



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Influência do Solo Sob o Bloco de Coroamento na Resposta Dinâmica de um Bloco de Concreto Armado

Paulo Henrique Maciel Barbosa¹, Cláudio José Martins²

^{1,2} Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Civil / paulohenriquemb@gmail.com

Resumo

In this paper the influence of soil under pile-cap on the response of a reinforced concrete frame structure designed to support vibrating equipment under the action of dynamic excitations of large magnitude was analyzed. The foundation of this structure is composed of borehole piles connected to the superstructure by a rigid pile-cap. For the evaluation of the structural response numerical models based on finite element method (FEM) were considered, adopting Winkler's model for the elastic behavior of soil. Specifically, the influence of pile stiffness and contribution of soil under pile-cap was assessed. Specifically, the displacements and pile reactions were evaluated. From the obtained results, it can be seen that the contribution of soil under pile-cap was too small for the case study examined. There were not variations in the deformation, but in relation to pile reactions, results suggest that for foundations with large number of piles, some savings can be achieved by considering the contribution of the soil.

Palavras-chave

Structural vibrations, Winkler's model for piles, dynamic actions in foundation, Soil-Structure Interaction.

1 Introdução

Neste trabalho abordou-se o problema das fundações profundas sob ações dinâmicas, especificamente em relação ao comportamento deste sistema em função da variação na rigidez das estacas da consideração do solo sob o bloco de coroamento. A avaliação do comportamento estrutural será efetuada a partir da análise de uma estrutura apertada em concreto armado, cujas 50 estacas tipo hélice contínua de diâmetro 80 centímetros e comprimento médio de 16 metros, estão espaçadas a cada 3,0 metros nas direções longitudinal e transversal. Esta estrutura recebe ações dinâmicas que são transferidas ao bloco de coroamento em concreto estrutural de altura 3,2 metros e dimensões em planta 30,0 por 15,0 metros.

Um dos aspectos fundamentais no projeto de estruturas sob ações dinâmicas refere-se ao controle dos níveis de vibrações. Estes níveis deverão ser limitados a valores relativamente reduzidos de modo a não danificar, ou por em risco, a funcionalidade dos equipamentos, provocando desconforto aos usuários da estrutura e edificações próximas. A resposta dinâmica de uma estrutura será influenciada significativamente pela rigidez da fundação. Estudos desenvolvidos por GAZETAS *et al.* (1983), MELLO *et al.* (1997), GAZETAS *et al.* (2010), KORKOULIS *et al.* (2011) e outros, apresentam influência dos parâmetros elásticos de fundações no comportamento de estruturas frente a excitações dinâmicas.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Em relação à influência da rigidez do estaqueamento, alguns softwares incorporam o conceito da interação solo-estrutura visando distribuir os esforços nas estacas e simular o comportamento estrutural de forma mais precisa. Já em relação à contribuição do solo na capacidade de carga do estaqueamento alguns poucos trabalhos foram elaborados, como por exemplo, MELLO *et al.* (1997). O estudo da contribuição do solo sobre o bloco na redução das cargas sobre as estacas para o caso de ações estáticas tem demonstrado que para solos com características físicas mais baixas (resistência e deformabilidade), o bloco de coroamento não consegue absorver esforços significativos. Já quando os parâmetros físicos do solo são maiores, uma parcela significativa de carga poderá ser absorvida, como já estudado por MELLO *et al.* (1997).

Com base na exposição acima é proposto neste trabalho analisar o comportamento da fundação profunda de um pórtico espacial em concreto armado sujeito a ações dinâmicas. Tais estacas absorverão os esforços originados das ações cíclicas provenientes de equipamentos industriais. Para isto, serão adotados modelos de Winkler, que apesar de simplificados, conduzem a comportamentos globais adequados. Serão elaborados modelos numéricos da estrutura, considerando-se tanto estacas rígidas quanto flexíveis. Além disto, será avaliada a influência da capacidade de carga do bloco apoiado sobre o solo. Estes modelos serão analisados visando avaliar a redução das ações nas estacas, com consequente economia no estaqueamento.

Cabe ressaltar, que neste trabalho questões relacionadas ao dimensionamento geotécnico das fundações e efeito de grupo nas estacas não serão abordados.

