

Análise da Transferência de Carga em Profundidade de Tubulões a Céu Aberto em Solo Tropical

Regina Maria Ferreira

Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, regina.marya@hotmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque

Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, pjra@unicamp.br

Neusa Maria Bezerra Mota

Centro Universitário de Brasília, Brasília-DF, neusa.mota@ceub.edu.br

RESUMO: Este trabalho visa apresentar um estudo do comportamento de duas provas de carga estáticas, executadas em tubulões a céu aberto em horizontes não saturados do Distrito Federal. Os tubulões possuem diâmetro do fuste igual a 0,60 m, diâmetro da base igual a 1,20 m, comprimentos de 8,60 a 9,20 m e foram instrumentados ao longo do fuste e base para que se obtivesse a transferência de carga em profundidade. A partir da metodologia de análise de provas de carga estáticas com base nos conceitos de ensaio de adensamento e na resposta do solo à solicitação apresentados por Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010), avaliou-se a mobilização do solo na interface com a fundação e a plastificação de todo o conjunto. Tal metodologia trabalha com resultados de provas de carga estáticas que não foram instrumentadas e utiliza como conceito o coeficiente de recalque ou de deslocamento (α) que consiste no ensaio de adensamento em laboratório, o recalque imediato acumulado e o recalque secundário que representam a resposta do solo quando a estaca ou tubulão é mobilizado, todos plotados em relação às cargas aplicadas. A instrumentação foi utilizada para comparativo de resultados obtidos pelos autores e de um modo geral, o conjunto de resultados analisados apresentaram-se coerentes com as considerações feitas por Camapum et al. (2008, 2010).

PALAVRAS-CHAVE: Tubulão a Céu Aberto, Prova de Carga Estática, Instrumentação, Coeficiente de Recalque, Comportamento de Fundações.

ABSTRACT: This paper aims to present a study of the behavior of two static load tests, effect in belled caissons in unsaturated horizons in the Federal District. The belled caissons have a shaft diameter equal to 0.60 m, a diameter of the base equal to 1.20 m, lengths from 8.60 to 9.20 m and were instrumented along the shaft and base to obtain the transfer of load in depth. From the methodology of analysis of static load tests based on the concepts of density testing and the response of the soil to the request presented by Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010), it was evaluated the mobilization of the soil at the interface with the foundation and the plastification of the whole set. Such methodology works with results of static load tests that have not been instrumented and uses as a concept the consolidation coefficient (α) which consists of the densification test in the laboratory, the accumulated primary consolidation and the consolidation secondary that represent the response of the soil when the pile or belled caisson is mobilized, all plotted in relation to the applied loads. The instrumentation was used to validate the results obtained by the authors and, in general, the set of results analyzed were consistent with the considerations made by Camapum et al. (2008, 2010).

KEYWORDS: Belled caisson, Static Loading Tests, Instrumentation, Consolidation Coefficient, Foundations Behavior.

1. Introdução

De acordo com Albuquerque (2001), a complexidade em compreender o mecanismo de distribuição de carga para avaliar a carga de ponta e a distribuição do atrito lateral, as características do solo onde as fundações serão construídas, a mudança das condições iniciais ocasionadas pela sua execução e o complexo comportamento do conjunto estaca-solo, de difícil modelagem numérica ou analítica, fundamentam a necessidade da utilização de provas de carga.

As provas de carga permitem verificar aspectos importantes como a capacidade de carga, os deslocamentos do elemento de fundação, e quando instrumentadas, permitem verificar a transferência de carga em profundidade. Em tubulões, as provas de carga estática têm a finalidade de comprovar a capacidade do elemento de resistir à carga axial para a qual foi projetada e auferir informações detalhadas dos recalques e transferência de carga quando há instrumentação, a fim de obter valores de resistência por atrito lateral e resistência de base.

No Brasil emprega-se tubulão a céu aberto em muitas obras, sobretudo devido a aspectos econômicos e de desempenho geotécnico, pois se trata de uma alternativa de fundação simples, econômica e com possibilidade de uso de equipamentos leves, e em solo poroso apresenta facilidade para escavação manual e estabilidade em cortes verticais. Contudo, mesmo com a expressiva quantidade de obras executadas com tubulões a céu aberto, são poucos os trabalhos sobre o comportamento deste tipo de fundação obtidos através de provas de carga, quer seja instrumentada ou não.

