3	10	18	10	66,2	65,5	21	9
1,00 a 1,45	1	7	15	7	45,7	71,9	20	11
2,00 a 2,45	1	5	19	5	42,5	76,2	21	11
3,00 a 3,45	2	7	15	9	63,6	75,3	18	13
4,00 a 4,45	6	5	20	9	68,4	81,0	17	13
5,00 a 5,45	8	5	29	0	74,5	80,9	17	11
6,00 a 6,45	7	4	25	14	80,8	79,5	21	14
7,00 a 7,45	7	8	44	10	84,2	81,5	21	13
8,00 a 8,45	9	11	11	4	83,8	80,0	28	11

Nas sondagens referenciadas por Machado *et al.* (2018), não foi identificada a presença de lençol freático até 10 metros de profundidade em relação ao nível do terreno. Durante essas sondagens, a energia de cada golpe foi medida utilizando *strain gages* e acelerômetros na haste de ensaio. A análise revelou um solo com baixa resistência à penetração e homogeneidade até cerca de 4,0 metros de profundidade, onde o aumento do N_{SPT} indicou uma transição de areia siltosa para silte arenoso.

Nascimento (2019) ao conduzir ensaios de laboratório e de campo com base em amostras obtidas de sondagens à trado e SPT, caracterizou o perfil de solo do campo experimental até 10 metros de profundidade. A distribuição granulométrica foi determinada através do ensaio de peneiramento e sedimentação, juntamente com o método expedito da pastilha. Os resultados estão apresentados na Tabela 2, indicando um solo arenoso e laterítico até 7,0 metros de profundidade, com alta agregação e intemperização.

Tabela 2. Resultados obtidos nos ensaios de massa específica dos grãos, classificações

Profundidade (m)	ρ_s (g/cm ³)	Teor de agregação (%)	Classificação granulométrica		Classificação Método Expedito da Pastilha
			Sem Defloculante	Com defloculante	
0 - 1	2,74	94,4	Areia siltosa	Areia argilosa	LA' - LG'
1 - 2	2,73	100	Areia siltosa	Areia argilosa	LA' - LG'
2 - 3	2,72	49,4	Areia siltosa	Areia argilosa	LG'
3 - 4	2,75	58,7	Areia siltosa	Areia argilosa	LA' - LG'
4 - 5	2,74	100	Areia siltosa	Areia argilosa	LA' - LG'
5 - 6	2,79	100	Areia siltosa	Areia argilosa	LG'
6 - 7	2,77	100	Silte arenoso	Areia argilosa	LG'
7 - 8	2,81	100	Silte arenoso	Areia argilosa	NG'
8 - 9	2,80	100	Silte arenoso	Areia siltosa	NS' - NG'
9 - 10	2,78	100	Silte arenoso	Areia siltosa	NA - NS'

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Além disso, Machado (2020) executou sete furos de sondagem PMT tipo *Ménard* com profundidade de 6,0 metros. Os resultados desses ensaios estão ilustrados nas Figuras 1 e 2, denotando as diferentes condições climáticas.

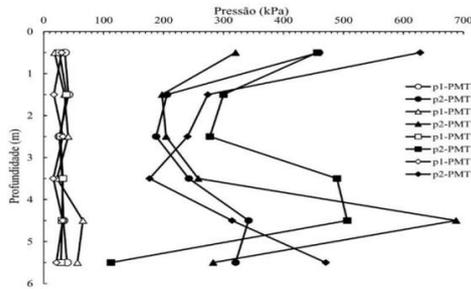


Figura 1. Ensaio PMT: extensão do trecho pseudo-elástico (estação chuvosa) (Machado, 2020).

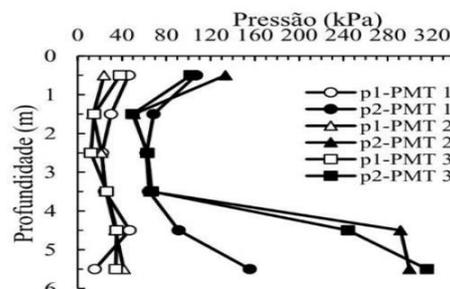


Figura 2. Ensaio PMT: extensão do trecho pseudo-elástico (estação seca) (Machado, 2020).

