

Análise de Prova de Carga Bi-Direcional em Estaca Hélice Contínua na Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG

Moisés Valente Pereira

Sergio Velloso Engenheiros Consultores e Projetos, Belo Horizonte/MG, Brasil,
moises@sergiovelloso.com.br

Sandro Eduardo Lima Pinto

Sergio Velloso Engenheiros Consultores e Projetos, Belo Horizonte/MG, Brasil,
sandro@sergiovelloso.com.br

Hedmilson Ferreira Bragança

Sergio Velloso Engenheiros Consultores e Projetos, Belo Horizonte/MG, Brasil,
hedmilson@sergiovelloso.com.br

Sérgio Maurício Pimenta Velloso Filho

Universidade FUMEC, Belo Horizonte/MG, Brasil,
spvelloso@sergiovelloso.com.br

RESUMO: Este trabalho contempla a análise comparativa entre métodos semi-empíricos de cálculo de capacidade de carga e resultados de prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional. A instrumentação foi realizada em estaca “teste”, escavada, tipo hélice contínua monitorada, levada até a ruptura física. Foi realizada escavação contígua à estaca, possibilitando confirmação visual do recalque lido pelos instrumentos instalados no topo do elemento e posterior extração da célula. Adicionalmente foi aplicado no segmento inferior da estaca (parte levada até ruptura física) o conceito de rigidez, visando identificar o domínio de transferência de carga pela ponta e o domínio de transferência de carga pelo atrito lateral de uma estaca, de forma a permitir a formulação semi-empírica que melhor se adequa ao empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga, célula hidrodinâmica, estaca hélice contínua, cálculo de capacidade de carga, comprovação do recalque, conceito de rigidez.

1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de projetos de fundação, contrariando o que prescreve a normatização vigente, a maneira mais comum de se estabelecer cargas de trabalho de estacas e eventuais profundidades, baseia-se na aplicação de métodos semi-empíricos de estimativa de capacidade de carga. Essas formulações, que levam em consideração parâmetros derivados de dados de investigações de campo e geometria das peças de fundação, podem muitas das vezes não se adequar aos locais de interesse, devido à

variações diversas no perfil geológico-geotécnico, associadas à correlações inexistentes de ensaios daquela região. Tal metodologia, pode apresentar discrepâncias entre os valores teóricos e reais, o que se faz necessário à realização de provas de carga para avaliar o real comportamento da fundação.

Com base nesse conceito, este trabalho contempla análise comparativa de métodos semi-empíricos de estimativa de cálculo de capacidade de carga com resultado de prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional.

A instrumentação em estudo foi realizada em uma estaca “teste” escavada tipo hélice contínua monitorada, levada até ruptura física. Com o intuito de analisar os resultados de recalques obtidos através do ensaio e, verificar a integridade do elemento ensaiado, já que as tensões de compressão aplicadas suplantaram o fck do elemento, foi realizada escavação contígua à estaca de forma a possibilitar a análise visual do recalque lido pelos instrumentos posicionados no topo da peça, além do exame visual da célula, onde foi constatada perfeita integridade do equipamento.

Adicionalmente foi aplicado no segmento inferior da estaca (parte levada a ruptura física), o conceito de rigidez, que permite a identificação do domínio de transferência de carga pela ponta e o domínio de transferência de carga pelo atrito lateral da estaca.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

Neste trabalho é apresentada análise comparativa entre métodos semi-empíricos e resultado de prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional. Para desenvolvimento deste trabalho, foram analisados métodos consagrados de previsão de carga de interação estaca-solo, incluindo os desenvolvidos pelos autores Aoki Velloso (1975), Texeira (1996), Luciano Decourt e Arthur R. Quaresma, publicado originalmente no COBRAMSEG/1978 para estacas cravadas e estendido em 1996 para elementos escavados, Pedro Paulo Costa Velloso (1981) e a metodologia proposta por Urbano Rodrigues Alonso (1996) para estacas tipo hélice contínua.

