

ESTUDO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTACA SOB CARREGAMENTO HORIZONTAL

Study of the soil-pile interaction under horizontal loading

Priscila de Christan*

Rogério Francisco Kuster Puppi**

RESUMO – Foi utilizado no estudo uma estaca vertical de concreto armado, submetida a carga horizontal e momento, parcialmente enterrada em um solo argiloso. O modelo de cálculo foi gerado no programa SAP2000, sendo a estaca modelada como elemento de viga e o solo representado por molas linearmente elásticas espaçadas a cada metro, baseado no modelo de Winkler. Os coeficientes de mola (K_i) foram calculados pela equação proposta por Vesic, que correlaciona o coeficiente de reação com as propriedades elásticas do solo. Os resultados do SAP2000 mostraram que a estaca apresentou o comportamento de estacas flexíveis, no qual tem os seus deslocamentos ocasionados devidos a flexão. A região que mostra o comportamento relevante da estaca está de acordo com as conclusões feitas por outros autores. Os máximos deslocamentos horizontais e momentos fletores encontrados no SAP2000 ficaram próximos dos valores obtidos pelo método clássico da equação diferencial.

SYNOPSIS – In the study was used a vertical reinforced concrete pile, subjected to horizontal load and moment, partially buried in a cohesive soil. The calculation model was generated in the software SAP2000. The pile was modeled as beam element and the soil represented by linearly elastic springs spaced one meter apart, based on the Winkler model. The spring coefficients (K_i) were calculated from the equation proposed by Vesic, which correlates the reaction coefficient with the elastic properties of the soil. The results of SAP2000 calculations show that the pile used in the analysis presented flexural behavior, with their displacements caused due to bending. The region that shows the relevant behavior of the pile agrees with the the findings of other authors. The maximum horizontal displacements and bending moments found with SAP2000 were close to the values obtained by the classical differential equation method.

PALAVRAS CHAVE – Solo, estaca, módulo de reação do solo.

1 – INTRODUÇÃO

O estudo da interação solo-estrutura pode ser feito utilizando um programa de análise estrutural, no qual o solo é representado por molas (apoios flexíveis K_i) nos pontos que correspondem às fundações (Khoury, 2001; Crespo, 2004).

Os métodos da teoria de reação horizontal do solo são muito utilizados no cálculo de estacas carregadas horizontalmente. Essa teoria considera que a reação do solo (p) é proporcional ao deslocamento horizontal (y), semelhante ao modelo de Winkler (Cintra, 2002). Neste trabalho a consideração da interação solo-estaca foi feita conforme este método, utilizando apoio elástico nodal (molas).

* Mestre em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

E-mail:priscila.christan@gmail.com

** Professor Adjunto, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

E-mail: rfkpuppi@gmail.com

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Modelo de Winkler

O modelo de Winkler (1867) indica que a resposta do solo em um determinado ponto não é dependente do deslocamento da estaca em outros pontos, ou seja, este método considera que a resposta do solo é caracterizada por um conjunto de mecanismos discretos independentes entre si, o que não caracteriza perfeitamente o contínuo.

O valor do coeficiente de reação depende das propriedades elásticas do solo e também das dimensões da área sob a ação da reação do solo de fundação, podendo ser estimado a partir de valores típicos fornecidos na literatura (Terzaghi, 1943).

Conforme Terzaghi (1955), o coeficiente de reação horizontal do solo (k_h) é a razão entre a pressão (p) e o seu respectivo deslocamento horizontal (y). As primeiras aplicações da teoria de Winkler para estacas carregadas horizontalmente surgiram a partir de 1920.

No caso de estacas o problema é mais complexo que o de vigas sobre apoio elástico, pois em vigas é possível admitir que elas estejam apoiadas sobre um solo uniforme horizontalmente, e já para o caso das estacas podem existir várias camadas de solo com naturezas diversas (Cintra, 2002).

O módulo de reação horizontal do solo (K) é definido como a relação entre a reação do solo (p), em unidades de força por comprimento da estaca com o seu respectivo deslocamento (y).

