

Análise da Influência do Coeficiente de Reação Horizontal do Solo no Dimensionamento Estrutural de Estacas de Concreto

João Paulo Santos Silva¹
Vítor Pereira Faro²
Tennison Freire de Souza Junior³

Resumo

No contexto da engenharia de fundações é habitual a utilização de estacas sujeitas à esforços horizontais, seja em obras de viadutos, pontes, torres eólicas, torres de transmissão, edificações, entre outros. Para a realização do projeto dessas estacas, deve-se atentar para três aspectos principais, sendo eles a capacidade resistente do solo, capacidade resistente do elemento estaca e do deslocamento máximo sofrido pela estaca. Dentre a gama de parâmetros existentes que influenciam no dimensionamento dessas estacas existe o coeficiente de reação horizontal do solo. Para a determinação desse coeficiente, existem diversos métodos na literatura geotécnica, dentre eles os métodos de Terzaghi (1955), Davisson (1970), Bowles (1997), Leoni (s.d.), Vésic (1961), Broms (1964), *Japan Road Association* (1980), Poulos e Davis (1980), Matlock (1970), Dunnavant e O'Neil (1989), Kim (2015), além de determinação empírica através da execução de ensaio de placa horizontal. Entretanto, quando comparados os resultados dos métodos, os valores divergem entre si. Com este trabalho, propõe-se realizar uma análise comparativa entre os métodos, aplicando-os em um determinado solo, modelando os resultados obtidos e comparando os deslocamentos e momentos fletores encontrados. Assim, é possível visualizar a importância do coeficiente de reação horizontal para a definição dos deslocamentos causados e também para o projeto estrutural da estaca. Os resultados encontrados comprovam a importância do coeficiente para a consideração das solicitações ao longo da estaca, onde a divergência entre estes resultados chegou até 6, 62 entre os deslocamentos e até 1,99 entre os momentos fletores.

Palavras-chave: Coeficiente de reação horizontal; Estacas solicitadas lateralmente; Ensaio de placa horizontal.

1 Introdução

De um modo geral, o dimensionamento de fundação em estaca solicitada horizontalmente, leva em consideração dois critérios, que são: um fator de segurança adequado contra seu rompimento e uma deformação aceitável em função os carregamentos a que está sujeita. É usual analisar esses dois critérios separadamente e dimensionar a estaca para que satisfaça ambos independentemente (POULOS e DAVIS, 1980).

Desta forma, tem se generalizado cada vez mais a utilização de métodos de cálculo baseados em hipóteses simplificadoras, pelo fato de terem simples utilização, como é o caso dos métodos da teoria de reação horizontal do solo (CINTRA, 1981).

O coeficiente de reação horizontal do solo k_h é um fator determinante para o dimensionamento de uma estaca carregada horizontalmente, dependendo do método a ser utilizado. A partir dele, é possível determinar qual será a reação produzida no solo e na estaca advindo dessa ação e também qual será o deslocamento provocado ao longo da profundidade. Na literatura é possível encontrar diversos métodos para definir o coeficiente de reação horizontal do solo, sendo por meio de valores pré-definidos ou por meio de correlações. O coeficiente de reação horizontal do solo é um fator determinante para o dimensionamento de uma estaca carregada horizontalmente, dependendo do método a ser utilizado. A partir dele, é possível determinar qual será a reação produzida no solo por causa

1 Engenheiro Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, jpaulossilva93@gmail.com

2 D. Sc. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, vitorpereirafaro@gmail.com

3 M. Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, tennisongeotec@gmail.com

dessa ação e também qual será o deslocamento provocado ao longo da estaca. Devido a essa importância, se faz necessária uma correta utilização de valores para esse coeficiente, a fim de que os resultados encontrados para o dimensionamento condigam com a realidade.

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar a influência do coeficiente de reação horizontal do solo no dimensionamento de uma estaca solicitada lateralmente. Este estudo foi realizado por meio de uma análise comparativa entre resultados obtidos em modelagens, baseadas em diferentes métodos para definição desse coeficiente. Por meio deste estudo busca-se tornar evidente a influência do coeficiente de reação horizontal no dimensionamento estrutural dessas estacas.

2 Revisão Bibliográfica

A reação produzida no solo é um dos aspectos fundamentais no estudo de estacas carregadas horizontalmente, sendo um problema complexo. Essa reação é dependente das propriedades do solo onde a estaca se encontra, do tipo de solicitação (estática, cíclica, *etc.*) e também das propriedades da estaca (dimensões e módulo de elasticidade) (VELLOSO e LOPES, 2002).

