



Provas de carga em estacas escavadas e com *expander body* em estudo de fundações de aerogeradores

Celso Francisco de Faria Junior
Graduando Engenharia Civil, EECA/UFG, Goiânia, Brasil, celsofrancisco@discente.ufg.br

Geovane Evangelista Rocha
Graduando Engenharia Civil, EECA/UFG, Goiânia, Brasil, geovane@discente.ufg.br

Maurício Martines Sales
Professor, EECA/UFG, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

Renato Resende Angelim
Professor, EECA/UFG, Goiânia, Brasil, angelim@ufg.br

Renato Marques Cabral
Gerente Eletrobras-Furnas, Professor UEG, Anápolis, Brasil, renatocg@furnas.com.br

Daniel Carmo Dias
Engenheiro Civil, D&M Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda., Goiânia, Brasil, engdanieldias@gmail.com

Aleones José da Cruz Junior
Professor, IF Goiano-Trindade, Goiânia, Brasil, aleones.eng@gmail.com

Carlos Medeiros
Engenheiro Civil, Diretor Técnico EMBRE Engenharia e Fundações Ltda., Brasília, Brasil, carlos@embre.com.br

Márcio Muniz de Farias
Professor, UnB, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

RESUMO: Algumas obras de engenharia envolvem a complexidade da combinação de carregamentos cíclicos duradouros com as cargas verticais, como fundações de torres de aerogeradores situadas em parques eólicos. A melhoria dos métodos de dimensionamento de tais situações esbarram na pequena quantidade de dados reais de testes em situação similar a estas fundações. Este trabalho avalia a possibilidade da degradação do atrito lateral em estacas escavadas isoladas, instaladas em um solo residual siltoso, devido a ação de carregamentos cíclicos. Foram realizadas 3(três) provas de carga estática (PCE) em estacas escavadas com diâmetro de 0,3 m e comprimento aproximado de 5,0m, onde uma sofreu carregamento axial até sua carga máxima e foi descarregada até 50% da carga limite, sendo submetidas a ciclos de carregamentos axiais e posteriormente recarregadas até a total mobilização de carga. Outras duas estacas também foram levadas a ruptura inicialmente e após descarregamento até o nível da carga de projeto, foram submetidas a diferentes números de ciclos de cargas horizontais. Posteriormente foram recarregadas até a completa mobilização de carga. Uma quarta estaca escavada teve a inserção de um elemento expansivo em sua ponta (denominado “*Expander Body*”) e foi submetida

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





a PCE similares, com reensaio após ciclos de cargas axiais na situação de carga de projeto. Os resultados indicaram que a capacidade de carga de todas as estacas não foram alteradas, a rigidez de recarregamento após os ciclos de cargas horizontais e axiais também foi pouco afetada, mas com aumento relevante de recalques na iminência da ruptura no recarregamento.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca escavada, *Expander body*, Prova de carga instrumentada em estacas, Carregamentos cíclicos.

ABSTRACT: Excavated pile, Expander body, Instrumented pile load test, Cyclic loads

KEYWORDS: Some engineering works involve the complexity of combining long-lasting cyclic loads with vertical loads, such as wind turbine tower foundations located in wind farms. The improvement of design methods for such situations are hampered by the small amount of real data from tests in situations similar to these foundations. This paper evaluates the possibility of lateral resistance degradation in isolated excavated piles, installed in a residual silty soil, due to the action of cyclic loading. Three (3) static load tests (SLT or SML) were carried out on excavated piles with a diameter of 0.3 m and an approximate length of 5.0 m, where one underwent axial loading up to its maximum load and was unloaded up to 50% of the limit load and then was subjected to cycles of axial loads. Afterwards, the pile was reloaded until total load mobilization. Other two piles were also brought to failure initially and after unloading, at the design load level, were subjected to different number of horizontal loading cycles. Subsequently, they were reloaded until the complete load mobilization. A fourth excavated pile had an expander element inserted at its tip (called “Expander Body”) and was subjected to similar PCE, with retest after cycles of axial loads in the design load situation. The results indicated that the bearing capacity of all piles was not changed, the reloading stiffness after cycles of horizontal and axial loads were also little affected, but with a relevant increase in settlements in the imminence of failure in reloading.

