

Comparação de Teorias de Interação entre Estacas Para o Caso de Uma Linha de Cinco Estacas

Tallyta da Silva Curado

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí - GO, Brasil,
tallytacurado@gmail.com

Maurício Martines Sales

Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil,
sales.mauricio@gmail.com

RESUMO: Com a expansão dos centros urbanos, verifica-se a tendência de verticalização das estruturas, com estas sendo cada vez mais esbeltas e construídas em áreas menores. Com isso, por muitas vezes é necessário dimensionar fundações profundas, como as estaqueadas, de modo a resistir altos esforços solicitantes e com pequena disponibilidade de espaço para sua construção, implicando em blocos com muitas estacas e próximos uns aos outros, ou mesmo chegando a se ter a formação de radiers estaqueados. A influência dessa elevada quantidade e proximidade de estacas não pode ser desprezada, devendo ser levada em consideração no dimensionamento da fundação, principalmente quando analisados os recalques. Para considerar o efeito de uma estaca em outra, várias teorias vêm sendo formuladas para representar melhor a interação entre estacas. Esse trabalho tem por objetivo estudar algumas teorias existentes na previsão do fator de interação entre estacas, comparando resultados de fatores de interação encontrados considerando a presença de duas estacas e de cinco estacas dispostas em linha. Foram comparados os resultados obtidos por Poulos e Davis (1980) e El Sharnouby e Novak (1990) e ainda os determinados por meio do programa de método dos elementos finitos, baseado no método dos deslocamentos, chamado DIANA, como uma referência dos valores considerados mais próximos da solução exata. O artigo compara as teorias, tendo a variação de propriedades geométricas, como comprimento das estacas, e parâmetros elásticos do solo, de acordo com os valores utilizados na apresentação dos fatores de interação entre estacas, para uma linha de cinco estacas realizada por El Sharnouby e Novak (1990). Demonstra-se a diferença entre os fatores de interação verificando que há influência da presença de estacas ao redor das duas estacas avaliadas para determinação de fatores de interação entre as mesmas, sendo mais expressiva quanto mais próximas estão as estacas. As maiores variações entre os resultados encontrados foram quando considerados solos estratificados e ao se analisar as estacas presentes na extremidade da linha das cinco estacas, ou seja, as estacas que possuem a maior quantidade de estacas intermediárias entre elas. Percebe-se a importância dessa interação, principalmente, quando for realizado o dimensionamento de um grupo com maior quantidade de estacas, o que pode resultar em uma maior influência no comportamento do sistema de fundações.

PALAVRAS-CHAVE: Fatores de interação, Recalque de estacas, Grupo de estacas, Estacas.

1 INTRODUÇÃO

É notável a tendência mundial de se terem construções cada vez mais altas, esbeltas. Isso se deve ao crescimento populacional dos

centros urbanos e a falta de maiores áreas disponíveis para abrigar construções que atendem a essa demanda. Dessa forma, há aumento dos valores das solicitações das estruturas ao sistema de fundações, sendo que

este deve estar contido em um espaço pequeno impedindo-se ter fundações isoladas mais espaçadas. Com a proximidade das fundações, é necessário se avaliar aspectos oriundos dessa aproximação como o aumento da interação entre os elementos da fundação.

Ao se empregar fundações estacadas, uma das interações notórias é a que ocorre entre as estacas. Vários estudiosos têm contribuído com o avanço dos conhecimentos a cerca desse tipo de interação, com muitos deles apresentando teorias de previsão da interação entre as estacas. Tal interação, basicamente, é avaliada de acordo com a influência de uma estaca nos recalques das estacas vizinhas.

Poulos (1968) apresentou uma maneira para a quantificação dessa interação por meio da utilização de fatores de interação entre estacas. A Equação 1 demonstra a expressão para determinação do fator de interação pela relação entre o recalque de uma estaca vizinha e o recalque de uma estaca devido ao seu próprio carregamento.

$$\alpha_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (1)$$

Onde:

- α_{ij} é o fator de interação entre a estaca carregada “j” e sua estaca vizinha “i”;
- w_i é o recalque provocado na estaca “i” devido ao carregamento da estaca “j”;
- w_j é o recalque da estaca “j” devido ao seu próprio carregamento.

Sabendo disso, nesse artigo serão comparados resultados entre duas teorias: Poulos e Davis (1980) e El Sharnouby e Novak (1990) e programa de método dos elementos finitos (MEF), baseado no método dos deslocamentos, denominado DIANA (TNO, 2012). Busca-se verificar qual a influência de existência de estacas vizinhas às estacas avaliadas na interação entre elas.

