

# O Efeito da Interação Solo-Estaca na Geração dos Momentos Internos de uma Estaca Carregada Horizontalmente

Isabella Christine de Paula Santos

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, isabellacpsantos@gmail.com

Maurício Martines Sales

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, sales.mauricio@gmail.com

Guilherme Melo da Silva Lima

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, guilhermemslima@outlook.com

**RESUMO:** As fundações têm a função de suportarem as cargas provenientes de uma estrutura, e de transmitir essas cargas para o solo, como é o caso das estacas, que é um elemento estrutural de fundação tradicional. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito da interação solo-estaca na geração dos momentos internos de uma estaca carregada horizontalmente. Para realizar este estudo, foi utilizada a ferramenta numérica DIANA, a qual é baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF). Foram avaliados diversos casos de estacas isoladas carregadas lateralmente, variando-se parâmetros como o comprimento relativo e o diâmetro da estaca; o perfil dos solos, o módulo de elasticidade e o número de camadas do solo. Para efetuar a análise da importância da deformabilidade de cada camada de solo, foi admitido um exemplo em que se variou a distribuição do módulo de elasticidade com a profundidade em cinco perfis diferentes. Foram considerados dois diâmetros e três diferentes relações  $L/D$  (comprimento relativo). São apresentadas as curvas de deslocamento e momento para cada caso estudado, com o intuito de observar o efeito da interação solo-estaca. Observou-se que tanto o deslocamento, quanto o momento dependem bastante das propriedades do solo. As camadas superiores são as que mais exercem influência nos resultados de momento e deslocamento. Não é o módulo de elasticidade médio ao longo da estaca que define o comportamento da estaca, mas sim o módulo de elasticidade do solo das camadas mais superficiais. Ficou clara a existência de um comprimento crítico para as estacas. Valores de comprimentos acima deste limite em nada alteram os resultados de deslocamentos e momentos internos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Carregadas Lateralmente, Interação Solo-Estaca, Análise Numérica, Momento Fletor, Deslocamento.

## 1 INTRODUÇÃO

As fundações resistem a todos os esforços aplicados sobre elas, e transmitem esses para as camadas mais profundas do solo. Incluem nestes carregamentos os esforços verticais, os esforços horizontais e os momentos a esta fundação submetidos. Nesse sentido, tem-se preocupado com a relação solo-fundação, pois a análise desta interação ajuda a compreender o comportamento do solo e da fundação.

A análise de interação solo-fundação tem o intuito de fornecer os deslocamentos reais da fundação, e seus esforços internos. Além disso, esta interação depende da rigidez e da geometria da fundação, do tipo de solo e do nível de deslocamento atingido.

O estudo de estacas carregadas lateralmente representa um problema complexo de interação solo-estrutura conduzido pela relação entre a estaca e a reação de empuxo passivo gerado no solo em torno desta (SU e LI, 2013), pois o

valor de deformação da estaca depende da reação do solo, que por sua vez é função do nível de deformação.

Devido ao número crescente de obras sujeitas a grandes carregamentos transversais, tais como estruturas “off-shore”, estruturas de contenção, fundações de edifícios altos e de pontes, portos, torres de linhas de transmissão e aerogeradores, nota-se a importância de estudar o comportamento de fundações submetidas à solicitações laterais, como é o caso das estacas, que é um elemento estrutural de fundação tradicional para distribuir os esforços das construções para o solo.

A análise dos deslocamentos e esforços internos de estacas isoladas submetidas a carregamento lateral tem seguido basicamente cinco linhas de abordagem: modelos baseados em equilíbrio limite; modelos baseados no coeficiente de reação horizontal do solo; curvas p-y; modelos elásticos e modelos baseados nos métodos dos elementos finitos (MEF) (FAN e LONG, 2005).

O objetivo deste trabalho é analisar o efeito da interação solo-estaca na geração dos momentos internos de uma estaca carregada horizontalmente.

## 2 MÉTODOS DE DESLOCAMENTOS PARA O ESTUDO DE ESTACAS CARREGADAS HORIZONTALMENTE

### 2.1 Método do Módulo de Reação Horizontal

Métodos baseados no coeficiente de reação do solo foram idealizados por Winkler em 1867. Sua hipótese é amplamente utilizada na solução de problemas de estacas submetidas a esforços laterais, principalmente pela possibilidade de variação dos parâmetros tensão x deformação com a profundidade e por poder simular o comportamento não linear do solo, pelas curvas p-y.