Com o aumento do esforço horizontal atuante na estaca, é gerado um conseqüente aumento também no deslocamento horizontal da estaca e na reação do solo até que se atinge a ruptura desse, considerando-se que a estaca tenha rigidez suficiente para resistir às solicitações fletoras. Com isso, decorre a primeira verificação a ser feita: a ruptura do solo. Para que a solicitação de trabalho tenha uma adequada segurança em relação à solicitação de ruptura, é necessário determinar os deslocamentos horizontais e as solicitações fletoras na estaca (VELLOSO e LOPES, 2002).

A hipótese de Winkler é relativamente simples, se caracterizando basicamente pela representação do solo em forma de molas. A partir dessa representação, é possível então configurar o solo em diversas maneiras diferentes, sendo assim altamente adaptável a maioria dos solos encontrados (FARO, 2014)

Segundo o modelo de Winkler, qualquer que seja a forma da seção transversal da estaca ou estrutura solicitada horizontalmente, o solo resiste ao deslocamento horizontal da estrutura por meio de tensões normais atuantes na face projetada da estrutura e também por tensões cisalhantes atuantes nas laterais dessa estrutura, a resistência na parte de trás pode ser desconsiderada. Na prática assume-se que a resultante dessas reações atue na frente da estrutura, ou seja, em

uma faixa de largura equivalente à largura da estrutura solicitada. Com isso, pode-se afirmar que a reação do solo consiste em uma suposta tensão normal atuante nessa área frontal da estrutura, perpendicularmente ao seu deslocamento, conforme:

$$p = k_h \cdot y \quad (1)$$

onde p é a tensão normal resultante da reação do solo na parte frontal da estrutura; k_h é o coeficiente de reação horizontal do solo; y é o deslocamento causado pela aplicação do esforço horizontal (VELLOSO e LOPES, 2002).

É importante ressaltar que esse coeficiente pode aparecer na literatura expresso em diversas maneiras. Além da forma descrita na Equação 1, há também o coeficiente (módulo de reação horizontal) expresso considerando a influência da dimensão transversal da estrutura, onde $K_h = k_h \cdot D$ (FL⁻²) e também o coeficiente (constante de mola) correspondente a um segmento de solo representado por uma mola, onde $K = K_h \cdot d$ (FL) sendo d o comprimento de discretização do solo (VELLOSO e LOPES, 2002).

Segundo Terzaghi (1955), para a idealização da hipótese que propõe que o coeficiente k_h é constante de acordo com a profundidade para o caso de argilas duras, considera que o módulo de elasticidade desse solo independe da profundidade. Para o caso de areias, o mesmo assume que o módulo de elasticidade do solo aumenta proporcionalmente de acordo com a profundidade. Sabendo das limitações das hipóteses e de suas simplificações, Terzaghi (1955) propõe um método para obter o valor do coeficiente de reação horizontal do solo a partir de valores calculados previamente e dependentes das características físicas do solo e do tipo de estrutura a ser solicitada.

Davisson (1970) também encontrou faixas de valores para o coeficiente de reação horizontal, considerando que areias sofrem variação linear com a profundidade e que argilas pré-adensadas possuem valor constante desse coeficiente com a profundidade. Bowles (1997) também apresenta uma metodologia para determinação do valor do coeficiente k_h , sendo que esta também pode ser aplicada para determinação do coeficiente de reação vertical k_s . No método de Bowles (1997), o coeficiente de reação do solo (vertical ou horizontal) é relacionado com a teoria de capacidade de carga para sapatas proposta por Terzaghi (1943).

Além desse método empírico Bowles (1997) também correlaciona o valor de k_h com a classificação do solo, que pode ser obtida por meio dos resultados dos N_{SPT} obtidos nos ensaios de percussão SPT. (CHRISTAN, 2012).

Vesic (1961) e Leoni (s.d., *apud* CHRISTAN,

2012) propõem métodos que permitem relacionar o coeficiente k_h com os parâmetros elásticos do solo (E_s e ν). Broms (1964) também relacionou o coeficiente k_h com parâmetros elásticos do solo, porém considerando também a influência do tipo de material da estaca e da resistência do solo solicitado.

Baseada em estudos prévios de Yoshinaka (1967) e Yoshida e Adashi (1970), a *Japan Road Association* (JRA), em sua revista *Specifications for Highway Bridges* (JRA, 1980 *apud* HONJO *et al.*, 2005), propuseram uma estimativa para o coeficiente de reação horizontal do solo k_h onde essa estimativa depende da maneira com que foi obtido o valor de parâmetros do solo E_s .

Outro método utilizado para determinação do coeficiente de reação horizontal k_h relaciona com a resistência não-drenada do solo s_u e é proposto por Poulos e Davis (1980, *apud* HADAR *et al.*, 2009).

