

PREVISÃO DO DESLOCAMENTO LATERAL DE ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE, EMBUTIDAS EM SOLO POROSO, NÃO SATURADO, A PARTIR DE ENSAIOS PRESSIOMÉTRICOS

Wilson Conciani, Prof. Dr. CEFETMT
Uilaci Bezerra Chaves Ferreira, Engenheira Civil MSc
Raimundo Leidimar Bezerra, Prof. Dr. UFCG
Erinaldo Hilário Cavalcante, Prof. Dr. UFSE
Heraldo Giachetti, Prof. Dr. UNESP Bauru
Cláudio Vidrih Ferreira, Prof. Dr. UNESP Bauru

RESUMO

Este trabalho apresenta a estimativa do deslocamento lateral de estacas carregadas transversalmente a partir de resultados de ensaios com pressiómetro Ménard (PMT). Para tanto, realizaram-se provas de carga transversal em estacas cujos resultados foram comparados com as previsões feitas a partir dos resultados de ensaios pressiométricos conduzidos próximos à superfície do solo e junto às estacas ensaiadas. Para avaliar o efeito da umidade nos resultados foram executados ensaios com o solo no estado natural de umidade e na condição inundada. Os resultados dos ensaios pressiométricos são empregados para estimar as cargas que atuam na face da estaca que empurram o solo, no nível onde as cargas são aplicadas. De posse destes valores estimou-se os deslocamentos que estas cargas provocam. Os valores previstos foram comparados com as provas de carga e mostraram que para alguns intervalos de carga esta aplicação é válida.

Palavras-chave: estacas, ensaios pressiométricos, provas de carga.

INTRODUÇÃO

Para a previsão de deslocamentos laterais em estacas é necessário o conhecimento das propriedades do solo na direção horizontal. Ensaio nesta direção são raros e pouco empregados na prática de projetos de fundações. Na maioria dos casos de obra empregam-se soluções empíricas ou baseadas em ensaios de penetração estática e dinâmica. Por outro lado, o ensaio pressiométrico avalia o comportamento do solo quando solicitado por esforços radiais horizontais. Em assim sendo, a previsão de deslocamento horizontal do topo de estacas a partir de resultados de ensaios pressiométricos deve conduzir a bons resultados.

O objetivo deste trabalho é comparar medidas de deslocamento horizontal do topo de estacas apiloadas, de concreto, com previsões realizadas a partir de resultados de ensaios pressiométricos.

ÁREA EXPERIMENTAL

Este trabalho foi realizado em uma área rural, próxima à cidade de Pederneiras no interior do estado de São Paulo.

A geologia da região está inserida no Grupo São Bento, Formação Serra Geral, em área limítrofe aos terrenos da Formação Adamantina do Grupo Bauru, constituídos por Basaltos toleíticos em derrames tabulares superpostos e arenitos intercalados.

A primeira camada do perfil é de aproximadamente 4m e é constituída de areia fina, argilosa, com N_{SPT} variando de 0 a 7. A segunda camada de 2,5m, é constituída de areia fina argilosa, pouco compacta com fragmentos de quartzo, com N_{SPT} variando de 8 a 11. A terceira camada, localizada entre a linha de seixos e a rocha alterada, é constituída de areia fina ou silte argiloso que pode atingir mais de 20m, com N_{SPT} variando de 7 a 75. O nível da água estava a

cerca de 13 m de profundidade na época em que os ensaios foram realizados. O limite da sondagem foi atingido por volta dos 23 m, onde se encontrou uma camada impenetrável à percussão.

ENSAIOS REALIZADOS

Nesse solo foram realizados diversos ensaios para caracterização das suas propriedades mecânicas. Além disto, foram feitas provas de cargas horizontais e ensaios pressiométricos.

As provas de carga horizontais foram realizadas de acordo com a NBR12131. Esta norma preconiza que em estacas submetidas a esforços horizontais, sejam instalados 2 relógios comparadores, num mesmo plano horizontal. Porém, neste caso foram instalados 3 relógios comparadores, em níveis diferentes, para obter maiores informações sobre o deslocamento do bloco de coroamento. As estacas ensaiadas têm diâmetro de 32 cm e comprimento de 8,0 m.

