

Comparação de Provas de Carga Estáticas em Estacas Tubulares Metálicas de Ponta Aberta e Fechada Macaqueadas em um Solo Tropical de Goiânia-GO

Breno Breseghelo do Nascimento

Mestrando, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, brenobdn@gmail.com

Maurício Martines Sales

Professor Titular, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, sales.mauricio@gmail.com

Renato Resende Angelim

Professor Adjunto, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, tecnoeng@gmail.com

RESUMO: Apresenta-se um comparativo do comportamento carga x recalque entre estacas tubulares metálicas de ponta aberta e fechada macaqueadas em solo tropical de Goiânia-GO. O objetivo foi comparar o comportamento destes dois tipos de estaca, visto que, devido ao tamponamento da ponta aberta da estaca pelo solo, durante a cravação, o comportamento de uma estaca de ponta aberta pode se aproximar do de uma de ponta fechada, à medida que se avança a cravação. A estaca, um tubo de aço de 114,43 mm de diâmetro, 4,45 mm de espessura de parede e de ponta aberta, foi macaqueada em um perfil de solo tropical, submetido à prova de carga estática e então removido. Posteriormente realizou-se o mesmo procedimento de macaqueamento e prova de carga com a mesma estaca com ponta fechada. Foi feita uma caracterização do perfil de solo, através de análises granulométricas, ensaios de pastilha, ensaio SPT e com penetrômetro leve de energia variável - PANDA 2. O solo se compunha de areia siltosa laterítica. As curvas de IFR e PLR ao longo da cravação da estaca de ponta aberta mostraram que ela se tamponou plenamente. As provas de carga apresentaram ruptura brusca com poucas deformações plásticas e a estaca de ponta aberta apresentou resistência 59% maior do que a de ponta fechada.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas Tubulares Metálicas, Estacas de Ponta Aberta, Tamponamento, Fundações em Estacas, Solo Tropical.

1 Introdução

Estacas tubulares metálicas de ponta aberta consistem em um tubo cilíndrico metálico com ponta aberta instalado no solo por macaqueamento ou cravação dinâmica (percussão ou vibração). Esse tipo de fundação é muito utilizado no mundo em estruturas *offshore* e estruturas de pontes, entre outros tipos de obras. Seu uso no mercado brasileiro vem aumentando, porém ainda faltam estudos brasileiros sobre o comportamento deste tipo de estaca no solo do Brasil, cujo território é, em grande parte, recoberto por solos lateríticos.

Esse tipo de estaca possui algumas vantagens em relação a outros tipos, como por exemplo o peso reduzido dos tubos em relação a estacas de concreto pré-moldado e a baixa vibração gerada no processo de cravação. Além disso, em certas obras, como por exemplo obras *offshore*, em que a resistência à tração é importante, a facilidade de instalação permite que se atinja mais facilmente as grandes profundidades necessárias para que o atrito lateral resista aos esforços de tração (LEHANE; GAVIN, 2001)

Sendo assim, este trabalho apresenta resultados de ensaios de prova de carga estática realizados em estacas tubulares metálicas de ponta aberta e fechada instaladas no solo laterítico do campo experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA-UFG). O trabalho faz parte de uma pesquisa maior, atualmente em andamento na EECA-UFG.

Os resultados são apresentados na forma de um comparativo entre uma estaca tubular com ponta aberta e a mesma estaca com a ponta fechada, ambas instaladas por macaqueamento no solo. Tal comparativo é importante, pois estacas de ponta aberta, devido à entrada de solo no seu interior durante a instalação, tendem a sofrer tamponamento, podendo seu comportamento se aproximar do de uma estaca de ponta fechada.

2 Estudos anteriores

Estacas tubulares metálicas de ponta aberta consistem em um tubo cilíndrico metálico com ponta aberta instalado no solo por cravação dinâmica ou macaqueamento. Essas estacas possuem certas particularidades de comportamento que outras estacas em geral não apresentam.

Durante a instalação, estacas de ponta aberta inicialmente penetram no solo cortando-o, causando pouco deslocamento de solo nos trechos iniciais, sendo esse deslocamento correspondente ao volume da parede do tubo metálico. Porém, à medida em que se avança a instalação, o atrito entre o solo e a parede interna do tubo se eleva gradualmente, de forma que o solo no interior do tubo passa a se deslocar juntamente com a estaca, até o ponto limite em que a ponta da estaca se torna completamente vedada pelo solo no seu interior. A estaca passa então a provocar grande deslocamento de solo. Esse fenômeno é chamado de tamponamento ou embuchamento, e tende a tornar o comportamento de uma estaca de ponta aberta próximo ao de uma de ponta fechada, à medida em que a estaca penetra no solo.