Isto ocorre devido à peculiaridade deste tipo de fundação, visto que a mobilização do atrito lateral é desenvolvida a partir de pequenos deslocamentos e pode ocasionar um excesso de carga no fuste antes que uma carga significativa possa ser transferida para a base. Quando o atrito lateral do fuste é totalmente mobilizado, toda a carga adicional é transferida para a base, produzindo excesso de tensão e ruptura do solo de apoio. Em consequência, a dificuldade principal na condução de provas de carga estática em tubulões é aplicar a carga necessária para atender as exigências de carga do ensaio ou chegar à ruptura da fundação, posto que a carga de ruptura é em geral elevada e o sistema de reação necessário para a mobilização da base aumenta consideravelmente o custo de execução da prova de carga e quando executadas, muitas vezes não têm a sua ruptura nítida.

Com o objetivo de se entender e definir melhor o comportamento das fundações frente a um determinado nível de recalque, o comportamento do atrito lateral e carga na base, Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010), desenvolveram uma metodologia, a partir de provas de carga estática executadas em estacas hélice contínua e tubulões, que permite verificar as cargas na ponta e recalque quando ocorre a plastificação do solo, informação preponderante no comportamento da fundação.

Faustino et al. (2019) analisou quatro provas de carga instrumentadas realizadas em estaca hélice contínua em um solo altamente poroso e colapsível no município de Campinas/SP, através da metodologia de Camapum de Carvalho et al. (2008). Os resultados obtidos apresentaram uma aproximação preponderante do domínio da ponta e plastificação do sistema solo-fundação para os gráficos de carga versus coeficiente de recalque e carga versus recalque secundário acumulado, com os valores confirmados pela instrumentação.

No trabalho de Alledi et al. (2016), foi estudado o comportamento de uma estaca hélice contínua executada no solo colapsível de Brasília/DF, onde verificou-se o domínio do atrito lateral pela metodologia de Camapum de Carvalho et al. (2010). Foram analisados os resultados referentes ao primeiro ponto de inflexão para os gráficos de carga versus coeficiente de recalque, carga versus recalque imediato acumulado e secundário acumulado, com valor aferido pela prova de carga instrumentada em profundidade. Os resultados apresentaram uma diferença percentual da ordem de 10%, concluindo pela boa aplicabilidade da metodologia na análise do domínio da transferência de carga por atrito lateral.

Diante do exposto, o presente trabalho possui o objetivo de confrontar os resultados obtidos pela instrumentação, em provas de carga estática a compressão em tubulões executados no Distrito Federal, com os resultados pelo método de Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010).

2. Método de Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010)

A metodologia proposta por Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010) trabalha com a análise do coeficiente de recalque/ deslocamento (α) plotado em relação as cargas e se baseia no ensaio de adensamento

em laboratório. Os coeficientes são extraídos do gráfico plotado em escala logarítmica em tratamento semelhante ao ensaio de adensamento, para cada carregamento, da parte final linear das curvas de recalque (mm) em função do tempo.

O autor cita que, a determinação do coeficiente de recalque/ deslocamento (α) é análoga à determinação do coeficiente de adensamento secundário resultante do ensaio de adensamento, alterando-se a variação do índice de vazios ou deformação específica decorrente do corpo de prova do ensaio de adensamento, pelo recalque medido no topo da fundação submetida à prova de carga.

O gráfico resultante apresenta três segmentos de reta, onde o primeiro trecho define o início das deformações plásticas do sistema fuste-solo, ou seja, o domínio do atrito. O segundo trecho é caracterizado pela mobilização da ponta e o terceiro representa início das deformações plásticas do solo na ponta da estaca. O ponto de inflexão entre o primeiro trecho com o início do segundo determina a carga a partir da qual a mobilização da ponta é preponderante em relação ao carregamento na qual a fundação é submetida. O segundo ponto de inflexão com o terceiro trecho corresponde ao início das deformações plásticas do solo na base da fundação, porém, não significa a ocorrência de ruptura e sim que, a partir deste ponto, os recalques apresentarão resultados elevados (Figura 1).

