

Aplicação, Análise e Interpretação do Ensaio de Prova de Carga Estática, realizado pelo método BIDIRECIONAL.

Felipe Vianna Amaral de Souza Cruz
GeoEstática Consltoria e Engenharia, Brasil, felipe@geoestatica.com.br

RESUMO: Este artigo contempla uma introdução à história, análise e interpretação do ensaio de Prova de Carga Estática pelo método BIDIRECIONAL com a utilização de células estáticas descartáveis (CED). O ensaio bidirecional é hoje a metodologia de prova de carga estática mais utilizada no mundo e vem crescendo de forma significativa no Brasil. O método consiste na instalação de uma ou mais células estáticas descartáveis (CED) no corpo do elemento estrutural em uma profundidade dimensionada; as mesmas, quando acionadas hidraulicamente, fazem a porção abaixo das células, resistência de ponta mais atrito lateral da porção, reagir contra a porção acima das células, atrito lateral do trecho superior. O ensaio bidirecional apresenta como resultado as curvas carga x recalque do topo e da base, porção superior e inferior da estaca, de forma direta; já a curva carga x recalque equivalente à estaca completa, depende de extrapolação e conversão de dados. Concluindo, serão apresentados diferentes métodos de interpretação e conversão, entre eles, os métodos apresentados por Da Silva (1983 e 1986) e Massad (2015), demonstrando suas comprovações teóricas e numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática, Ensaio Bidirecional, Célula Expansiva Hidrodinâmica, Análise, Interpretação.

1 INTRODUÇÃO

O Ensaio de Prova de Carga Estática através do método BIDIRECIONAL vem sendo realizado desde 1980 no Brasil. O sistema consiste em posicionar um ou mais conjunto de CED ao longo do fuste da estaca e aplicar carga em sentidos opostos buscando o equilíbrio das tensões atuantes no fuste e ponta da estaca ensaiada.

Esse ensaio idealizado por Da Silva e divulgado em 1983 é bastante similar ao sistema proposto por J. Osterberg, utilizando as O'Cell. Ambos os sistemas foram patenteados, a O'Cell por Osterberg e as células expansivas por Da Silva, sendo a primeira posterior à segunda. Schmmertmann & Hayes, em 1997, mencionaram que a O'cell foi utilizada pela primeira vez, experimentalmente, em 1984 e comercialmente em 1987 e até 1996 já haviam sido realizados mais de duzentos ensaios com a O'cell nos Estados Unidos e no sudeste da Ásia.

No Brasil esses ensaios foram inicialmente

denominados como Prova de Carga Arcos, PCA ou provas de carga com células expansivas hidrodinâmicas, "expancel", e posteriormente denominados Ensaio Bidirecionais, nomenclatura adotada mundialmente independente do nome da CED utilizada.

Apesar do pioneirismo brasileiro na utilização deste tipo de ensaio, há poucos trabalhos referindo-se ao comportamento de estacas moldadas "in loco" ensaiadas através dessa metodologia.

2 PROVA DE CARGA ESTÁTICA NO BRASIL

2.1 Método Convencional

As provas de carga são utilizadas na geotecnia para se estudar o comportamento estaca-solo, verificam aspectos importantes como a capacidade de carga, deslocamentos do elemento da fundação, e ainda, no caso das estacas instrumentadas, a transferência de carga

ao longo do fuste.

A prova de carga é um ensaio que visa determinar, por meios diretos, as características de deslocamento ou resistência do conjunto terreno e elementos estruturais da fundação.

Os ensaios são realizados para aferir que não irá ocorrer ruptura para a carga admissível da fundação dimensionada; avaliar a integridade estrutural do elemento da fundação (de forma indireta); determinar qual a carga de ruptura, realizando o rompimento ou modelos matemáticos de extrapolações; determinar o comportamento carga x deslocamento de um elemento de fundação, especialmente na região da carga admissível.

A prova de carga estática, realizada pelo método convencional é executada através de um carregamento aplicado no topo da estaca ensaiada. Esse carregamento reage contra um sistema de reação (Figura 1), permitindo a compressão axial no bloco de coroamento da estaca.