Essa tendência de comportamento é mostrada na Figura 1, em que se compara uma estaca de ponta aberta com uma de ponta fechada, durante a cravação por percussão. As curvas de quantidade acumulada de golpes de uma estaca de ponta aberta e de ponta fechada tendem a se tornar paralelas, enquanto que a penetração por golpe tende a convergir para o mesmo valor ao longo da cravação.

O efeito de tamponamento pode ser medido através de dois parâmetros: *Incremental Filling Ratio* (IFR) e *Plug Length Ratio* (PLR) (PAIK; SALGADO, 2003; GAVIN; LEHANE, 2003; KO; JEONG, 2015). O IFR é definido como a razão entre o incremento da altura do tampão de solo no interior da estaca e o incremento de altura cravada da mesma, para cada estágio da cravação. Já o PLR é definido como a razão entre a altura total do tampão de solo e altura total cravada da estaca. As Equações 1 e 2 e a Figura 2 mostram as fórmulas de cálculo dos dois parâmetros e as variáveis das mesmas, respectivamente. Valores de IFR iguais a 0% ou 100% indicam, respectivamente, que a estaca está completamente tamponada ou não tamponada, sendo que valores intermediários entre esses dois extremos indicam tamponamento parcial.

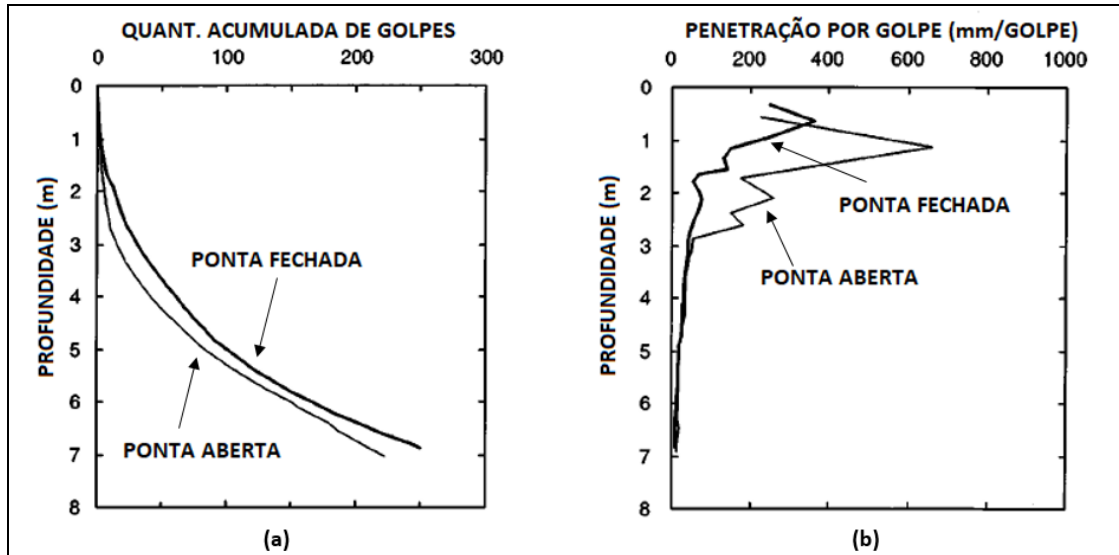


Figura 1 - Comparativo entre estacas de ponta aberta e fechada durante a cravação. (a) Quantidade acumulada de golpes. (b) Penetração por golpe. (adaptado de PAIK et al, 2003)

$$IFR = \frac{\Delta L}{\Delta D} \quad (1)$$

onde:

ΔL = incremento de altura de solo do tampão (m);
 ΔD = incremento de altura cravada da estaca (m);

$$PLR = \frac{L_1}{D_1} \quad (2)$$

onde:

L_1 = altura de solo do tampão (m);
 D_1 = altura cravada da estaca (m);

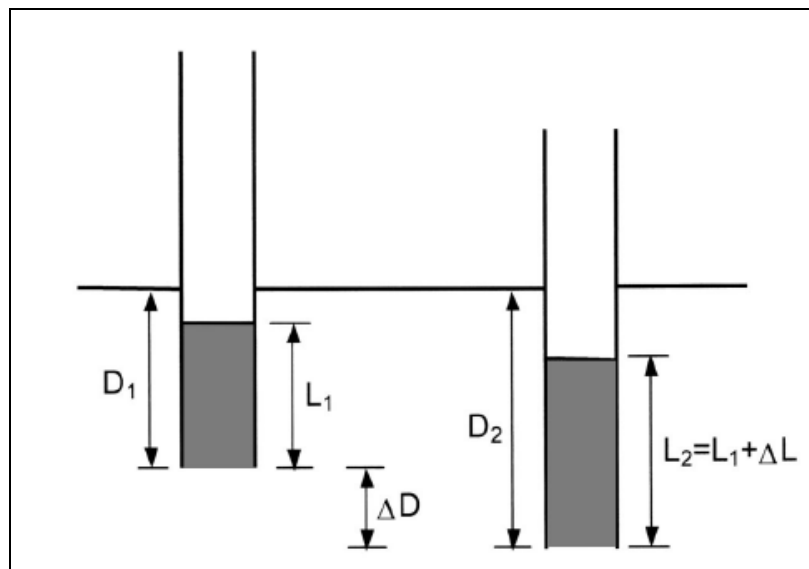


Figura 2 - Definição das variáveis das Equações 1 e 2 (PAIK; SALGADO, 2003)