É notável no estado de Minas Gerais, uma grande relutância por parte dos investidores quanto à necessidade de teste ou instrumentação prévia para dimensionamento ou avaliação do real comportamento das fundações. A alegação por parte dos mesmos é quase sempre, o lugar comum conhecido por todos nós, elevado custo e atraso no cronograma da obra. Com o intuito de tornar a prova de carga convencional mais segura, rápida e econômica, o engenheiro civil Pedro Elísio Chaves Alves Ferreira da Silva desenvolveu em meados da década de 80 a

prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional. Em relação ao assunto supracitado são relevantes, os trabalhos de Oliveira Campos, (2015) e Dellana Wolney, (2013 e 2014), além de Silva (1983) que descrevem a metodologia e praticidades desta modalidade de prova de carga.

Para discernimento dos carregamentos imputados aos domínios de ponta e atrito do segmento inferior, foi empregado o conceito de rigidez, sendo necessária menção ao trabalho desenvolvido por Melo (2009), onde o método foi aplicado para análise de prova de carga, realizada em estaca escavada sem fluido estabilizante.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 A obra

O objeto de estudo encontra-se contido em obra de complexo industrial de aproximadamente 25.000 m² de área construída com 8 galpões, que exigiram a realização de mais de 600 pontos de fundação, entre sapatas, tubulões e estacas moldadas *in loco*, visto a vastidão da área e heterogeneidade do subsolo. O empreendimento está situado no município de Santa Luzia, região metropolitana de Belo Horizonte/MG.

3.2 Análise geológica-geotécnica

As investigações de campo se limitaram à realização de sondagens de simples reconhecimento tipo SPT, executadas de acordo com a norma NBR 6484/2001. A estaca “teste” estudada encontra-se executada a uma distância de aproximadamente 8 metros do furo de sondagem à percussão FA24. O perfil geológico-geotécnico no local que abriga a análise, é formado basicamente por camada superficial variável de aterro compactado argilo-siltoso, seguida de material silto-arenoso residual, com afloramentos rochosos pontuais em alguns trechos.

Devido à configuração topográfica local e implantação do empreendimento, algumas

regiões possuem camadas de aterro compactado variando de 1,00 a 12,00 metros de espessura. A figura 1 apresenta esquema que ilustra o perfil geotécnico da sondagem FA24 e eventual posicionamento do elemento de fundação, com destaque à armação e à célula hidrodinâmica. A estaca ensaiada está imersa em subsolo cujo perfil é composto inicialmente por camada de 3,60m de aterro argilo-siltoso muito rijo, seguida de silte arenoso muito compacto de espessura de 1,30m e silte argiloso rijo com 2,60m. A partir de 7,50m de profundidade, encontra-se silte arenoso residual de compactidade fofa a muito compacta. A estaca ensaiada foi escavada até a profundidade de 14m, apoiando-a no solo residual de N_{SPT} igual a 31 golpes/30cm.

3.3 Metodologia da prova de carga bi-direcional

Para realização da prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica, é necessário que a célula de carga, previamente aferida, seja instalada dentro do fuste da estaca e engastada na armação, como demonstrado na figura 1.