1 Introdução

Muitas fundações sofrerão ao longo de sua vida a combinação de esforços verticais e esforços horizontais provocados pela ação do vento, das marés, vibração de equipamentos, forças da natureza, entre outras causas. Com a crescente necessidade da ampliação e diversificação na geração de energia elétrica no Brasil, presencia-se uma rápida expansão dos parques eólicos no país. Segundo a ABEEÓLICA(2023), o Brasil já conta com mais de 900 parques instalados (todos *onshore*) com uma capacidade de geração de 13% da matriz de energia elétrica do país. O Brasil já é a 6ª nação em geração de energia elétrica por via eólica.

Neste contexto surge o desafio de se aprimorar os projetos das fundações de aerogeradores, fundações estas que associam o peso próprio da estrutura dos aerogeradores, as vibrações dos rotores e cargas horizontais provocadas pelo vento.

De acordo com Rosquoët *et al.* (2007), os carregamentos cíclicos laterais são caracterizados por quatro parâmetros: a carga máxima aplicada; a amplitude de variação da carga; o número de ciclos e a frequência. Sendo que para esses autores, a taxa de carregamento (ou a frequência) tem efeitos significativos para o desempenho da estrutura solo-fundação, dependentes do tempo ou fenômenos inerciais. Poulos (1988), Puech e Garnier (2017), entre outros, apresentam o efeito das cargas cíclicas no comportamento de fundações e em particular as fundações profundas.

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



O desenvolvimento de métodos de cálculo para projeto de fundações que envolvam cargas cíclicas é um grande desafio e a pequena quantidade de resultados experimentais para balizar esses novos métodos torna o problema mais complexo. Trabalhos como os de Rosquoët *et al.* (2007); Nardelli (2019); Abbas e Mahmood (2021); Owji, Habibagahi e Veiskarami (2023) apontam a preocupação com a possibilidade da alteração da capacidade de carga de estacas que sofrem cargas combinadas (vertical & cíclicas) em comparação com apenas carregamentos axiais. A existência de cargas cíclicas, tanto verticais quanto horizontais, pode implicar na degradação do atrito lateral. O presente trabalho buscou avaliar o comportamento de estacas escavadas, de pequenas dimensões, que foram inicialmente carregadas até sua carga máxima, posteriormente submetidas a ciclos de carga quando esta estaca estava suportando a sua carga de projeto, e após esta etapa, as estacas voltaram a ser carregadas até atingir seu novo limite de carga axial. Os ensaios foram executados em um perfil de solo siltoso residual de micaxisto, que é um solo bastante frequente na região metropolitana de Goiânia.

2 Descrição do Local

Os testes foram realizados no Campo Experimental do Centro Tecnológico em Engenharia Civil da Eletrobras Furnas, situado em Aparecida de Goiânia, na região metropolitana de Goiânia, (coordenadas -16.7959732_S, -49.23137942_W). Neste local vem sendo realizada uma série de ensaios voltados ao estudo do desempenho de aerogeradores. Além das provas de cargas relatadas no presente artigo, já foram instalados dois protótipos de aerogeradores (10 e 40 m de altura).

Ferreira *et al.* (2019) apresentaram uma completa caracterização geotécnica do local. As Figuras 1 a 3 apresentam a distribuição granulométrica, alguns índices físicos, parâmetros de resistência (c e ϕ) e deformabilidade (E), até uma profundidade de 7,0 m, e duas sondagens SPT. O ensaio de granulometria foi realizado com o uso de defloculante (CD) e sem o uso do mesmo (SD). Essa prática vem se tornando usual em solos tropicais e indica a quantidade de agregações das partículas que permanecem na presença de água. Um percentual majoritário da fração argila se encontra no formato de agregações, gerando grãos no tamanho silte ou areia fina. Tal efeito é maior nas camadas superficiais, onde o processo de intemperismo é mais acentuado.