O método do módulo de reação horizontal considera o solo como uma série de molas independentes. De acordo com Poulos e Davis (1980), as principais desvantagens da Hipótese de Winkler são a falta de continuidade entre as molas, por serem independentes e a

impossibilidade teórica de análise de grupo de estacas. No entanto, autores como Brown *et al.* (1988) apresentam soluções aproximadas para grupos de estacas. Recentemente, trabalhos como de Han *et al.* (2015) empregaram uma nova abordagem para descrever a mecânica do meio contínuo, obtendo resultados mais eficientes do que as curvas p-y para o comportamento não linear.

A equação mostrada abaixo, a qual incorpora a Hipótese de Winkler, rege a interação entre o solo e a estaca, impondo igualdade de forças internas e externas atuantes na estaca e levando em conta a rigidez à flexão da estaca ( $E_p I_p$ ). Essa equação é válida para os casos de existir apenas carga horizontal ou momento aplicado.

$$E_p I_p \frac{d^4 \rho}{dz^4} + K_h \rho = 0 \quad (1)$$

onde:

$E_p$  = módulo de elasticidade do material da estaca;

$I_p$  = momento de inércia da seção da estaca;

$z$  = profundidade do ponto analisado do solo;

$\rho$  = deslocamento horizontal do solo;

$K_h$  = módulo de reação horizontal incorporando a dimensão transversal da estaca ( $F/L^2$ ).

### 2.2 Modelo de um Meio Contínuo e Elástico

Este modelo prevê o comportamento da estaca a partir da teoria da elasticidade, considerando o solo em um domínio contínuo e elástico.

Segundo Sales *et al.* (1998), esse método apresenta bons resultados apenas para baixos níveis de deformação, quando o solo pode ser aproximado pelo regime elástico e possui, como vantagens, o fato de possibilitar análise de modelos não lineares, mas elásticos, e por permitir a análise de interação em um grupo de estacas.

### 2.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Este método permite a modelagem do solo de forma bastante próxima do real, por permitir incorporar diversos dos fatores que afetam a interação solo-estaca.

Uma das maiores vantagens do método é o fato de que as cargas laterais são na realidade

multidirecionais, e por isso é necessária uma análise 3D para simular o comportamento desse problema (SU e LI, 2013). Além disso, é importante limitar o domínio envolvido no problema, além de impor restrições de deslocamentos que simulem a situação real.

Diversos trabalhos, como o de Peng *et al.* (2010), o de Kim e Jeong (2011) e o de González (2014) realizam modelagens tridimensionais utilizando o MEF. Segundo González (2014), o MEF é o mais utilizado dos métodos numéricos existentes, pois este é uma ferramenta ampla e versátil para modelar quase todo tipo de problema, como por exemplo, problemas geotécnicos que envolvem a análise da interação solo-fundação. Além disso, os resultados obtidos com o MEF possuem boa precisão.

Como o objetivo deste trabalho é analisar o efeito da interação solo-estaca, utilizou-se a ferramenta numérica DIANA, que é baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), para realizar as simulações dos problemas, considerando um comportamento elástico para o solo.

### 3 EMPREGO DE ANÁLISE NÚMERICA PARA O ESTUDO

#### 3.1 Programa DIANA

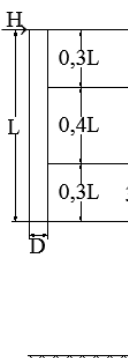
O DIANA é um programa de elementos finitos, fundamentado no método dos deslocamentos, sendo dedicado à análise de diversos tipos de obras de engenharia civil e geotécnica, tais como barragens; diques; túneis e estruturas subterrâneas; análise estrutural em situação de incêndio e cura de concreto (TNO, 2014). Ele é considerado uma boa ferramenta para análises tridimensionais, tanto lineares, quanto não lineares.

O DIANA realiza o processamento da estrutura. Para realizar o pré-processamento e o pós-processamento, utiliza-se o iDIANA ou o FX+ *for* DIANA. Neste artigo foi utilizado o FX+ *for* DIANA.

#### 3.2 Problemas Simulados

Com o intuito de avaliar a importância da heterogeneidade do solo na interação solo-estaca para o problema da estaca carregada lateralmente, foram avaliados diversos casos de estacas isoladas carregadas horizontalmente, variando-se o comprimento relativo e o diâmetro da estaca; o perfil dos solos; a deformabilidade (módulo de elasticidade do solo); e o número de camadas do solo. Para isso, foram modeladas estacas circulares com domínio prismático, em um meio elástico linear.