3 Metodologia

Para a comparação de comportamento entre estacas de ponta aberta e fechada foram realizadas a instalação e a prova de carga em uma estaca de ponta aberta e uma de ponta fechada. As estacas foram macaqueadas em um perfil de solo laterítico do campo experimental da EECA-UFG. Ambas foram ensaiadas na profundidade nominal de 4 m a partir do topo do terreno.

3.1 Caracterização do solo do campo experimental da EECA

O perfil do subsolo do campo experimental da EECA foi caracterizado por meio de ensaios de campo, análises granulométricas em amostras de solo coletadas e ensaios de pastilha segundo a metodologia da DERSA (2006).

Para a caracterização da resistência do solo *in situ* com ensaios de campo, foram executados um furo de sondagem SPT segundo a NBR6484 (ABNT, 1997) e três ensaios com penetrômetro dinâmico leve de energia variável PANDA 2, utilizando-se ponteira de 4 cm². A Tabela 1 mostra o N_{SPT} e a classificação granulométrica e segundo a metodologia MCT para cada metro de profundidade. Não foi encontrado nível de água no perfil. Observa-se que se trata de um perfil de solo relativamente homogêneo, de baixa resistência em sua maior parte, com N_{SPT} da ordem de 1 a 3 golpes e composto predominantemente por areia siltosa laterítica. A Figura 3 mostra o perfil de resistência dinâmica à penetração q_d medido com o penetrômetro PANDA 2, tendo sido feita uma média dos valores em trechos de 10 cm de cravação. Nota-se que, na região até 4 m de profundidade onde foram instaladas as estacas, o solo apresenta certa homogeneidade, com pouca variação na sua resistência.

Tabela 1 - N_{SPT} e classificação do solo

Trecho (m)	N_{SPT}	Classificação granulométrica sem defloculante /
		Classificação granulométrica com defloculante /
		Classificação MCT
0,30 - 0,75	03	Areia siltosa / Areia argilosa / LA'-LG'
1,00 - 1,45	01	Areia siltosa / Areia argilosa / LA'-LG'
2,00 - 2,45	01	Areia siltosa / Areia argilosa / LG'
3,00 - 3,45	02	Areia siltosa / Areia argilosa / LA'-LG'
4,00 - 4,45	06	Areia siltosa / Areia argilosa / LA'-LG'
5,00 - 5,45	08	Areia siltosa / Areia argilosa / LG'

3.2 Procedimento de ensaio

A estaca de ponta aberta consistiu de um tubo de aço carbono de 114,43 mm de diâmetro externo e 4,45 mm de espessura de parede, dividido em segmentos rosqueáveis de 80 cm de comprimento cada, tendo o segmento da ponta 85 cm de comprimento. A estaca de ponta fechada se consistiu do mesmo tubo da estaca de ponta aberta previamente extraído do solo, tendo a ponta vedada com um disco de aço soldado, e instalada a uma distância de 1,50 m do eixo da estaca de ponta aberta.

Para a cravação e ensaio das estacas foi utilizado um sistema de reação composto uma viga metálica ancorada a estacas de reação escavadas de 30 cm de diâmetro e 8,0 m de profundidade. Os eixos das estacas de reação se distanciavam 3,0 m um do outro, sendo a estaca de ensaio instalada entre elas, com seu eixo a 1,50 m de distância de cada estaca de reação. Um macaco hidráulico de capacidade máxima de 30 tf foi utilizado para aplicação de cargas, que foram medidas utilizando-se uma célula de carga posicionada abaixo do macaco e sobre a estaca. Uma rótula metálica foi posicionada entre o topo do macaco e a base da viga de reação.

Os deslocamentos do topo da estaca durante as provas de carga foram registrados através de quatro medidores digitais de precisão de 0,01 mm, posicionados sobre uma chapa metálica plana soldada à cabeça da estaca. Os medidores foram apoiados sobre duas vigas metálicas de referência cujos apoios estavam a

1,50 m de distância do eixo da estaca ensaiada. As Figura 4 e 5 mostram, respectivamente, uma foto do conjunto macaco e célula de carga e um croqui do sistema de reação e medição de deslocamentos utilizado.