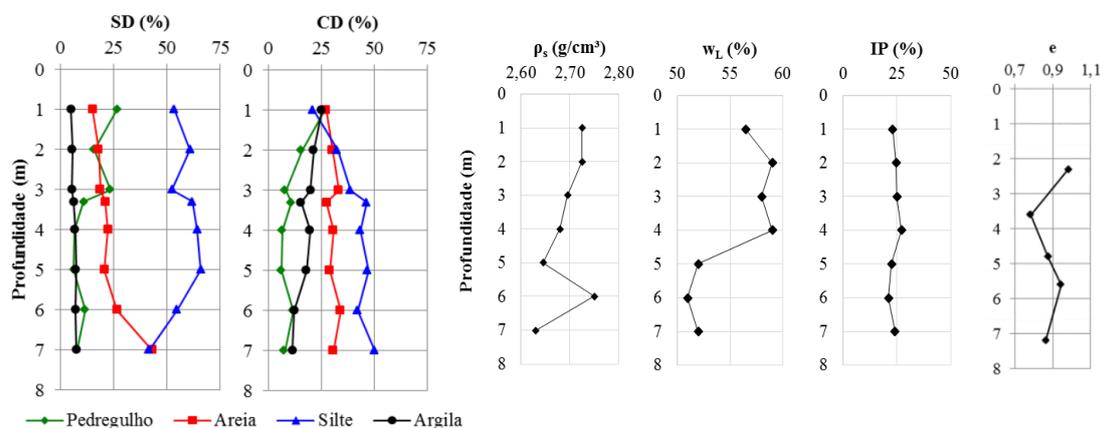


Figura 1. Caracterização geotécnica do perfil de solo (FERREIRA *et al.*, 2019).

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



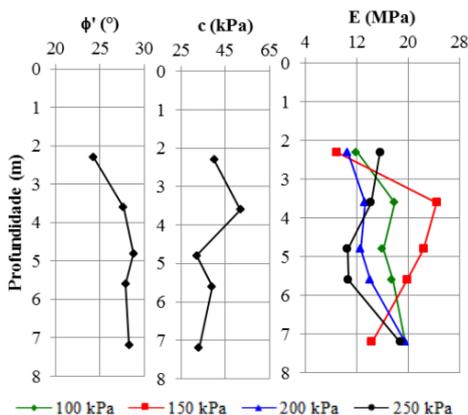


Figura 2. Coesão, ângulo de atrito e módulo de elasticidade secante (FERREIRA *et al.*, 2019).

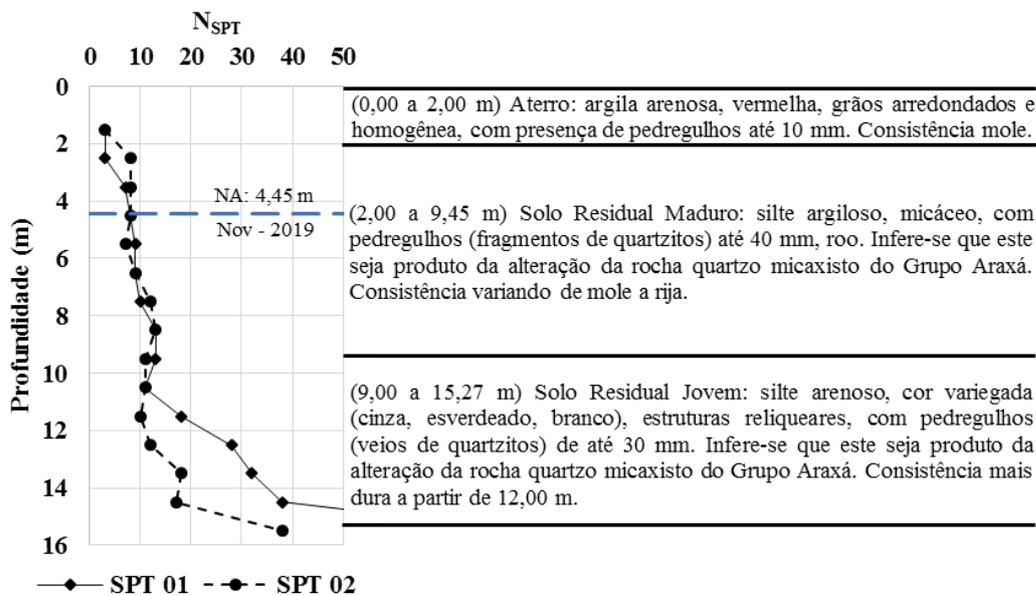


Figura 3. Perfis de sondagem SPT 01 e SPT 02 com descrição geológica.