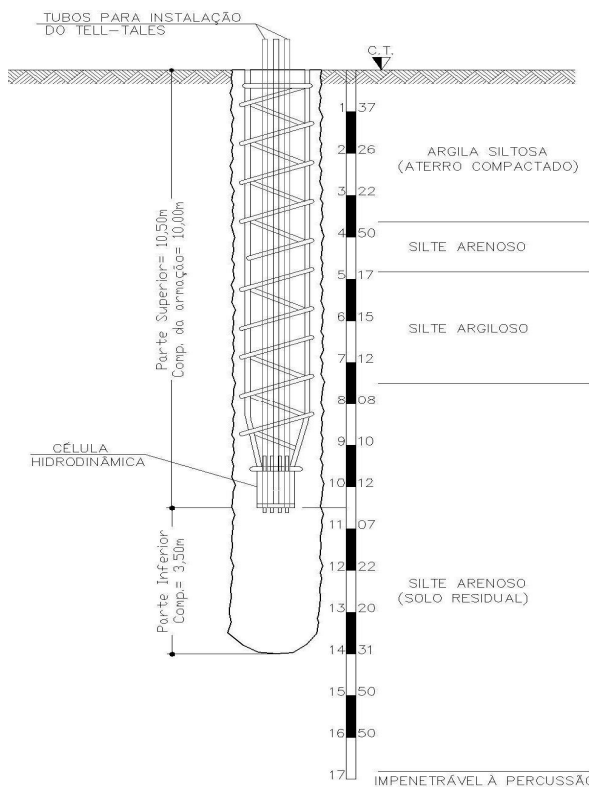


Figura 1. Esquematização da estaca no perfil apresentado pela sondagem FA24

O ensaio consiste basicamente na aplicação de carga na célula através de pressurização de fluido hidráulico, que solicita o segmento inferior ao equipamento (fuste e ponta), fazendo-a reagir contra o segmento superior (fuste), com uma força igual, porém de sentido contrário. Para escolha da profundidade de implantação da célula de carga, busca-se o equilíbrio entre a resistência lateral do fuste acrescido do peso próprio da estaca (parte superior) e a parte inferior a esta, que apresenta resistências do atrito lateral e ponta. Os recalques do segmento inferior são medidos através de tell-tales, previamente instalados no equipamento a ser testado. O deslocamento do fuste é medido através do movimento ascendente da parte superior da estaca, através de extensômetros com precisão de leitura direta de 0,01mm.



Figura 2. Instalação da célula hidrodinâmica na armação da estaca



Figura 3. Prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica em andamento

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA PROVA DE CARGA

A prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica foi realizada com o intuito de verificar os parâmetros adotados em projeto para o dimensionamento das fundações e, analisar qual formulação semi-empírica de cálculo de capacidade de carga mais se adequa para o estaqueamento e região estudada.

A estaca ensaiada é do tipo hélice contínua com diâmetro 60cm e profundidade de 14m. A armação longitudinal é composta por 7 barras de aço $\phi 16,0\text{mm}$, comprimento 10 metros e, transversal de $\phi 8,0\text{mm}$ a cada 20 cm. O concreto utilizado possui 20 MPa de resistência à compressão e abatimento igual a 25 ± 3 cm.

A prova de carga estática foi realizada com o processo de carregamento rápido, com carga máxima de 2489,2kN divididos entre parte superior (fuste) e parte inferior (fuste e ponta). A célula de carga foi implantada ao fim do trecho armado, aos 10 metros de profundidade, dividindo assim a estaca em dois segmentos: superior de fuste com 10,5m de comprimento e inferior de fuste de 3,5m mais resistência de ponta.

Durante o ensaio foram atingidos os 20 estágios previstos por norma, havendo extensão a 28 estágios até alcance da carga de ruptura, inicialmente observada pela não estabilização do deslocamento do segmento inferior com consequente exaustão das resistências do domínio de transferência de carga pelo atrito lateral e do domínio de transferência de carga pela ponta. A tabela abaixo apresenta os valores dos carregamentos atingidos no último estágio do ensaio estático e os valores corrigidos.

Tabela 1. Dados dos carregamentos do estágio final do ensaio

Carga Total (kN)		Carga Parte Superior (kN)		Carga Parte Inferior (kN)		Pressão Manômetro (kgf/cm ²)
Corrigida	Aplicada	Corrigida	Aplicada	Corrigida	Aplicada	
2446,8	2489,2	1173,9	1244,6	1272,9	1244,6	490,0

Devido à metodologia da prova de carga bidirecional, onde a célula de carga é implantada dentro do fuste da estaca, neste caso à 10m de

profundidade, se faz necessário correção dos valores lidos durante a instrumentação. Nas cargas corrigidas, o peso flutuante do segmento superior, considerando a densidade de concreto armado (25kN/m^3) acima da célula de carga, foi descontado das cargas mobilizadas para o fuste, devido ao carregamento ascendente. À carga da ponta, houve acréscimo do peso próprio do segmento posicionado abaixo da célula expansiva.

A partir dos resultados é possível avaliar o comportamento do trecho superior e o trecho inferior separadamente, como demonstrado na figura abaixo, representada por dois gráficos de carga x recalque.

