

Avaliação da Transferência de Carga em Profundidade de Estacas Hélice Contínua com Base no Conceito do Adensamento Unidimensional

Joaquim Ribeiro de Castro Neto
Mestrando, Unicamp, Campinas, Brasil, joaquimcastro.eng@gmail.com

Carolina Longo Faustino
Mestrando, Unicamp, Campinas, Brasil, longofaustino@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque
Professor Associado, Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: Geralmente os resultados obtidos em provas de carga estática em fundações se restringem à obtenção da curva carga-recalque. Embora seja possível realizar provas de carga instrumentadas com a finalidade de obter a transferência de carga ao longo do fuste, essa técnica não é empregada com frequência em obras e/ou projetos de engenharia, ficando muitas vezes restrita aos centros de pesquisa. Isso ocorre em virtude do elevado custo ou pela falta de especialistas da área. Em 2008, Camapum e outros propuseram uma metodologia de análise de provas de carga, com base nos conceitos do ensaio de adensamento e na resposta do solo à solicitação, que dispensa o uso da instrumentação para interpretação da transferência de carga em profundidade. Sendo assim, o presente artigo aplica tal método em resultados de quatro provas de carga instrumentadas realizadas em estacas hélice contínua, executadas em solo de diabásio da região de Campinas/SP. A instrumentação foi utilizada para validar os resultados obtidos pelo método de Camapum et al (2008).

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática, Métodos de Análise, Instrumentação, Coeficiente de Recalque, Comportamento de Fundações.

ABSTRACT: The results in static loading tests are usually restricted to load-settlement curve. Although it is possible to perform instrumented loading tests to obtain the load transference along the pile shaft, this technique is not frequently used in constructions and/or engineering designers, being restricted for the research centers. This is due to the high cost or lack of specialists in the area. In 2008, Camapum and others proposed a methodology analysis of loading tests, based on consolidation test concepts and on soil behavior in the request, in which the use of instrumentation for interpretation of the load transference in depth is unnecessary. Thus, the present paper apply this method in four instrumented loading tests realized in CFA (continuous flight auger pile), performed in diabasic soil of Campinas/SP region. The instrumentation had been used to validate the obtained results by the Camapum et al (2008) method.

KEYWORDS: Static Loading Tests, Methods of Analysis, Instrumentation, Settlement Coefficient, Foundations Behavior.

1 Introdução

Provas de carga instrumentadas em fundações são meios eficientes para a avaliação do comportamento dessas estruturas. Através da curva carga-recalque pode-se obter ou estimar a capacidade de carga e o recalque de uma estaca. Além disso, a instrumentação pode fornecer a transferência de carga ao longo do fuste, definindo quanto da carga aplicada é absorvida pelo atrito lateral e quanto vai para o apoio de ponta, porém, esse ensaio ainda é restrito no Brasil.

Após a publicação da norma de fundações pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2010, a qual estabeleceu limites para a tensão admissível e quantidade de estacas onde é obrigatória a realização de provas de carga, a procura por esse ensaio aumentou. Com o objetivo de aprimorar as análises desses ensaios, Camapum de Carvalho et al. (2008) desenvolveram um método que permite estimar as cargas a partir das quais ponta e recalques devido à plastificação são preponderantes no comportamento da fundação.

Esse método será utilizado nesse trabalho para interpretar os resultados de quatro provas de carga instrumentadas em estacas hélice contínua, segundo Albuquerque (2001) e Mucheti (2008). Essas estacas foram contruídas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Nos capítulos seguintes serão apresentados os conceitos teóricos desse método, como é feito o cálculo, os resultados obtidos e as discussões, assim como a conclusão obtida.