1.1 Justificativa

Este artigo permitirá uma avaliação da contribuição do solo e da rigidez das estacas no comportamento global da estrutura, tanto para ações estáticas quanto dinâmicas. Poucos estudos abordam a influência da rigidez do solo, dos elementos estruturais de fundação, e da interação entre bloco de coroamento com o solo. Para o caso de ações dinâmicas, não foi possível encontrar estudos relacionados.

Desta forma, a análise de fundações profundas sob ações dinâmicas, considerando a rigidez do estaqueamento e a contribuição do solo, permitem a avaliação do comportamento dinâmico da estrutura, frente às cargas cíclicas de equipamentos, considerando a interface bloco de coroamento-solo, e se justifica pelas seguintes razões:

- a) Poderemos analisar de forma mais precisa, o comportamento do sistema máquina-fundação-solo quanto da presença de ações dinâmicas;
- b) De acordo com os resultados encontrados, será possível promover economia em relação ao quantitativo (comprimento) dos elementos do estaqueamento, devido a uma melhor distribuição das cargas nas estacas. Será possível também a determinação das deformações e vibração estruturais com maior precisão.

1.2 Metodologia

Este artigo será pautado por pesquisas bibliográficas relacionadas ao tema proposto, quais sejam: interação solo-estrutura e ações dinâmicas em fundações profundas. Serão pesquisados



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



trabalhos relacionados à contribuição na resposta estrutural sob ações estáticas e dinâmicas do solo sob o bloco de coroamento.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa será baseada na análise numérica via métodos dos elementos finitos (MEF), de um projeto de fundações para base de máquinas, de uma estrutura de um pórtico em concreto armado, como já descrevemos. As estacas da fundação são espaçadas em 3 metros cada, eixo a eixo.

Realizaremos simulações visando avaliar a influência da rigidez das estacas e a contribuição do solo sob o bloco de coroamento, na resposta estrutural.

Serão considerados os seguintes modelos numéricos:

- a) Modelo 1: apenas contribuição do solo sob o bloco;
- b) Modelo 2: estacas rígidas sem a contribuição do solo sob o bloco;
- c) Modelo 3: estacas rígidas com a contribuição do solo sob o bloco;
- d) Modelo 4: estacas flexíveis sem a contribuição do solo sob o bloco;
- e) Modelo 5: estacas flexíveis com a contribuição do solo sob o bloco;

Para a realização destas análises, adotamos as considerações estabelecidas na norma NP1848 (2008), pertencente à Petrobrás (BR), que define procedimentos para a determinação dos coeficientes de mola do sistema solo-estrutura. A determinação destes coeficientes de mola segundo a norma NP1848 (2008) levará em consideração ensaios SPT (Standard Penetration Test) do solo, geometria das estacas, e suas propriedades elásticas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson), além das propriedades físicas do solo (correlacionadas aos ensaios SPT). As modelagens numéricas, através do método dos elementos finitos, serão conduzidas pelo software SAP2000 versão 14, do fabricante *Computer and Structures, Inc* (2002).

As análises e operação do software SAP 2000 versão 14 foram realizadas no Laboratório de Mecânica Computacional do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET/MG, em Belo Horizonte.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar, através de simulações numéricas baseadas no método de elementos finitos, como a rigidez das estacas e o solo sob o bloco de coroamento contribuirão para a redução da reação nas estacas e alteração nos níveis de vibrações, visando avaliar a influência da rigidez das estacas e a presença do solo sob o bloco de coroamento de estacas.

Entretanto, são objetivos específicos:

- a) Estudar os conceitos envolvidos na análise dos problemas de interação solo-estrutura e dinâmica estrutural;
- b) Elaborar modelos numéricos baseadas no MEF de estrutura em concreto armado, considerando estacas rígidas, flexíveis e a presença do solo sob o bloco;
- c) Estudar o comportamento mecânico do sistema perante ação estática;
- d) Estudar o comportamento mecânico do sistema perante ações dinâmicas.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

2 Interação Solo-Estrutura

A evolução das técnicas construtivas na engenharia civil propiciou o aumento na magnitude das cargas nas edificações, que em muitas situações transferiram à engenharia de fundações, a tarefa de solucionar problemas em fundações profundas (normalmente estacas ou tubulões) solicitadas por cargas verticais conjugadas a esforços transversais (DEL PINO *et al.*, 2002).