3 Características das Estacas

Foram executadas 4 estacas escavadas com trado mecânico para teste (EB & T1 a T3) e outras 6 estacas para atuarem como reação (R1 a R6). A Tabela 1 resume as dimensões das estacas ensaiadas e a Figura 4 apresenta a locação delas. A estaca denominada por EB foi escavada até 7,0 m, quando teve a introdução de dispositivo denominado por “*Expander Body (EB)*”, que é um cilindro metálico com paredes bastante flexíveis. Após a concretagem da estaca, e com o concreto ainda fresco, é feita a injeção de argamassa sobre pressão que provoca o inflamento do EB, induzindo um alargamento do furo radialmente próximo à ponta. Com o enchimento do EB, a parte inferior do mesmo se descola do fundo da escavação da estaca. Então é feita uma segunda injeção, agora sob o EB para garantir o contato perfeito com o fundo da escavação (Figura 5).

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



Tabela 1. Descrição das estacas ensaiadas.

Estaca	Tipo	L (m)	ϕ (m)	Ciclo de carga
T1	Escavada	5,0	0,3	10@vertical
T2	Escavada	5,0	0,3	10@horizontal
T3	Escavada	5,0	0,3	30@horizontal
EB	Escavada & <i>Expander Body</i>	7,0	0,3	10@vertical

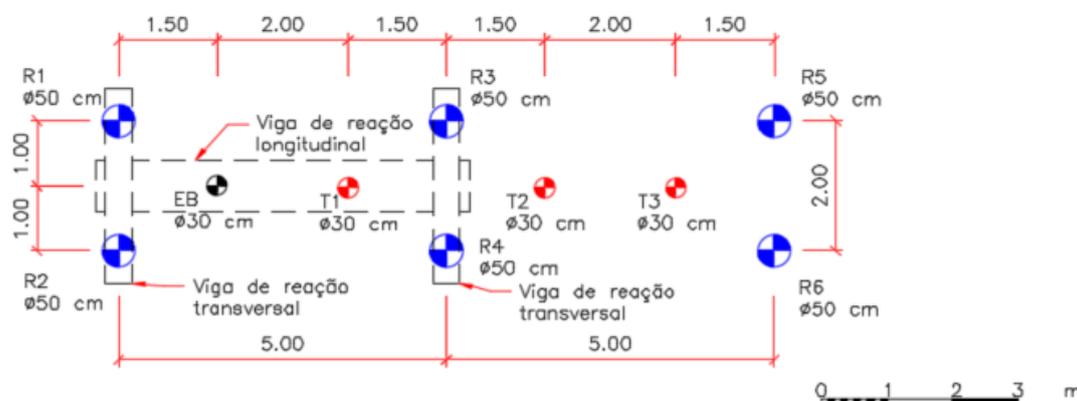


Figura 4. Detalhe em planta da disposição das estacas testes e sistema de reação.

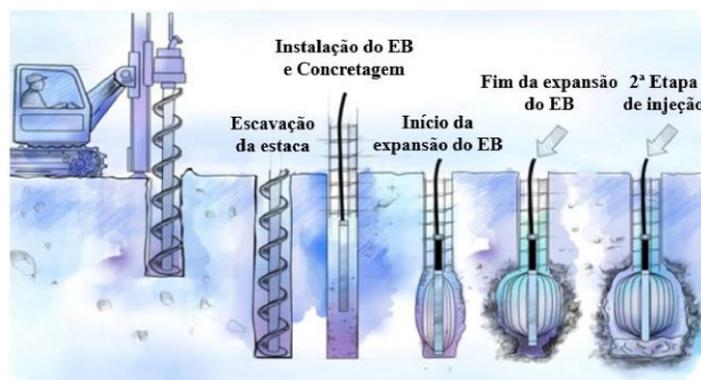


Figura 5. Processo executivo da tecnologia *Expander Body* (EB) (SILVA; MONTEIRO; CUNHA, 2019).

O local dos testes, como em toda região Centro-Oeste do Brasil, apresenta uma estação seca bem definida (meses maio – setembro). Isto possibilita grandes oscilações na cota do lençol freático. A estaca EB foi executada no período de seca (antes do período da pandemia Covid-19) e atingiu a profundidade de 7,0 m. As demais estacas foram executadas em 2022 durante a estação chuvosa e por isso as mesmas ficaram com uma profundidade de 5,0 m, que era o nível do lençol freático naquele momento.