Com o objetivo de efetuar a análise da importância da deformabilidade de cada camada de solo, foi admitido um exemplo em que se variou a distribuição do módulo de elasticidade do solo ( $E_s$ ) com a profundidade em cinco perfis diferentes, sendo que o caso 1 representa um solo homogêneo e os casos 2, 3, 4 e 5 um solo heterogêneo, como apresentado na Figura 1. Foram considerados dois diâmetros ( $D$ ) para a estaca (40 e 80 cm) e três diferentes comprimentos relativos ( $L/D$ ) para a mesma (10, 20 e 40). Onde  $L$  é o comprimento da estaca e  $D$  o diâmetro da mesma.



|      | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,3L | $E_s$  | $E_s$  | $2E_s$ | $4E_s$ | $4E_s$ |
| 0,4L | $E_s$  | $2E_s$ | $E_s$  | $E_s$  | $2E_s$ |
| 0,3L | $E_s$  | $4E_s$ | $4E_s$ | $2E_s$ | $E_s$  |

Figura 1. Perfil do solo para diferentes casos.

Para os  $L/D = 20$  e  $40$ , simularam-se os cinco casos, para ambos os diâmetros (40 e 80 cm). Já para o  $L/D = 10$ , modelaram-se apenas os casos 1 e 5, para  $D = 40$  cm. Foram adotados os seguintes valores para os parâmetros:  $E_s = 20$  MPa; coeficiente de Poisson do solo ( $\nu_s$ ) = 0,3; módulo de elasticidade da estaca ( $E_p$ ) = 25 GPa e coeficiente de Poisson do material da estaca ( $\nu_p$ ) = 0,2. Os comprimentos de estaca ( $L$ ) variaram de acordo com o  $L/D$  e o  $D$  adotado, conforme Tabela 1.

Nas simulações numéricas foram geradas

malhas 3D, com elementos sólidos de interpolação quadrática (elementos hexaédricos com 20 nós e pentaédricos com 15 nós). Aplicou-se carregamento horizontal (H) pontual (em um nó), no topo da estaca igual a 100 kN (Figura 2). O domínio lateral (DL) adotado foi de  $2L$ , a partir do eixo da estaca, e o domínio inferior igual a  $3L$ , a partir do topo da estaca (Figura 3). Aos nós da borda do domínio foram impostas restrições de deslocamentos. Na direção de  $x$  e  $y$ , ao longo da profundidade de todo o domínio, impediu-se o deslocamento na direção perpendicular a estas, e na base do domínio restringiu-se o deslocamento nas 3 direções.

Tabela 1. Comprimento da estaca de acordo com diâmetro e comprimento relativo.

| L/D | D (m) | L (m) |
|-----|-------|-------|
| 10  | 0,40  | 4,0   |
| 20  | 0,40  | 8,0   |
| 40  | 0,40  | 16,0  |
|     | 0,80  | 32,0  |

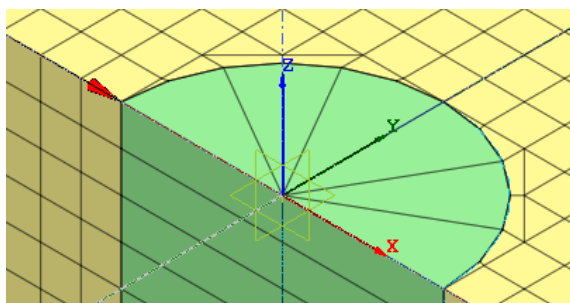


Figura 2. Aplicação da carga horizontal na estaca circular.

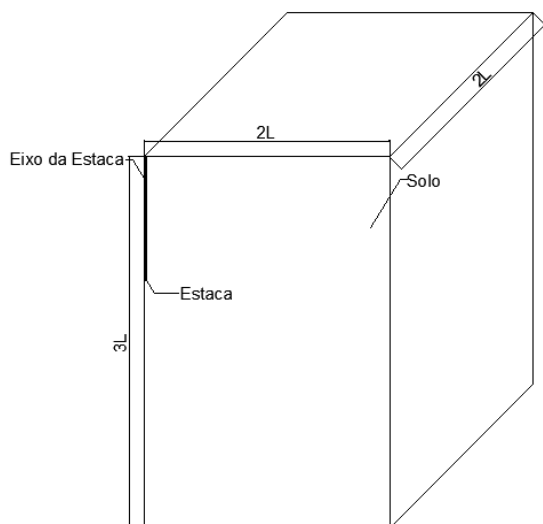


Figura 3. Domínio adotado nas modelagens (ilustração de apenas  $\frac{1}{4}$  da malha simulada).