A Figura 3 apresenta as curvas características solo-água obtidas através de Tempo Cell e WP4C, exibindo o comportamento bimodal característico dos solos lateríticos. Rodrigues *et al.* (2018) realizaram ensaios PANDA em duas estações climáticas distintas, que pode ser confirmado na Figura 4.

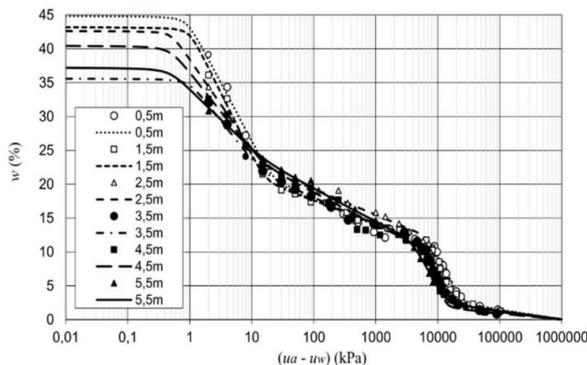


Figura 3. CCSA do solo do Campo Experimental. (Rodrigues *et al.*, 2018)

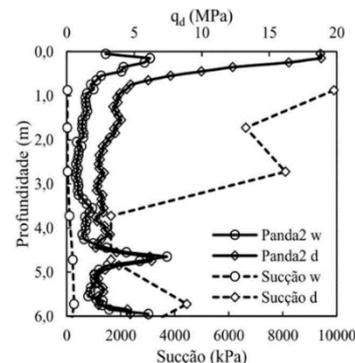


Figura 4. Perfil de Sucção e Panda 2. (Rodrigues *et al.*, 2018)

2.2 Teor de umidade

Para compreender as diferenças no comportamento das estacas em distintas estações climáticas, foi necessário conduzir ensaios para determinar o perfil de umidade.

Para obter o perfil de teor de umidade, coletas de solo foram realizadas durante a escavação das estacas de ensaio em trechos de 0,5 metros até 4,0 metros de profundidade na estação seca, e até 3,0 metros de profundidade na estação chuvosa. As amostras foram recolhidas durante a perfuração das estacas, armazenadas em sacos para preservar a umidade e analisadas algumas horas após a coleta. Dado a proximidade das curvas de umidade para cada estação chuvosa, realizou-se a média dos perfis de umidade obtidos a partir da perfuração das estacas de ensaio.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Portanto, a Figura 5 sumariza os perfis de umidade para ambas as estações climáticas, claramente definindo as características distintas de cada estação.

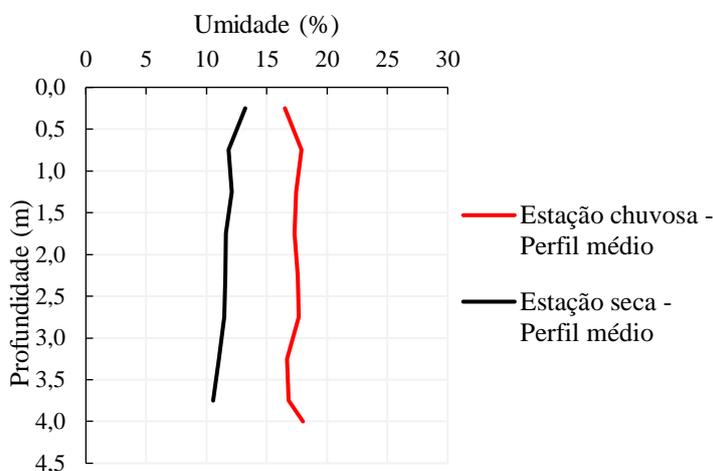


Figura 5. Perfis de umidade médio para estação seca e chuvosa.