4 Execução dos Testes

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



As estacas T1 e EB foram submetidas a provas de carga estática (PCE) e posterior carregamento cíclico na vertical e seguiram as seguintes fases:

- Fase 1: carregamento axial da estaca até sua carga última (P_{ult});
- Fase 2: descarregar até a carga de trabalho ($P_{ult}/2$);
- Fase 3: Aplicar 10 ciclos de carga, oscilando a carga axial entre 50% e 25% de P_{ult} . Cada carga ou descarga era mantida por 10 min;
- Fase 4: Ao final do último ciclo, a estaca foi carregada até atingir sua nova carga última.

As estacas T2 e T3 foram submetidas a ciclos de carga horizontais enquanto a estaca recebia a carga de trabalho, com as seguintes fases de teste:

- Fase 1: carregamento axial da estaca até sua carga última (P_{ult});
- Fase 2: descarregar e manter a carga vertical na carga de trabalho ($P_{ult}/2$);
- Fase 3: Aplicar ciclos de carga na horizontal, oscilando o valor horizontal entre 14,5% P_{ult} e “zero”. Foram aplicados 10 ciclos de carga e descarga na estaca T2 e 30 na estaca T3. Cada carga ou descarga era mantida por 10min;
- Fase 4: Ao final do último ciclo, a estaca foi carregada até atingir sua nova carga última.

A Figura 6 mostra o arranjo dos dois macacos par aplicar o carregamento cíclico horizontalmente nas estacas T2 e T3, enquanto a carga axial de trabalho ($P_{ult}/2$) era mantida.



Figura 6. Sistema de aplicação de carga horizontal da estaca T3.

5 Resultados

5.1 Estacas sob Ciclos de Cargas Verticais

As estacas T1 e EB foram submetidas a 10 ciclos de cargas verticais, como apresentado no item 4. A Figura 7 apresenta o comportamento da T1, onde observa-se que a estaca aproximou-se muito de sua carga limite e o ensaio foi paralisado com um recalque correspondente a 10% de seu diâmetro(D). Durante o ciclo de carga-descarga (entre 25-50% de P_{ult}) os recalques foram

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



insignificantes. Após o ciclo de cargas, a estaca voltou a suportar um valor de carga similar ao valor anteriormente resistido, mas sofreu um acréscimo da ordem de 7 mm.

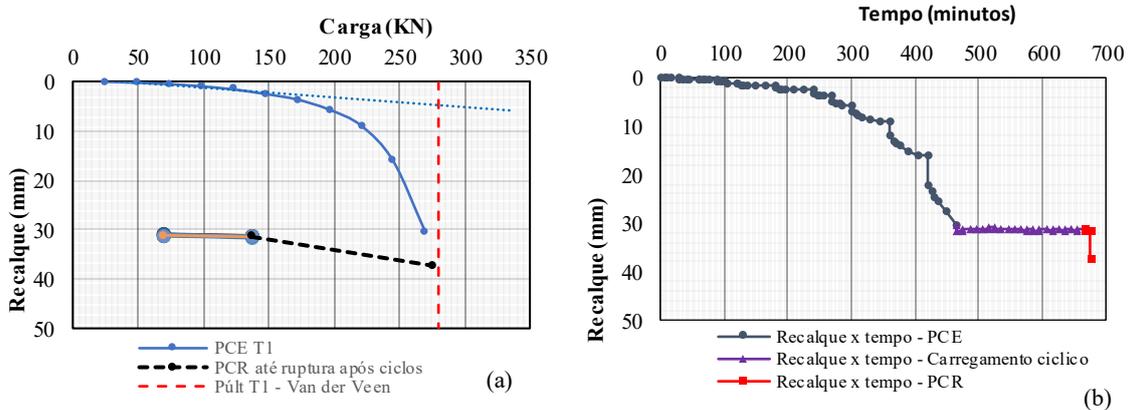


Figura 7. Prova de carga na estaca T1. (a) curva carga x recalque. (b) Evolução do recalque durante os carregamentos.