Foram realizadas 6 provas de carga: quatro rápidas (duas na condição natural de umidade e duas inundadas) e duas lentas (na condição natural de umidade). As provas de carga nas estacas com solo inundado foram carregadas até 50 kN apresentando um deslocamento da mesma ordem de 30 mm. A Figura 1 mostra uma curva carga deslocamento das provas de carga realizadas.

O pressiômetro empregado neste trabalho tem uma sonda com uma célula principal e duas células de guarda. O diâmetro da sonda é de 60 mm. A relação L/D neste equipamento é igual a 8,3. Os ensaios pressiométricos foram realizados a cada metro de profundidade até 11 m.

A Figura 2 mostra uma curva pressiométrica do ensaio realizado na profundidade de 1 m. Como pode ser verificado nesta figura a qualidade do ensaio não é tão boa quanto como aquela da Figura 3.

A razão para esta distorção no trecho inicial da curva pressiométrica é que a resistência da membrana da sonda é maior que a resistência do solo. Isto dificulta a interpretação deste trecho da curva. Provavelmente isto não teria acontecido se tivesse sido empregado um pressiômetro monocelular como o de pavimentação, conhecido como pressiômetro Pencil. Este equipamento é mais adequado aos ensaios próximos à superfície onde a tensão confinante é baixa.

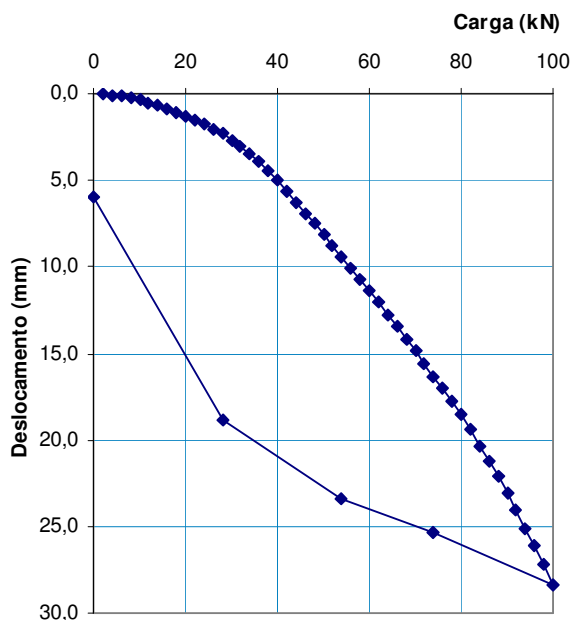


Figura 1: Curva carga deslocamento da prova de carga 1, rápida, solo na condição natural de umidade.

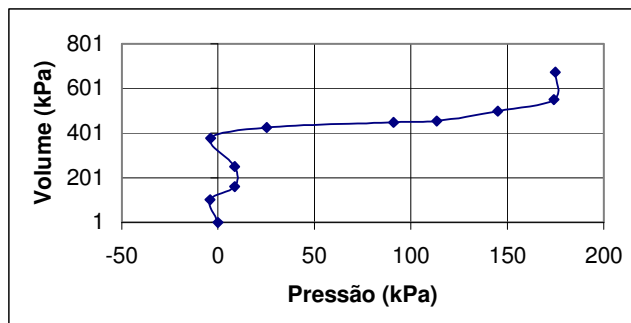


Figura 2: Curva pressiométrica do ensaio conduzido na profundidade de 1 m.

Outros ensaios conduzidos em profundidades maiores apresentaram as curvas com formato tradicional. A Figura 3 mostra uma das curvas obtidas em profundidades maiores. Em curvas pressiométricas como esta da Figura 3 foi possível calcular o módulo pressiométrico, a pressão limite e estimar a pressão horizontal.