Destaca-se, assim, uma variação de umidade de cerca de 12% na estação seca para aproximadamente 18% na estação úmida. A partir dos perfis médios de umidade para as estações seca e chuvosa, foi possível traçar um gráfico com informações da sucção matricial baseada nas curvas características ($u_a - u_w$) ilustradas na Figura 6.

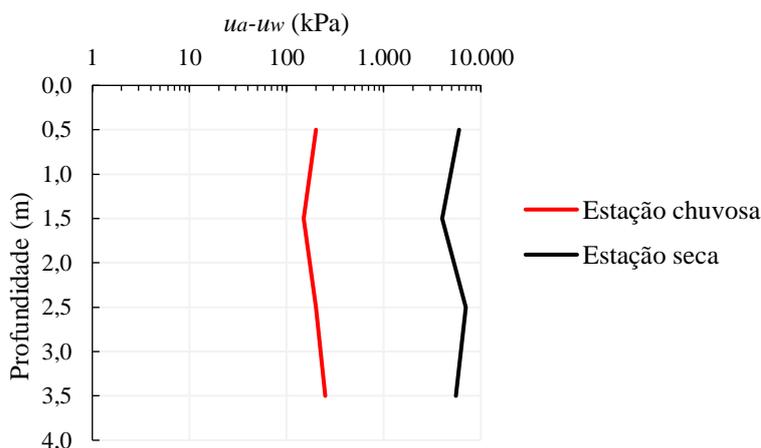


Figura 6. Sucções matriciais obtidas por meio de ajuste de curva.

Em relação aos resultados da sucção matricial ($u_a - u_w$), observa-se uma considerável discrepância entre os resultados da estação chuvosa e da estação seca. Essa diferença é mais acentuada nas profundidades iniciais do período seco, reduzindo-se conforme a profundidade aumenta. Notavelmente, as sucções encontradas na estação chuvosa são menores em comparação com as obtidas na estação seca.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



3 Etapas da Execução dos Ensaios

No âmbito dos materiais e métodos, os ensaios de estacas foram conduzidos no Campo Experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizado em Goiânia-GO. Este campo experimental, originado a partir da pesquisa de Nascimento (2019) e complementado por Galvani Jr. (2020), anteriormente destinou-se a ensaios em estacas metálicas tubulares prensadas.

Para aproveitar a infraestrutura existente, foram adicionadas seis novas estacas de reação, com designação de R8 a R13, conforme Figura 7, ampliando o número total de estacas de teste ensaiadas para dez, posteriormente submetidas a provas de carga estática (em destaque na cor azul).