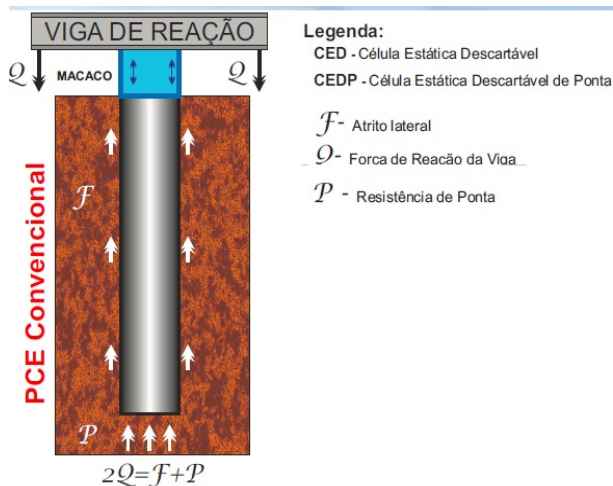


Figura 1. Sistema de reação do método Convencional.

O ensaio é definido na aplicação de sucessivos estágios de carga à estaca, conjuntamente com a leitura dos recalques correspondentes; para aplicar a carga é necessário utilizar um sistema de reação que suporte o carregamento dimensionado.

Dependendo do sistema de carregamento, o ensaio pode ser determinado como rápido, lento ou misto, conforme a norma vigente NBR 12131:2006.

O ensaio de prova de carga estática, realizado pelo método convencional nos fornece a curva de carga x recalque e a

integridade (indireta) do elemento testado, já que supõe que se o elemento resiste à carga é porque ele está íntegro.

É um ensaio muito estudado e muito difundido no Brasil, com inúmeras análises de ruptura fundamentadas em seus resultados.

2.2 Método Bidirecional

O ensaio de prova de carga estática pelo método bidirecional vem sendo realizado desde 1980, no Brasil, pelo Engenheiro Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva. O sistema consiste em posicionar uma ou um conjunto de CED ao longo do fuste da estaca e realizar a compressão de forma bidirecional, conforme publicado em Da Silva (1983 e 1986).

Devido ao sentimento de relutância de executores de fundação e construtores em realizar ensaios em fundações pelo alto valor e prazo estendido de execução, o Eng^o Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva observou a necessidade de criar instrumentos de controle de desempenho de fundações que permitisse quantificar a resistência do solo e das fundações simultaneamente. Essa metodologia deveria ser dinâmica e deveria agradar os construtores, com um menor impacto possível no custo do empreendimento e no seu cronograma, atendendo também a comunidade geotécnica, fornecendo resultados relevantes e confiáveis.

Obviamente que qualquer tentativa nesse sentido teria que eliminar nos ensaios convencionais, os fatores que estariam impactando os seus custos e prazos de execução. Essa análise inicial evidenciou que a utilização de estacas mais tirantes de reação necessitariam ser excluídas da metodologia de ensaio, mas precisava-se pensar em algo que pudesse servir como reação para a prova de carga.

A primeira solução lógica foi utilizar o próprio elemento de fundação como reação, mas isso só seria possível em estacas moldadas “in loco” e/ou tubulões escavados e concretados a céu aberto que possuíssem um comprimento específico, capaz de conseguir reagir o fuste versus a base da fundação. Para isso, seria necessária a instalação de um macaco hidráulico dentro da estaca, numa posição tal

que aproveitasse a máxima capacidade do atrito lateral para reagir contra sua base e pequena parte do fuste colocado sobre ela.



Figura 2. Prova de Carga pelo método Convencional reaginado contra cordoalhas.

Além disso, seria necessário desenvolver dispositivos que instrumentassem a estaca, quanto ao seu deslocamento com o máximo de precisão.

Nessa primeira ideia, observou-se o primeiro problema, o custo elevado de perder um macaco hidráulico concretado no fuste da estaca. Com isso o Eng^o Pedro Elísio começou a pensar em como reduzir o custo da fabricação do macaco hidráulico e a redução veio com a percepção de que o mesmo só precisaria abrir e fechar uma única vez. Assim surgiu a Célula Expansiva Hidrodinâmica, que é a Célula Estática Descartável batizada pelo Eng^o Pedro Elísio e com o seu baixo custo, o ensaio passou a ser viável economicamente.