As fundações profundas podem transmitir as ações ao terreno tanto através do atrito das paredes laterais do elemento estrutural contra o solo quanto, por sua ponta, definição apresentada por MELLO *et al.* (1997). As estacas abordadas neste trabalho são do tipo hélice-contínua, e desta forma espera-se uma contribuição significativa do atrito lateral na capacidade de carga geotécnica das mesmas.

Para um projeto de estacas, MELLO *et al.* (1997) apresenta duas condições básicas:

- a) Segurança adequada quanto à ruptura tanto do solo que envolve a estaca quanto dos materiais que a compõem;
- b) Deslocamentos e deformações angulares do topo da estaca aceitáveis para a estrutura.

Quanto as cargas em uma fundação do tipo estacas, MATOS FILHO *et al.* (2007) apresentam em seus estudos que o critério para projeto, na maioria dos casos, não determina a capacidade de carga última na estaca, mas sim o máximo deslocamento da mesma. O projeto exige a verificação do estado limite último, mas o critério determinante para o dimensionamento na maioria das vezes, é a verificação do estado limite de utilização.

3 Análise Dinâmica

Na maioria dos casos a análise dinâmica de um sistema estrutural pode ser simplificada a um modelo matemático de parâmetros discretos. O mais simples desses modelos é o sistema com um grau de liberdade constituído de massa, mola e amortecedor, no qual a posição em qualquer uma das suas partes é descrita por uma única variável em função do tempo. Embora tal modelo possa representar uma aproximação grosseira do sistema real, existem muitos casos em que ele constitui um exemplo satisfatório (ALMEIDA, 2002).

A qualidade da resposta dinâmica oferecida por um sistema de um único grau de liberdade depende principalmente, da variação no tempo, da distribuição espacial das cargas, propriedades de rigidez e inércia do sistema real. Quando um sistema requer mais de uma variável para definir sua posição, ele possui mais de um grau de liberdade. Assim, o número de graus de liberdade de um sistema é o número de variáveis independentes necessárias para definir a posição deste em qualquer instante de tempo (ALMEIDA, 2002).

4 Caracterização da Estrutura

A seguir, descrevem-se as características da estrutura abordada neste trabalho. Trata-se de um pórtico tridimensional em concreto armado apoiado em estacas tipo hélice-contínua e que serve de suporte e absorve ações estáticas e dinâmicas de equipamentos vibratórios, notadamente de uma turbina geradora de vapor. Serão apresentados a seguir a geometria detalhada da estrutura, as magnitudes e pontos de aplicação das ações, as combinações de ações consideradas, os procedimentos de obtenção dos parâmetros de rigidez das estacas e solo e os modelos numéricos desenvolvidos.



4.1 Estrutura analisada

De acordo com a geometria indicada na planta e cortes a seguir, a laje superior do pórtico estudado trata-se de um conjunto de 3 (três) lajes com alturas variáveis. Estas estão apoiadas em um conjunto de 8 (oito) pilares maciços com dimensões e alturas variáveis. As figuras 2 a 8 a seguir apresentam as plantas, cortes e perspectivas da estrutura analisada.

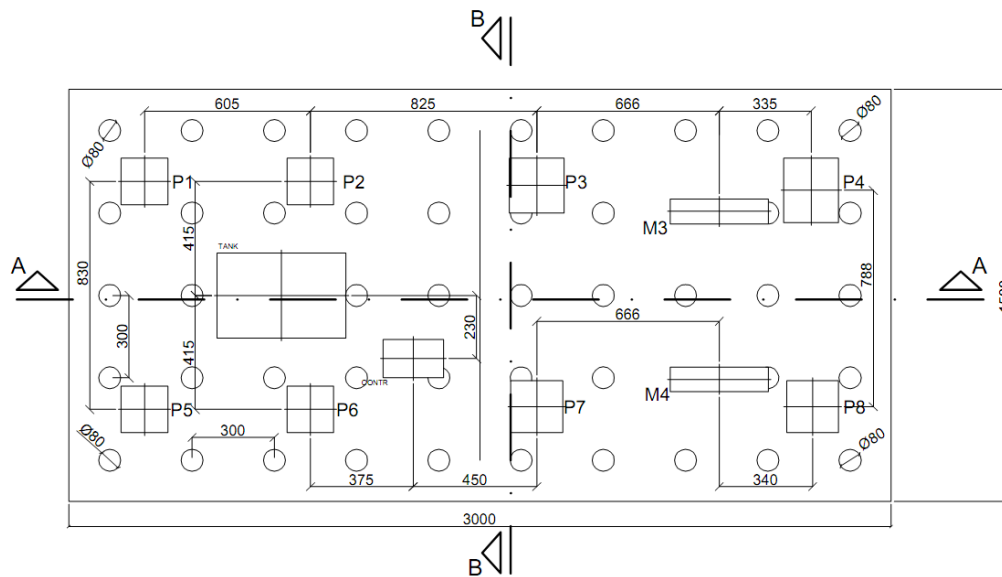


Figura 1: Pilares e maciço sobre o bloco de coroamento das estacas.