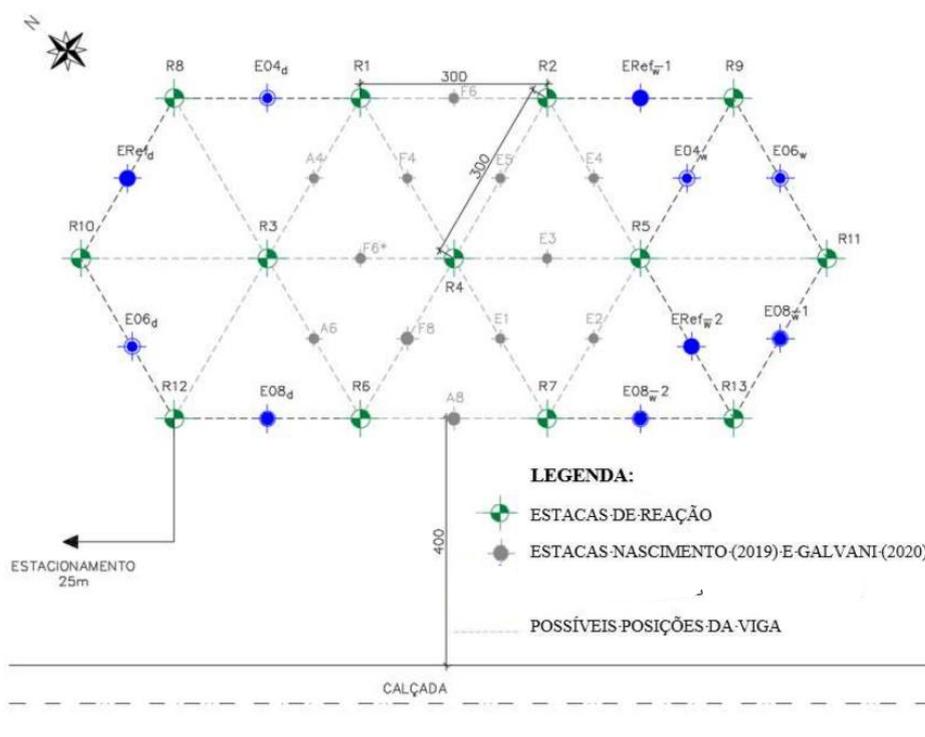


Figura 7. Localização das estacas do Campo Experimental da EECA/UFG

Das dez estacas executadas, iremos discutir os resultados de três estacas, escavadas mecanicamente, atingindo um diâmetro final de 250 mm. Essas estacas foram então submetidas a ensaios de compressão por meio de provas de carga estática.

No âmbito dos métodos utilizados, foram empregados sensores de imersão para a realização das provas de carga instrumentadas, imersos no concreto e alinhados na direção e sentido da carga aplicada sobre os elementos estruturais. Esses sensores foram fabricados de acordo com as especificações detalhadas no projeto descrito em Cruz Jr. (2016), seguindo a mesma direção e sentido das cargas aplicadas nas estacas.

Os sensores de imersão possuem duas bases cilíndricas feitas de aço galvanizado 1045, enquanto a barra central é confeccionada em alumínio, Liga 6351. As bases cilíndricas foram

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



rosqueadas na barra de alumínio para evitar possíveis não linearidades que poderiam surgir na solda. Durante a preparação, a barra central e as bases foram lavadas com água corrente e detergente neutro, eliminando qualquer resíduo de graxa, sendo em seguida secas ao ar. Após a secagem, os sensores foram lixados, lavados novamente e submetidos à secagem. A área de colagem no centro do sensor foi demarcada e os procedimentos recomendados por Cruz Jr. (2016) foram seguidos.

Depois da colagem dos sensores, os extensômetros foram conectados em circuitos em ponte de Wheastone completa para eliminar influências de temperatura e flexão. A validação dos sensores envolveu calibrações em laboratório, realizadas na prensa Humboldt HM-3000 do Laboratório de Solos do IFGoiano Campus Trindade para as estacas da estação seca, e na prensa hidráulica do Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC) da Universidade Federal de Goiás para as estacas da estação chuvosa.

Após a calibração, medidas foram tomadas para proteger os extensômetros, pontos de solda e circuitos elétricos contra umidade e ações mecânicas. Isso envolveu a aplicação de resina de silicone, cera de proteção, borracha de silicone e fita isolante de alta fusão. A Figura 8 ilustra o posicionamento dos sensores na armação guia no centro da estaca.



Figura 8. Fabricação, calibração e instalação de sensores.

Os sensores calibrados e protegidos foram posicionados em um vergalhão de 10 mm CA- 50, com comprimento de 3,50 m. Eles foram fixados nas alturas de 0,65 m, 1,40 m, 2,40 m e 3,80 m em relação ao nível do terreno, inicialmente utilizando abraçadeiras de poliamida e posteriormente fixados com arame recozido.

4 Análise dos Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de prova de carga estática conduzidos em estacas escavadas mecanicamente, em ambas as estações climáticas - seca e úmida.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



A estação em que as estacas foram executadas está indicada no índice da nomenclatura, por exemplo, a estaca ERef é identificada como ERef_d quando executada na estação seca (*dry*), e como ERef_w quando realizada na estação chuvosa (*wet*).