Todos os métodos citados até então possuem determinação direta para o valor de k_h . Outra maneira de se definir esse valor é com a da curva p-y do solo. Matlock (1970) e Dunnavant e O'Neil (1989) propõem métodos para determinação do coeficiente k_h a partir da pré-definição de uma geometria para a curva p-y. Kim *et al.* (2016) propõe um outro método para determinação da curva p-y, desta vez baseado nos resultados encontrados através do ensaio CPT.

Além desses métodos apresentados pela literatura, também é possível obter um valor para esse coeficiente k_h com a realização de ensaios de placas horizontais. Para isso, basta aplicar a hipótese de Winkler com os dados de deslocamento e tensão obtidos pelo ensaio, conforme demonstrado por Silva (2019).

3 Região de Estudo

Os ensaios para obtenção dos dados experimentais foram realizados no campo experimental do Centro Tecnológico da Universidade de Passo Fundo (CETEC-UPF), como pode ser observado na Figura 1.a. Este local (coordenadas 28°13'34,6"S 52°23'11,1"W) foi escolhido devido à diversidade de parâmetros geotécnicos obtidos em pesquisas anteriores, além da disponibilidade de utilização dos equipamentos do próprio CETEC e pela possibilidade de análise conjugada com outras pesquisas já realizadas no mesmo local.

Segundo Faro (2014), o solo característico do campo experimental onde foram realizados os ensaios é um solo residual, oriundo da composição de rochas basálticas (ígneas) e de arenitos (sedimentar). De acordo com Consoli *et al.* (1998), o solo residual

decorrente de basalto é um tipo de solo muito comum na região sul do Brasil. Solos residuais são resultado do intemperismo, o que geralmente diminui a densidade e aumenta a porosidade, e suas propriedades sofrem uma certa influência do histórico de tensões a que este solo já foi submetido devido à criação de uma ligação entre partículas decorrente tanto da cristalização associada com a formação de minerais, quanto da precipitação de células minerais. A formação de uma estrutura cimentada e porosa leva os solos residuais a apresentarem comportamentos geotécnicos diferentes dos solos sedimentares, mesmo com densidade e granulometria similares. Interpretações geralmente realizadas para solos coesivos em condições não drenadas podem não ser válidas quando aplicadas a solos residuais cimentados. (CONSOLI *et al.*, 1998).

Ruver (2011) citou que observando a granulometria e limites de plasticidade concluiu-se que o solo coesivo friccional do campo experimental de Passo Fundo (UPF) pode ser classificado como A-5-7 (Solo Silto Argiloso) pelo sistema *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e CL (Argila de baixa a alta liquidez) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Ao realizar a caracterização através da sistemática M.C.T (Miniatura, Compacto e Tropical), Souza Junior *et al.* (2019) por meio do procedimento do Mini-M.C.V e ensaio de pastilha concluiu-se que o solo em questão atende aos requisitos do grupo LG', ou seja, Solo Argiloso com comportamento Laterítico.

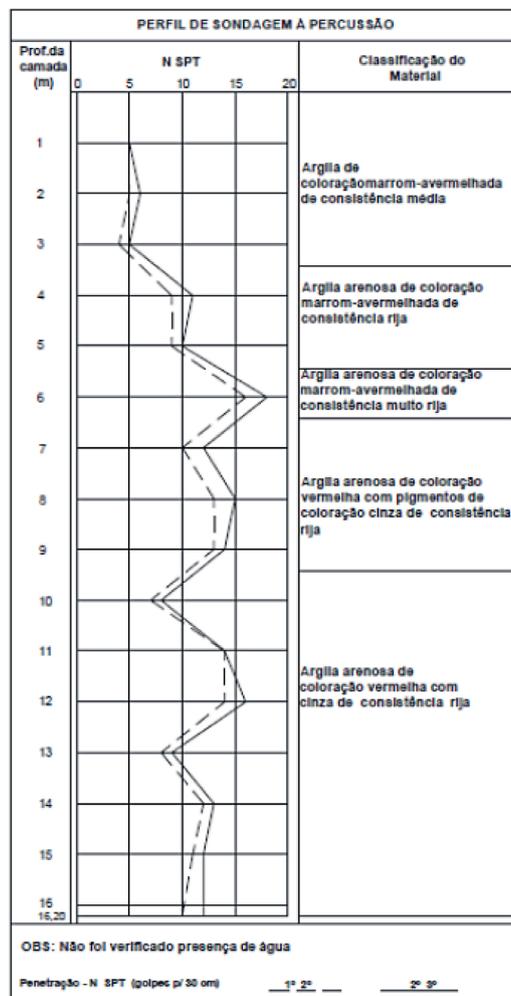
Ruver (2011) realizou ensaios de composições granulométricas, os quais foram precedidos em duas amostras, sendo primeiro com a lavagem após processo de sedimentação (com uso de defloculante) e o segundo seco em estufa (sem uso de defloculante). O mesmo obteve, pela análise granulométrica por peneiramento e sedimentação seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 6502 (ABNT, 1995), que o solo possui 0,45% de areia grossa, 2,06% de areia média, 18,57% de areia fina e 78,91% de finos (59% de Argila e 19,9% de Silte).