2 Conceito teórico

O método de interpretação dos resultados de provas de carga estática proposto por Camapum de Carvalho et al. (2008) consiste no traçado de três gráficos, sendo um baseado no ensaio de adensamento em laboratório e os outros dois na resposta do solo quando a estaca é mobilizada. Geralmente, ambos são compostos por três segmentos de reta (figura 1), onde o primeiro define o domínio do atrito, o segundo da ponta e o terceiro da plastificação. A interseção entre o primeiro e o segundo segmentos define a carga a partir da qual a mobilização da ponta passa a ser preponderante na resposta da fundação ao carregamento em termos de capacidade de carga e deformabilidade. Do mesmo modo, a interseção entre o segundo e o terceiro trechos define a carga a partir da qual as deformações plásticas comandam o comportamento da estaca, o que não significa que houve a ruptura, e sim que a partir desse ponto deve-se esperar recalques elevados. Silva (2011) ressalta que as mobilizações de atrito e ponta, bem como as deformações plásticas podem ocorrer simultaneamente ao longo de toda a curva, porém são relevantes apenas nos trechos definidos pelo método.

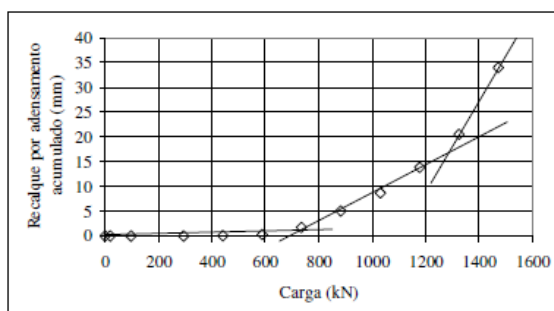


Figura 1. Gráfico de recalque por adensamento acumulado x carga (Camapum de Carvalho *et al.*, 2008).

2.1 Método de Cálculo

A primeira análise consiste em traçar o gráfico de coeficiente de recalque – ou coeficiente de adensamento *vs* carga, semelhante ao mostrado na figura 1. Tal coeficiente é obtido do trecho linear final da

curva recalque (mm) vs tempo (min), esse em escala logarítmica, para cada carregamento. O cálculo é semelhante à determinação do coeficiente de adensamento secundário, com a diferença que no método de Camapum de Carvalho et al (2008) esse valor é calculado em termos do deslocamento em milímetros e não em termos de deformação específica ou do índice de vazios como feito tradicionalmente.

Na segunda análise obtém-se novamente um gráfico semelhante ao da figura 1, porém traçado a partir dos pares recalque imediato acumulado e carga. O método considera recalque imediato aquele ocorrido até os 4 min após a aplicação do incremento de carga. Esse tempo, arbitrado em função de observações e interpretações de curvas carga-recalque, define o intervalo onde ocorrem deslocamentos abruptos.

Por fim, são feitas interpretações dos resultados das provas de carga através do recalque secundário acumulado – ou recalque por adensamento acumulado – o qual se inicia quando decorridos 4 min da aplicação da carga. Camapum et al. (2008) consideraram esse fenômeno representativo do comportamento do solo adensado referente à mobilização do maciço pela fundação. Tal como nas análises anteriormente citadas, traça-se um gráfico com os pares recalque secundário acumulado e carga, obtendo-se segmentos de reta semelhantes aos da figura 1.

3 Resultados e Discussões

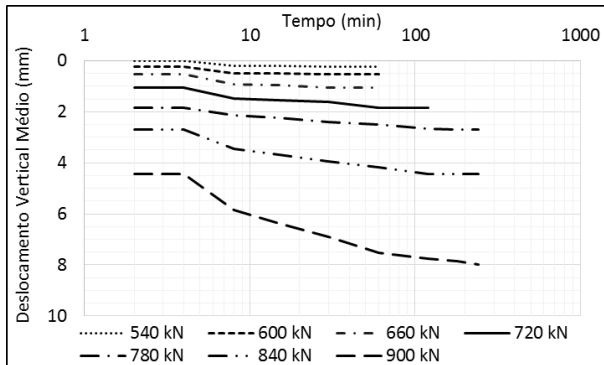
Neste trabalho foram utilizados resultados de quatro provas de carga estáticas lentas em estacas do tipo hélice contínua, sendo três com diâmetro nominal de 0,40 m e uma de 0,30 m. Todas têm 12 m de comprimento e foram instrumentadas ao longo do fuste com extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) em quatro níveis: 0,30 m (seção de referência), 5,0 m, 11,1 m e 11,7 m. Os *strain gages* foram colados em barras de aço CA-50 com 12,5 mm de diâmetro e 0,60 m de comprimento, as quais foram devidamente calibradas em laboratório. O circuito foi do tipo ponte completa.