4.1 Capacidade de carga

Os dados obtidos nos ensaios de prova de carga estática à compressão nas estacas previamente prensadas e nas estacas de referência estão apresentados na Figura 8 e Tabela 3. Na estação úmida, as estacas de referência ERef-1w e ERef-2w não apresentaram aumento significativo na capacidade de carga das estacas previamente prensadas. A estaca ERefw-2 foi executada para verificar a repetibilidade no resultado da ERef.w-1. Na Figura 9 é possível identificar que houve uma repetibilidade satisfatória no comportamento das estacas de mesmo diâmetro (ERef-1w e ERef-2w) e, portanto, em termos de capacidade de carga, foi considerado a média das cargas de ruptura para cálculo da variação da capacidade de carga.

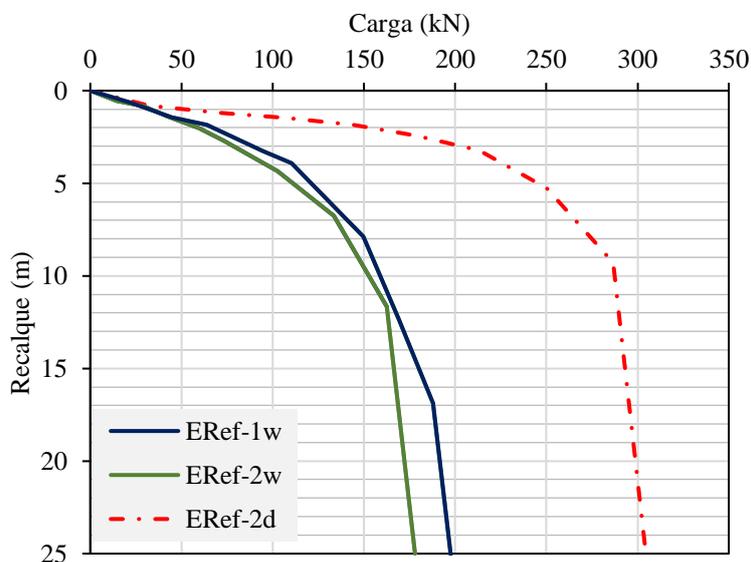


Figura 9. Curva carga vs recalque das estacas ensaiadas.

Conforme Figura 9, a estação chuvosa resultou no umedecimento do solo superficial até a profundidade da estaca de 4,0 m e, na presença de solo tropical, causou a perda do efeito da sucção, consequentemente na redução de 41% na capacidade de suporte da estaca de referência.

Este valor é representativo conforme abordado por Sales *et al.* (2015), visto que a capacidade de carga das estacas instaladas em solo não saturado, pode variar de 23% a 71% em função da umidade do solo.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



4.2 Mobilização das tensões cisalhantes

Observou-se na Figura 10 que a estaca teve mobilização do atrito praticamente todo na primeira camada instrumentada na estação seca e na estação úmida, as duas primeiras camadas contribuíram para esta mobilização, mesmo que em proporções menores.

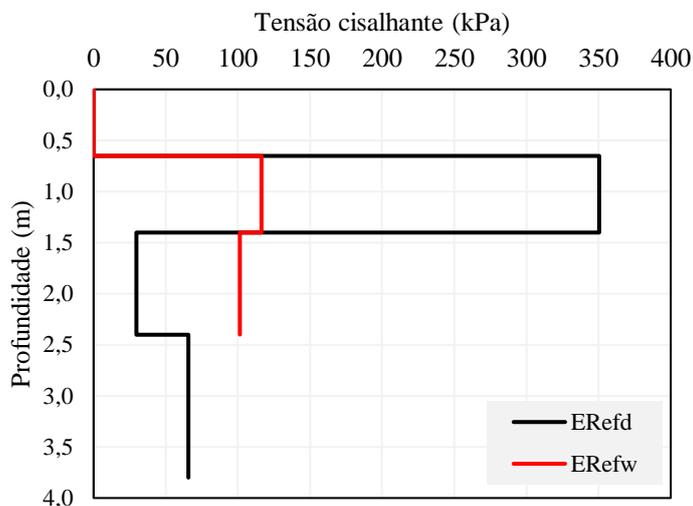


Figura 10. Tensão cisalhante das estacas ensaiadas.