2 TEORIAS

A existência de várias teorias de previsão de interação entre estacas ocorre pela consideração

de variáveis de forma diferente em cada uma, além dos modelos de cálculo utilizados. Dentre algumas das diferenças entre as teorias destacam-se:

- Consideração do enrijecimento do sistema de fundação, com o acréscimo de estacas;
- Influência de estacas vizinhas na interação;
- Divisões das estacas para análise;
- Estacas com propriedades diferentes;
- Estratificação do solo.

Algumas das teorias que envolvem estudo de interação entre estacas iguais foram apresentadas nos trabalhos de Poulos e Davis (1980), Randolph e Wroth (1979), El Sharnouby e Novak (1990), Southcott e Small (1996), Mylonakis e Gazetas (1998), Cao e Chen (2008).

Poulos e Davis (1980) também apresentaram a solução para determinação da interação entre estacas com diferentes propriedades geométricas, assim como Wong e Poulos (2005) propuseram. Nota-se menor quantidade de trabalhos envolvendo tais estacas, já que é mais uma variável a ser considerada na influência das interações.

O método de elementos de contorno foi a base das teorias apresentadas por Poulos e Davis (1980) e El Sharnouby e Novak (1990). Tais autores dividiram as estacas em n elementos cilíndricos como demonstrado na Figura 1.

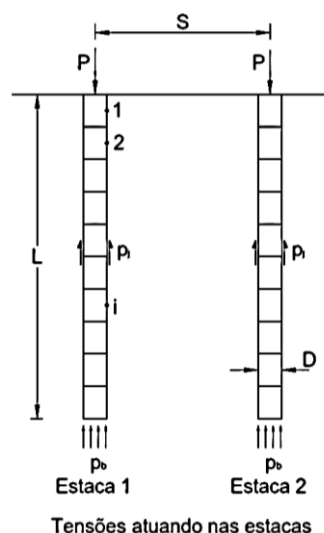


Figura 1. Grupo de duas estacas flutuantes (POULOS; DAVIS, 1980) – modificado pelos autores.

Poulos (1968) apresentou a solução para avaliar a interação entre duas estacas por meio da consideração do solo como um meio elástico contínuo. Poulos e Davis (1980) exibiram vários gráficos de fatores de interação entre estacas, de acordo com a variação de algumas propriedades como o módulo de elasticidade do solo (E_s), coeficiente de Poisson (ν), comprimento relativo da estaca (L/D =comprimento da estaca/diâmetro da estaca), dentre outros.

Caso não se tenha possibilidade de uso dos gráficos para a determinação dos fatores de interação, por conta da inexistência dos mesmos para determinada propriedade, a equação 2 apresenta uma forma de cálculo através de uso de fatores de correção.

$$\alpha = \alpha_F \cdot N_h \cdot N_b \cdot N_v \quad (2)$$

Onde:

- α é o fator de interação entre as estacas avaliadas;
- α_F é o fator de interação para massa de solo semi-infinita e usando o coeficiente de Poisson igual a 0,5;
- N_h é o fator de correção para considerar o efeito da profundidade da camada finita;
- N_b é o fator de correção para considerar a influência da profundidade da camada finita (camada com maior rigidez abaixo da ponta da estaca);
- N_v é o fator de correção para considerar a variação do coeficiente de Poisson do solo.

Os fatores de interação α_F são encontrados através dos gráficos em que há variação de valores de espaçamentos relativos (S/D), onde S é o espaçamento eixo a eixo entre estacas avaliadas e D o diâmetro delas, e $K = E_p/E_s$ que é a rigidez relativa entre os módulos de elasticidade do concreto da estaca (E_p) e do solo (E_s).

É necessário ressaltar que por Poulos e Davis (1980), para a determinação da interação entre as estacas, considera-se a existência de apenas duas estacas. Os autores ainda apresentaram a possibilidade do uso computacional para a obtenção dos fatores por meio do programa chamado DEFPIG. Dessa maneira, é possível se

obter os fatores de interação entre duas estacas diretamente, sem a necessidade de se realizar correções.

Já El Sharnouby e Novak (1990) chamaram a atenção para a influência de estacas vizinhas às duas estacas avaliadas na interação entre elas.

Para isso, os autores apresentaram resultados de fatores de interação entre estacas estando dispostas em uma linha de três ou de cinco estacas tendo apenas uma estaca carregada com uma carga P .