As provas de carga foram executadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp, no município de Campinas/SP. Segundo Albuquerque (2001), o perfil geológico do local é constituído por solo de diabásio, o qual apresenta uma camada superficial de aproximadamente 6,5 m de espessura de argila silto-arenosa, intensamente intemperizada, de alta porosidade e colapsível. Essa camada é seguida por outra, que chega até 19 m de profundidade, a qual apresenta um solo residual jovem de silte argilo-arenoso. O nível d'água é encontrado a 17,7 m, podendo variar de acordo com a época do ano.

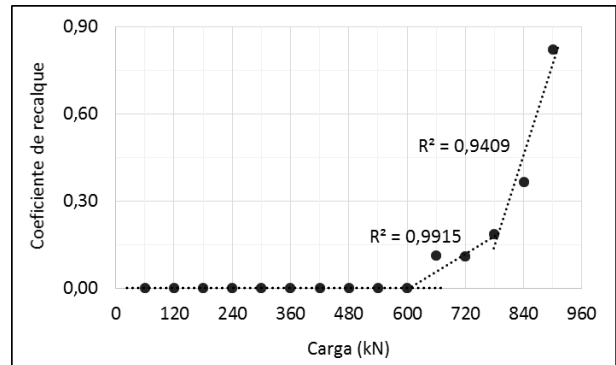
3.1 Interpretação das Provas de Carga pelo Método de Camapum de Carvalho et al (2008)

Apresentam-se nas figuras 2, 3, 4 e 5 os gráficos tempo em escala logarítmica vs. deslocamento vertical médio e carga vs. coeficiente de recalque para as provas de carga realizadas. Nota-se que para alguns carregamentos a inclinação das retas foi pequena, sendo zero em alguns casos. Além disso, as medidas dos deslocamentos verticais para alguns carregamentos nas fundações EH-1, EH-2 e EH-3 apresentaram valores negativos, ou seja, os relógios medidores registraram um levantamento da estaca. Acredita-se que essa situação ocorra devido a acomodação do bloco, não retratando o comportamento real da estaca. Sendo assim, foram desprezadas as medidas de deslocamento vertical até a carga de 480 kN para a estaca EH-1 e até 180 kN para as estacas EH-2 e EH-3.

Visando diminuir a subjetividade no traçado das retas de cada domínio adotou-se os pontos que gerassem os segmentos com o maior coeficiente de correlação linear (R^2). Vê-se que nas figuras 2b, 4b e 5b que o segmento do domínio do atrito foi constante. Inicialmente pensou-se tratar de uma falha, seja na manipulação dos dados ou do método, entretanto após comparar os resultados fornecidos com a instrumentação encontrou-se coerência nos resultados.

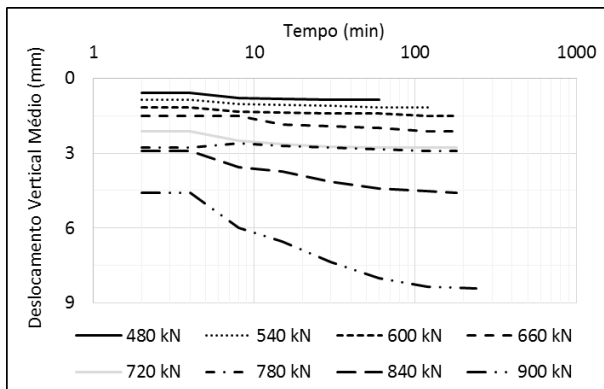


(a)