4 Conclusões

O presente artigo fundamenta-se em comparar a capacidade de carga obtida em estacas escavadas mecanicamente e constatar a influência da variação do teor de umidade do perfil no comportamento destas estacas por meio de ensaios de prova de carga estática instrumentadas. Da análise dos resultados obtidos nos ensaios PCE-Ins, conclui-se que:

- O efeito da variação do teor de umidade foi confirmado na variação da capacidade de carga das estacas que foram escavadas mecanicamente. Nesta pesquisa houve uma redução de 41% na capacidade de carga, valor este dentro da faixa verificada por outros autores, como Sales *et al.* (2015), após o umedecimento do solo não saturado, de 23% a 71% na redução da capacidade de carga.
- A fabricação de sensores seguindo o processo executivo de Cruz Junior (2016) foi eficaz para obtenção dos dados de transferência de carga nas estacas. Nesta etapa, poucos sensores foram perdidos após concretagem. Uma solução para evitar essa perda em estacas escavadas, seria uma verificação adicional na proteção contra a umidade realizada após calibração.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Maurício Sales e co-orientador Renato Angelim, mestres de excelência que me acompanharam na época do Mestrado e posteriormente no desenvolvimento deste artigo. Obrigada por me acompanharem nestas jornadas. Obrigada por sempre demonstrarem confiança ao longo desta pesquisa e muita paciência. Gratidão pela sabedoria na condução nos momentos adversos do caminho percorrido.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131: *Estaca – Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.

CUNHA, R.P.; & SALES, M.M.; *Field load tests of piled footings founded on a tropical porous clay*. 3rd Int. Geot. Seminar Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, pp.433-438, 1998.

CRUZ JUNIOR, A.J. *Instrumentação de fundações estaqueadas*. 2016. 208f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GALVANI JR, L. C. *Ensaio em estacas metálicas tubulares de ponta aberta e fechada e em estacas prensadas e concretadas in situ*. Dissertação (em andamento) (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

MACHADO, R.R.; NASCIMENTO B.B.; RODRIGUES, J.L.M.; ANGELIM, R.R.; SALES, M.M.; JUNIOR, J.C.L.; MERIGHI, V.A.; FONSECA, A.L.E. *Medição de Energia em ensaio SPT realizado no campo experimental da EECA/UFG*, 2018. Salvador - XIX COBRASMEG, Salvador, Agosto, 2018.

MACHADO, R.R.; *Ensaio pressiométricos para estimativa de parâmetros de resistência e deformabilidade de um perfil de solo tropical*. 2020, 208f. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 2020.

REZENDE, B.L.M.; ROCHA, L.B. *Influência da energia nos resultados do ensaio SPT*. Monografia (Conclusão o curso de Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

NASCIMENTO, B. B. *Provas de carga estáticas em estacas metálicas tubulares de ponta aberta em um solo tropical*. 160 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

RODRIGUES, J.L. da M.; NASCIMENTO, B.B. do; MIRANDA, A.F.G.C.; CUNHA, L.M.; MACHADO, R.R.; ALVES, T.C.; ANGELIM, R.R.; *Ensaio com penetrômetro leve – PANDA 2 – em campo experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG*. XIX COBRAMSEG, 2018 – Salvador, Bahia, Brasil, 2018.

SALES, MAURÍCIO M.; VILAR, O. M. ; MASCARENHA, M. M. A. ; PEREIRA, J. H. F. ; SILVA, CARLOS MEDEIROS; CARVALHO, JOSÉ CAMAPUM DE. *Fundações em Solos Não Saturados*. Introdução à Mecânica dos Solos Não Saturados. 1ed.São Paulo: ABMS, 2015, v. 1, p. 1-36.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