Lopes Jr. e Thomé (2005) executaram sondagens SPT no campo experimental em questão, sendo um desses resultados apresentados pela, onde a Figura 1.b representa um ensaio realizado com circulação de água. Com esses resultados, é possível observar que o solo em questão apresenta um perfil homogêneo até uma profundidade de 15 m, sem presença de nível de água.

A Tabela 1 informa as propriedades físicas resultantes dos estudos de Dalla Rosa, Thomé e Ruver (2004), Ruver (2011) e Rizzon (2016).



(a)



(b)

Figura 1 – Campo Experimental do CETEC-UPF: (a) Localização (GOOGLE MAPS, 2018); (b) Resultados de ensaio SPT realizado com circulação de água (LOPES JR e THOMÉ, 2005).

Tabela 1 – Valores obtidos em outros estudos das propriedades do solo coesivo friccional de Passo Fundo/RS.

Propriedades	Estudos		
	Ruver (2011)	Dalla Rosa e Thomé (2004)	Rizzon (2016)
Umidade natural média (%)	28,87	27 - 29	34
Peso específico dos grãos (kN/m³)	26,7	26,5 - 28,2	26,7
Limite de Plasticidade – LP (%)	32,08 ± 4,14	35	42
Limite de Liquidez – LL (%)	41,21	55	53
Índice de Plasticidade – IP (%)	9,13	20	11

4 Métodos e Modelagens

Inicialmente foi realizada uma comparação dos valores dos coeficientes de reação horizontal calculados pelos métodos Terzaghi (1955), Davisson (1970), Bowles – Tab. (1997), Leoni (s.d.), Vésic (1961), Broms (1964), JRA (1980), Poulos e Davis (1980), Matlock (1970), Dunnavant e O’Neil (1989), Kim (2015) e por ensaio de placa realizado no local. Com isso, cada resultado foi imputado no modelo simplificado desenvolvido no *software* Ftool e assim foram simulados os deslocamentos para posterior determinação das solicitações utilizando a hipótese de Winkler.

O modelo desenvolvido consiste em um elemento em barra cuja base possui restrição de deslocamentos, o fuste é composto por uma série de apoios molas e com carregamento aplicado na extremidade superior, conforme ilustrado na Figura 2.b. Esse modelo é representativo de uma estaca de concreto solicitada lateralmente, conforme apresentado na Figura 2.a, cujas premissas encontram-se na Tabela 2.

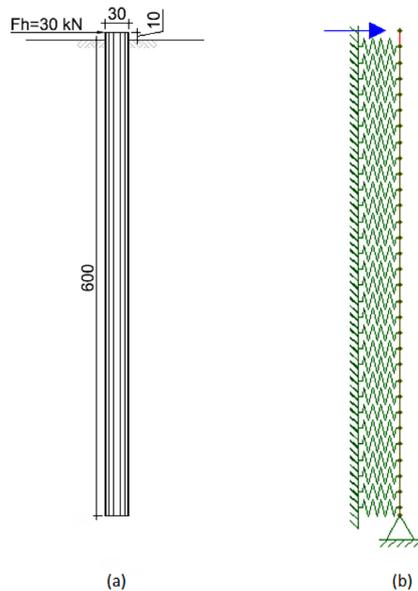


Figura 2 – Modelo estrutural proposto para avaliação da estaca no *software* Ftool®.

Para cada método, foi encontrado um determinado valor para o coeficiente k_h que posteriormente é transformado em um valor de K , que representa o mesmo coeficiente sendo aplicado sobre uma determinada área com aplicação de uma força horizontal de 30 kN a 10 cm da superfície do terreno. A representação do solo foi dada por uma mola espaçada em 20 cm ao longo da profundidade, sendo a primeira mola locada a uma profundidade de 10 cm. Portanto, a área representativa de solo para cada mola é de 30 cm (referente à largura da estaca) x 20 cm (referente à distância entre cada mola).