Para fazer uma análise de estacas submetidas a carregamentos horizontais, deve ser considerada a rigidez à flexão de estaca (EI) e a rigidez horizontal do solo (E_s , G_s ou k_h). O método da teoria de reação horizontal do solo considera que a reação do solo (p) é proporcional ao deslocamento horizontal da estaca (y), equação 1 (Cintra, 2002; Diniz, 1972).

$$EI \cdot \left(\frac{d^4 y}{dz^4} \right) = p = -K \cdot y \quad (1)$$

z – profundidade a partir da superfície.

A equação 2 mostra a variação de K ao longo do comprimento da estaca (Palmer e Thompson, 1948).

$$K = K_L \cdot \left(\frac{z}{L} \right)^n \quad (2)$$

K_L – valor de K na ponta da estaca ($z = L$);

n – expoente empírico positivo;

L – comprimento de embutimento da estaca no solo.

As hipóteses mais comuns são que para argilas pré-adensadas $n = 0$, ou que o módulo de reação horizontal é constante com a profundidade, e que para areias $n = 1$, ou que o módulo de elasticidade é variável linearmente com a profundidade (Figura 1). Para o caso de areias, com $n = 1$ a variação de K pode ser reescrita conforme a equação 3.

$$K = n_h \cdot z \quad (3)$$

n_h – constante de reação horizontal do solo.

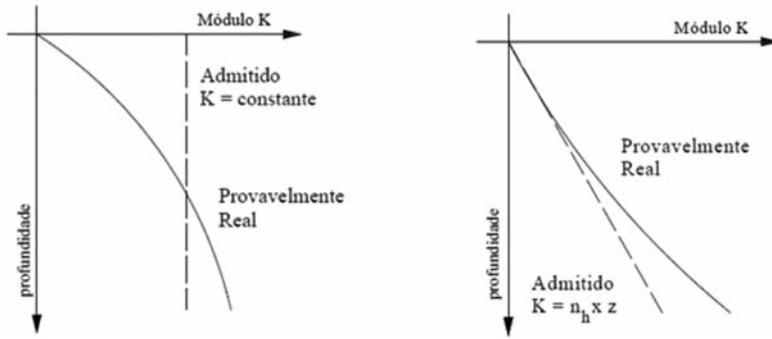


Fig. 1 – Solos coesivos pré-adensados e areias, siltes e argilas normalmente adensadas (Cintra, 2002).

2.2 – Método para determinação do coeficiente de reação do solo

Vesic (1961) propôs uma equação que possibilita relacionar o coeficiente de reação do solo com os parâmetros elásticos do solo (E_s e ν). Esse método foi feito para o caso de uma viga de comprimento infinito apoiada num meio isotrópico, elástico e contínuo. Para o caso de uma estaca suficientemente longa de diâmetro (B) e rigidez à flexão (EI) em um solo homogêneo e isotrópico, definido por um módulo de elasticidade constante (E_s) e um coeficiente de Poisson (ν), o coeficiente de reação horizontal (k_h) pode ser definido conforme a equação 4.

$$k_h = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_s \cdot B^4}{EI}} \cdot \frac{E_s}{B \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4)$$

A aplicação da equação sugerida por Vesic (1961) para o caso de uma estaca não é direta, pois a consideração da influência do solo está somente na parte de trás de estaca. Uma forma de corrigir é considerar aproximadamente igual a duas vezes o valor do k_h (Santos, 2008).