Da curva pressiométrica apresentada na Figura 2 foram estimados os valores do módulo pressiométrico (E_p) e da pressão limite (P_L). Estes valores são respectivamente 4222 kPa e 180 kPa.

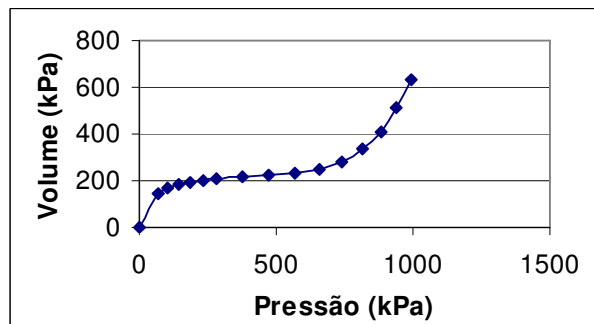


Figura 3: Curva pressiométrica do ensaio realizado na profundidade 11 m no furo 1.

A Figura 4 mostra os valores do módulo pressiométrico. Como pode ser visto nesta figura, o módulo pressiométrico não tem uma tendência clara de comportamento crescente ou decrescente. O módulo pressiométrico do solo parece seguir o comportamento da distribuição das camadas.

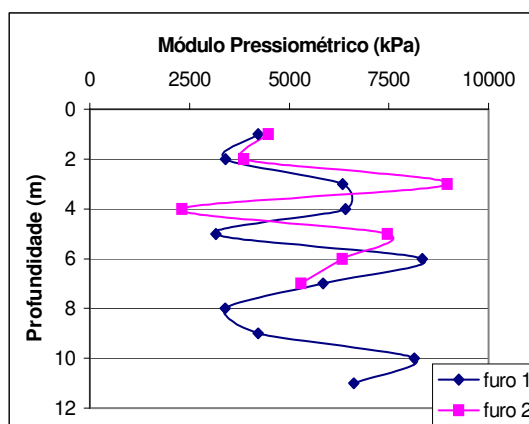


Figura 4: Distribuição do módulo pressiométrico ao longo da profundidade.

Apresenta-se na Figura 5 os valores do módulo de reação horizontal (n_h) do solo ao longo da profundidade estimados a partir dos ensaios pressiométricos. Esta estimativa foi feita pela aplicação da Equação 1. Isto é, tomou-se a pressão líquida aplicada ao pressiômetro (P) e a variação do seu raio no trecho correspondente a fase pseudo-elástica (y). Pode-se admitir uma relação direta entre o módulo de reação horizontal do solo e o coeficiente de reação horizontal (k_h).

$$k = \frac{P}{y} = n_h \times z \quad (1)$$

onde: z é a profundidade em que a medida foi realizada.

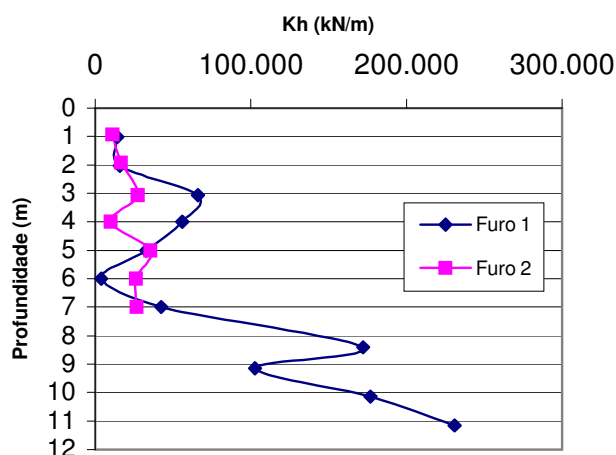


Figura 5: Distribuição dos valores do módulo de reação horizontal ao longo da profundidade.

Bowles (1987) recomenda o uso de equações empíricas para calcular o valor do módulo de reação horizontal do solo. A Equação 2 é uma destas equações empíricas.

$$k_h = \frac{3E_p}{D} \quad (2)$$

onde: E_p é o módulo pressiométrico e D é o diâmetro do pressiômetro.