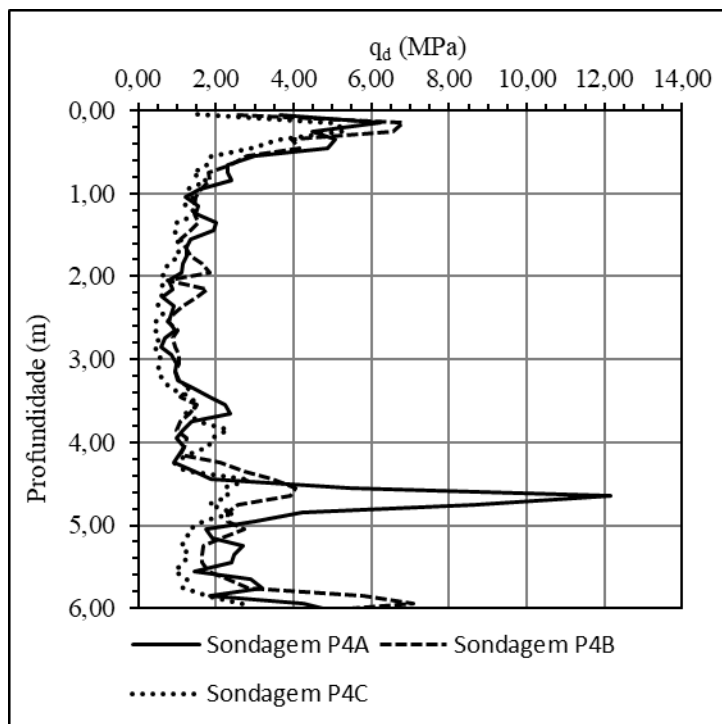


Figura 3 - Gráfico de resistência q_d com a profundidade do perfil



Figura 4 - Conjunto macaco e célula de carga

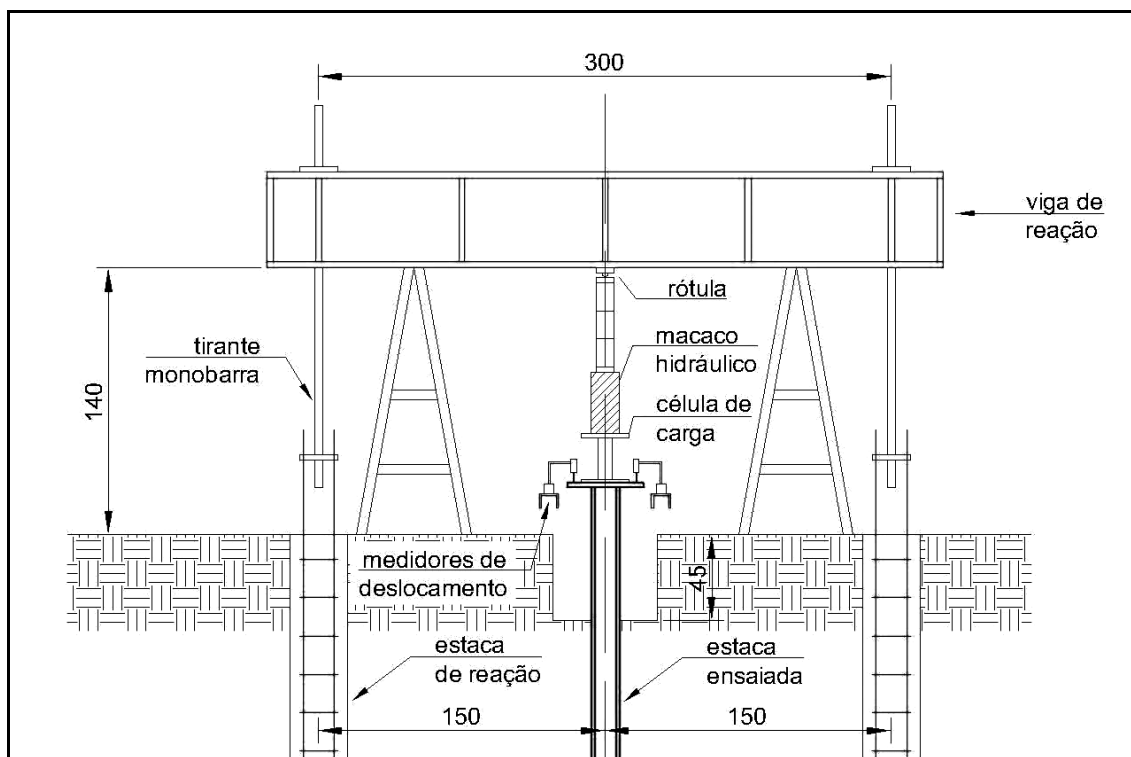


Figura 5 - Croqui do sistema de reação e medição de deslocamentos

A instalação de cada estaca foi iniciada a partir de um pré-furo de cerca de 45cm de profundidade. Cada estaca foi macaqueada até uma profundidade de cerca de 4 m, ficando assim com cerca de 355 cm de comprimento cravado. Medições da altura de solo no interior da estaca de ponta aberta foram feitas a cada 10 cm de avanço, utilizando-se um cordão de aço graduado que saía por uma abertura no topo da estaca. Esse cabo de aço estava ligado a um peso assentado no topo da coluna de solo no interior da estaca, com o propósito de mantê-lo esticado em cada medição.