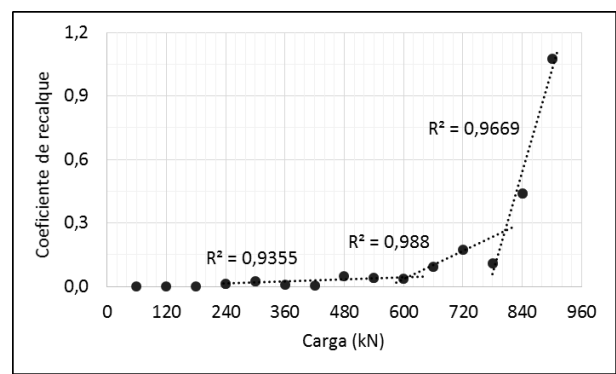


(b)

Figura 2. Gráficos de tempo x deslocamento (a) e carga x coeficiente de recalque (b) – EH-1 (Do Autor, 2019).

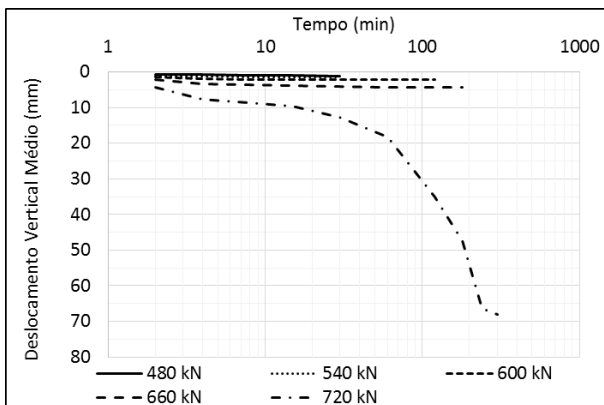


(a)

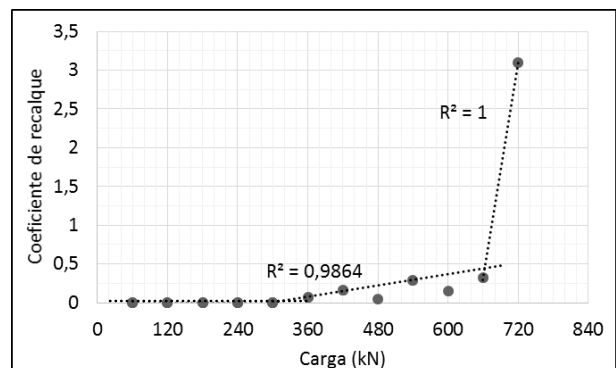


(b)

Figura 3. Gráficos de tempo x deslocamento (a) e carga x coeficiente de recalque (b) – EH-2 (Do Autor, 2019).



(a)



(b)

Figura 4. Gráficos de tempo x deslocamento (a) e carga x coeficiente de recalque (b) – EH-3 (Do Autor, 2019).