2.3 – Rigidez relativa estaca-solo

Na resolução da equação diferencial, utilizou-se uma constante λ , que envolve parâmetros característicos da estaca e do solo. Essa constante expressa uma relação entre a rigidez do solo e a rigidez à flexão da estaca, que depende da forma da variação do módulo de reação com a profundidade. Para uma variação exponencial do módulo de reação com a profundidade ($K = k \cdot z^n$) o fator de rigidez relativa estaca-solo é definido conforme a equação 5 (Cintra, 2002).

$$\lambda = \sqrt[n+4]{\frac{E \cdot I}{K}} \quad (5)$$

Para solos coesivos, onde K é constante com a profundidade ($n = 0$), o fator de rigidez estaca-solo (R) é definido conforme a equação 6.

$$R = \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{K}} \quad (6)$$

2.4 – Classificação das estacas em função do comprimento

De acordo com Davisson (1970), Matlock e Reese (1960) e outros autores, as estacas carregadas lateralmente podem ser classificadas em função do comprimento (L) da seguinte forma (apud Cintra, 2002):

- $L / R > 4$ – estaca flexível;
- $2 < L / R < 4$ – estaca intermediária;
- $L / R < 2$ – estaca rígida.

O comportamento da estaca é influenciado diretamente pela sua rigidez. Sendo assim, uma estaca rígida tem os deslocamentos devidos a uma rotação de corpo rígido, já uma estaca flexível tem os deslocamentos devidos à flexão. As estacas flexíveis podem ser analisadas como infinitamente longas, pois as soluções para $L / R = 4$, são as mesmas que para $L / R = 5, 10$ e infinito.

2.5 – Classificação do solo segundo os valores do N_{SPT}

Segundo Terzaghi e Peck (1948), a classificação dos solos pode ser feita utilizando o resultado do ensaio SPT, através dos valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Para solos argilosos a consistência da argila é classificada da seguinte forma: muito mole, N_{SPT} igual a 2; mole, N_{SPT} variando de 2 a 4; média, N_{SPT} variando de 4 a 8; rija, N_{SPT} variando de 8 a 15; muito rija, N_{SPT} variando de 15 a 30; e dura, N_{SPT} maior que 30.

2.6 – Parâmetros geotécnicos do solo

O valor do módulo de elasticidade do solo (E_s) pode ser estimado com base em resultados de ensaios realizados no campo (SPT, CPT, entre outros), ou fazendo correlações do tipo de solo com os valores publicados na literatura. O valor do módulo de elasticidade, varia de acordo com a consistência da argila, da seguinte forma: muito mole, E_s varia de 2 a 15 MPa; mole, E_s varia de 5 a 25; média, E_s varia de 15 a 50; dura, E_s varia de 50 a 100 e arenosa, E_s varia de 25 a 250 (Bowles, 1997).

O coeficiente de Poisson (ν) é a razão entre a deformação específica lateral e longitudinal, sendo um valor adimensional. Usualmente este parâmetro não impõe grandes alterações nos resultados das análises (Rody, 2010). Este coeficiente pode ser negativo se há contração lateral. Conforme a teoria de elasticidade o valor de ν varia de -1 a 0,5. Para casos práticos, devido as dificuldades encontradas na medição, é indicado adotar para ν os valores apresentados na literatura. Para argila saturada, ν varia de 0,40 a 0,50, argila parcialmente saturada, ν varia de 0,10 a 0,30 e argila arenosa, ν varia de 0,20 a 0,30 (Bowles, 1997).

2.7 – Solução clássica da equação diferencial

Vários pesquisadores, desde cerca de 1920, apresentaram soluções para a equação diferencial para solos coesivos, com a hipótese do módulo de reação do solo constante com a profundidade. A solução considerada clássica é proposta por Hetényi (1946), para o caso de estacas flexíveis ($L/R > 5, 6$) (Cintra, 2002).

A equação 7 apresenta o cálculo do deslocamento horizontal no topo da estaca (y_o).

$$y_o = \frac{2.P_H}{K.(1,414.R)} + \frac{2.M_o}{K.(1,414.R)^2} \quad (7)$$

P_H – força horizontal aplicada na estaca;

M_o – momento aplicado na estaca.