O uso da Equação 2 leva a valores de k_h variando entre 30.000 e 70.000 kN/m³. Estes valores têm variação errática não apresentando uma tendência clara. Esta falta de tendência contraria o resultado apresentado na Figura 5 e que foi obtido com base nos dados pressiométricos.

Devido às restrições operacionais as provas de carga e os ensaios pressiométricos foram realizados no período chuvoso. Isto reduz as possibilidades de avaliação do comportamento da estaca sob condição inundada. De qualquer modo as estacas ensaiadas com o solo na condição inundado, apresentaram deslocamentos finais cerca de 10% maiores que as estacas ensaiadas sem inundação.

PREVISÃO DOS DESLOCAMENTOS LATERAIS

Briaud (1992) cita diversos métodos para a previsão dos deslocamentos laterais de estacas a partir do ensaio pressiométrico. Na maioria dos métodos considera-se que o solo é solicitado pela

estaca de duas formas: carga frontal e cisalhamento. A carga frontal solicita o solo na área de contato estaca solo e na direção do movimento. O cisalhamento ocorre deslocamento relativo entre conjunto estaca – solo, isto é, a estaca se desloca para frente enquanto o solo permanece estático, o que gera uma ruptura nesta interface.

O emprego dos dados pressiométricos para previsão de deslocamentos laterais de estacas pode ser feito por extrapolação. Esta é a forma mais simples de se fazer a previsão dos deslocamentos. Um método foi desenvolvido por Briaud et al. (1985). Neste caso, calculam-se as forças frontal e cisalhante correspondentes ao nível de pressão aplicado pelo pressiômetro, toma-se os valores de variação do raio da sonda pressiométrica correspondente a este nível de pressão e aplica-se a Equação 3 para obter os valores de deslocamento lateral no topo da estaca (y).

$$y = \frac{\Delta R}{R_0} R \quad (3)$$

Onde y é o deslocamento do topo da estaca, R é o raio da estaca, R_0 é o raio inicial da sonda pressiométrica e ΔR é a variação do raio da sonda para o nível de pressão p corresponde à carga P desejada. Este método pode ser aplicado com base em experiência local quando se dispõe de coeficientes de ajuste para ajustar as previsões aos valores experimentais.

Um destes modelos é aplicado a seguir. Este método é adequado para solos considerados uniformes e estacas longas.

A força de cisalhamento atuante na interface estaca solo pode ser calculada pela Equação 4. Neste caso emprega-se os valores de coesão e ângulo de atrito determinados através de ensaio de cisalhamento direto.

$$\tau = c + \sigma g \varphi \quad (4)$$

O valor da coesão é de 28 kPa para a condição de umidade em que solo estava no momento do ensaio de campo. O ângulo de atrito é de 46° . É importante enfatizar que ao longo da profundidade a coesão do solo apresenta tendência de crescimento, ocorrendo o inverso com o ângulo de atrito. A tensão normal é assumida como sendo a pressão aplicada no pressiômetro.

$$F = \tau_{r\theta(máx)} \times 2R_0 \times \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

sendo F a força resultante da ação cisalhante da estaca no solo.

A força frontal exercida pela estaca no solo pode ser calculada empregando-se a Equação 6, descrita por Baguelin et al. (1977).

$$Q_{(frontal)} = p_{(pmt)} B_{(estaca)} S_{(Q)} \quad (6)$$

onde:

$Q_{(frontal)}$ = resistência do solo devido a reação frontal (dada em força por unidade de comprimento da estaca).

$p_{(pmt)}$ = pressão pressiométrica.

$B_{(estaca)}$ = lado ou diâmetro da estaca.

$S_{(Q)}$ = fator de forma = $\pi/4$ para estacas redondas.