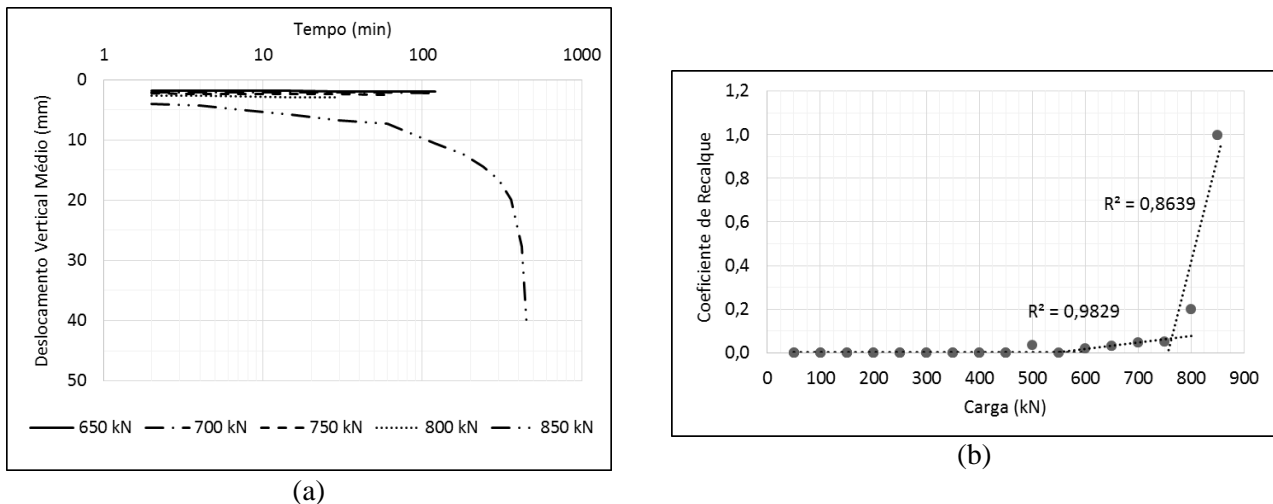


Figura 5. Gráficos de tempo x deslocamento (a) e carga x coeficiente de recalque (b) – EH-4 (Do Autor, 2019).

Na tabela 1 são apresentadas as cargas que definem o início dos domínios da ponta e da plastificação, de acordo com o método de Camapum de Carvalho *et al* (2008), sendo q_1 e q_2 as terminologias adotadas nesse artigo, respectivamente.

Tabela 1. Cargas obtidas pelos gráficos Carga vs. Coeficiente de Recalque (Elaborado pelo Autor, 2019).

Estaca	q_1 (kN)	q_2 (kN)
EH-1	600	780
EH-2	600	805
EH-3	300	605
EH-4	550	763

Nas figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam-se os gráficos das demais análises do método de Camapum de Carvalho *et al* (2008), isto é, carga vs. recalque primário acumulado e carga vs. recalque secundário acumulado. No caso das estacas EH-1 e EH-2 os gráficos carga vs. recalque imediato acumulado não apresentaram tendência convencional, por isso não foram apresentados. De acordo com Silva (2011), isso pode ser decorrente dos procedimentos adotados para a estabilização dos recalques ou das características da estaca. Por se tratar de estacas do tipo substituição, é comum o acúmulo de solo solto na base da fundação, o que levaria num primeiro momento à compactação desse material e só posteriormente à mobilização da ponta.

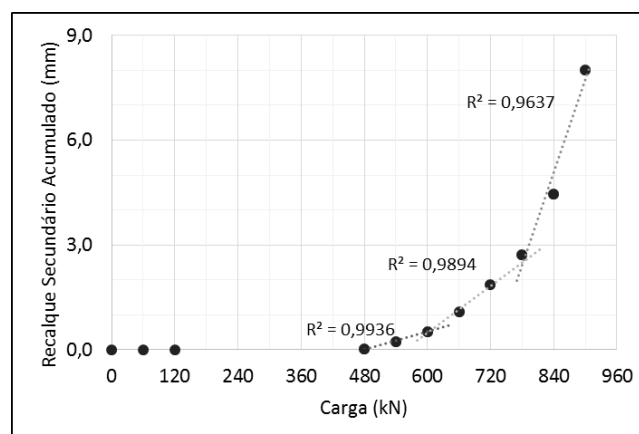


Figura 6. Carga vs. Recalque Secundário Acumulado – EH-1 (Do Autor, 2019).