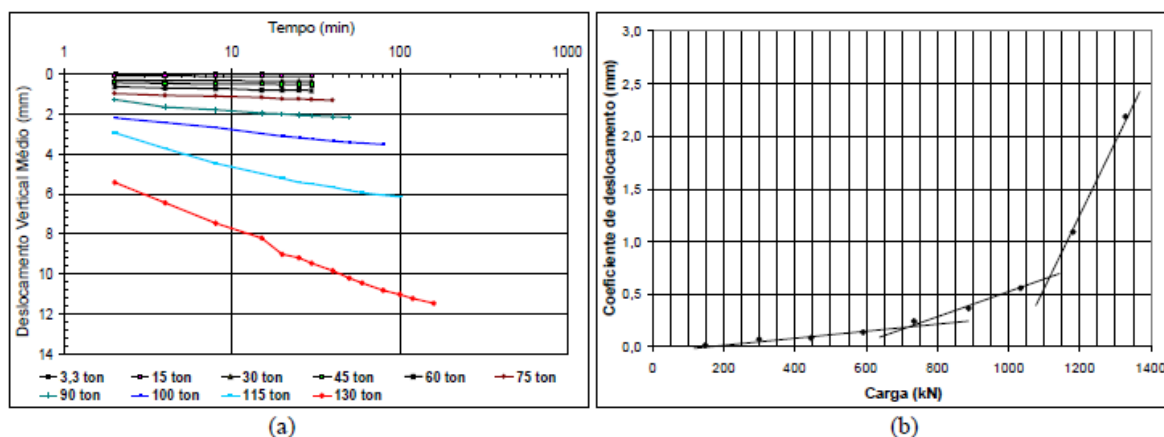


Figura 1. Curvas tempo versus deslocamento vertical (a) e carga versus coeficiente de recalque (b) (CAMAPUM et al., 2010).

De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2010), para o gráfico do recalque imediato acumulado versus carga aplicada e do recalque acumulado secundário versus carga aplicada, as determinações dos pontos de inflexão nos trechos dos gráficos são semelhantes ao gráfico coeficiente de recalque versus carga. No entanto, devido à necessidade de se definir melhor a carga oriunda do atrito lateral e a carga na ponta da estaca ou tubulão, foi proposto que o recalque imediato seja limitado no tempo ocorrido até 4 minutos após a aplicação da carga e no recalque secundário, o que ocorre após este tempo.

A divisão de quatro minutos entre os dois estágios foi em função da análise do comportamento do solo na interface com a fundação, que ocasiona um deslocamento imediato no contato, onde se observou que o deslocamento é abrupto nas curvas carga versus recalque dos solos estudados (Figura 2). O recalque imediato acumulado reflete o comportamento imediato na interface e o secundário o comportamento do solo por adensamento ou mobilização do maciço pela fundação.

Silva (2011) salienta que a mobilizações por atrito, ponta e deformações plásticas podem ocorrer simultaneamente nos três domínios, entretanto o comportamento da estaca e, conseqüentemente, da curva carga-recalque comandado pelo atrito, pela ponta ou pela plastificação depende do domínio em que se encontra o carregamento.

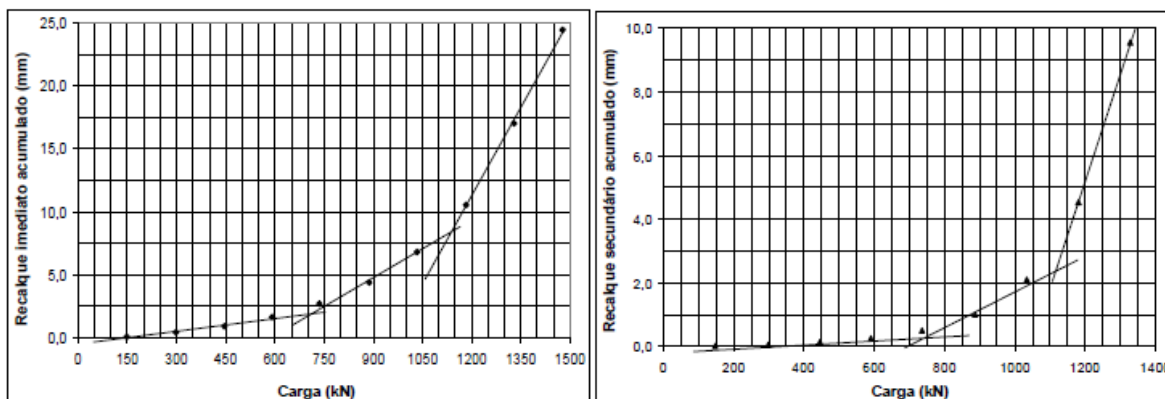


Figura 2. Curvas recalque imediato acumulado versus carga (a) e recalque por adensamento versus carga (b) (CAMAPUM et al., 2010).