Depois de vencidas as dificuldades de se encontrar o material ideal para a confecção da CED e na adequação do sistema de vedação dos cilindros através dos testes realizados em simuladores, partiu-se para outra etapa do projeto, a instrumentação dos deslocamentos a grandes distâncias, justamente a questão mais importante e delicada. Pelo entendimento do Engenheiro Pedro Elísio a instrumentação deveria ser feita aproveitando-se o tubo hidráulico que conectava a célula, instalada ao longo do fuste da estaca a bomba de pressão. Isso foi possível através da colocação de uma

haste metálica, que fica apoiada no fundo da célula, por dentro do tubo e conectá-la a um gradiente hidráulico, fixado na extremidade do tubo de ligação célula/bomba. Com o desenvolvimento do gradiente hidráulico, conseguiu-se um circuito fechado e um sistema estanque a cada estágio de pressão.

Como as células usam água ao invés de óleo para pressurização, é possível preencher as fissuras ocasionadas pelo ensaio bidirecional com o preenchimento da célula com calda de cimento e como o circuito é fechado, podemos confirmar o preenchimento com a saída das impurezas pelo sistema ao realizar a injeção da calda.

Ensaio Bidirecional

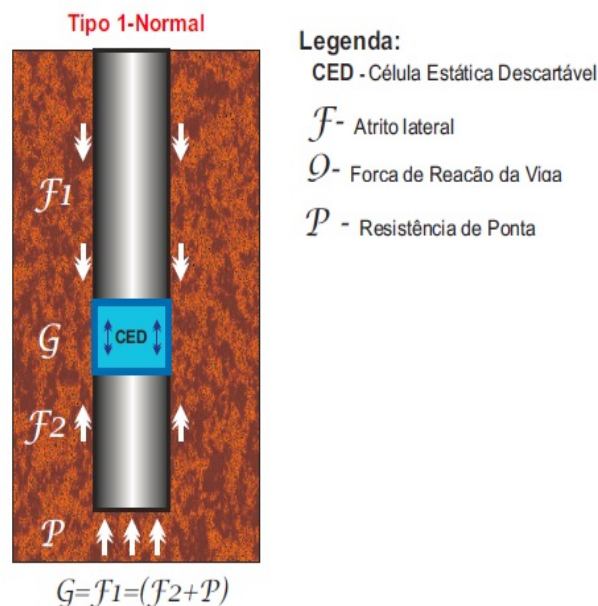


Figura 3. Desenho esquemático do Ensaio Bidirecional.

Além das hastes metálicas, denominadas “tell tales”, foram confeccionadas conexões especiais que permitem a abertura das CED com os tubos pressurizados conectados a bomba.

Toda tubulação conectada às células é preenchida por água, para evitar a contaminação do solo, durante o processo de injeção.

O princípio da prova de carga estática pelo método bidirecional é executar um carregamento, no ponto de equilíbrio das tensões da estaca ensaiada, atrito lateral do trecho acima da célula contra a resistência de ponta mais o atrito lateral do trecho abaixo da

célula, permitindo a análise do comportamento de carregamento estático do elemento testado.

3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO BIDIRECIONAL

3.1 Histórico da análise

Segundo Da Silva (1983), o ensaio bidirecional nos fornece três tipos de gráficos distintos.

- Uma curva carga-recalque do topo (fuste) da estaca;
- Uma curva carga-recalque da base (fuste + ponta) da estaca;
- Uma curva carga-recalque da estaca, onde se soma causa e efeitos.

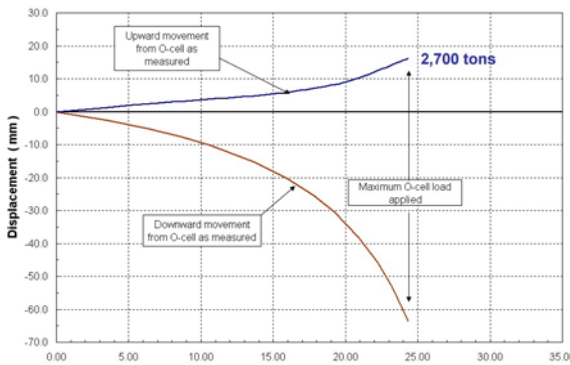


Figura 4. Curvas carga x recalque do topo e da base.