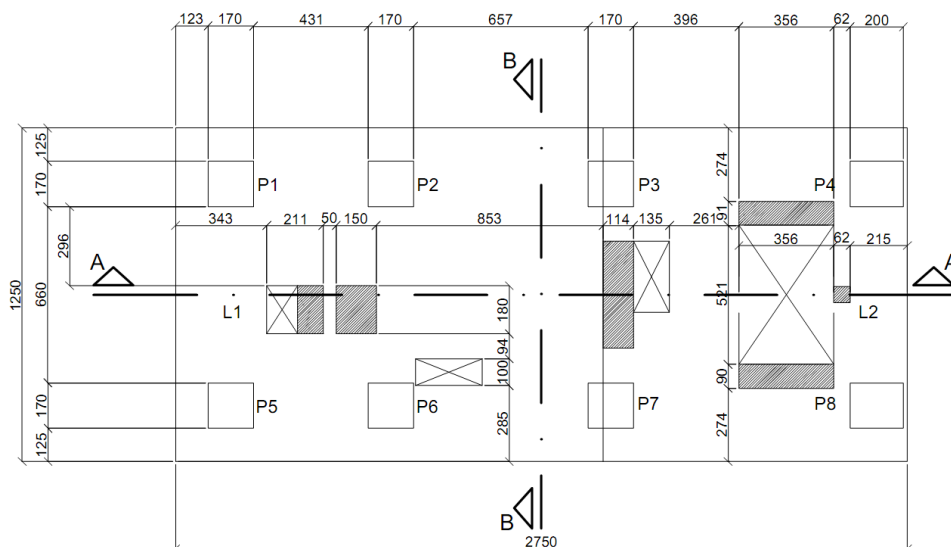


Figura 2: Laje superior do pórtico em concreto armado.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

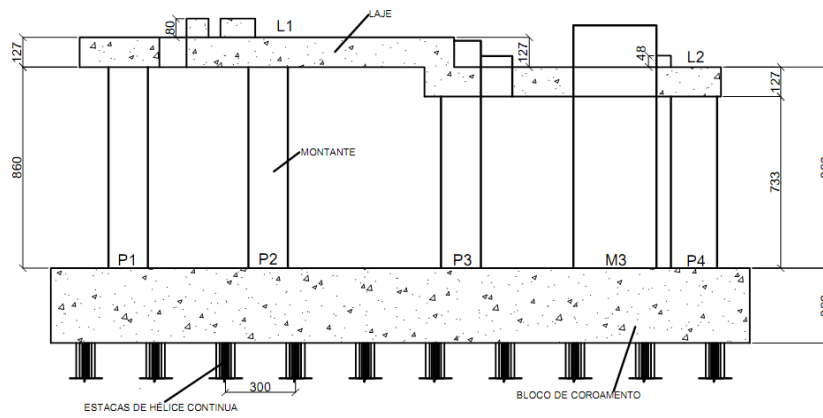


Figura 3: Corte Longitudinal AA

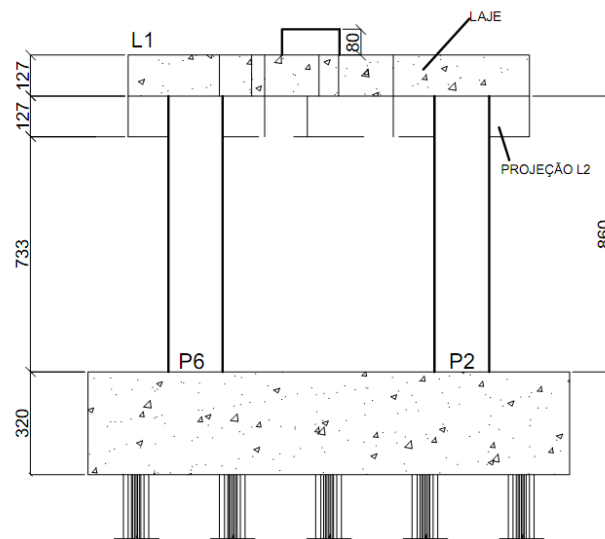


Figura 4: Corte Transversal BB.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