3. Metodologia

Utilizou-se neste trabalho resultados de duas provas de carga estáticas tipo lentas em tubulões a céu aberto executados em um complexo imobiliário na cidade de Brasília, no plano piloto da Capital Federal. Os tubulões possuem diâmetro do fuste igual a 0,60m, diâmetro da base igual a 1,20m e comprimentos de 8,60 a 9,20m. Visando obter informações relativas à transferência de carga em profundidade, os tubulões ensaiados foram instrumentados em níveis distintos. Para a PC01 foram feitos 4 (quatro) níveis de 1,0 m; 2,4 m; 5,1 m e 9,2 m. Para a PC02, 03 (três) níveis de 1,0 m; 5,2 m e 8,6 m. Os *strain gages* foram colados em barras de aço CA-50, com 12,5mm de diâmetro e 0,4 m de comprimento e instalados aos pares no mesmo nível, em posição diametralmente oposta, com ligação tipo ponte completa e devidamente calibrados em laboratório.

As barras instrumentadas foram calibradas na Unicamp, e tal calibração teve por objetivo possibilitar a correção de eventuais diferenças nas leituras de deformação e possíveis erros de instalação. Após a calibração, as barras foram, na instalação, unidas por meio de roscas formando uma barra contínua. As barras instrumentadas foram fixadas no tubulão mediante o auxílio de cruzetas, para garantir o posicionamento centrado, seguida da armação. Após a colocação da barra instrumentada foi realizada a concretagem para consolidação do sistema barra instrumentada-estaca.

O perfil geológico-geotécnico do local é constituído por uma argila arenosa porosa residual, sobrejacente a um silte arenoso, onde o nível do lençol freático ocorreu à cerca de 15,0 m de profundidade.

3.1. Apresentação e Análise de Resultados

Na Figura 3 são apresentados os resultados da PC01 e PC02 nas escalas aritmética e logarítmica em termos de recalque último medido em função da carga aplicada. Observou-se uma mudança no comportamento dos tubulões em função do logaritmo da carga. Na Figura 4 são apresentadas as curva carga-recalque indicando as linhas de tendência e suas equações nos trechos verificados.

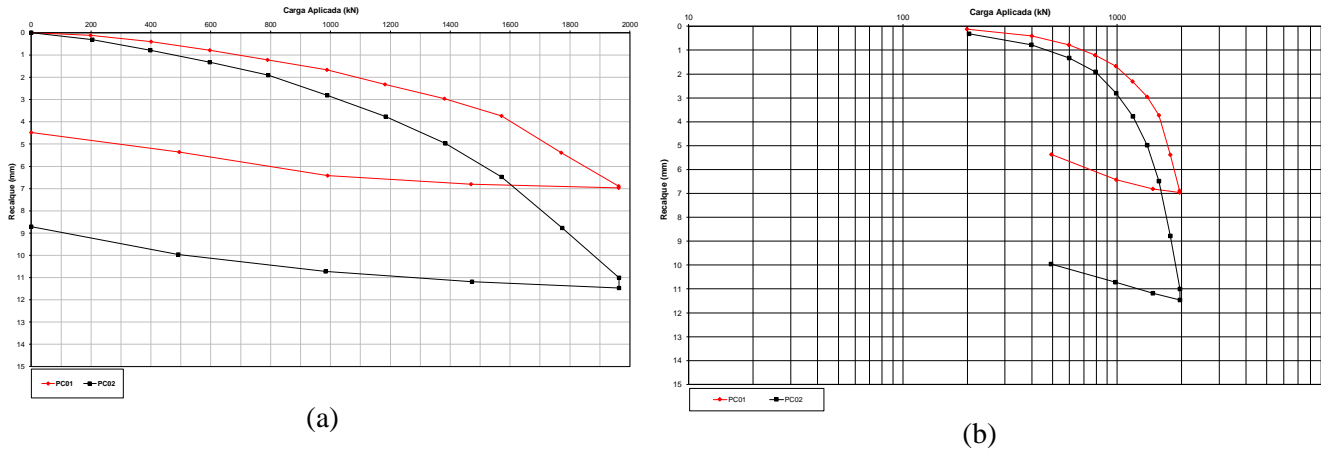


Figura 3. Curva carga versus recalque da PC01 e PC02 em escala aritmética (a) e logarítmica (b).