A estaca com a introdução do *Expander Body* (EB) em sua ponta foi carregada até o limite de projeto do sistema de reações (Figura 8), atingindo a carga máxima de 700 kN, com um recalque de apenas 1,75%D, longe de se poder estimar a carga última dessa estaca. O ciclo de carga-descarga produziu oscilações de recalques inferiores a 1 mm, de forma elástica.

Posteriormente aos ciclos, a estaca foi novamente levada a uma carga de 700 kN, com um recalque levemente superior (acréscimo < 1,0 mm) ao experimentado no primeiro carregamento. A Figura 9 destaca a comparação de desempenho de T1 x EB. Ainda que a estaca EB tenha um comprimento de 7,0 m, contra 5,0 m da Estaca T1, destaca-se uma considerável melhoria de desempenho de EB, tanto em termos de capacidade de carga (não determinada) quanto de sua rigidez inicial.

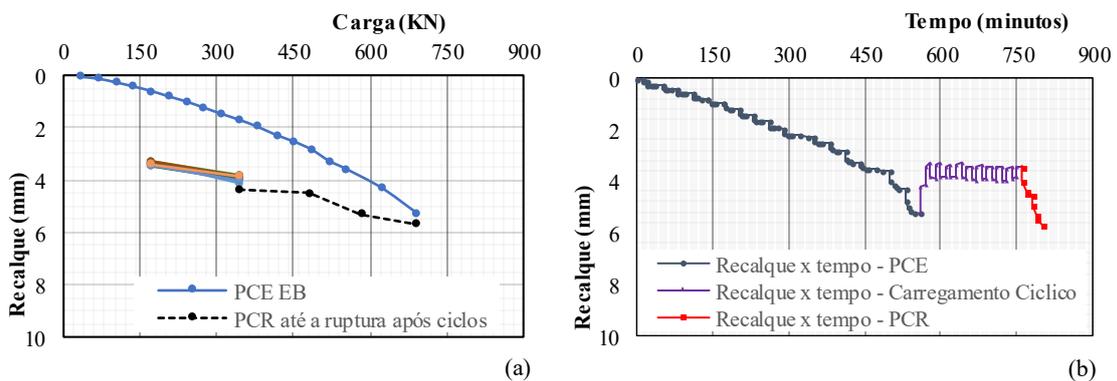


Figura 8. Prova de carga na estaca EB. (a) curva carga x recalque. (b) Evolução do recalque durante os carregamentos.

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



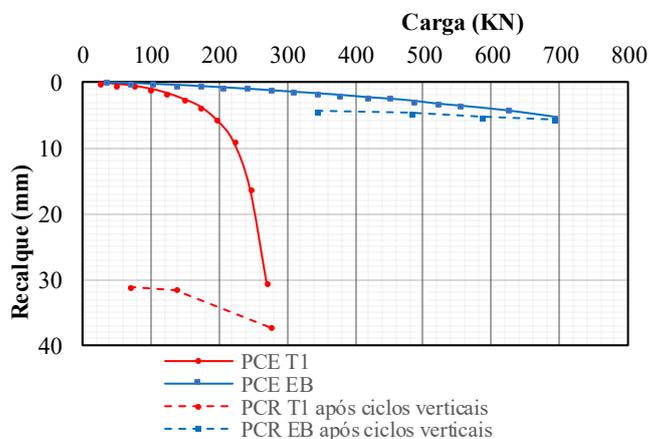


Figura 9. Comparação do comportamento T1 x EB.

5.2 Estacas sob Ciclos de Cargas Horizontais

As Figuras 10 e 11 apresentam as PCE nas estacas T2 e T3, respectivamente. Ambas foram levadas inicialmente até sua carga máxima (ultrapassando recalques equivalentes a 10%D). Posteriormente essas estacas foram submetidas a um conjunto de 10 e 30 ciclos de cargas horizontais, respectivamente, como mostrado na Figura 6. Na parte final do ensaio, as estacas foram novamente carregadas até suas cargas máximas.

A estaca T2 atingiu novamente sua carga máxima, mas com um acréscimo de recalque superior a 13 mm após os ciclos de carga. Após atingir a carga máxima pela segunda vez a estaca foi descarregada até 50% de Pult e recarregada, não apresentando acréscimos importantes de recalque.