Considerando a existência de três estacas, os autores perceberam uma redução no fator de interação entre duas estacas, com uma estaca intermediária presente. Então, os autores apresentaram mais resultados relativos ao caso de cinco estacas em linha com a construção de gráficos mostrando valores dos fatores de interação entre cada uma das estacas e a estaca carregada, variando os espaçamentos e comprimentos relativos das estacas, assim como, a rigidez relativa.

Ainda compararam resultados de interação de apenas duas estacas com os resultados apresentados por Poulos e Davis (1980). Isso foi realizado para demonstrar a influência da divisão das estacas para os cálculos. Os autores estabeleceram para a relação $L/D < 50$, a divisão de cada estaca em pelo menos 30 elementos e para uma estaca mais longa ($L/D > 50$) a divisão em, pelo menos, 50 elementos, diferentemente do apresentado por Poulos e Davis (1980) que utilizavam divisões das estacas em 10 elementos.

3 METODOLOGIA

Para a avaliação da existência de estacas vizinhas às estacas analisadas, decidiu-se modelar o caso de uma linha de cinco estacas apresentado por El Sharnouby e Novak (1990), utilizando o programa baseado em MEF denominado DIANA – *Displacement Analyzer*.

Esse programa foi utilizado buscando-se ter resultados de fatores de interação entre as estacas que mais se aproximariam da solução exata, por ser um programa baseado em MEF. As análises foram realizadas de forma linear elástica, já que as teorias abordadas utilizaram essa consideração.

A linha de cinco estacas é apresentada na Figura 2, com as estacas sendo identificadas pela numeração de 1 a 5, iniciando na estaca carregada por uma força P e “x” representando a distância entre as estacas eixo a eixo. Foram determinados os fatores de interação entre cada estaca descarregada e a estaca carregada sendo identificados pelos índices correspondentes às estacas avaliadas: α_{21} , α_{31} , α_{41} e α_{51} . Portanto, α_{21} corresponde ao fator de interação entre as estacas 2 e 1, considerando o efeito da estaca 1 na estaca 2, e assim sucessivamente.

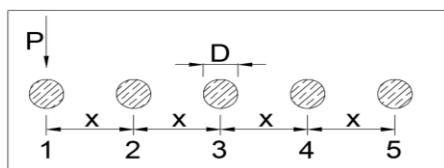


Figura 2. Proposta de caso de linha de cinco estacas, apresentado por El Sharnouby e Novak (1990).

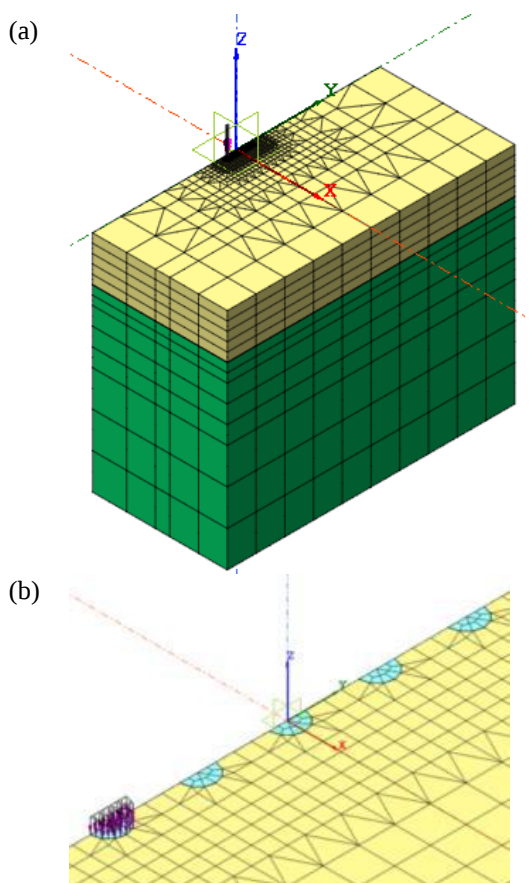


Figura 3. Malha usada na modelagem de cinco estacas com $L/D=25$ e espaçamento eixo a eixo entre estacas igual a $2,5D$: (a) vista geral sem condições de contorno; (b) ampliação da vista próxima às estacas.

Utilizaram-se três tipos de elementos

isoparamétricos de quatro, cinco e seis faces, sólidos e maciços com interpolação quadrática, buscando a geração de malhas simulando, de forma aproximada, as estacas circulares e também em busca de bons resultados sem que tivesse a necessidade de se ter a malha muito refinada (Figura 3). Os domínios horizontal e vertical utilizados nas modelagens foram de $3L$ e $5L$, respectivamente.