A equação 8 apresenta o cálculo do momento fletor máximo da estaca (M_{max}).

$$M_{max} = 0,32.P_H.(1,414.R) + 0,70.M_O \quad (8)$$

A equação 9 mostra a profundidade aproximada do momento fletor máximo.

$$z = 0,70.(1,414.R) \quad (9)$$

3 – METODOLOGIA

3.1 – Definição das características da estaca, solo e cargas atuantes

Para as análises foi utilizada como exemplo uma estaca de concreto armado, vertical, isolada e com seção transversal circular. O solo é do tipo coesivo, sendo os valores adotados para os N_{SPT} em função do comprimento de embutimento da estaca dentro do solo. Para os carregamentos atuantes foram considerados cargas horizontal, vertical e momento.

3.2 – Considerações sobre a interação solo-estaca

O solo foi representado como um sistema independente, com molas linearmente elásticas espaçadas entre si, modelo de Winkler. Os coeficientes de molas foram calculados de acordo com a equação proposta por Vesic, que correlaciona o coeficiente de reação com as propriedades elásticas do solo.

3.3 – Elaboração do modelo de cálculo no software SAP2000

A estaca foi modelada através do elemento de viga do SAP2000, sendo discretizada a cada 1,0 m. O solo foi simulado com molas linearmente elásticas espaçadas a cada 1,0 m e os seus coeficientes foram adotados conforme os valores resultantes da equação proposta por Vesic, apresentada no item 2.2.

3.4 – Resultados, discussões e conclusões

Foi obtido do modelo de cálculo do SAP2000 resultados para os momentos fletores, deslocamentos e reações nas molas. O método da solução clássica da equação diferencial apresentou os máximos deslocamento e momento fletor.

As discussões e conclusões foram feitas em relação aos seguintes aspectos: comportamento da estaca no modelo de cálculo do SAP2000, resposta da estaca em função da profundidade, e comparação destes resultados com a solução clássica da equação diferencial.

4 – MATERIAIS

4.1 – Propriedades da estaca, características do solo e cargas atuantes

A estaca de concreto armado possui diâmetro igual a 1016 mm, comprimento de embutimento no solo (L) igual a 24 m, resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) igual a 40 MPa e armadura longitudinal igual a 30 barras de 25 mm, conforme mostra a Figura 2.

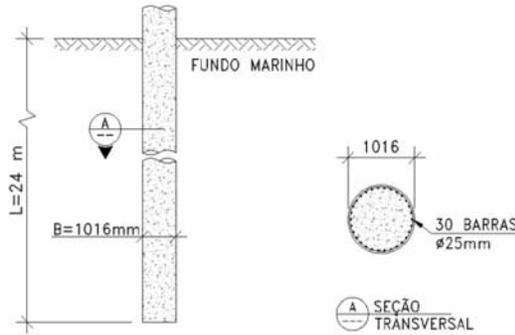


Fig. 2 – Geometria da estaca.

O módulo de elasticidade inicial do concreto e o módulo secante foram determinados conforme as equações 10 e 11, respectivamente (NBR-6118/2007). O valor do módulo secante obtido foi igual a 30 104,88 MPa.

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$

$$E_{cs} = 0,85.E_{ci} \quad (11)$$

Para a modelagem do solo foram utilizados valores do N_{SPT} . Estes valores foram obtidos em função do comprimento de embutimento da estaca dentro do solo, utilizando o método de capacidade de carga estática em estacas isoladas, proposto por Aoki e Velloso. Foram adotados para os primeiros 12 m um número de N_{SPT} igual a 19 e para os 12 m restantes um N_{SPT} igual a 35.

A Figura 3 mostra o perfil do solo e os valores para a carga horizontal (P_H) e momento (M_O).