A PCE da estaca T3 foi realizada com 3 estágios de recarregamento após os ciclos de carga-descarga, onde também se observou um acréscimo de recalques superiores a 25 mm, mas somente ao se aproximar de sua carga máxima, ou seja, a estaca após os ciclos de cargas horizontais pouco recalcou com o aumento de carga entre 170-250 kN e somente ao se aproximar da carga máxima voltou a recalcar de forma mais acentuada. Esses estágios intermediários não haviam sido aplicados nas estacas T1 e T2.

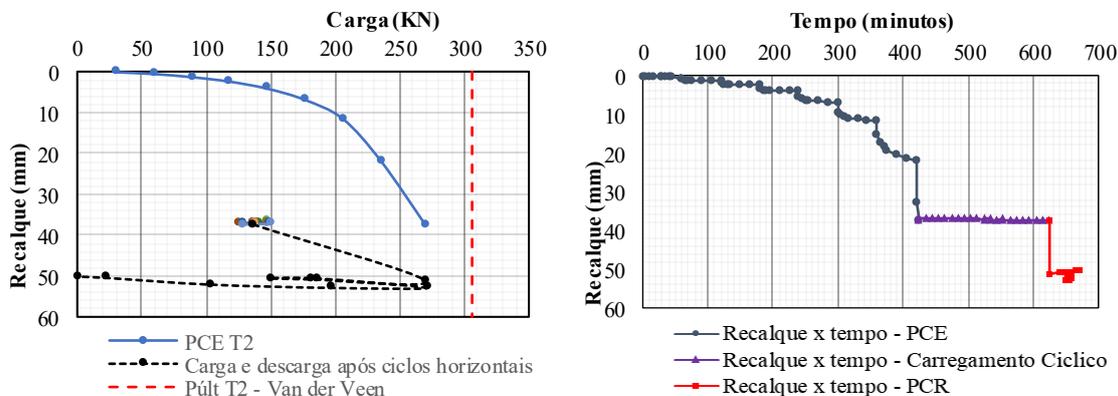


Figura 10. Prova de carga na estaca T2. (a) curva carga x recalque. (b) Evolução do recalque durante os carregamentos.

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



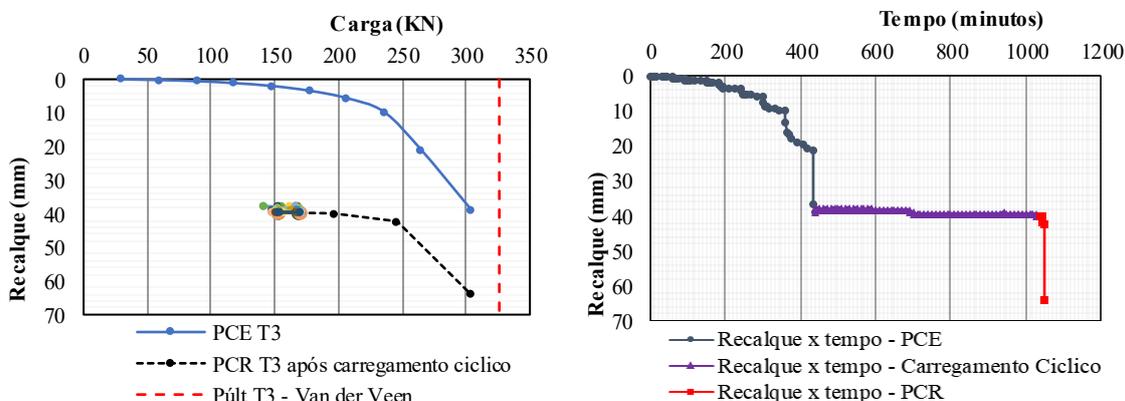


Figura 11. Prova de carga na estaca T3. (a) curva carga x recalque. (b) Evolução do recalque durante os carregamentos.

A Figura 12 apresenta, num só gráfico, a comparação dos resultados das 3 estacas similares (T1, T2 e T3), mostrando uma razoável repetibilidade do comportamento inicial das estacas em termos de rigidez e com cargas correspondentes a um recalque de 10%D na faixa de 255 a 285 kN. Todas apresentaram acréscimos de recalque no recarregamento das estacas ao se aproximar da carga máxima, mas ficando nítido que os ciclos com cargas horizontais foram mais impactantes do que os ciclos verticais.