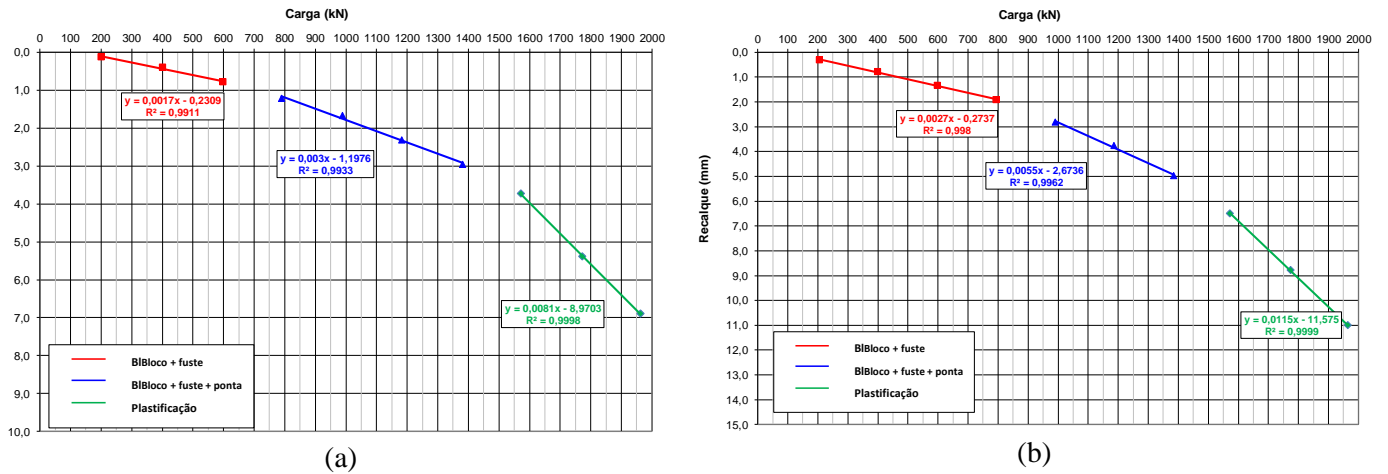


Figura 4. Curva carga versus recalque - Equações dos trechos destacados PC01(a) e PC02(b).

As Figuras 5 e 6 apresentam os recalques imediatos acumulados e os recalques por adensamento e/ou secundário acumulados em função das cargas aplicadas para a PC01 e PC02.