A ação e reação fornecem variação de carga de zero a $2F$, que provocam recalques totais, resultantes, em cada estágio do recalque do fuste adicionado. Segundo Da Silva (1983), para se converter as curvas bidirecionais em curva única carga-recalque da estaca precisa-se seguir os seguintes passos:

- Verificar na curva carga-recalque do topo (fuste), qual carga equivale ao recalque x .
 - Procurar na curva carga-recalque da base (fuste + ponta), qual carga provocou o mesmo recalque x .
 - Plotar a curva final da estaca obtida através da somatória de cargas, que provocaram o mesmo recalque do topo e da base.
- É o que Da Silva (1983) denominou de Curva Ajustada.

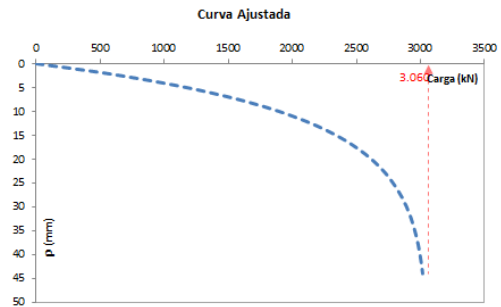


Figura 5. Curva carga x recalque ajustada.

Nem sempre as rupturas são equivalentes e não se encontra os mesmos recalques nas curvas carga-recalque do topo e da base, nesses casos, usam-se métodos de extrapolação consagrados para obter os mesmos recalques e somar suas cargas resultantes.

A curva ajustada de Da Silva é a transposição do resultado método bidirecional para o resultado do convencional. Tal estudo se fez necessário para aprovação da metodologia pela comunidade geotécnica. Dessa forma não se perdem teses, levantamentos, estudos e formulações realizadas com base no ensaio convencional.

A curva ajustada pode ser considerada a favor da segurança, pois é comum que apenas um dos segmentos das estacas atinja a carga última.

Para viabilizar a substituição da curva carga x recalque da metodologia convencional, pela curva ajustada da metodologia bidirecional é necessário que, além da estaca ser totalmente rígida, sejam similares as compressões atuando simultaneamente na ponta e no topo e que o deslocamento da ponta seja equivalente ao deslocamento do topo, no que diz respeito ao atrito lateral.

3.2 Análise matemática

3.2.1 Encurtamento da estaca durante o teste convencional

Segundo MASSAD (2015), para estimar o encurtamento de estacas verticais, sob compressão axial de carga no topo da estaca (P_0), não necessariamente levada à ruptura, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$\Delta e = \frac{Q_p}{K_r} + c \cdot \frac{A_l}{K_r} \quad (1)$$

Onde Q_p e A_l , são cargas de ponta e atrito lateral, respectivamente.

$$P_o = Q_p + A_l \quad (2)$$

K_r é a rigidez da estaca, com uma altura h , área da secção transversal S e módulo de elasticidade E , dada por:

$$K_r = \frac{E \cdot S}{h} \quad (3)$$

Segundo Lovell (1979), a razão entre o valor médio da carga lateral transferido (a zona sombreada da Figura 6 a), sobre a altura da estaca) e a carga total do eixo (A_l), seria:

$$c = \frac{A_l - \bar{A}_l}{A_l} \quad (4)$$

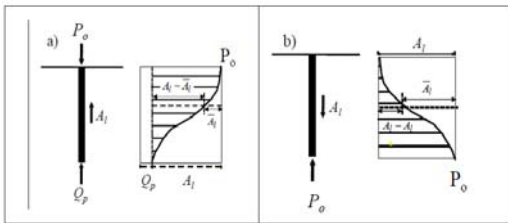


Figura 6. a) Distribuição de carga teste convencional b) Distribuição de carga teste bidirecional

O coeficiente c depende da distribuição da unidade de atrito lateral do eixo (f). Se a carga do eixo está totalmente mobilizada ($A_l = A_{lr}$), então $c = 0,5$ para $f_u =$ constante junto profundidade e $c = 2/3$ para f_u aumentando linearmente com a profundidade.

Valores de c para outras formas simples de distribuição de f_u pode ser obtida rapidamente utilizando os abácos preparados por Leonards e Lovell (1979), ou a equação proposta por Fellenius (1980), mostrada na Figura 7.

Note-se que h_1 e h_2 são as espessuras das camadas menos resistentes e mais resistentes, respectivamente, e f_{u1} e f_{u2} são os atritos dos eixos correspondentes.