5 Resultados

Para as modelagens das estacas, primeiramente foi necessário calcular o k_h para cada profundidade por cada método. Os resultados encontrados podem ser observados pela Figura 3, onde é observa-se que os valores variaram de 1307 kN/m², encontrado pelo método de Davisson (1970), até 54267 kN/m², encontrado pelo método de Poulos e Davis (1980), sendo o maior quase 42 vezes maior que o menor. Quando comparadas as médias, a maior foi de 36133 kN/m² encontrada pelo método de Bowles (1970), enquanto a menor foi de 2559 kN/m² encontrada pelo método de Davisson, tendo, portanto, uma diferença de 14,11 vezes da maior para a menor.

Aplicando-se os coeficientes em seus respectivos modelos, é possível determinar os deslocamentos da estaca ao longo da profundidade para cada método, como pode ser observado na Figura 4. Nesse caso o maior deslocamento encontrado foi de 25,48 mm, encontrados pela aplicação dos coeficientes obtidos pelo método de Matlock (1970) ao modelo, e o menor foi de 3,85 mm, encontrado pela aplicação dos coeficientes obtidos pelo método de Poulos e Davis (1980) ao modelo. Com isso, temos uma diferença de 6,62 vezes do maior valor para o menor.

A análise também foi realizada para comparar os resultados de momentos fletores encontradas por todos os modelos. A Figura 5 mostra que o maior momento

Tabela 2 – Premissas adotadas na estaca modelada.

Propriedades e dados de entrada	Unid.	Valores
Diâmetro	cm	30
Comprimento	cm	600
Resistência característica à	MPa	20,00
Resistência característica à tração (f_{ck})	MPa	1,55
Módulo de elasticidade	MPa	21688,70

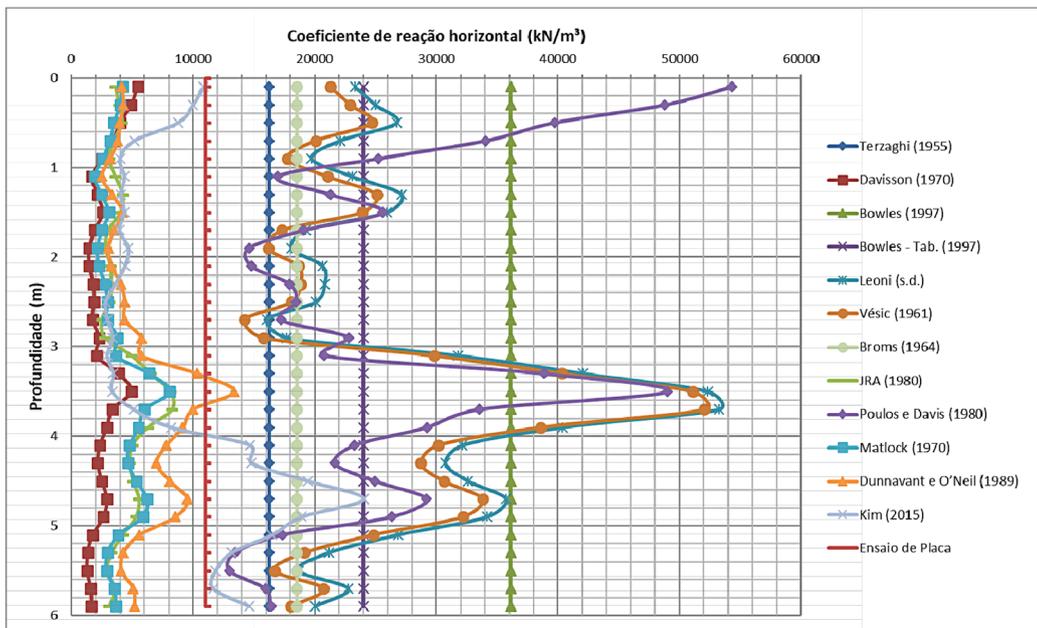


Figura 3 – Valores dos coeficientes encontrados ao longo da estaca pelos diversos métodos.