Para se ter valores de fatores de interação segundo Poulos e Davis (1980), utilizou-se o programa DEFPIG que abrange a teoria e a possibilidade da divisão das estacas em mais de 10 elementos cilíndricos, como previsto inicialmente. Como os autores consideraram a existência de apenas duas estacas na previsão da interação, para a comparação com os fatores de interação obtidos para o caso de cinco estacas em linha, apresentaram-se valores referentes ao espaçamento eixo a eixo entre as estacas avaliadas (S).

4 ANÁLISES

Os mesmos casos apresentados por El Sharnouby e Novak (1990) foram reproduzidos no DIANA para diversas relações de E_b/E_s , onde E_b corresponde ao módulo de elasticidade do solo abaixo da ponta da estaca. Foram obtidos resultados para casos com $L/D=25$ e K variando entre 100, 1000 e 10000, enquanto que para $L/D=50$, o K avaliado foi o de 1000 e de 10000, e ainda para os valores de x/D de 2,5, 3, 4 e 5. Os resultados podem ser visualizados, na íntegra, em Curado (2015).

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados para α_{21} e α_{51} em que $S=x$ e $S=4x$, respectivamente. Percebe-se que Poulos e Davis (1980) apresentam melhores previsões dos fatores de interação para solos homogêneos ($E_b/E_s=1$) e quando considerado solo estratificado, estacas de ponta, El Sharnouby e Novak (1990) passam a apresentar resultados mais próximos aos obtidos pelo DIANA.

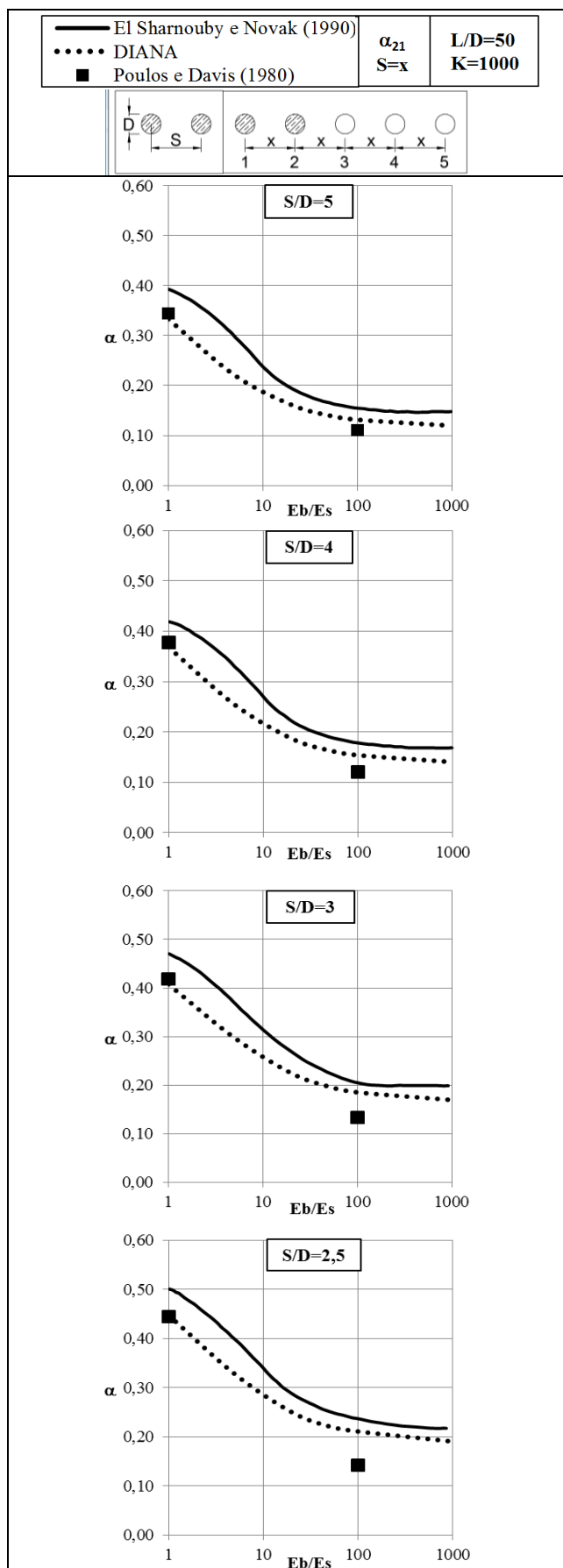


Figura 4. Fator de interação α_{21} entre duas estacas em um grupo de duas e cinco estacas para $L/D = 50$ e $K = 1000$.