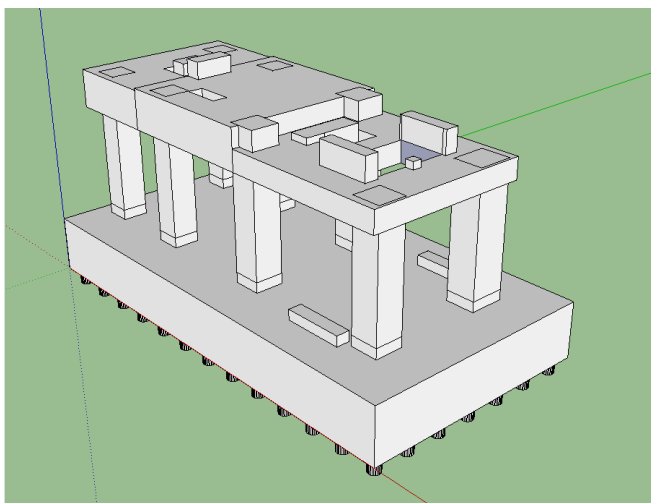


Figura 5: Estrutura analisada em perspectiva.

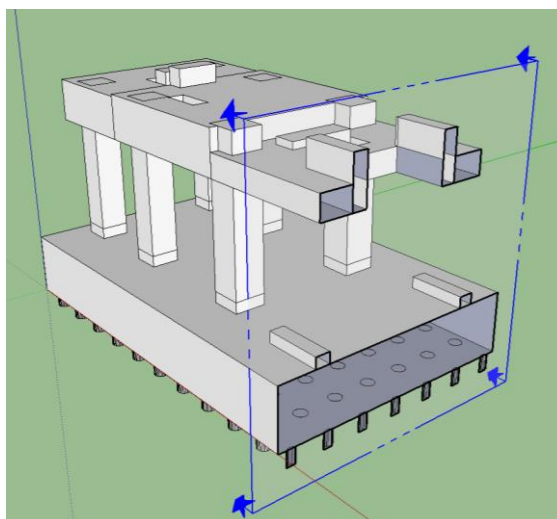


Figura 6: Corte transversal da estrutura aporcada.

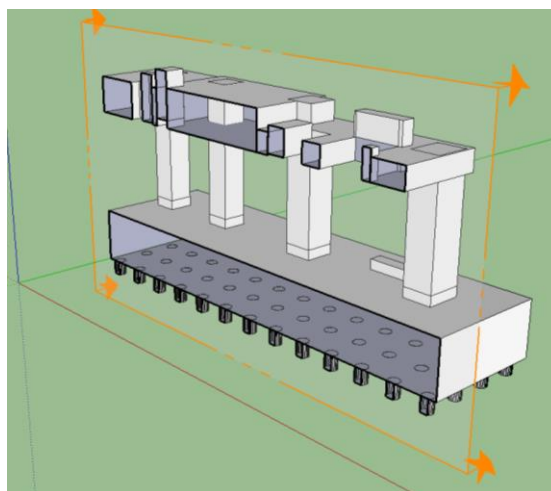


Figura 7: Corte longitudinal da estrutura aporcada.

4.2 Materiais estruturais

O projeto da estrutura foi desenvolvido considerando a classe de agressividade III conforme NBR 6118 (2003). Referente às estacas, as especificações técnicas destas foram seguidas de acordo com o catálogo de fabricação do fornecedor de estacas pré-moldadas.