Cada prova de carga foi feita no mínimo 12 horas após o final do macaqueamento. Foram realizados ensaios de carregamento lento, com no mínimo 7 passos de carga de no máximo 20% da carga última estimada, atendendo à NBR 12131 (ABNT, 2006), mantendo-se a carga até a estabilização dos recalques. O critério de estabilização utilizado foi o da norma D1143 (ASTM, 2007), referente à velocidade de recalque menor do que 0,25 mm/hora, calculada num intervalo do dobro do tempo do estágio, sendo os estágios divididos a cada 10 minutos. Cada estágio foi mantido por no mínimo 30 minutos. Ao final do ensaio procedeu-se um descarregamento em no mínimo 4 estágios, cada um mantido por 30 minutos totais.

4 Análise dos resultados

Com a metodologia utilizada neste trabalho, foi possível obter dados de cravação e prova de carga para uma estaca de ponta aberta (EPA) e uma estaca de ponta fechada (EPF). A Tabela 2 mostra um resumo dos dados geométricos de cada estaca após a instalação. Ambas estacas foram cravadas a partir da cota de -45 cm. A estaca EPA teve um comprimento cravado de 350,4 cm, atingindo a profundidade de -395,4 cm. A estaca EPF teve um comprimento cravado de 352,4 cm, atingindo a profundidade de -397,4 cm.

Tabela 2 - Dados geométricos das estacas após o macaqueamento

Estaca	D _{ext} diâmetro externo	t espessura da parede	Cota inicial da instalação (a partir do terreno natural)	Cota final da instalação (a partir do terreno natural)	L Comprimento cravado no solo
EPA - ponta aberta	114,43 mm	4,45 mm	-45 cm	-395,4 cm	350,4 cm
EPF - ponta fechada	114,43 mm	4,45 mm	-45 cm	-397,4 cm	352,4 cm

A Figura 6 mostra as curvas de IFR e PLR ao longo do comprimento cravado da estaca EPA durante a instalação. Conforme Paik e Salgado (2003), valores de IFR iguais a 0 e 1 correspondem, respectivamente, a uma estaca em estado completamente tamponado e não tamponado. Já valores de IFR entre 0 e 1 correspondem a um tamponamento parcial da estaca. Observa-se pela curva de IFR que no início a estaca se comportou como parcialmente tamponada, tendo o primeiro trecho de avanço um IFR de 0,75. Os valores de IFR foram diminuindo ao longo da cravação, até chegarem a zero na profundidade de 110 cm, estando a estaca plenamente tamponada a partir daí. No intervalo de comprimento de 50 cm e 100 cm ocorreu uma queda acentuada do IFR, mostrando que a estaca rapidamente se tamponou neste trecho. A curva de PLR apresenta um formato mais suave do que a curva de IFR, apresentando variações menos bruscas do que esta, além de que nunca toca o eixo vertical, sendo este eixo uma assíntota da curva após o ponto de tamponamento completo nos 110 cm de comprimento.

A Figura 7 mostra a curva do comprimento do tampão de solo ao longo do comprimento cravado da estaca EPA. A formação do tampão de solo ocorreu de forma gradual até uma altura máxima de 49,5 cm, até o ponto em que passou a se mover junto da estaca, não havendo aumento de altura. Este ponto corresponde ao ponto de IFR igual a zero, nos 110 cm de comprimento, visto que o IFR é a derivada da curva mostrada na Figura 7. A reta tracejada mostrada na figura corresponde à reta do estado não tamponado da estaca, em que o comprimento do tampão em qualquer trecho é igual ao comprimento cravado da estaca no trecho, o que corresponde a um IFR de 100% e a estaca penetra no solo sem tamponamento algum. A curva sempre se mantém abaixo dessa reta.

As curvas das Figuras 6 e 7 mostram que a estaca EPA se tamponou completamente em um trecho relativamente curto da cravação, quando ela estava com cerca de 31% de seu comprimento final,

permanecendo tamponada até o final da cravação e durante a prova de carga. O comprimento do tampão também se mostrou relativamente baixo, tendo cerca de 14% do comprimento final da estaca. Este está relacionado tanto ao diâmetro interno relativamente pequeno da estaca quanto à baixa resistência do perfil de solo, visto que as tensões normais na base do tampão não foram capazes de superar o atrito interno do solo compactado com a parede da estaca.