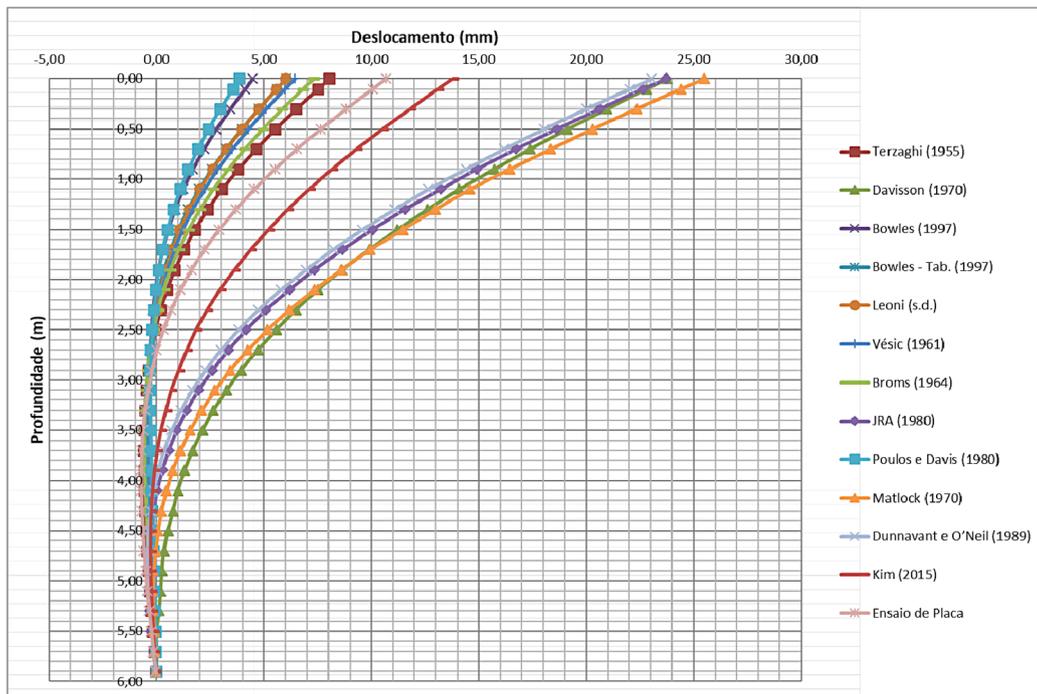


Figura 4 – Comparativo de deslocamentos entre os modelos de estaca.

fletor foi encontrado pela aplicação do método da *Specifications for Highway Bridges* (JRA, 1980), com valor de 24,84k N.m, e o menor momento foi encontrado pela aplicação do método de Poulos e Davis (1980), com valor de 12,50 kN.m. Portanto, o maior valor corresponde a 1,99 vezes o menor valor.

Mesmo não tendo uma relação tão significativa quanto a relação dos deslocamentos, é possível observar que a determinação do coeficiente também tem importância significativa na determinação dos momentos fletores solicitantes na estaca. Essa importância pode ser observada quando comparados os maiores e menores momentos fletores em termos de

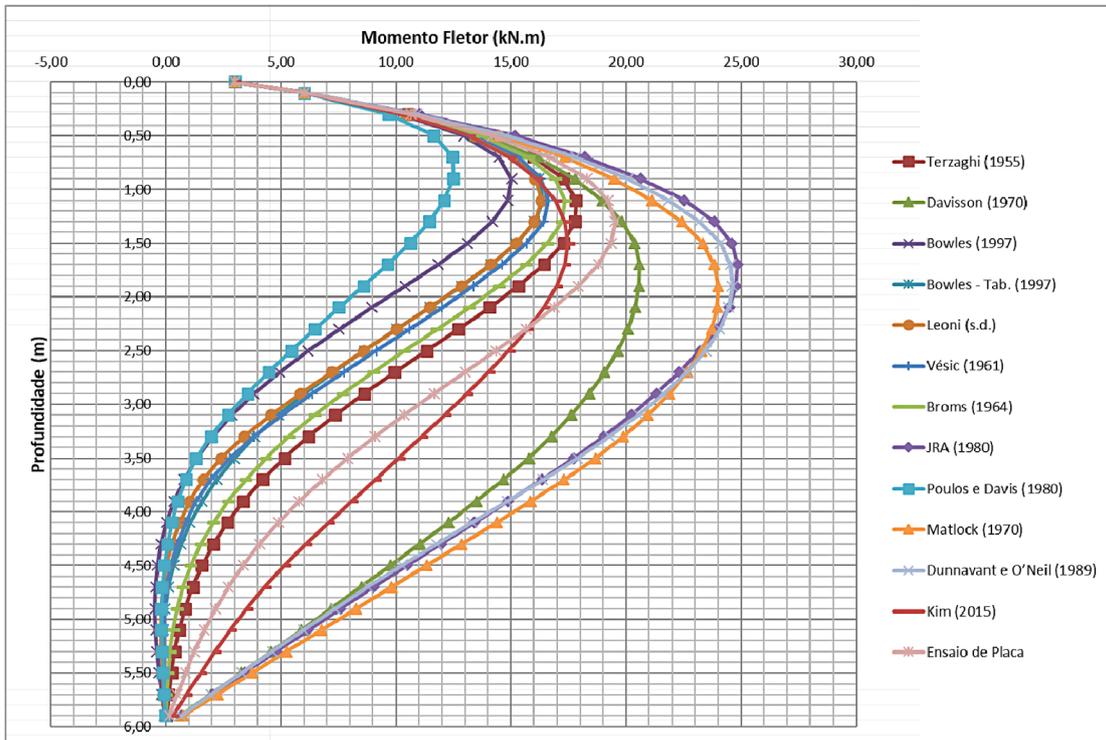


Figura 5 – Comparativo de momentos fletores entre os modelos de estaca.