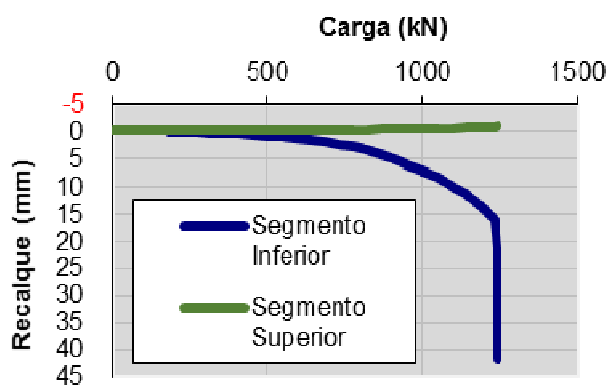


Figura 4. Curva carga x recalque do trecho superior (verde) e curva carga x recalque do trecho inferior (azul)

A partir dos resultados da figura 4 e da tabela 1, verifica-se pequeno deslocamento da parte superior (ordem de 0,77mm) com carregamento corrigido de 1173,9kN. Já o segmento inferior, apresenta deslocamento residual de 34,57mm com carregamento corrigido de 1272,9kN.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Análise dos resultados dos recalques obtidos no ensaio

De Beer (1988) define ruptura convencional como sendo a carga correspondente a um deslocamento da ponta (ou do topo) da estaca de 10% de seu diâmetro, no caso de estacas de deslocamento e de estacas escavadas em argila e, de 30% de seu diâmetro no caso de estacas escavadas em solos granulares. O conceito de ruptura física é definido como o limite da

relação do acréscimo do recalque da ponta da estaca pelo acréscimo de carga, tendendo ao infinito.

A realização de provas de carga pode apresentar, em boa parte das vezes, resultados em termos de gráficos carga vs recalque, que não demonstram condições claras de ruptura, havendo a necessidade de interpretação dos dados por métodos numéricos de extrapolação, para indicação de valor arbitrário que caracterize ruptura física ou convencional da peça de fundação.

Na análise dos resultados obtidos da instrumentação e retratado no item anterior, percebe-se que apesar do deslocamento lido no estágio 28 representar apenas 5,76% do diâmetro da estaca, quando atingido o carregamento corrigido de 1272,9kN (pressão equivalente exercida de 490 kgf/cm²), a não estabilização do deslocamento do trecho inferior se tornou evidente, sendo assim caracterizada exaustão da resistência do segmento inferior do elemento de fundação. No gráfico carga x recalque (figura 4) a ruptura é representada pela inflexão acentuada da curva.

O segmento superior por sua vez, apresentou deslocamento ascendente praticamente nulo (0,77mm), não tendo sido alcançado nitidamente o patamar de carregamento máximo.

Haja visto que as tensões atuantes no corpo do elemento excedem em quase 2,5 vezes a resistência a compressão do concreto utilizado, 200 kgf/cm², foi suscitada a possibilidade de ter havido punção do interior do fuste da estaca e a cizão da peça em dois segmentos distintos como considerado hipoteticamente. Motivada pelos fatores retromencionados, foi realizada escavação adjacente à estaca, alcançando a cota de instalação da célula confirmação da divisão do corpo, integridade dos segmentos e recalque lido pela instrumentação, como mostrado a seguir nas figuras 5, 6, 7 e 8. Posteriormente, a célula foi extraída para perícia e avaliação de sua integridade.



Figura 5. Escavação adjacente a estaca ensaiada



Figura 6. Verificação da divisão do elemento em dois segmentos distintos



Figura 7. Verificação visual do seccionamento da estaca



Figura 8. Extração da célula de carga e verificação da integridade do elemento de fundação.

5.2 Análise comparativa de métodos semi-empíricos de cálculo de capacidade

Neste item são apresentados os resultados de previsão de carga de ruptura calculados com base em métodos semi-empíricos e comparados com os resultados experimentais obtidos na instrumentação somente para o segmento inferior, que veio a apresentar ruptura convencional. Os cinco métodos aqui estudados: Aoki-Velloso, Texeira, Décourt-Quaresma, Pedro Paulo Costa Velloso e Urbano Rodrigues Alonso são de prática corrente na engenharia geotécnica brasileira. Na tabela a seguir, são apresentados os valores de carga de ruptura total (P_T), lateral (P_L) e ponta (P_P), obtidos através das formulações semi-empíricas com base no ensaio SPT (FA24) supracitado no item 3.2 e resultado oriundo da prova de carga.

