

2 Vibrações em estacas

2.1. Frequência natural de vibração e ressonância

Todo sistema físico capaz de vibrar possui uma ou mais frequências naturais de vibração, isto é, que são características do sistema físico, mais precisamente da maneira de como este sistema é constituído. São alguns exemplos de sistemas físicos: um pêndulo ao ser afastado do ponto de equilíbrio, cordas de um violão, uma ponte para a passagem de pedestres sobre uma rodovia movimentada, e até mesmo elementos de fundações como estacas.

Se a frequência natural de oscilação do sistema e as excitações constantes sobre ele estiverem sob a mesma frequência, a energia do sistema será aumentada, fazendo com que o sistema vibre com amplitudes cada vez maiores. A esse fenômeno é dado o nome de ressonância.

Estacas são usadas como elementos de fundações para suportar estruturas em várias situações envolvendo ambas as situações estáticas e dinâmicas. Exemplos de situações dinâmicas são as estacas usadas para fundações de máquinas e outros equipamentos que vibram.

Se, por exemplo, a frequência de vibração de um determinado equipamento (agente excitador) se aproxima da frequência natural de uma dada fundação as amplitudes de vibração do sistema tendem a ser cada vez maiores. A ressonância ocorre quando a frequência do agente excitador é igual à frequência natural do sistema. Deve-se evitar a ressonância para que as amplitudes de vibração não se tornem muito intensas e causem danos às pessoas, máquinas e instalações (Puri, 1988).

Uma estaca que suporta uma fundação com uma máquina (agente excitador) pode ser excitada na vertical, na horizontal, em *rocking* ou em modo torsional de vibração dependendo da natureza, distribuição, configuração das forças desbalanceadoras geradas pela máquina.

Projetos adequados de fundações de máquinas são caracterizados por pequenas amplitudes de vibração, de modo que teorias lineares são adequadas para calcular a resposta de tais fundações. As teorias de Novak (1974, 1977), e Novak e El-Sharnouby (1983) têm sido comumente usadas para tal objetivo.

Ainda há poucos dados de comparação da resposta dinâmica de estacas entre o comportamento previsto e o observado, porém atualmente se destacam os trabalhos Kitiyodom e Matsumoto (2008), que desenvolveram um programa numérico híbrido para análise de cravação de estacas e para análise de provas de carga estáticas nas direções horizontal e vertical. Nesse trabalho foram obtidos resultados satisfatórios entre comportamentos medidos e calculados.

2.2. Análise de vibração em estacas

A resposta de uma estaca que suporta uma máquina é geralmente obtida: (1) usando aproximações simplificadas tal como o uso do conceito de módulo de fundação (Barkan, 1962; Maxwell 1969) para obter molas com comportamento estático-cinemático equivalentes ao solo; (2) tratando a estaca como uma viga em balanço fixa em sua ponta; (3) tratando o problema da estaca como um caso de propagação de uma onda unidimensional em uma barra (Richart; Hall; Woods 1970); e (4) estendendo a solução de Baranov (1967) para fundações embutidas e determinando a rigidez e o amortecimento do sistema estaca solo de uma aproximação de um semi-espaço (Novak, 1974, 1977), Novak e El-Sharnouby (1983), Novak e Howell (1977). Dentre essas metodologias, a de Novak é uma das mais utilizadas para a análise dinâmica de fundações. Baseado na solução analítica de Baranov (1967), Novak (1977) propôs um método para determinação da resposta de estacas sob carregamentos dinâmicos. Porém, o método em que a estaca é modelada como um elemento de viga e o solo como molas de Winkler alcança bons resultados quando comparado com testes em escala real, mas não é recomendado em situações onde a distância entre estacas seja inferior a cinco diâmetros (Chowdhury, 2009).