Tabela 3 – Comparativo de armaduras mínimas necessárias para os momentos solicitantes de cada método.

Método	Momento fletor máximo (kN.m)	Armadura adotada	Profundidade de armadura (m)	Massa da armadura (kg)
Terzaghi (1955)	17,83	6 φ 10mm	3,9	14,7
Davisson (1970)	20,58	6 φ 12,5mm	5,5	33,0
Bowles (1997)	15,03	5 φ 10mm	2,9	9,1
Bowles – Tab. (1997)	16,41	6 φ 10mm	3,3	12,5
Leoni (s.d.)	16,32	6 φ 10mm	3,3	12,5
Vésic (1961)	16,64	6 φ 10mm	3,3	12,5
Broms (1964)	17,35	6 φ 10mm	3,7	14,0
JRA (1980)	24,84	6 φ 12,5mm	5,5	33,0
Poulos e Davis (1980)	12,50	5 φ 10mm	2,9	9,1
Matlock (1970)	24,00	6 φ 12,5mm	5,5	33,0
Dunnavant e O'Neil (1989)	24,63	6 φ 12,5mm	5,5	33,0
Kim (2015)	17,48	6 φ 10mm	4,9	18,5
Ensaio de Placa	19,53	4 φ 12,5mm	4,3	17,2

valores totais, onde o dimensionamento estrutural para uma estaca solicitada a um momento fletor de 12,50 kN.m se difere totalmente de um para 24,84 kN.m.

Realizando o dimensionamento estrutural de cada modelo apresentado, considerando que a armadura deve ir pelo menos até o momento resistente para for-

mação de fissuras, que para a estaca em questão é de 4,10 kN.m, as armaduras mínimas para cada modelo seriam as dispostas na Tabela 3. Como é possível observar, as necessidades variam de cinco barras de 10 mm à cinco barras de 16 mm e as profundidades da armadura vão de 2,9 m a 5,5 m. Em termos de massa total da armadura longitudinal da estaca, o dimensionamento

elaborado pelo método da Specifications for Highway Bridges (JRA, 1980) resultaria em 33,0 kg de aço, peso 361% maior do que os 9,1 kg o dimensionados pelo método de Poulos e Davis (1980).

6 Conclusões

O problema de estacas solicitadas lateralmente é muito mais complexo do que se imagina. Para a execução de um projeto, se faz necessário o conhecimento exato dos parâmetros da estaca e do solo para que se consiga prever com eficácia e acurácia os esforços resultantes na estaca, os esforços solicitantes no solo e também os deslocamentos ao longo da profundidade.

O trabalho realizado foi importante para destacar a variedade de possibilidades para se determinar um parâmetro do solo como k_h . Os métodos apresentados na revisão bibliográfica são apenas alguns dentro de uma infinidade encontrada na literatura. Os métodos variam de correlações com ensaios de campo DMT, CPT, pressiométricos e SPT, em conjunto ou não de parâmetros obtidos em laboratório, até determinação direta de um valor dependendo única e exclusivamente da classificação do solo. Essa variedade de métodos deixa evidente as incertezas quanto a consideração desse coeficiente, e a determinação do método a ser aplicado depende das informações e ensaios possíveis de se realizar no solo em questão e da complexidade do projeto.

Por meio da análise comparativa, é possível observar a divergência tanto em valores quanto em configurações das distribuições dos momentos fletores ao longo da estaca. Quando comparadas as médias dos valores de k_h ao longo da profundidade, os valores variaram de 2559kN/m² à 36133kN/m². Para os deslocamentos no topo da estaca modelada, os valores variaram de 3,85 mm à 25,48 mm. Para os maiores momentos fletores encontrados, os valores variaram de 12,50 kN.m a 24,84 kN.m.

Essa divergência demanda um dimensionamento estrutural diferente para cada método, tanto em questão de barras a serem utilizadas quanto em profundidades de estaca armada. Conforme apresentado na Tabela 3, apenas considerando a armadura longitudinal da estaca, o peso de aço para um dimensionamento baseado em um modelo pode ser 361% maior do que o peso para um dimensionamento de um outro modelo onde a única variável foi o valor do k_h utilizado. Em termos financeiros, pode-se afirmar a partir destes resultados que o custo da armadura pode ser até 3,6 vezes maior dependendo do método de determinação do k_h adotado para o modelo.