Tabela 2. Cargas de ruptura calculada pelos métodos semi-empírico e obtido na prova de carga no trecho inferior

Método	Carga de ruptura calculada			Prova de Carga P (kN)	P/ P_T (%)
	P_T (kN)	P_L (kN)	P_P (kN)		
Aoki Velloso (1975)	2934	313,6	2620,4		0,43
Teixeira (1996)	1539,1	414,6	1124,5		0,83
Décourt e Quaresma (1996)	1126,1	411,5	714,5	1272,9	1,13
P.P.C.V (1981)	2701,3	704,9	1996,4		0,47
U.R. Alonso (1996)	1494,1	446,1	1048		0,85

Na figura 9 é apresentado o gráfico de relação entre o valor obtido pela instrumentação e os valores encontrados pelas formulações, P/P_T .

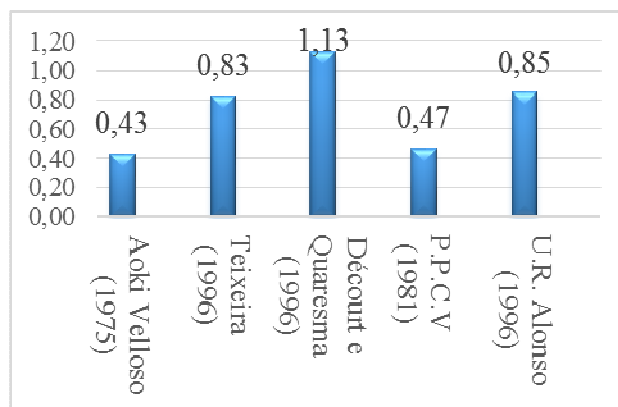


Figura 9. Relação entre a carga de ruptura do ensaio e a carga ruptura prevista por métodos semi-empíricos para o trecho inferior

Analisando a tabela 2 e figura 9, observa-se que os valores de ruptura obtidos pelos métodos de Aoki-Velloso, Pedro Paulo Costa Velloso (P.P.C.V), Teixeira e U.R. Alonso apresentaram relações menores do que 1 e portanto, superestimados. Os métodos que apresentaram resultados de maior discrepância foram os de Aoki-Velloso e P.P.C.V, variando 57% e 53% maiores que os da instrumentação, seguidos por Teixeira e Alonso, 17% e 15%. O método de Décourt e Quaresma foi o que mais se aproximou do resultado encontrado e o único que apresentou valor subestimado, aproximadamente 13% menor do encontrado.

O segmento superior não recebeu análise comparativa por não sido observada ruptura convencional e pela incerteza se os métodos convencionais de extrapolação se aplicariam a esse trecho, visto que a curva carga vs recalque ascendente (figura 4) deveria ser representada por uma reta, sem a inflexão característica da mobilização do domínio da ponta do elemento.

5.3 Aplicação do conceito de rigidez no segmento inferior da estaca

Neste trabalho, visando a mensuração das cargas resistentes imputadas ao atrito lateral e à ponta, como forma de confirmar o melhor método semi-empírico de predição de carga de interação estaca-solo, foi aplicado o conceito de rigidez no segmento inferior do elemento

ensaiado.

A metodologia desenvolvida pelo engenheiro Luciano Décourt, com base no conceito de rigidez, permite, através da análise do comportamento da curva carga vs recalque extraída de uma prova de carga estática, obter a identificação discreta da parcela do domínio de transferência de carga pela ponta e pelo atrito lateral.

Décourt (1996) define rigidez de uma fundação (RIG) como a relação entre a carga (Q) a ela aplicada e o recalque (s) produzido pela aplicação dessa carga. Define-se a ruptura física (Q_u) como sendo a carga correspondente a um valor de rigidez nulo.

$$RIG = \left(\frac{Q}{s \rightarrow zero} \right) \quad (1)$$

Para aplicação do método de rigidez, primeiramente determina-se o ponto de regressão, após estabelecidas correlações logarítmicas com a carga e o recalque. O ponto de regressão será o par de pontos, Log Q e Log s, que apresentará o melhor ajuste de curva (R), também sendo dependente da perícia do projetista com o conceito de rigidez e as experiências anteriores de aplicação do método. O ponto de regressão (R) escolhido é elevado ao quadrado (R^2) para possibilitar maior evidência à variação dos valores deste. A figura 10 apresenta a curva carga vs recalque do trecho estudado com destaque ao ponto de regressão selecionado.