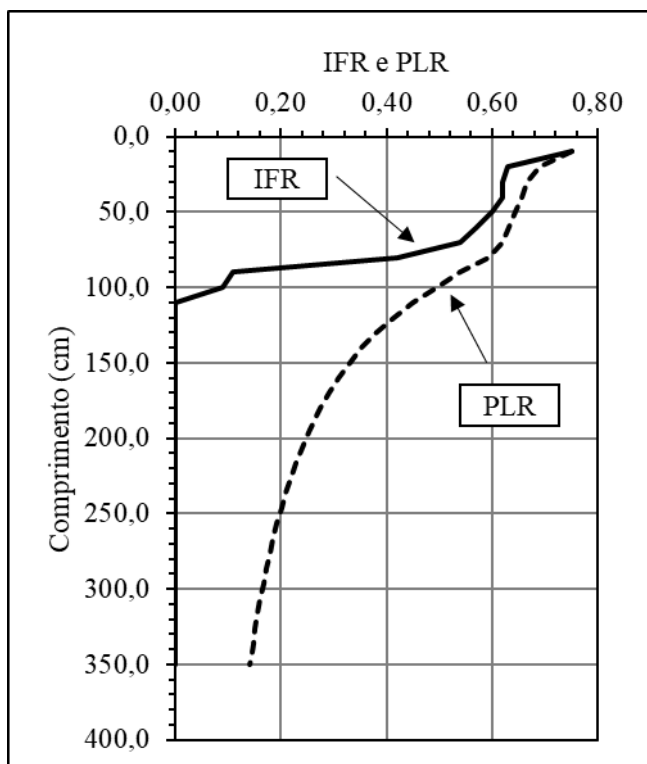


Figura 6 - Curvas de IFR e PLR ao longo do comprimento cravado da estaca EPA

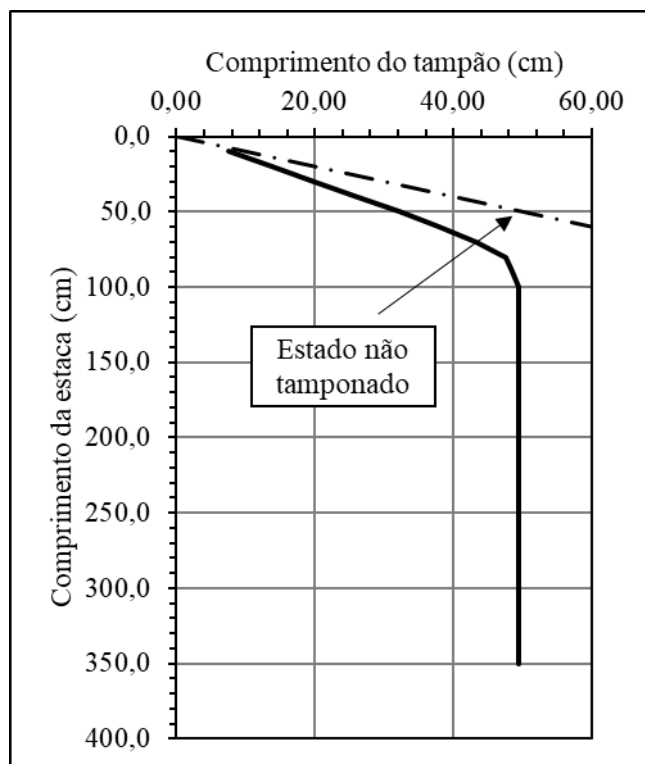


Figura 7 - Comprimento do tampão de solo em relação ao comprimento cravado da estaca EPA

A Figura 8 mostra as curvas de carga medida ao longo do comprimento cravado para as estacas EPA e EPF. Foram registradas as cargas de pico em cada trecho de cravação, correspondentes ao valor máximo de carga no trecho, quando a estaca se encontra em movimento de corte do solo. Inicialmente observa-se que a estaca EPF possui maior carga de cravação do que a EPA, visto que as tensões resistentes do solo na ponta da estaca são maiores por ela estar fechada. A estaca EPA inicia a sua cravação com um movimento de corte do solo, em que a resistência de ponta é predominantemente devido ao anel formado pela estaca em planta. Ao longo do avanço, no trecho intermediário entre 100 cm e 250 cm de comprimento, as cargas tendem a convergir entre si, principalmente devido ao tampão de estaca que se forma na EPA aos 110 cm de comprimento cravado. A partir de 250 cm até o final da cravação as curvas se distanciam, com as estacas EPF e EPA apresentando respectivamente 15,2 kN e 20,9 kN de resistência no último trecho, uma diferença de 37,5%.

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, as curvas carga x recalque das estacas EPA e EPF obtidas nas provas de carga. Ambas as estacas foram levadas até a ruptura nítida, evidenciada, no último passo de carga, pela evolução rápida dos recalques sem estabilização e sem aumento de carga. As estacas foram levadas até um recalque final de 30% do diâmetro (cerca de 34 mm), quando então foram descarregadas em estágios.