Com isso comprova-se a necessidade de consideração de um coeficiente de reação horizontal do solo

(k_h) que seja condizente com a realidade do projeto afim de evitar com que a estaca seja dimensionada com esforços de cálculo diferentes dos esforços solicitantes.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil da UFPR (PPGECC-UFPR) e à Universidade Federal do Paraná pelo apoio à pesquisa e à Chamada Pública 09/2016-FA da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) por permitir a aquisição de materiais e serviços necessários.

8 Referências

- BOWLES, J. E. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill, Inc. Fifth Edition. International Edition, 1997.
- BROMS, B. B. Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 90(2), pp. 27-64, 1964.
- CHRISTAN, P. Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- CINTRA, J. C. A. Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas e Comparação com os Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 150p. 1981.
- CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J. Interpretation of Plate Load Tests on Residual Soil Site. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124(9), p. 857-867. 1998.
- DALLA ROSA, F. E, RUVIER, C. A. e THOMÉ, A.. Obtenção das características de resistência e deformabilidade de um solo residual de Basalto através de Ensaios de Placa. XXXI Jornadas Sud-Americanas Ingeniería Estructural, 1994.
- DAVISSON, M. T. Lateral load capacity of piles. Highway Research Record, n. 333, 1970.
- DUNNAVANT, T. W.; O'NEILL, M. W. Experimental p-y model for submerged, stiff clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, nº. 1, pp. 95-114, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410 (1989) 115:1(95). 1989.
- FARO, V. P. Carregamento lateral em fundações profundas associadas a solos tratados: concepção, provas de carga e diretrizes de projeto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em

- Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.
- HALDAR, S.; BABU, G. S. Design of laterally loaded piles in clays based on cone penetration test data: A reliability-based approach. *Geotechnique*, vol. 59, n° 7, pp. 593-607. 2009.
- HONJO Y.; ZAIKA Y.; POKHAREL G. Estimation of subgrade reaction coefficient for horizontally loaded piles by statistical analyses. *Soils and Foundations*, vol. 45, n° 3 p. 51-70. 2005.
- JRA. Specifications for Highway Bridges IV, Japan Road Association. 1980.
- KIM, G.; KYUNG, D.; PARK, D.; KIM, I.; LEE, J. CPT-based p-y analysis for piles embedded in clays under cyclic loading conditions. *KSCE J Civ Eng*. 20: 1759. 2016.
- LEONI, J. A. Apunte de coeficiente de balasto. Laboratorio de mecanica desuelos. Facultad de Ingenieria (U.N.L.P). Buenos Aires, s.d.
- LOPES JR., L. S.; THOMÉ, A. Provas de Carga Estática em Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, Executadas na Região de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul (GEORS). Passo Fundo, 2007.
- MATLOCK, H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. *Proc., 2nd Ann. Offshore Technol. Conf., OTC, Houston, Texas*, pp. 577-594. 1970.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. *Pile Foundation Analysis and Design*. Nova York: John Wiley & Sons, 1980.
- FARO, V. P. Carregamento lateral em fundações profundas associadas a solos tratados: concepção, provas de carga e diretrizes de projeto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.
- RIZZON, M. M. Efeitos da compactação em solos residuais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2016.
- RUVER, C. A. Estudo do arrancamento de fundações em solos tratados com cimento. Tese Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.
- SILVA, J. P. S; FARO, V. P. Ensaio de placa horizontal para a definição do valor do coeficiente de reação horizontal. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE9). São Paulo, 2019.
- SOUZA JUNIOR, T. F. de, JESUS, F. F. S., RUVER, C. A, HEINECK, K. S., e LUZ, C. C.. Aplicação do método de classificação MCT ao solo coesivo friccional do município de Passo Fundo – RS. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 10. Santa Maria, 2019.
- LOPES JR., L. S.; THOMÉ, A. Provas de Carga Estática em Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, Executadas na Região de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul (GEORS). Passo Fundo, 2007.
- TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc. New York, 1943.
- TERZAGHI, K. Evaluation of coefficient of subgrade reaction. *Geotechnique*, vol. 5., n. 4, 1955.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações Profundas*. COPPE – UFRJ, 2002.
- VESIC, A. S. Beam on elastic subgrade and the Winkler hypothesis. *Proc., 5th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris*, vol. 1, p. 845-850, 1961.
- YOSHIDA, I.; ADACHI, Y. Experimental studies on statistical lateral restraint of caisson foundation. *Civil Engineering Memorandum, Public Work Research Institute*, 139, 1-60. 1970.
- YOSHINAKA, T. (1967): Subgrade reaction coefficient and its correction based on the loading width, PWRI Report, 299, 1-49 (em japonês).