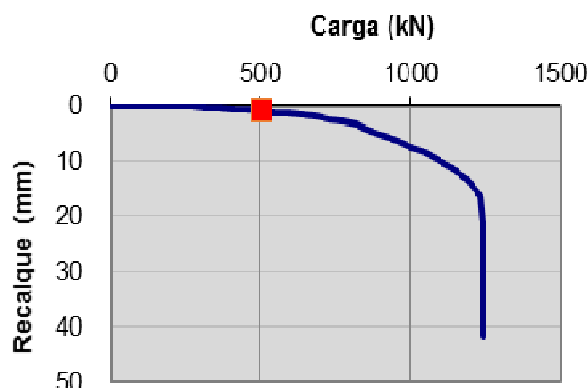


Figura 10. Curva carga vs recalque do segmento inferior e indicação do ponto de regressão

A determinação do gráfico de rigidez é definida pela equação 1 e a partir dos valores de carga e recalque obtidos na instrumentação é

possível determinar os pontos do gráfico de rigidez, conforme apresentado na figura 11.

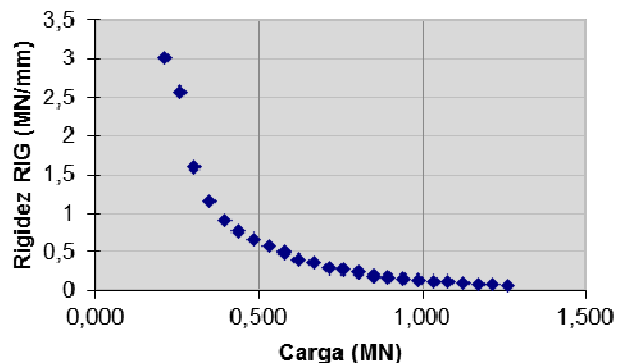


Figura 11. Gráfico de rigidez

Neste método, os domínios de ponta e atrito são discernidos entre si pela mudança de trajetória observada pela seleção do ponto de regressão, salientando a importância da perícia do projetista nesta etapa. A linearização da curva até o ponto de regressão permite a indicação da suposta equação da reta que governa a relação logarítmica carga x recalque:

$$\text{Log } Q = -0,354 - 0,396 \text{ Log RIG} \quad (2)$$

Com os pontos referentes aos carregamentos aplicados é possível a identificação das resistências de ponta e atrito no gráfico de rigidez, e eventual indicação das cargas discretizadas para estes dois domínios: ponta equivalente à 774,3kN e atrito equivalente à 498,6kN. O método semi-empírico de Decourt e Quaresma previu para este mesmo segmento, respectivamente para os domínios de ponta e atrito, 714,5kN e 411,5kN.

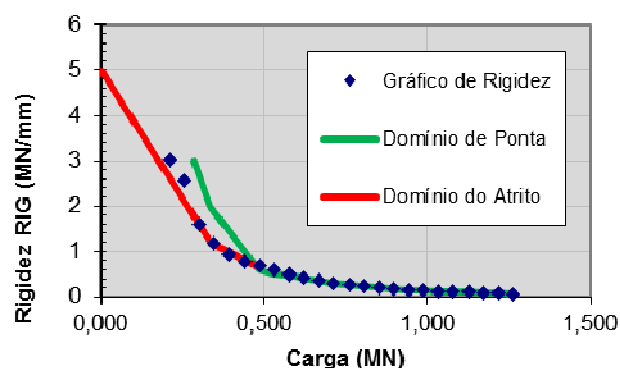


Figura 12. Domínio da ponta no gráfico de rigidez

A curva carga x recalque ajustada pelo Método de Rigidez é apresentada a seguir.