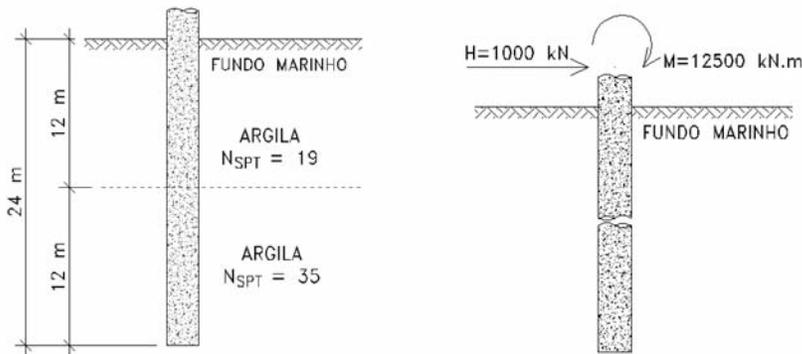


Fig. 3 – Perfil do solo e cargas atuantes na estaca.

4.2 – Cálculo dos coeficientes de mola

Os coeficientes que representam as molas foram obtidos basicamente conforme a equação 12.

$$K_i = k.A_i \quad (12)$$

K_i – Rigidez relativa ao nó i ;

k – coeficiente de reação horizontal do solo k_h ;

A_i – área de influência do nó i , diâmetro da estaca multiplicado pela distância entre os nós.

A classificação do solo em função da consistência da argila, foi feita utilizando uma correlação dos valores adotados para o N_{SPT} (item 4.3) com os valores sugeridos por Terzaghi (item 2.5). Para os primeiros 12 m, com N_{SPT} igual a 19 a consistência da argila é muito rija, e para os 12 m restantes, com N_{SPT} igual a 35 a consistência é dura.

Para os valores do módulo de elasticidade (E_s) e do coeficiente de Poisson (ν) foram utilizados como referência os valores sugeridos por Bowles (1997), item 2.6. Para os valores do E_s foram adotados: muito rija, E_s igual a 25 MPa e dura E_s igual a 50. O valor do ν adotado foi igual a 0,40.

O Quadro 1 mostra os resultados obtidos para os coeficientes de mola utilizando a equação proposta por Vesic.

Quadro 1 – Cálculo dos coeficientes de mola.

N_{SPT}	E_s	EI	ν	k_n	$A_i = B \cdot I$	$K_i = 2 \cdot (k_n \cdot A_i)$
	(kN/m ²)	(kN.m ²)	–	(kN/m ³)	(m ²)	(kN/m)
19	25 000	1 574 641	0,4	13 553	0,508	13 770
					1,016	27 540
35	50 000			28 718	1,016	58 355
					0,508	29 178

4.3 – Cálculo da rigidez relativa solo-estaca e classificação da estaca

Para o cálculo da rigidez relativa estaca-solo, o valor de K considerado é referente a primeira camada de solo, no topo da estaca, sendo igual a 27 540 kN/m².

O valor para a rigidez à flexão da estaca de concreto armado (EI) foi igual a 1 574 641 kN.m². Substituindo os valores de K e EI na equação 6, obtêm-se o coeficiente R igual a 2,75.

A relação entre o comprimento da estaca e o coeficiente R resultou num valor igual a 8,73. Sendo assim a estaca é classificada como flexível.

4.4 – Modelagem no software de cálculo estrutural SAP2000

A estaca foi modelada no SAP2000 por elementos de viga, e a interação solo-estaca foi feita pelo uso de molas lineares espaçadas a cada 1,0 m.

Foi gerada uma combinação para obtenção dos resultados, que considera as cargas atuantes mais o peso próprio da estaca, que é gerado automaticamente pelo SAP2000.

O comportamento do sistema estaca-solo é um assunto que envolve muitas variáveis, tornando-se assim complexo. Neste trabalho foram adotadas algumas hipóteses básicas para a simplificação do modelo de cálculo, que são: foi considerado que o solo e a estaca estão livres de tensões iniciais decorrentes da instalação, sendo iguais a zero; foi admitido que o solo e a estaca trabalham em regime elástico-linear; a estaca está parcialmente imersa em um semi-espaço, elástico linear, isotrópico; foi admitido que a estaca possui uma superfície rugosa, não existindo assim deslocamentos relativos entre a estaca e o solo e foram consideradas as forças volumétricas.