A solução de Novak é baseada em gráficos, que fornecem a rigidez e o amortecimento de uma estaca e a solução é ligada a um grau de liberdade

fundamental. O modelo de Novak possui algumas limitações: a solução não considera os efeitos inerciais da estaca; a extrapolação é requerida quando dados do projeto ultrapassam os limites dos gráficos; os gráficos são disponíveis apenas para estacas de concreto e madeira, não há gráficos para estaca de aço; os gráficos não estão adaptados para situações de estacas parcialmente imersas em solo.

Em certos casos quando estacas suportam compressores, torna-se essencial checar o projeto para mais frequências de vibração, para garantir que elas não se combinem com o segundo ou terceiro harmônico. Nessa situação, a aplicação do método dos elementos finitos ou Rayleigh-Ritz, em que a estaca é modelada como um elemento de barra ou viga e o solo como molas de Winkler, fornece resultados satisfatórios para medir as frequências superiores (Chowdhury, 2009).

2.3. Testes dinâmicos em estacas

Testes de vibração são efetuados pela introdução de uma função de força em uma estrutura, usualmente com algum estímulo físico que cause a excitação e consequente vibração da estrutura. Testes de vibração podem ser executados para a determinação das frequências naturais de vibração.

O ensaio de carregamento dinâmico ou prova de carga dinâmica é um ensaio que objetiva principalmente determinar a capacidade de carga da interação estaca-solo, através da medição da força e da aceleração em uma seção do elemento estaca durante o impacto do martelo de cravação. O equipamento gerador da força de impacto é um bate-estacas ou similar.

O ensaio de carregamento dinâmico pode ser executado em todas as estacas cravadas e em estacas moldadas *in loco*. A norma brasileira para o ensaio de carregamento dinâmico é a NBR 13208 e a norma norte americana é ASTM D-4945.

A instrumentação é feita através de um par de transdutores de deformação e de um par de acelerômetros. Estes são fixados em posições opostas em relação ao eixo de simetria da estaca, de modo a detectar e compensar possíveis efeitos de flexão na estaca, que eventualmente ocorrem quando da aplicação dos golpes do martelo. A instalação dos sensores no fuste da estaca é realizada em uma seção situada abaixo do topo da estaca. Os acelerômetros podem ser do tipo

piezoelétrico ou piezorresistivo. A Figura 1 ilustra os sensores utilizados em um ensaio típico de carregamento dinâmico.



Figura 1 - Transdutores de aceleração (direita) e deformação (esquerda) fixados em uma estaca (Cortesia: Fugro In Situ Geotecnia Ltda)

Durante o impacto do martelo de cravação, os sinais dos sensores de aceleração e deformação longitudinais são armazenados numa unidade aquisitora. São utilizados cabos de transmissão de dados para a interligação entre os sensores e a unidade aquisitora. A Figura 2 ilustra uma estaca instrumentada pronta para um ensaio de carregamento.



Figura 2 - Estaca instrumentada para ensaio dinâmico (Cortesia: Fugro In Situ Geotecnia Ltda)

O ensaio de carregamento dinâmico é baseado na teoria da onda Smith (1950, 1955, 1957, 1960). Na época do desenvolvimento dessa teoria também se destacam-se trabalhos de Abramson *et al* (1968) e Samson *et al* (1963).

Goble *et al* (1970, 1972) desenvolveram pesquisas que levaram aos equipamentos e métodos de ensaios de carregamentos dinâmicos atuais. Destaca-se também a modelagem de estacas sob ação de carregamentos dinâmicos nos trabalhos de Lee *et al* (1988), Deeks e Randolph (1992), Lysmer *et al* (1999) e Randolph (2000). Mais recentemente Kitiyodom *et al* (2006) desenvolveram modelos tridimensionais para a análise de vibrações em estacas.

Apesar de o foco do ensaio de carregamento dinâmico ser a determinação da capacidade de carga da estaca, os acelerômetros do ensaio possibilitam a determinação das frequências naturais de vibração que podem ser obtidas através de uma FFT (*Fast Fourier Transform*) que será discutida no item 6.5.