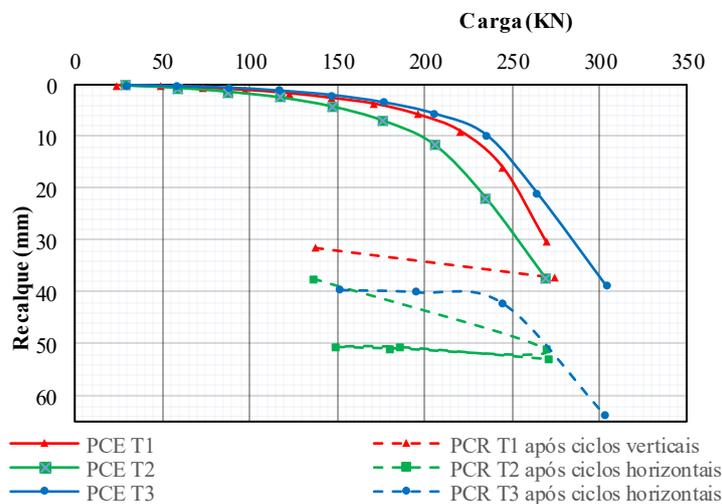


Figura 12. Comparação do comportamento T1 x T2 x T3.

6 Conclusões

Foram apresentadas provas de cargas estáticas em 4 estacas escavadas, que após carregadas até sua carga limite (exceto a EB), sofreram ciclos de cargas verticais e horizontais quando suportavam a carga de projeto. Posteriormente todas foram recarregadas. Valem ser destacados os seguintes pontos:

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





- As PCE com as três estacas sem a inserção do *Expander Body* apresentaram uma repetibilidade muito boa;
- O emprego do *Expander Body* na ponta da estaca escavada melhorou em muito o desempenho da mesma, tanto em termos de rigidez quanto da capacidade de carga;
- Os ciclos de carga, com a estaca suportando a carga de projeto (50% de P_{ult}) não alteraram a capacidade de carga das estacas;
- O recarregamento após os ciclos de carga resultaram em acréscimos de recalque quando a estaca se aproximava de sua carga última;
- Os ciclos horizontais implicaram num maior acréscimo de recalque na fase final de recarga do que a estaca submetida a ciclos verticais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as empresas Eletrobras Furnas (Projeto ANEEL PDPD-0394-1709/2017), Embre Eng. e Fund. Ltda., D&M Consult. Proj. de Eng. Ltda pela grande cooperação na execução das provas de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, J. M.; Mahmood, A. K. (2021). Effect of vertical loads on pile group response subjected to lateral cyclic loading with different configuration of piles: experimental study. IOP CONF. SER.: MATER. SCI. ENG. *Anais...* DOI 10.1088/1757-899X/1076/1/012088
- ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2023) *Boletim Anual 2022*. 19p.
- Ferreira, J. R.; Schlieve, M. S.; Cabral, R. M.; Côrtes, H. A. (2019) Caracterização do Campo Experimental I do Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas. In: 5º SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO OESTE. *Anais...*, ABMS, Brasília. p. 161-164.
- Nardelli, A. (2019). *The shaft friction degradation of piles under cyclic axial loading in wind turbine foundations*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 182p.
- Owji, R.; Habibagahi, G.; Veiskarami, M. (2023) Effects of Cyclic and Post-cyclic Loading on Lateral Response of Flexible Piles Embedded in Dry Sand. *International Journal of Civil Engineering, SpringerLink Journals*. vol.21 (4), p.633-645.
- Poulos, H. G. (1988) Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 114(8), p. 877-895.
- Puech, A.; Garnier, J. (2017) *Design of Piles Under Cyclic Loading*. Wiley, London, 424 p.
- Rosquët, F.; Thorel, L.; Garnier, J.; Canepa, Y. (2007) Lateral cyclic loading of sand-installed piles. *Soils and Foundations*, v. 47(5), p. 821-832.
- Silva, C. M.; Monteiro, F. F.; Cunha, R. P. (2019) O Avanço da Tecnologia *Expander Body* no Brasil. In: 5º SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO OESTE. *Anais...* ABMS, Brasília, p. 322-327.

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