3.2.2 Encurtamento da estaca durante o teste Bidirecional.

Ainda segundo MASSAD (2015), para carregamentos realizados pelo método Bidirecional, a equação (1) muda para:

$$\Delta e = c' \cdot \frac{A_l}{K_r} \quad (5)$$

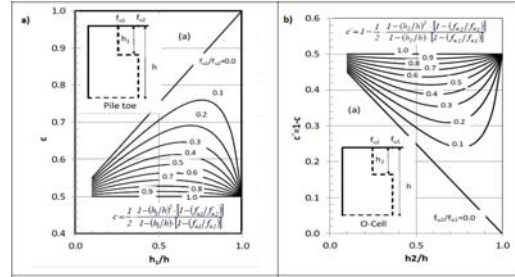


Figura 7. a) Abáco teste convencional b) Abáco teste bidirecional.

O c que é fornecido pela Equação (4) está relacionado com a Figura 6 b). No outro abáco semelhante pode ser interpretado como c' , mostrado na Figura 7 b), com a equação associada.

Note-se que agora h_1 e h_2 são as espessuras das camadas mais resistentes e menos resistentes, respectivamente, e f_{u1} e f_{u2} são os atritos correspondentes.

Comparando as Figuras 6 a) e 6 b), com as Figuras 7 a) e 7 b), pode ser visto que:

$$1 = c + c' \quad (6)$$

Note-se também que, em geral, $c' < c$, isto é, a compressão elástica em estacas sob as cargas acima das CED é inferior que o valor correspondente para as cargas abaixo das células.

Isto é assim porque as CED primeiro mobilizam os solos mais resistentes para depois mobilizar os menos resistentes.

3.2.3 Simulação matemática do teste Bidirecional.

Para a simulação de ensaio bidirecional, um modelo matemático desenvolvido por Massad (1995) para ensaios convencionais foi utilizado. Baseando se nas relações Cambefort modificadas que são realizadas através de vários aspectos dos fenômenos de transferência de carga, como a ruptura progressiva, devido às cargas de compressão e as tensões residuais,

devido à condução ou cargas subsequentes. Como as estacas no presente documento são supostamente para serem usadas no local e submetidas a um carregamento único, tensões residuais foram ignoradas.

Um coeficiente que mede a rigidez relativa do sistema de estacas-solo foi introduzido e é definido como:

$$K = \frac{A_{lr1}}{K_r \cdot \gamma} \quad (7)$$

Onde A_{lr} é a carga do atrito final; γ_1 , o deslocamento da estaca, da ordem de alguns milímetros, necessário para mobilizar resistência por atrito lateral. O modelo deu um novo discernimento sobre o comportamento da estaca e levou a uma nova classificação, no que diz respeito aos valores de k : "curta" ou rígida ($k \leq 2$); intermediária ($2 < k < 8$); e "longa" ou compressível ($k \geq 8$).

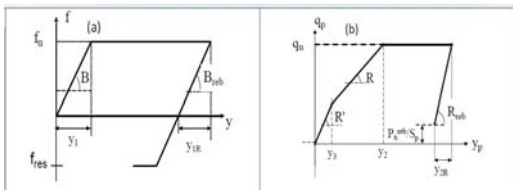


Figura 8. Coeficientes de Camberfort modificados a) Atrito Lateral b) Ponta.

Para simular o ensaio bidirecional, este modelo foi alterado incorporando uma camada superior pouco resistente (f_{u2}) sobre um solo mais profundo e mais resistente (f_{u1}). Para cada camada ao longo do fuste, haverá uma correlação como mostra a Figura 8. Usando subscritos 1 e 2 para distinguí-los:

$$f_{u1} \geq f_{u2} \quad e \quad A_{lr} = A_{lr1} + A_{lr2} \quad (8)$$

Para ambas as camadas assumiu-se o valor de γ_1 (ver Figura 8 (a)), de modo que o valor K (Equação 7), pode ser associado a todo o subsolo ao longo do fuste da estaca. Note-se que K_r na equação (7) refere-se à altura da estaca acima das Células Estáticas Descartáveis (CED).