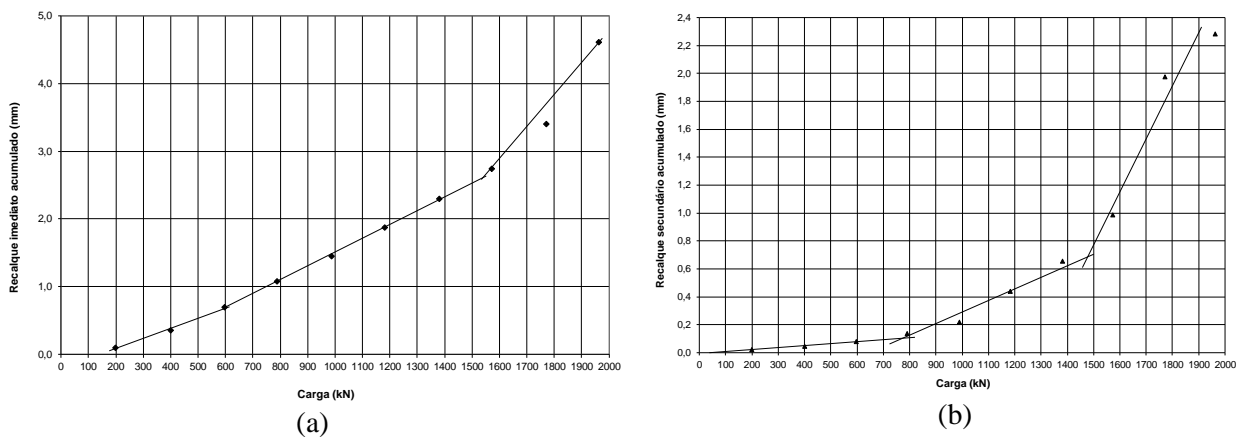


Figura 5. Curva recalque imediato acumulado e recalque por adensamento e/ou secundário acumulado em função das cargas aplicadas para a PC01.

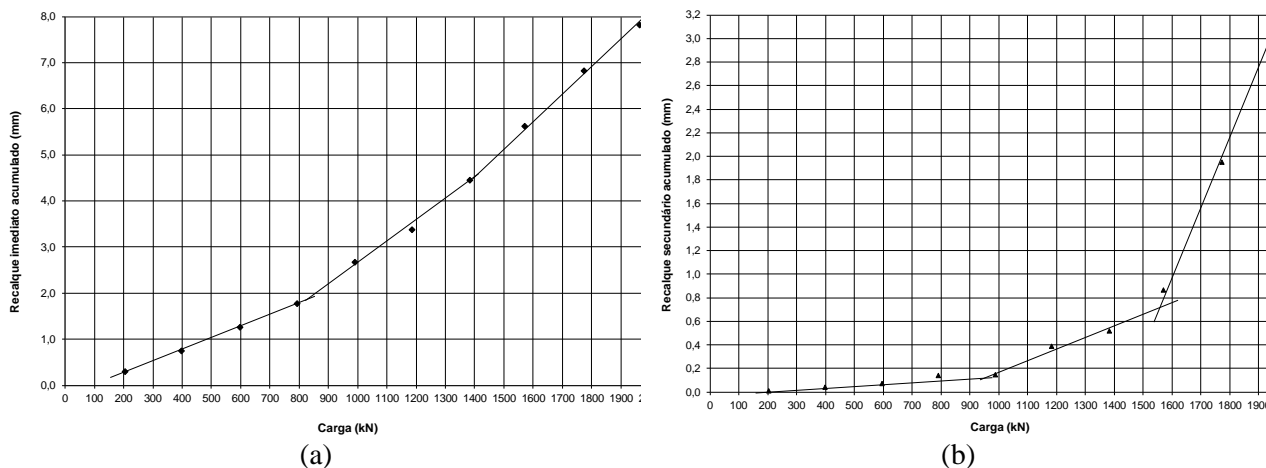


Figura 6. Curva recalque imediato acumulado e recalque por adensamento e/ou secundário acumulado em função das cargas aplicadas para a PC02.

Para a PC01, observou-se que o tubulão começou a trabalhar fuste + bloco de coroamento, sofrendo pequenos recalques com o carregamento aplicado até uma carga de aproximadamente 590 kN. A partir deste valor começa a trabalhar o conjunto bloco de coroamento + fuste + ponta de modo integrado até a carga de aproximadamente 1540 kN. Nos recalques por adensamento e/ou secundário acumulados em função das cargas aplicadas na PC01, observou-se que o bloco de coroamento + fuste começa a trabalhar com pequenos recalques até a carga de aproximadamente 780 kN. Após essa carga, o conjunto bloco de coroamento + fuste + base trabalham de modo integrado até a carga de aproximadamente 1485 kN.

Para a PC02, observou-se que o recalque imediato acumulado em função da carga aplicada começa a trabalhar fuste + bloco de coroamento, sofrendo pequenos recalques com o carregamento aplicado até uma carga de aproximadamente 840 kN. A partir deste valor começa a trabalhar o conjunto bloco de coroamento + fuste + ponta de modo integrado até a carga de aproximadamente 1405 kN. No recalque por adensamento e/ou secundário acumulado em função das cargas aplicadas na PC02, o bloco de coroamento + fuste começa a trabalhar com pequenos recalques para carregamentos aplicados até uma carga de aproximadamente 950 kN. Após essa carga, o conjunto bloco de coroamento + fuste + base trabalham de modo integrado até a carga de aproximadamente 1570 kN.