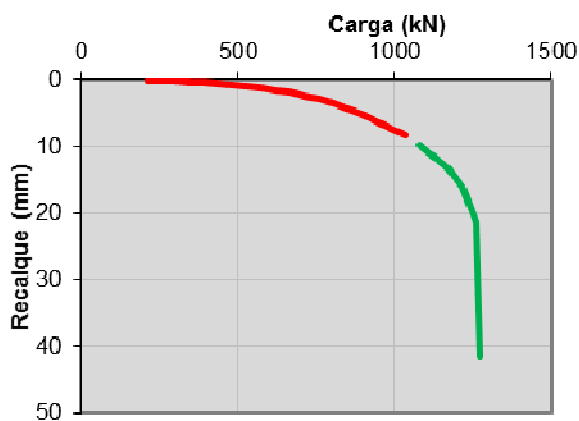


Figura 13. Curva carga x recalque ajustada pelo Método de Rigidez, domínio do atrito (vermelho) e domínio da ponta (verde)

6 CONCLUSÃO

Do presente trabalho, conclui-se que a execução de prova de carga estática empregando-se célula hidrodinâmica bi-direcional apresentou-se como alternativa adequada e racional para indicação das capacidades de carga do elemento ensaiado e que o método semi-empírico de previsão de carga de interação estaca-solo preconizado por Decourt e Quaresma se mostrou, entre outros, o de melhor acurácia, inclusive quanto às magnitudes de resistência dos domínios de ponta e atrito.

Resalta-se ainda que, os valores de ruptura previstos para o segmento inferior, norteados pela média dos métodos semi-empíricos analisados e que foram levados em consideração para definição da cota de instalação da célula, suscitaram ter havido superestima da ponta do elemento, visto o comportamento dúctil apresentado pelo ensaio e os resultados observados para as provas de carga das outras cinco estacas ensaiadas, onde não observou-se ruptura. Tal observação pode ainda levantar dúvidas sobre a confiabilidade do apoio do elemento, face à resistência indicada na sondagem de referência (NSPT = 31 golpes/30cm) para a cota de paralisação da estaca. Silva (2015) cita a baixa confiabilidade na capacidade de ponta das estacas hélice contínua oriunda da sua metodologia executiva e, recomenda procedimentos para melhoria da carga resistente.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Construtora Atrium, através dos engenheiros Sérgio Castilho e Délio Moreira, à Arcos Engenharia, empresa responsável pela execução do ensaio, além da empresa JD Fundações pela colaboração na coleta de dados para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Execução de Sondagem de Simples Reconhecimentos de Solos*. Rio de Janeiro, 2001. 17p.
- Campos, G. O., Silveira, J. E. S., Rodrigues, A. O., Resende, A. S. . *Procedimento e resultados para execução e avaliação da prova de carga com célula expansiva*. Seminário de Engenharia de Fundações especiais e geotecnia. SEFE, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- Cintra, J. C. A. e Aoki, N. (2010) *Fundações por Estacas Projeto Geotécnico*, 1. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 96 p.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Tsuha, C. H. C. E Giacheti, H. L. (2013) *Fundações Ensaios Estáticos e Dinâmicos*, 1. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 144 p.
- Melo, B. M. (2009) *Análise de Provas de Carga à Compressão à Luz do Conceito de Rigidez*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 250 p.
- Silva, P. H. C. A. F.. *Célula Expansiva Hidrodinâmica – Uma Nova Maneira de Executar Provas de Cargas*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. COBRAMSEG, Porto Alegre, RS, Brasil, 1986.
- Silva, C. M., Carvalho, J. C., Alledi, C. T. D. B., Albuquerque, P. J. R.. *Estacas tipo hélice contínua e sua capacidade de ponta*. Seminário de Engenharia de Fundações especiais e geotecnia. SEFE, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (2011) *Fundações*, 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 569 p.
- Wolney, D.. *Provas de carga: Pormenores e comparativos técnicos*, Ano 5, nº 47, Agosto 2014, Revista Fundações e Obras Geotécnicas, Brasil, pag. 32 à 39.
- Wolney, D.. *Provas de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica*, Ano 4, nº 36, Setembro 2013, Revista Fundações e Obras Geotécnicas, Brasil, pag. 24 à 32.