Em muitos dos ensaios bidirecionais foram simulados, variando a relação f_{u1}/f_{u2} e h_2/h , tal como ilustrado nas Figuras 9 e 10. Em cada

caso, o solo abaixo da célula foi o mesmo, obedecendo a relação da Figura 8 (b), com os seguintes parâmetros:

$$\gamma_3 = \gamma_1 \quad \text{Com isso} \quad \frac{R' \cdot S_p}{K_r \cdot K} = 0,80 \quad e \quad R'/R = 5 \quad (9)$$

Onde S_p é a área da seção transversal da ponta da estaca.

Os resultados que são apresentados nas Figuras 11 e 12 ressaltam que as curvas do topo, normalizada para os ensaios bidirecionais são aproximadamente invariantes no que diz respeito ao $c' \cdot k$, independentemente da distribuição de resistências de atrito lateral.

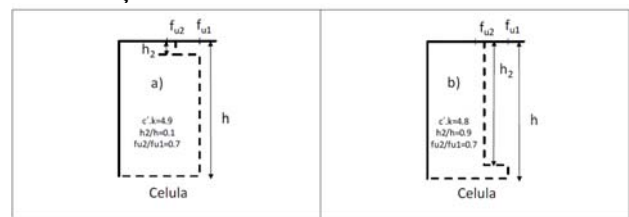


Figura 9. Distribuição do Atrito ao longo da profundidade.

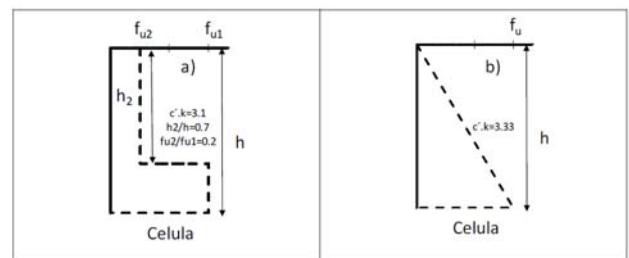


Figura 10. Distribuição do Atrito ao longo da profundidade.

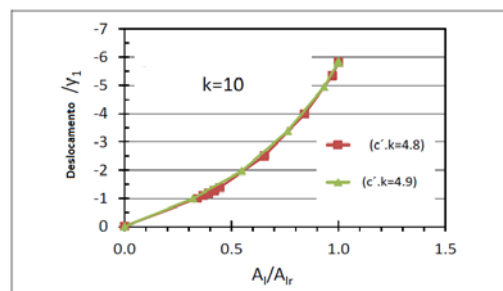


Figura 11. Simulação de ensaios bidirecionais em estacas profundas.

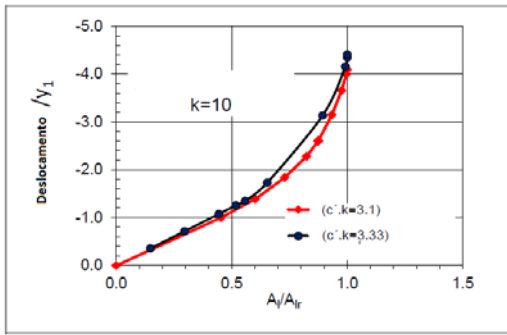


Figura 12. Ensaios bidirecionais com diferente distribuição de atrito lateral.

3.2.3 Convencional x Bidirecional

Para se derivar as fórmulas aproximadas com o intuito de determinar uma curva equivalente, serão feitas algumas considerações com base na Figura 13, supondo que o deslocamento ascendente foi medido na parte do topo (acima da célula). O ponto P será o ponto da curva ascendente de um ensaio bidirecional com os γ_f e A_l como coordenadas.

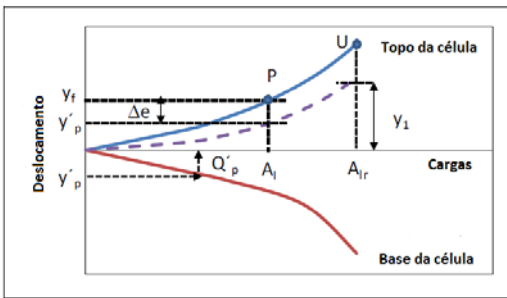


Figura 13. Curva esquemática de um ensaio bidirecional – Medições do gráfico do topo (acima da célula).