Após determinados os valores de Q e F os mesmos são somados para obter-se o valor da carga aplicada a estaca que corresponde a cada nível de pressão do pressiômetro. O valor dos deslocamentos é obtido pela Equação 7.

$$y_{(estaca)} = y_{(pmt)} \times \frac{R_{(estaca)}}{R_{(pmt)}} \quad (7)$$

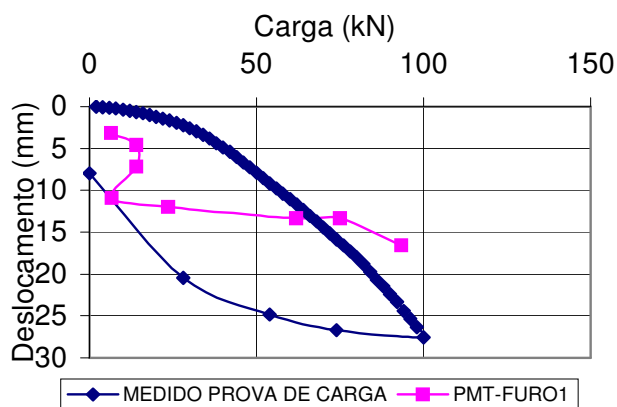


Figura 6: Comparação da curva carga deslocamento da prova de carga 1 com as previsões feitas a partir de dados do pressiômetro.

A Figura 6 permite verificar que não há uma boa convergência entre as previsões realizadas a partir dos dados pressiométricos e os resultados da prova de carga. Houve concordância de valores previstos e medidos apenas para um nível de carga. Este nível de carga corresponde a região central do trecho pseudo elástico da curva pressiométrica. Este resultado era esperado em função de forma da curva pressiométrica obtida do ensaio. O trecho da curva mais discrepante é exatamente aquele em que a qualidade dos dados da curva pressiométrica é ruim. O trecho final da curva apresenta distorções possivelmente devido à proximidade da ruptura do solo.

Contudo, ao nível de tensões de trabalho, isto é cerca de 50 % da tensão máxima do ensaio pressiométrico e da solicitação aplicada na prova de carga os resultados são animadores.

Entretanto, existem modelos físicos mais adequados para fazer esta previsão. Briaud (1992) mostra outros métodos onde as propriedades do solo são obtidas a partir da curva pressiométrica e empregadas para a previsão dos deslocamentos. Estes métodos em geral trabalham com o módulo pressiométrico, com a tensão horizontal no repouso e com a pressão limite para prever diferentes trechos da curva carga deslocamento. Neste trabalho estes métodos não serão aplicados face a qualidade da curva pressiométrica obtida para o primeiro metro.

CONCLUSÃO

O emprego do ensaio pressiométrico na previsão do deslocamento lateral do topo de estacas, embutidas em solos porosos não saturados, precisa de mais ensaios e de um melhor ajuste dos parâmetros envolvidos.

Novos ensaios realizados com a intenção de previsão do comportamento de estacas solicitadas lateralmente, devem ser conduzidos com pressiômetros tipo Pencil, devido à proximidade do ensaio com a superfície.

Também se devem empregar membranas (das sondas) menos rígidas para reduzir o efeito das baixas tensões confinantes. Apesar disto os resultados encontrados são encorajadores, uma vez que os valores previstos e medidos são concordantes para níveis de carregamento próximos àquele usualmente chamado de carga de serviço.

Mesmo para variações de umidade que poderiam ser consideradas pequenas, tomando em conta que os ensaios foram realizados no período chuvoso, os ensaios realizados com o solo na condição inundado apresentaram deslocamentos maiores que os demais ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGUELIN, F.; FRANK, R. A.; SAID, Y. Theoretical Study of Lateral Reaction Mechanism of Piles. **Geotechnique**, 27 (3), September. 1977.

BRIAUD, J. L. **The Pressuremeter**. Rotterdam: Balkema, 1992. p. 132-164.

BRIAUD, J. L.; SMITH, T. D.; TUCKER, L.M. A Pressuremeter method for laterally loaded piles. **ICSMFE**, v. 3, p. 1353, San Francisco, 1985.

Os autores agradecem a Geosolo Engenharia pela cessão dos dados.