5 – RESULTADOS

5.1 – Modelo de cálculo do *software* SAP2000

Do modelo de cálculo foram obtidos resultados para momentos fletores, deslocamentos e reações nas molas, conforme mostram os gráficos das Figuras 4, 5 e 6.

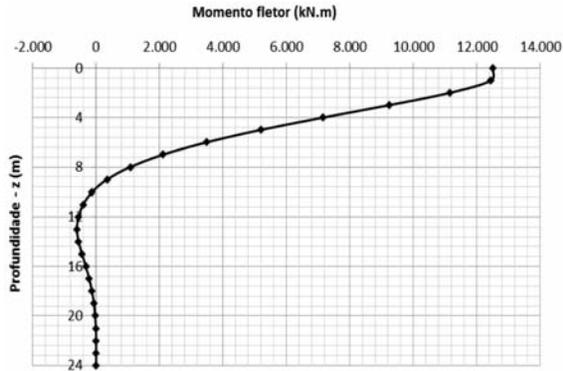


Fig. 4 – Variação dos momentos fletores com a profundidade (SAP2000).

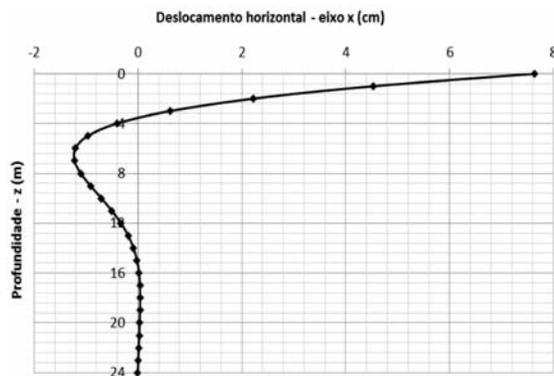


Fig. 5 – Variação dos deslocamentos horizontais com a profundidade (SAP2000).

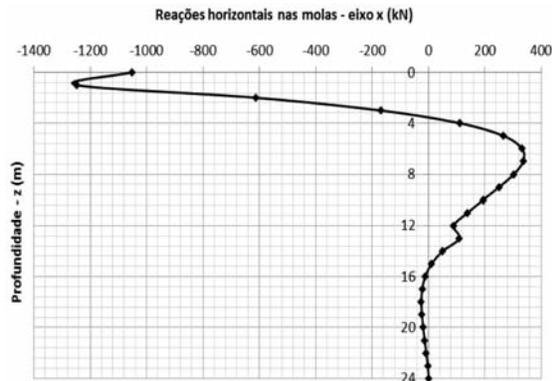


Fig. 6 – Variação das reações nas molas com a profundidade (SAP2000).

Verifica-se, conforme o gráfico da figura 6, que o valor da reação horizontal nos nós mais próximos da superfície apresenta valores não tão próximos do real, sendo muito elevados. Essa distribuição das reações horizontais resulta ser de uma análise linear-elástica.

5.2 – Método clássico da equação diferencial

Os resultados obtidos pelo método clássico foram 7,87 cm para o máximo deslocamento horizontal (topo da estaca) e 9994 kN.m para o máximo momento fletor, que corresponde a uma profundidade de 2,72 m (equação 9).

6 – DISCUSSÃO

6.1 – Comportamento da estaca no modelo de cálculo do SAP2000

Os resultados do modelo de cálculo mostram que a resposta da estaca se enquadra dentro do comportamento de estacas flexíveis. O modelo confirma o cálculo feito para a classificação da estaca (item 4.3), no qual o resultado obtido foi de estaca flexível.

Para solos coesivos, Davisson e Gill (1963) afirmam que a camada de solo que vai da superfície até profundidades de 0,2 R a 0,4 R exerce uma grande influência no comportamento da estaca. Com essas conclusões verifica-se que a região que deve mostrar o comportamento relevante da estaca está entre 0,55 m e 1,1 m. Verificando o modelo de cálculo, pode-se observar o comportamento relevante da estaca nos resultados dos deslocamentos horizontais. Os dois primeiros metros tiveram a maior variação, sendo para o topo 7,64 cm até 2,22 cm.