Abaixo será demonstrado o encurtamento elástico do atrito lateral e γ'_p , como uma medida aproximada do deslocamento do topo da estaca:

$$\Delta e = c' \cdot \frac{A_l}{K_r} \quad (10)$$

$$\gamma'_p = \gamma_f - \Delta e \geq 0 \quad (11)$$

Para simular o ensaio convencional, realizado a partir do topo da estaca, γ'_p será admitido como o deslocamento da ponta da estaca; estando associado a Q'_p , como indicado na Figura 13.

Finalmente, os pontos γ_0 e P_0 da curva equivalente, serão determinado pelas equações abaixo:

$$\gamma_0 = \gamma'_p + \Delta e \cdot \frac{c}{c'} + \frac{Q_p}{K_r} \quad (12)$$

$$P_0 = Q'_p + A_l \quad (13)$$

Se o deslocamento do topo da estaca puder ser observado, ao invés do movimento da parte superior da célula, o processo é análogo, como exibido na Figura 14. E finalmente, se os movimentos do topo da estaca e na parte superior da célula podem ser medidos, o Δe medido é usado ao invés do valor da Eq. (10).

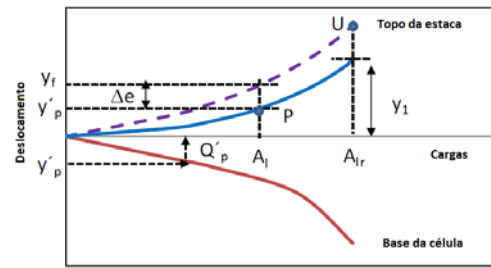


Figura 14. Curva esquemática de um ensaio bidirecional – Medições do gráfico do topo (Topo da estaca).

4 CONCLUSÃO

Conclui-se nesse trabalho que o método bidirecional de realizar prova de carga estática teve o pioneirismo brasileiro, apesar de ter sido bastante difundido, estudado e consolidado nos Estados Unidos.

O resultado que esse artigo considera mais gratificante é poder concluir que um tipo de prova de carga, como o método bidirecional, apesar de pouco conhecida e divulgada no país é facilmente correlacionada ao método convencional com altos índices de convergência.

O ensaio de prova de carga estática, realizado pelo método bidirecional, permite que se meçam curvas carga-recalque relacionadas à base e carga-recalque relacionadas ao topo, podendo assim dar uma análise semelhante ao ensaio de prova de carga realizado pelo método convencional, caso seja usada a curva corrigida e permitindo análise mais detalhada, podendo nos fornecer dados de distribuição de carga ao longo do fuste e a capacidade de carga da ponta, a depender da quantidade de células e localização das instalações.

Pode-se concluir também que a distribuição diferente de resistência do atrito lateral pode

levar ao mesmo encurtamento elástico e assim sendo, a mesma curva equivalente: o fator chave é o encurtamento elástico do atrito lateral.

Concluindo que caso a estaca seja comprovadamente um elemento rígido, ou seja, ($K_r \rightarrow \infty, \gamma_0 = \gamma'_f$, sendo assim $P_0 = A_l + Q'_p$) que a metodologia da curva corrigida, proposta por Da Silva (1983) é válida e atual.

REFERÊNCIAS

- Da Silva, P. E. C. A F., 1986, "*Célula expansiva hidrodinâmica - uma nova maneira de executar provas de carga*", in VIII COBRAMSEF, v. , pp.223-241. Porto Alegre, RS.
- Leonards, G. A . and Lovell, D. (1979). "*Interpretation of Load Tests in High Capacity Driven Piles*". Behavior of Deep Foundations, ASTM STP 670, Raymond Lundgren, Ed., ASTM, P. 388-415.
- Loadtest. (2014) Retrieved on January, 04th, 2014, from www.loadtest.com.
- Massad, F. (1995): "*Pile analysis taking into account soil rigidity and residual stresses*". X Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México, v.II:1199-1210.
- Massad, F. & Lazo G. (1998): "*Graphical method for the interpretation of the load-settlement curve from vertical load tests on rigid and short piles*". XI Brazilian Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. vol . 3, pp. 1407-1414, Brasília, Brazil (In Portuguese).
- Massad, F. (2015): "*Bidirectional Test With Use Of Hydrodynamic Cell - Testing And Its Interpretation*". SEFE8, BRASIL, v.II:1199-1210.
- Osterberg, J. (1989). "*New Load Cell Testing Device*". Proceedings - 14th Annual Conference (pp. 17-28). Deep Foundations Institute.