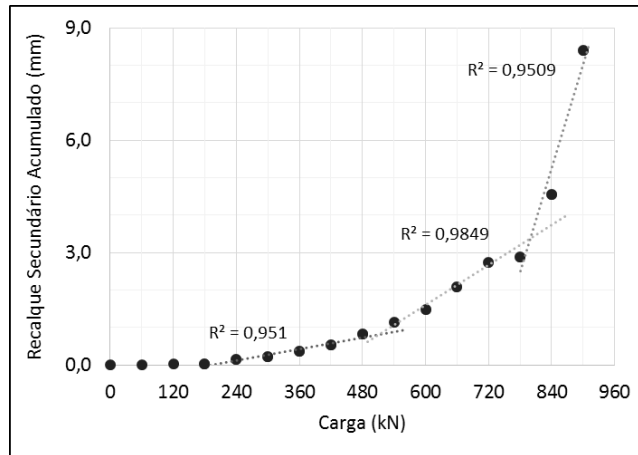
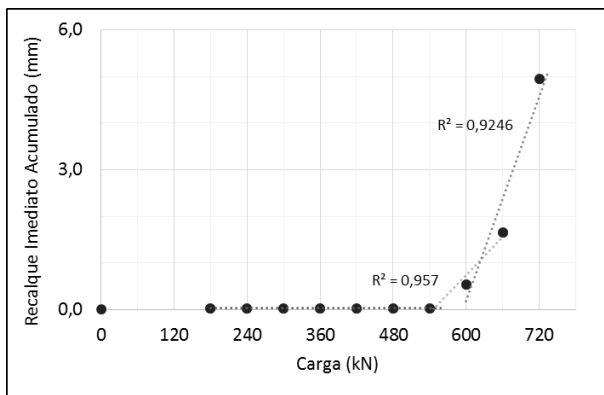
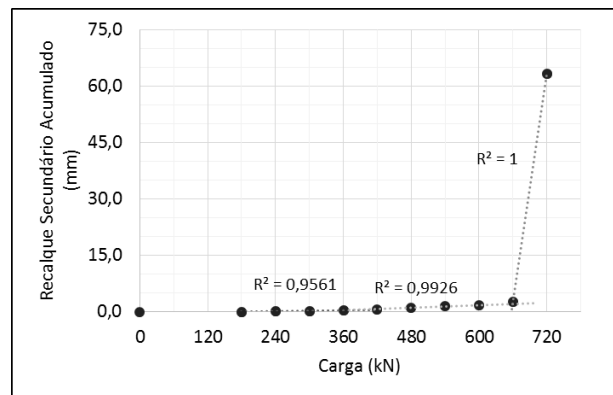


Figura 7. Carga vs. Recalque Secundário Acumulado – EH-2 (Do Autor, 2019).

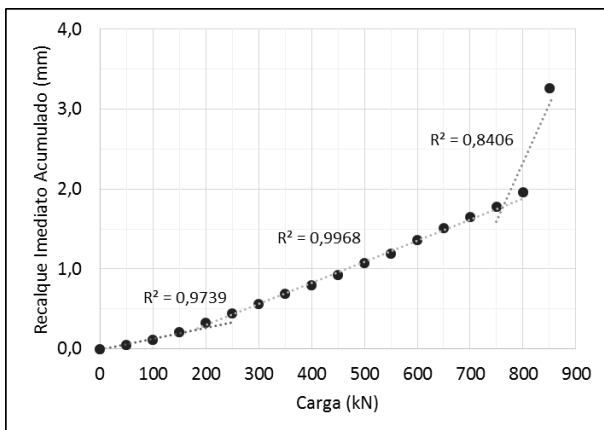


(a)

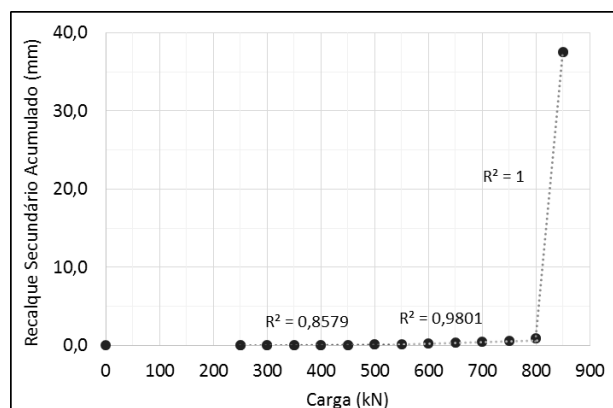


(b)

Figura 8. Carga vs. Recalque Imediato Acumulado (a) e Carga vs. Recalque Secundário Acumulado (b) – EH-3 (Do Autor, 2019).



(a)



(b)

Figura 9. Carga vs. Recalque Imediato Acumulado (a) e Carga vs. Recalque Secundário Acumulado (b) – EH-4 (Do Autor, 2019).

Nas tabelas 2 e 3 são apresentadas as cargas q_1 e q_2 definidas de acordo com as figuras 6b, 7b, 8b e 9b.

Tabela 2. Cargas obtidas pelos gráficos Carga vs. Recalque Imediato Acumulado (Elaborado pelo Autor, 2019).