De acordo com Silva (2011), nem sempre é possível analisar os dados com os três gráficos. Em geral, o gráfico de recalque imediato é o que melhor identifica os resultados.

A partir dos carregamentos do conjunto solo-estrutura dos tubulões, indicou-se sinais de plastificação global, o que não significa necessariamente a ruptura dos tubulões, apenas aponta para a carga a partir da qual os recalques passam a ser mais relevantes.

4. Resultados da instrumentação

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos pela instrumentação durante a prova de carga PC01 e PC02. Para análise da instrumentação adotou-se o módulo de elasticidade obtido na seção de referência da estaca (barra instrumentada posicionada no topo da estaca), mediante curvas tensão-deformação segundo faixas de deformação e a metodologia de Fellenius.

Silva (2011) alerta que a ponta da estaca começa a ser mobilizada antes do primeiro ponto de inflexão, entretanto sua contribuição passa a ser preponderante a partir desse ponto.

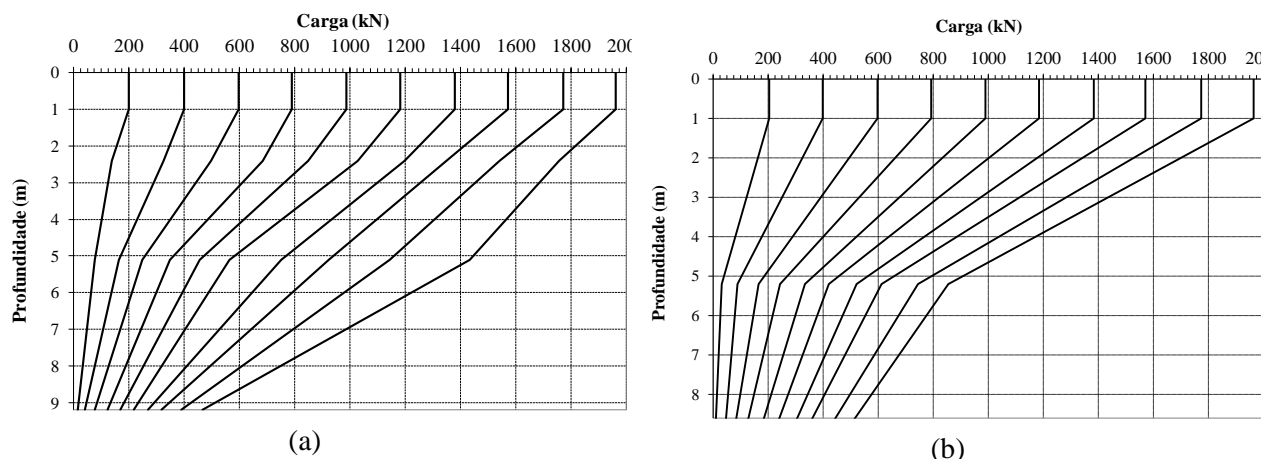


Figura 7. Transferência de carga ao longo do fuste e base do tubulão – PC01 (a) e PC02 (b).

a) Prova de carga PC01

Para a PC01, o carregamento total foi de 1992 kN transferindo ao fuste instrumentado uma carga máxima de 1496 kN equivalente a 75 %. A carga medida na profundidade de 9,6 m foi de 496 kN equivalente a 25% para a base.

Houve mobilização da base do tubulão ao passar da carga 400 kN para a carga 596 kN o que confirma com as análises efetuadas do recalque imediato acumulado apontando uma carga aproximada de 590 kN que corresponde ao início de mobilização da base do tubulão.

Na profundidade de 9,2 m, referente às cargas aplicadas de 1571 kN e 1771 kN, as linhas de transferência são paralelas, apontando para a constância da transferência de carga ao fuste do tubulão. A carga última neste ponto instrumentado passou de 318 kN para 390 kN o que confirma a carga de aproximadamente 1540 kN obtida na análise do recalque imediato, análoga ao ponto de início da plastificação do conjunto bloco + fuste + base.

b) Prova de carga PC02

Na PC02, o carregamento total foi de 1964 kN transferindo ao fuste instrumentado uma carga máxima de 1468 kN equivalente a 75 %. A carga medida na profundidade de 8,6 m foi de 496 kN equivalente a 25 %.