Nas Figuras 4 e 5 são exemplificadas as malhas geradas para um solo homogêneo e para um solo estratificado, respectivamente.

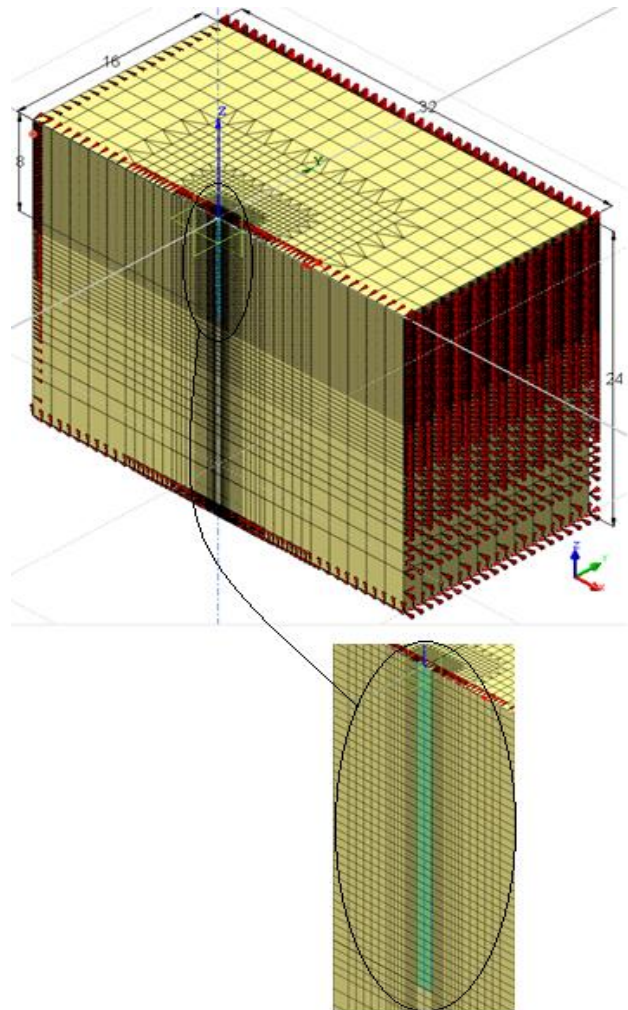


Figura 4. Malha gerada para um solo homogêneo (unidades em metro).

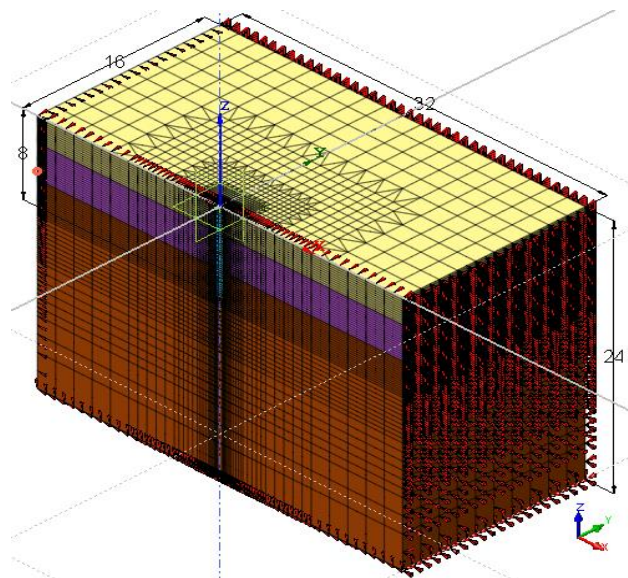


Figura 5. Malha gerada para um solo heterogêneo (unidades em metro).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Quanto ao Deslocamento da Estaca

Com a finalidade de analisar o problema de flexão da estaca na massa de solo, apresentam-se nas Figuras 6, 7 e 8 os gráficos de deslocamento da estaca. Lembrando, que o caso 1 se refere a um solo homogêneo e os casos 2, 3, 4 e 5 a solos estratificados, como mostrado na Figura 1.