Estaca	q_1 (kN)	q_2 (kN)
EH-1	-	-
EH-2	-	-
EH-3	540	620
EH-4	180	760

Tabela 3. Cargas obtidas pelos gráficos Carga vs. Recalque Secundário Acumulado (Elaborado pelo Autor, 2019).

Estaca	q_1 (kN)	q_2 (kN)
EH-1	600	780
EH-2	520	800
EH-3	420	660
EH-4	530	800

Diante dos valores apresentados nas tabelas 1, 2 e 3 percebe-se que as cargas definidas pelos gráficos carga vs. coeficiente de recalque e carga vs. recalque secundário acumulado, situaram-se próximas. Contudo, as cargas q_1 definidas pelo gráfico carga vs. recalque imediato acumulado apresentaram uma maior diferença com relação as demais. No caso da estaca EH-3 o valor de q_1 foi 80% e 30% maior que os valores de q_1 dados pelas figuras 4b e 8b, respectivamente. Do mesmo modo, o valor de q_1 para a estaca EH-4 definido pela figura 9a é cerca de 67% inferior que os valores definidos pelas figuras 5b e 9b.

3.2 Resultados Obtidos pela Instrumentação em Profundidade

As figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam os gráficos de transferência de carga obtidos pela instrumentação ao longo do fuste. Tais resultados foram obtidos a partir do módulo de elasticidade definido através da seção de referência das estacas mediante curvas tensão-deformação.

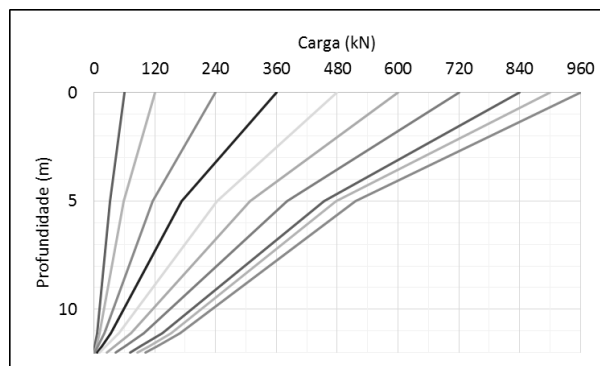


Figura 10. Transferência de carga ao longo do fuste da estaca EH-1 (Do Autor, 2019).

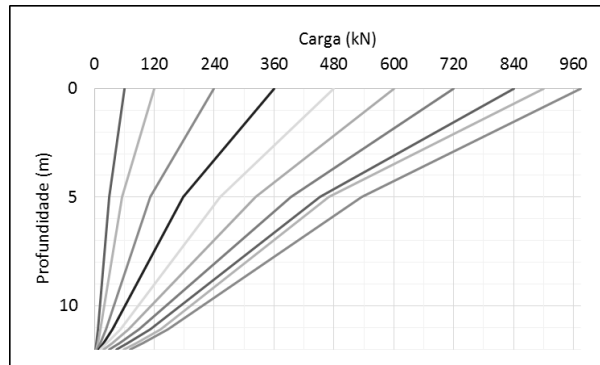


Figura 11. Transferência de carga ao longo do fuste da estaca EH-2 (Do Autor, 2019).

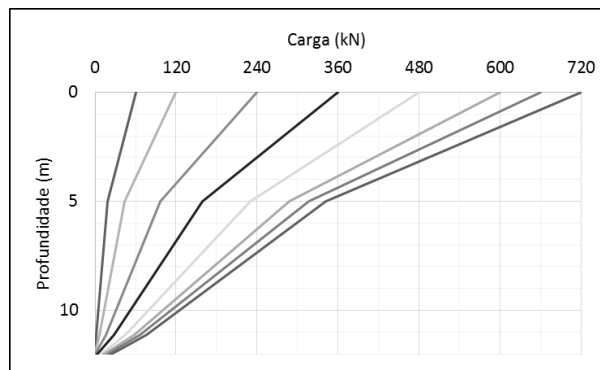


Figura 12. Transferência de carga ao longo do fuste da estaca EH-3 (Do Autor, 2019).