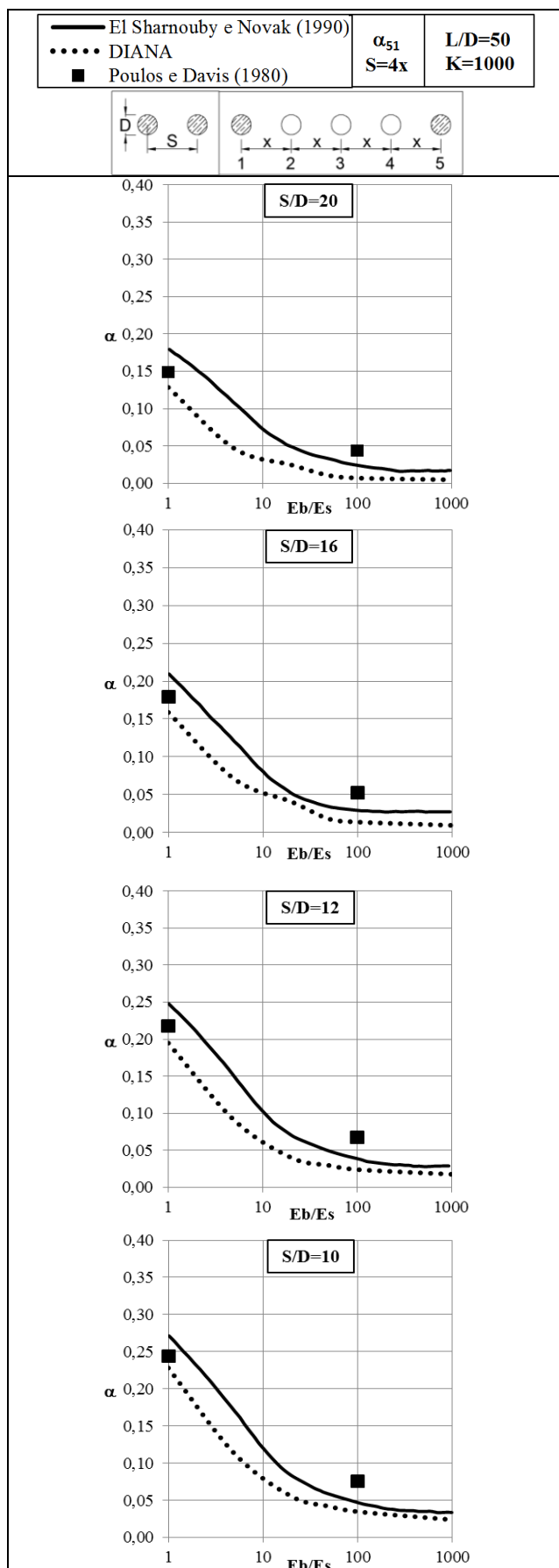


Figura 5. Fator de interação α_{51} entre duas estacas em um grupo de duas e cinco estacas para $L/D = 50$ e $K = 1000$.

De forma geral, é possível se ter uma variação dos fatores de interação para um mesmo comprimento relativo (L/D) e rigidez relativa (K) com a variação dos espaçamentos entre as estacas avaliadas (S) de $2,5D$ a $20D$, como já demonstrado nas Figuras 4 e 5. As Figuras 6 e 7 apresentam a variação geral dos fatores de interação α_{21} , α_{31} , α_{41} e α_{51} para $L/D=50$ e K de 1000 e 10000, respectivamente.

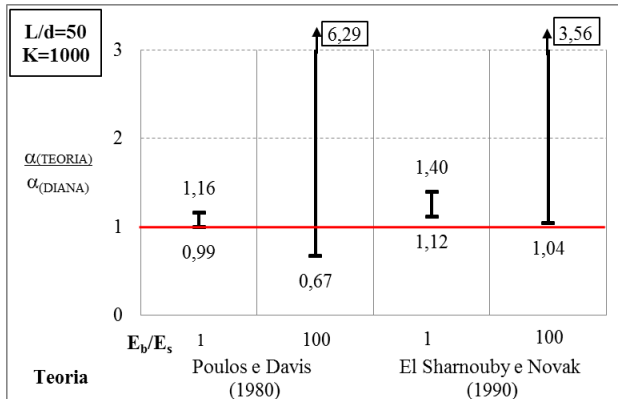


Figura 6. Variação dos fatores de interação α_{21} a α_{51} entre as teorias, considerando cinco estacas, para $L/D=50$ e $K=1000$.