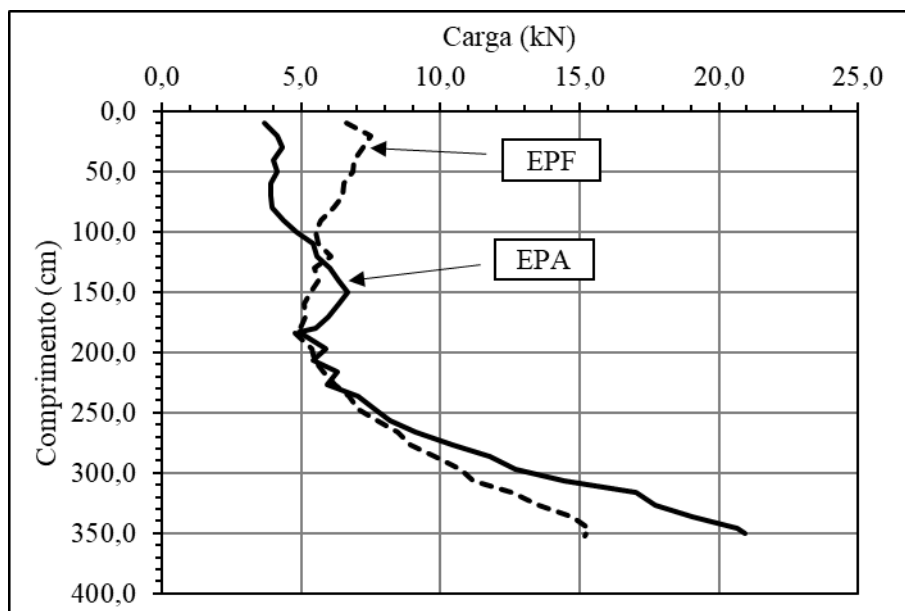


Figura 8 -Curvas de carga medida de pico x comprimento cravado para as estacas EPA e EPF