6.2 – Comparação dos resultados do modelo de cálculo do SAP2000 com o método da equação diferencial

O Quadro 2 mostra um comparativo dos resultados obtidos.

Quadro 2 – Comparativo dos resultados.

Deslocamento horizontal máximo		Momento fletor máximo (z = 2,72 m)	
Eq. diferencial	SAP2000	Eq. diferencial	SAP2000
$yT_{máx}$ (cm)	$yT_{máx}$ (cm)	M_r (kN.m)	M_r (kN.m)
7,87	7,64	9994	9713

A posição do momento fletor máximo calculada pelo método da equação diferencial foi igual a 2,72 m, não sendo a mesma encontrada no modelo de cálculo, que foi no topo da estaca.

Os resultados para os dois métodos ficaram muito próximos, com uma variação de 3% para o deslocamento horizontal e o momento fletor.

7 – CONCLUSÕES

Os resultados do modelo de cálculo mostram que a resposta da estaca se enquadra dentro do comportamento de estacas flexíveis e a região que mostra o comportamento relevante está de acordo com as conclusões indicadas por Davisson e Gill (1963).

Os resultados do modelo de cálculo com o método clássico ficaram muito próximos, tanto para os deslocamentos horizontais, como para os momentos fletores. Mas uma observação que deve ser apresentada em relação a este método é a indicação da posição do momento fletor máximo, dado que, conforme os resultados obtidos do SAP2000, o momento fletor máximo na estaca não se encontra na profundidade que foi calculada pelo método da equação diferencial clássica.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT (2007). NBR-61118. *Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro.
- Bowles, J.E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Inc., Fifth Edition. International Edition.
- Cintra, J.C.Â. (2002). *Carregamento Lateral em Estacas*. Oficina de Textos. Departamento de Geotecnia, São Carlos. São Paulo.
- Crespo, V.A. de S. (2004). *Estudo da sensibilidade de edificações em relação ao solo*. Tese de Mestrado em Eng. Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro. 108 p.
- Davisson, M.T.; Gill, H.L. (1963). *Laterally loaded piles in a layered soil system*. J. Soil Mech. Found. Engrng., ASCE, 89(3), pp. 63-94.
- Davisson, M.T. (1970). *Lateral load capacity of pile groups*. Highway Research Record, nº 333, pp. 104-112. Washington, DC.
- Diniz, R.A.C. (1972). *Análise de Esforços em Estruturas Aperticadas com Fundações em Estacas*, Tese (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro.
- Hetényi, M. (1946). *Beams on Elastic Foundation*. Univ. of Mich. Press. Ann Arbor. Michigan.
- Khouri, M.E. (2001). *Contribuição ao projeto de estacas e de pontes de concreto armado com consideração das não-linearidades física e geométrica e interação solo-estrutura*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Univ. de São Paulo. São Paulo, 215 p.
- Matlock, H.; Reese, L.C. (1960). *Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 86, SM5, pp. 63-91.
- Palmer, L.A.; Thompson, J.B. (1948). *The Earth Pressure and Deflection Along Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrust*. Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., GEBR Kesmat, Haarlem, the Netherlands, v. 5, pp. 156-161.
- Rody, H.A. (2010). *Análise numérica de uma estrutura de cais por dois modelos de representação do solo*. Tese (Mestrado). Univ. Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro, 142 p.
- Santos, J.A. (2008). *Fundações por estacas ações horizontais. Elementos Teóricos*. Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. Obras Geotécnicas. Lisboa.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Terzaghi, K.; Peck, R.B. (1948), *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.

- Terzaghi, K. (1955). *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Geotechnique, vol. 5, n°. 4, pp. 297-326.
- Vesic, A.B. (1961). *Beams on elastic subgrade and the Winkler hypothesis*. Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., vol. 1, pp. 845-850, Paris.
- Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*. H. Dominicus. Prague.