A mobilização da base ocorreu para a carga entre 792 kN a 989 kN onde o recalque imediato acumulado aponta para a carga de 840 kN.

Silva (2011) alerta que a ponta da estaca começa a ser mobilizada antes do primeiro ponto de inflexão, entretanto sua contribuição passa a ser preponderante a partir desse ponto.

5. Análise de resultados.

Com os dados obtidos pela instrumentação dos tubulões ao longo do fuste e base, plotou-se o gráfico de transferência de carga. Tais resultados foram determinados a partir do módulo de elasticidade obtido na seção de referência dos tubulões, mediante curvas tensão-deformação. Observou-se que para os dois tubulões, as linhas de transferência de carga são paralelas, apontando para uma constância da transferência de carga ao longo do fuste dos tubulões quando conjunto bloco de coroamento + fuste + base começou a trabalhar, conforme visto nas Figuras 5 e 6.

Como os tubulões não foram levados até a carga de ruptura, a análise se restringiu a verificação do recalque imediato acumulado, visto que o início de domínio da ponta se apresentou mais bem definido.

O conjunto das análises permitiu verificar que a metodologia Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010) permite obter informações relevantes do domínio do atrito lateral, ponta e plastificação da fundação, dependendo do nível de deformação e da existência das regiões, não se restringindo apenas a determinação apenas da capacidade de carga.

6. Conclusão/ Comentário Finais

A partir das análises efetuadas, pode-se afirmar que, para provas de carga estáticas em tubulões a céu aberto, a aplicação da carga necessária para se chegar à ruptura da fundação é de difícil execução uma vez que a mobilização da base do tubulão ocasiona um excesso de carga no fuste.

Os resultados da instrumentação em profundidade dos tubulões, apresentaram uma contribuição significativa da parcela de resistência do atrito lateral desenvolvido para uma fração do deslocamento necessário para a mobilização da resistência, devendo esta ser considerada na análise do comportamento de tubulões a céu aberto.

Ao comparar os resultados obtidos das provas de carga instrumentadas e metodologia de Camapum de Carvalho et al. (2008, 2010), foi possível verificar o início da mobilização da base dos tubulões, informação está de difícil mensuração e preponderante no dimensionamento da fundação, principalmente em provas de carga estáticas não levadas à ruptura.

A metodologia de forma geral, se apresentou como uma ferramenta importante para a análise das cargas mobilizadas ao longo do fuste, base de tubulões e região onde ocorre a plastificação do conjunto bloco + fuste + base.

Por fim, pode-se afirmar que há uma aproximação dos resultados analisados, confirmando as previsões dos autores para um solo não saturado do Distrito Federal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Campinas e à empresa BMS Engenharia pela liberação dos dados das provas de carga estática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P.J.R. (2001). *Estaca escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 260 p.
- Alledi, C. T. D. B.; Silva, C. M.; Albuquerque, P.J.R. (2016). *Atrito lateral de estaca hélice contínua – Instrumentação em profundidade vs Metodologia Camapum de Carvalho et al. (2010)*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais: ABMS.
- Camapum de Carvalho, J., Silva, C.M.; Aquino, F.R.; Aguiar, L.A; Mota, N.M.B; Albuquerque, P. J. R. (2010). *Análises dos Resultados de Provas de Carga Estáticas sobre Fundações Profundas*. In: COBRAMSEG, 2010, Gramado, RS. Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento: Inovação e Sustentabilidade. São Paulo: ABMS, v. 1, v. 1, p. 1-8.
- Camapum de Carvalho, J., Silva, C.M.; Paolucci, H.V.N.; González, Y.V; Valencia, L.A.L. (2008). *Considerações sobre a análise dos resultados de provas de carga estáticas*. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE, 6, 2008, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS. v. 1, p. 355-369.
- Faustino, C. L.; Castor Neto, J. R.; Albuquerque, P.J.R. (2019). *Avaliação da transferência de carga em profundidade de estacas hélice contínua com base no conceito do adensamento unidimensional*. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE, 9, 2019, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS.
- Silva, C. M. (2011). *Energia e confiabilidade aplicadas aos estaqueamentos tipo hélice contínua*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 311 p.