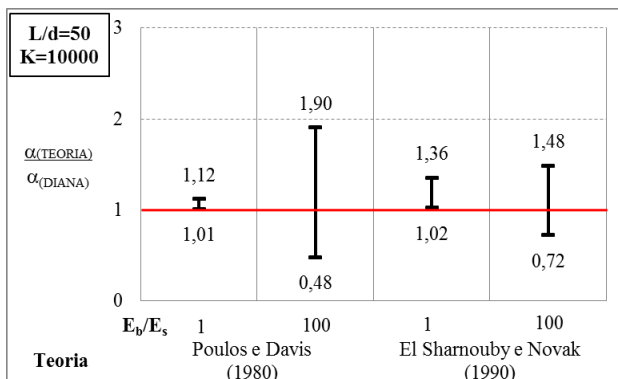


Figura 7. Variação dos fatores de interação α_{21} a α_{51} entre as teorias, considerando cinco estacas, para $L/D=50$ e $K=10000$.

Foi verificado que as teorias se aproximam mais aos resultados do DIANA quando considerados solos homogêneos do que quando há uma estratificação do solo, com a estaca sendo de ponta, ou seja, engastada em camada bem menos compressível. Quanto menor o valor da rigidez relativa, maiores as diferenças entre as teorias e o DIANA, sendo mais expressivas para solo heterogêneo ($E_b/E_s=100$)

do que para solo homogêneo ($E_b/E_s=1$).

Além da influência da rigidez relativa e da resistência da camada de solo abaixo da ponta da estaca, outro ponto importante a ser destacado é a identificação da influência das estacas intermediárias. Isso pode ser destacado, pois as maiores variações entre os fatores de interação obtidos pela teoria de Poulos e Davis (1980) e pelo DIANA se deram, justamente, na comparação com α_{51} , caso em que há maior quantidade de estacas entre as estacas avaliadas.

5 CONCLUSÕES

Apesar dos autores El Sharnouby e Novak (1990) ressaltarem a importância de se considerar a existência de outras estacas próximas às estacas avaliadas, os mesmos ainda não conseguiram determinar uma solução de previsão dos fatores de interação entre estacas que considere bem a presença de estacas vizinhas às analisadas.

Verifica-se dificuldade na previsão dos fatores de interação entre estacas, segundo Poulos e Davis (1980) para casos em que não há solo homogêneo. Os autores acabam subestimando a interação entre as estacas, quando se analisa α_{21} , já quando se considera a existência de estacas intermediárias (α_{31} , α_{41} , α_{51}), há uma superestimação da interação entre as mesmas e o afastamento maior dos resultados oriundos do DIANA.

Portanto, é notória a importância da consideração da presença de estacas vizinhas às avaliadas, diferentemente de como é calculado usualmente. A existência de sistemas de fundações com grande quantidade de estacas nos demonstra justamente essa necessidade, já que podem exercer maior influência na interação total do sistema de fundações.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) durante o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Cao, M., Chen, L. Z. Analysis of interaction factor between two piles. *Journal of Shanghai JiaoTong University (Science)*, 2008, v. 13 n. 2, p. 171-176.
- Curado, T. S. *Comparação de Teorias de Interação Entre Estacas*. 2015. 151 f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2015.
- El Sharnouby, B.; Novak, M. Stiffness constants and interaction factors for vertical response of pile groups. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 27. p. 813-822, 1990.
- Mylonakis, G.; Gazetas, G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. *Geotechnique*, London, v. 48, p. 55-72, 1998.
- Poulos, H. G. Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*, London, v. 18, n. 4, p. 449-471, 1968.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. *Pile Foundations Analysis and Design*. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1980, 397 p.
- Randolph, M. F.; Wroth, C. P. An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Geotechnique*, London, v. 29, n. 4, p. 423-439, 1979.
- Southcott, P. H., Small, J. C. Finite Layer Analysis of Vertically Loaded Piles and Pile Groups. *Computers and Geotechnics*. 1996. v. 18, n. 1, p. 47- 63.
- TNO Building And Construction Research. *DIANA User's Manual – Release 9.4*. Delft, Netherlands, 2012.
- Wong, S.C., Poulos, H.G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles. *Computers and Geotechnics*. 2005. v. 32, p. 613-618.