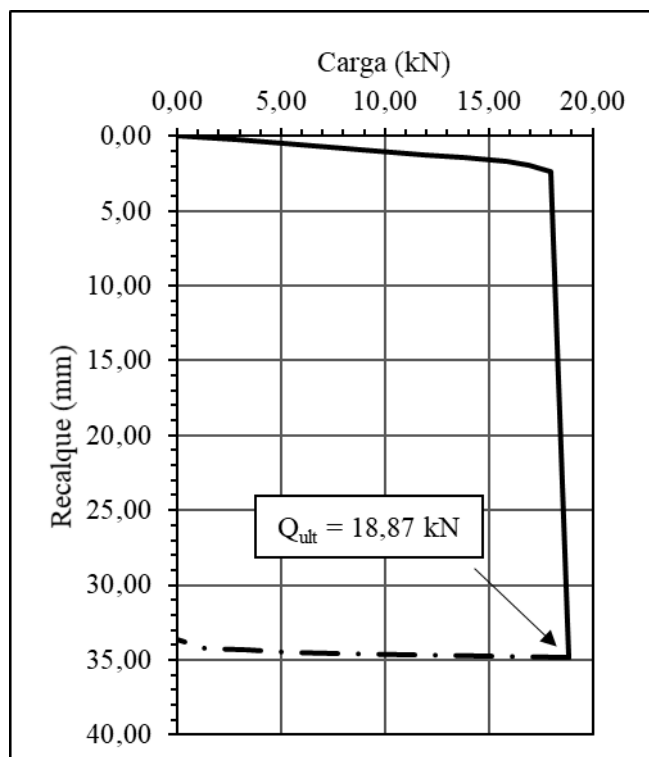


Figura 9 - Curva carga x recalque para a estaca EPA

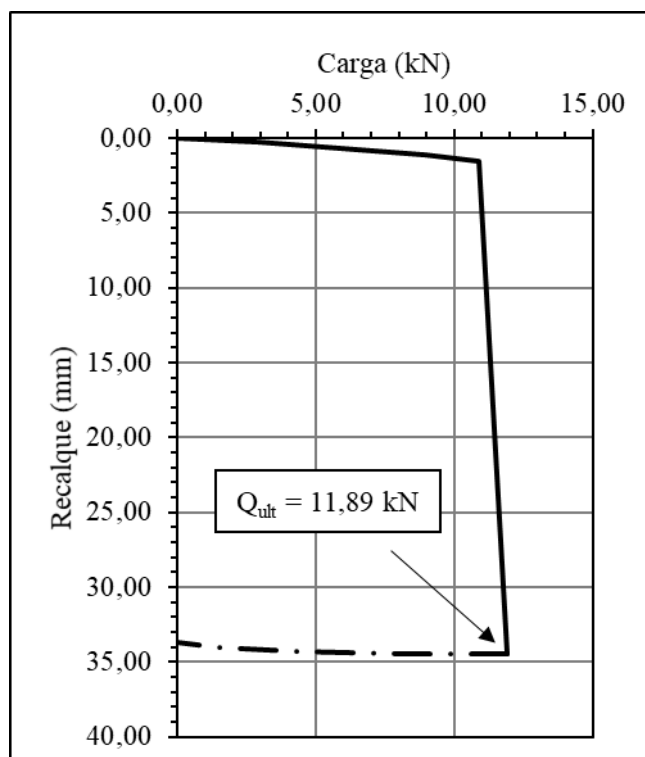


Figura 10 - Curva carga x recalque para a estaca EPF

As curvas carga x recalque se mostram bastante lineares durante quase todo o trecho de carregamento até próximo da carga de ruptura, mostrando que não houveram grandes deformações plásticas. Os recalques medidos no penúltimo estágio de carga, na iminência de ruptura, foram de 1,54 mm e 2,37 mm para as estacas EPF e EPA respectivamente. Tais recalques correspondem a uma faixa de 1,3% a 2,1% do diâmetro da estaca. O fato de haver tido poucas deformações plásticas nas estacas mostram que a ruptura se deu de forma brusca, indicando uma maior contribuição do atrito lateral do que da ponta na resistência das estacas.

As cargas últimas obtidas nas provas de carga para as estacas EPA e EPF foram, respectivamente, 18,87 kN e 11,89 kN. Esses valores mostram que a estaca EPA apresentou resistência significativamente

maior do que a estaca EPF, havendo uma diferença de cerca de 59% entre os valores. Tal resultado confirma o observado na cravação, em que as curvas de cravação se distanciaram gradualmente a partir de 250 cm de comprimento cravado. Além disso, para ambas as estacas, observa-se que a carga de cravação no último trecho cravado foi próxima à carga última medida na prova de carga, indicando que a velocidade de cravação imposta às estacas pouco alterou a capacidade de carga do solo ao seu redor.

As diferenças significativas observadas nos valores de carga de cravação e carga última entre as estacas EPA e EPF podem ser explicadas pela diferença de rugosidade entre uma ponta formada pelo solo do tampão e uma ponta formada por uma chapa metálica relativamente lisa. A estaca EPA possui uma ponta formada por solo em sua maior parte, mais próxima a um modelo de base rugosa, o que gera um atrito maior com o solo na vizinhança da ponta, levando ao aumento de sua resistência. Já a estaca EPF possui uma ponta menos rugosa devido à chapa metálica, mais próxima a um modelo de base lisa, resultando numa resistência de ponta inferior à da estaca EPA.

5 Conclusões

Este trabalho mostrou um comparativo do comportamento mecânico entre estacas tubulares metálicas de ponta aberta e fechada macaqueadas em um solo laterítico do campo experimental da EECA-UFG, através de provas de carga estáticas. Foi realizado o macaqueamento e a prova de carga em uma estaca de ponta aberta e outra de ponta fechada, ambas de mesmas dimensões e no mesmo perfil de solo.

Foi possível obter curvas de IFR e PLR e de comprimento do tampão ao longo da cravação da estaca EPA, mostrando que a estaca se tamponou completamente nos trechos iniciais da cravação, o que está relacionado tanto com o pequeno diâmetro da estaca quanto à baixa resistência do solo da região.

As curvas de carga medida ao longo da cravação para as estacas EPA e EPF mostraram que as cargas de cravação de ambas convergiram no trecho intermediário da cravação, após o tamponamento da estaca EPA, porém divergiram ao final dela, com a estaca EPF apresentando resistência significativamente menor do que a estaca EPA.

Ambas as curvas carga x recalque das estacas EPA e EPF apresentaram um trecho inicial bastante retilíneo até próximo da ruptura, indicando que houve poucas deformações plásticas até a ruptura. A estaca EPA apresentou carga última significativamente maior do que a EPF, confirmando a tendência observada na cravação, o que pode ser explicado pela maior rugosidade da ponta da estaca EPA em relação à EPF.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq, à FUNAPE, à Sete Engenharia e à Eletrobrás Furnas, pelo apoio dado durante esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 6484. *Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASTM: American Society for Testing and Materials (2007). D1143. *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*.
- DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A. do Estado de São Paulo (2006). *Diretrizes para identificação expedita do solo laterítico – “Método da Pastilha.”*. São Paulo.
- Gavin, K. G., Lehane, B. M. (2003). The shaft capacity of pipe piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, p. 36-45.
- Ko, J., Jeong, S. (2005). Plugging effect of open-ended pipe piles in sandy soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (5), p. 535-547.



- Lehane, B. M., Gavin, K. G. (2001). Base resistance of jacked pipe piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (6), p. 473-480.
- Paik, K., Salgado, R. (2003). Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (1), p. 46-57.
- Paik, K., Salgado, R., Lee, J., Kim, B. (2003). Behavior of open and closed ended piles driven into sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (4), p. 296-306.