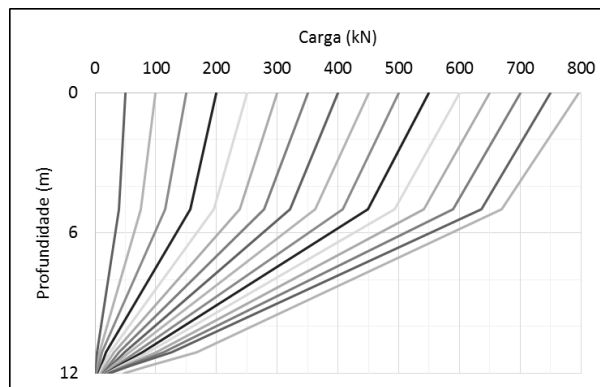


Figura 13. Transferência de carga ao longo do fuste da estaca EH-4 (Do Autor, 2019).

Através dessas curvas percebe-se que a ponta começa a ser mobilizada a partir de 600 kN para as estacas EH-1, EH-2 e EH-3, 500 kN para a estaca EH-4. Tendo em vista o paralelismo entre as linhas de transferência de carga, infere-se que a plastificação do sistema bloco + fuste + base torna-se preponderante a partir de 840 kN para as estacas EH-1 e EH-2, 660 kN para a estaca EH-3 e 750 kN para a estaca EH-4.

3.3 Discussões

Comparando os resultados obtidos pelo método de Camapum de Carvalho *et al* (2008) e pela instrumentação, percebe-se que existe uma aproximação. Assim como previsto pelo método e confirmado pela instrumentação, a reação da ponta passa a ser preponderante para a estaca EH-1 a partir de 600 kN e a plastificação do sistema solo-fundação entre 780 kN e 840 kN. Da mesma forma, para a estaca EH-2, a instrumentação comprovou que o domínio da ponta se inicia por volta de 600 kN e o da plastificação, 840

kN, sendo tais valores próximos daqueles obtidos pelo método, os quais valem 600 kN e 520 kN para q_1 , e 800 kN e 805 kN para q_2 .

Com relação as estacas EH-3 e EH-4, as cargas obtidas pelo método de Camapum de Carvalho *et al* (2008) tiveram uma variação maior quando comparadas com as estacas EH-1 e EH-2. A exceção do valor da carga q_1 definida pelo gráfico carga vs. recalque imediato acumulado para a estaca EH-4 e dos valores de q_2 definidos pelos gráficos carga vs. coeficiente de recalque e carga vs. recalque secundário acumulado, os resultados do método foram condizentes com os da instrumentação.

4 Conclusões

Diante do exposto, pode-se afirmar que a os resultados da instrumentação confirmaram as previsões do método de Camapum de Carvalho *et al* (2008). Portanto, esse método constitui numa ferramenta importante para análise de provas de carga não instrumentadas. Outro aspecto positivo é que a análise dos resultados não se restringe à determinação da capacidade de carga, mas vai além, estabelecendo os domínios do atrito, ponta e plastificação.

Conhecer essas fronteiras é relevante para estabelecer a carga de trabalho que a estaca será submetida, uma vez que leva-se em conta também as características de deformabilidade do conjunto solo-fundação, e não apenas a capacidade de carga.

As divergências encontradas nas análises podem ser decorrentes de diversos fatores, tais como falhas na aquisição dos dados ou tempo insuficiente para estabilização dos recalques, e não necessariamente de um erro do método. Por fim, ressalta-se que a ampliação do uso dos resultados das provas de carga estáticas precisa de estudos mais aprofundados, buscando incluir dados de outras regiões do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Campinas e à Capes pelo auxílio financeiro por meio de bolsa de estudos.

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.
- 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.
- Mucheti, A. S. (2008). *Estacas hélice segmentada: execução, verificação de integridade e estudo do comportamento*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 123 p.
- Silva, C. M. (2011). *Energia e confiabilidade aplicadas aos estaqueamentos tipo hélice contínua*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 311 p.