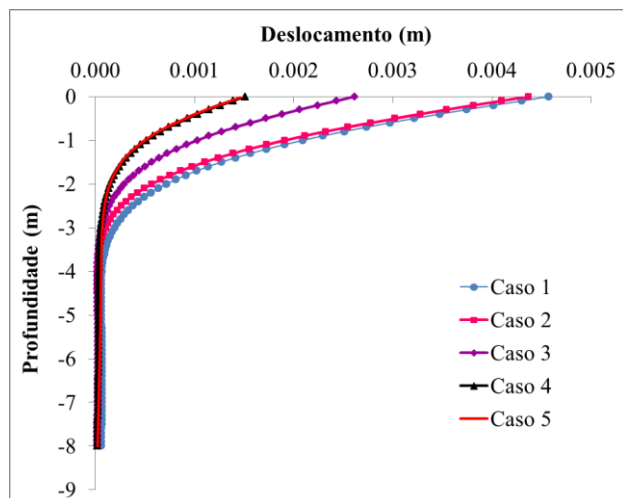


Figura 6. Deslocamento da estaca com  $L/D = 20$ ,  $D = 40$  cm.

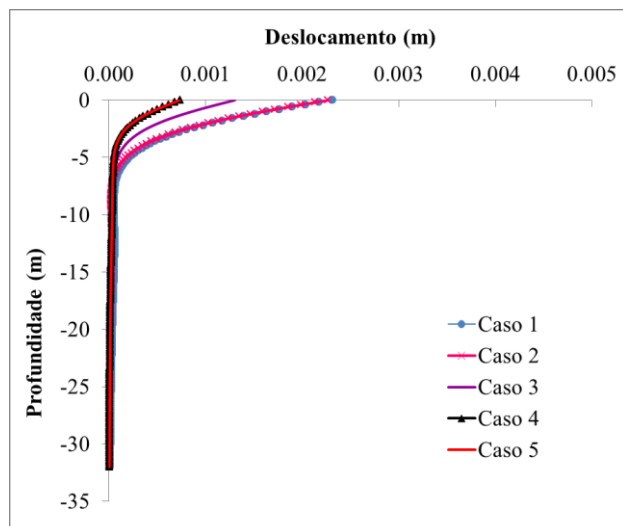


Figura 7. Deslocamento da estaca com  $L/D = 40$ ,  $D = 80$  cm.

Sabe-se que tanto as características da estaca, quanto do solo interferem no comportamento da estaca. Ao observar as Figuras 6 e 7 nota-se que o deslocamento da estaca diminui conforme a camada superior do solo apresente uma maior

resistência, ou seja, conforme a primeira camada e a segunda camada do solo apresentaram maior módulo de elasticidade (80 MPa e 40MPa), sendo menos deformável, a estaca fletiu menos. Percebe-se ainda, que o valor dos deslocamentos das estacas com 80 cm de diâmetro são menores do que os atingidos pelas estacas de 40 cm, mas ambas as curvas possuem formato análogo, indicando que a estaca se comporta de forma semelhante nos solos, independentemente de seu diâmetro. É importante ressaltar que o resultado do caso 1 foi muito parecido com o caso 2 e o caso 4 com o 5. Ou seja, o que está comandando o comportamento da estaca é praticamente só o solo da primeira camada. As mudanças nas camadas 2 e 3 não alteraram os resultados.

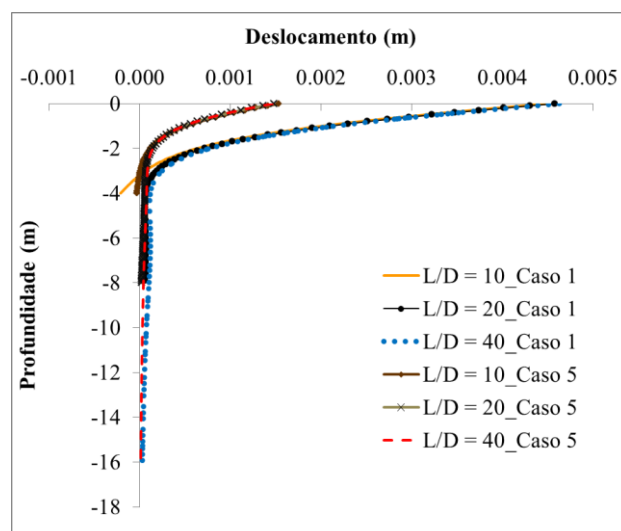


Figura 8. Deslocamento da estaca com  $D = 40$  cm.

Na Figura 8, foi avaliado o comportamento de uma estaca mais curta, de uma média e de outra mais longa, variando-se o  $L/D$  da estaca para os casos 1 e 5 explicados anteriormente.