4.3 Ações

Foram consideradas as seguintes ações atuantes sobre a estrutura:

a) Peso próprio da estrutura: Para o cálculo do peso próprio da laje, viga, blocos, pilares e estaca da estrutura considerou-se peso específico do concreto igual a 25kN/m^3 . O peso próprio é calculado automaticamente pelo software.

b) Sobrecarga de utilização (SCU): Considerou-se sobrecarga de utilização no valor de 5kN/m^2 , atuando na laje superior e mezanino. Cabe ressaltar que o mezanino encontra-se situado em nível intermediário entre a laje de topo e o bloco de estacas, e a sua contribuição foi considerada, através da inclusão de esforços proporcionais a sua área de influência sobre os pilares. Sobre o piso apoiado diretamente no solo, considerou-se sobrecarga de 10kN/m^2 .

c) Foram consideradas as ações dinâmicas de carregamento quanto aos equipamentos utilizados sobre o bloco com intensidade de acordo com normas internas do fabricante. As ações decorrente das cargas dinâmicas da turbina e da máquina de vapor com frequências 150Hz e 60Hz, são respectivamente:

- Ações com frequência de 60Hz: Direção e sentidos indicadas na figura 9 – 1425,10KN e 456,20KN;
- Ações com frequência de 150Hz: Direção e sentidos indicados na figura 10 – 1011,60KN e 2023,40KN.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



d) Ações de vento: Para a carga do vento, considerou-se a velocidade utilizada para o dimensionamento da estrutura, chamada de velocidade característica. Para determinar o valor desta velocidade são considerados os fatores topográficos do terreno, a influência da rugosidade do solo envolta da estrutura e as dimensões da edificação. A velocidade característica do vento é dada por 47,02m/s.

4.4 Determinação dos coeficientes de mola

A determinação dos coeficientes de mola tanto do solo sob bloco de coroamento (K_s) quanto do conjunto solo-estaca (K_x , K_y , K_z e K_ϕ) foram obtidos pelos procedimentos estabelecidos na norma NP-1848 (2008).

O anexo I apresenta a transcrição do relatório de sondagem representativo do local de implantação da estrutura. Observa-se que na profundidade próxima a 11,30 metros o relatório apresenta a existência de solo rígido. Desta forma, para o cálculo e determinação dos coeficientes de mola, consideraram-se as camadas deformáveis do solo, possíveis de compressão. O valor do coeficiente de Poisson para solo homogêneo, de acordo com os procedimentos descritivos na NP-1848 (2008) é de 0,25.

Os coeficientes de mola calculados foram agrupados em 5 tipos, sendo três relacionados às estacas e sete relacionados ao solo, conforme listado abaixo:

- K_x e K_y : Coeficientes de molas horizontais de uma estaca com valores iguais em ambas às direções;
- K_z : Coeficiente de mola vertical de uma estaca;
- $K_{\phi x}$ e $K_{\phi y}$: Rigidez de mola rotacional de uma estaca. Valores iguais em ambas as direções;
- K_{sx} e K_{sy} : Coeficientes de molas horizontais do solo. Iguais em ambas as direções;
- K_{sz} : Coeficiente de mola vertical do solo.

5 Conclusão

Neste trabalho estudou-se a contribuição do solo e a influência da rigidez das estacas na análise dinâmica de um pórtico em concreto armado. Foram analisados 5 modelos visando avaliar as contribuições do solo e da rigidez do estaqueamento. As análises para estes diferentes modelos foram realizadas baseadas no MEF, e tanto o solo como as estacas foram modeladas como elementos de mola (teoria de Winkler).

De acordo com os resultados oriundos dos modelos numéricos adotados para simular a resposta de uma estrutura real formada por pórtico em concreto armado apoiado sobre estacas, percebe-se que para este estudo de caso a influência na resposta da estrutura à consideração do solo como elemento de fundação é pequena.

Já em relação a consideração das estacas com rigidez infinita, observou-se que para este estudo de caso, as variações nos deslocamentos não foram elevadas mas as reações nas estacas apresentaram variações significativas.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Quando analisamos somente os elementos com rigidez finita (modelos 4 e 5), observou-se variação nas deformações em torno de 0,8% enquanto para as reações vertical, horizontal e momento fletor sobre as estacas estas variações foram da ordem de 4%, 10% e 3%, respectivamente.

Para os modelos que apresentam rigidez infinita das estacas, os deslocamentos variaram na ordem de 8% em relação ao modelo de estacas com rigidez finita. Em relação às reações nas estacas, a variação encontrada foi da ordem de 130%, 800% e 2000% para reações vertical, horizontal e momentos fletores, respectivamente.

Conclui-se então que a adoção de modelos numéricos considerando as estacas com rigidez infinita podem ocasionar variações nas deformações das estrutura e alterações muito significativas nas reações sobre as estacas. Assim, para estaqueamentos recomenda-se a adoção de modelos numéricos cujas estacam apresentem rigidezes finitas.

A contribuição do solo sobre o bloco de estacas foi pequena para este estudo de caso, tanto considerando-se análises estáticas quanto dinâmicas. Não ocorreram variações notáveis nas respostas de deformações, mas em relação às reações nas estacas as variações chegaram a 10%, o que sugere que para fundações com grande quantidade de estacas alguma economia pode ser alcançada considerando-se a contribuição do solo.

6 Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pelo financiamento desta pesquisa.

7 Referências

- Alexander Tyapin. *Potential of Winkler type platform models for SSI problems considering flexibility of base mat*. Nuclear Engineering and Design 263 (2013) 18-31.
- Almeida, Edgard Sant'Anna de, Neto. *Introdução a análise dinâmica de fundações de máquinas*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Fundações) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Bowles, J. E., 1996, *Foundation analysis and design*, 5 ed., McGraw-Hill.
- Broms, B. B.; Lateral Resistance of piles in cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, V. 90; n° SM2; May, 1964, p. 27-63.
- Covas, Nelson e Almeida S. Valério (2002). *Sises – Sistema de Interação solo-estrutura*. XVI CILAMCE.
- Del Pino JR, A.; Segantinni, A. A. S.; Carvalho, D. *Análise de estacas escavadas carregadas transversalmente, em solo colapsível, com umidade natural e após sua inundação*. In: COBRAMSEG, 12., 2002, São Paulo. Anais. São Paulo: ABMS, 2002. v. 3, p. 1493-1501.
- Dutta, S. C.; Roy R. (2002). A critical Review on Idealization and Modeling for Interaction Among Soil-Foundation-Structure System. *Computers and Structures* 80, pp. 1579-1594.
- Gazetas, G. *Analysis of Machine Foundations Vibration. State of the art*. Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Eng. 2-2:42, 1983.
- Gazetas, G. I. Anastasopoulos, G. Antonakos, *Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 30 (2010) 912-924.
- Gazetas, G. Gerolymos, N. *Winkler model for lateral response of rigid caisson foundations in linear soil*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006) 347-361.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

- Gazetas, G. I. Anastasopoulos, O. Odamidis, Th. Kontoroupi *Nonlinear rocking stiffness of foundations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 47 (2013) 83-91.
- Gusmão, A. D., Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações, Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (1990).
- Iwamoto, R. K. (2000). *Alguns aspectos dos efeitos da interação solo – estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Orientadora: Prof^a Dra. Helena M. C. Carmo Antunes.
- Jin Yu, Chenrong Zhang, Maosong Huang. *Soil-pipe interaction due to tunnelling: Assessment of Winkler modulus for underground pipelines*. Computer and Geotechnics. 50 (2013) 17-28.
- Kourkoulis, I. Anastasopoulos, F. Gelagoti, G. Gazetas, *Interaction of foundation structure systems with seismically precarious slopes: Numerical analysis with strain softening constitutive model*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 (2011) 1430–1445
- Matos Filho, R. F. de; Paiva, João Batista de, *Análise da Interação Estaca-Solo via Combinação do Método dos Elementos Finitos com o Método dos Elementos de Contorno*. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2007.
- Mello, Vitor F. B. de e Sobral, Antônio Carlos . *Fundações por estacas: Previsões e controles tradicionais reapreciados mediante estatística*. 6º CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNICA vol. II e III, 1997, Lisboa.
- Michalowski RL. Slope stability analysis: a kinematic approach'. Geotechnique 1995;45(2):283–93.
- Moura, A.R.L.U. de (1995). *Interação Solo-Estrutura em edifícios*. Recife. 135p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CT Engenharia Civil.
- NBR-6118, 2003, *Projeto e execução de obras de concreto armado*, ABNT.
- NBR-6122, 1996, *Projeto e execução de Fundações*, ABNT.
- NBR-6123, 2003, *Ação do vento em edificações*, ABNT.
- PETROBRÁS, NP-1848, *Projeto de Fundações de Máquinas* – Rio de Janeiro.
- Rao, P. S. et al. (1995). Representation of soil support in analysis of open plane frames. Computers & Structures, Vol. 56, N° 6, pp. 917-925; apud HOLANDA Jr, O. G. (1998).
- Reis, J. H. C., Interação solo estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole, Tese de Mestrado, USP/São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil (2000).
- SAP 2000 Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., 2002.