Na Figura 8 é possível observar que a estaca mais curta se comporta quase como um corpo rígido quando está presente em um solo com menor valor de módulo de elasticidade (neste caso 20 MPa). Isso pode ser atribuído ao fato da estaca se deslocar muito em um solo mais deformável, mas sem fletir. No Caso 5, a camada superficial é menos deformável, o que alterou a forma de flexão da estaca.

Outra questão a ser abordada é o fato do deslocamento da estaca ocorrer em sua parte superior, mostrando que a estaca começa a ficar

engastada a partir de certa profundidade e que, a partir deste ponto, o carregamento aplicado não exerce mais influência na mesma em termo de deslocamento. Essa profundidade é conhecida como comprimento crítico ( $L_C$ ) da estaca. Higgins *et al.* (2013) define  $L_C$  como sendo o comprimento limite de uma estaca, a partir do qual nenhum comprimento adicional na estaca exerce influência em seu comportamento lateral.

#### 4.2 Quanto ao Momento Gerado

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os gráficos de momentos gerados pela estaca, a partir da interação solo-estaca, para os diversos casos estudados.

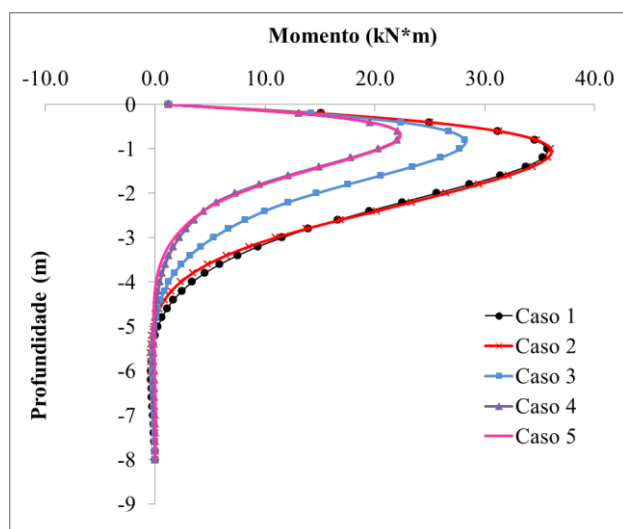


Figura 9. Momento gerado ao longo da estaca com  $L/D = 20$ ,  $D = 40$  cm.

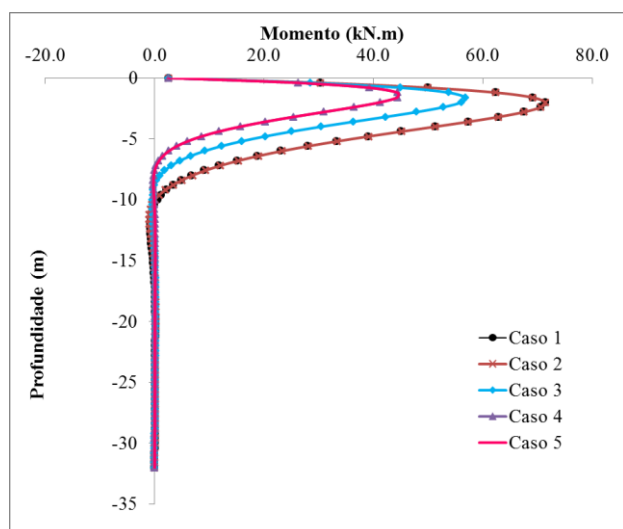


Figura 10. Momento gerado ao longo da estaca com  $L/D = 40$ ,  $D = 80$  cm.

Ao se comparar os gráficos das Figuras 9 e 10, compreende-se que independentemente do diâmetro ou do comprimento da estaca, conforme a resistência do solo aumenta, o momento gerado diminui. As curvas obtidas em ambas as análises possuem formato semelhante, apresentando maior variação nos resultados nas camadas mais superiores do solo. Indicando que estas camadas têm grande influência sobre o comportamento da estaca. Nota-se novamente que a diferença entre os resultados obtidos para o caso 1 e 2 e entre os encontrados para o caso 4 e 5 foram mínimas, mostrando que o solo superficial exerce maior influência no comportamento da estaca, ou seja, alterar a segunda e terceira camadas do perfil estudado não modificou os resultados.

Além disso, nota-se que as curvas convergiram para o eixo “y” de forma mais rápida a medida que o solo fica menos deformável, ou seja, as estacas atingem o engastamento a certa profundidade rapidamente. Isso indica que a partir de certa profundidade (comprimento crítico) a força aplicada não exerce mais efeito sobre a estaca, em termo de momento gerado.

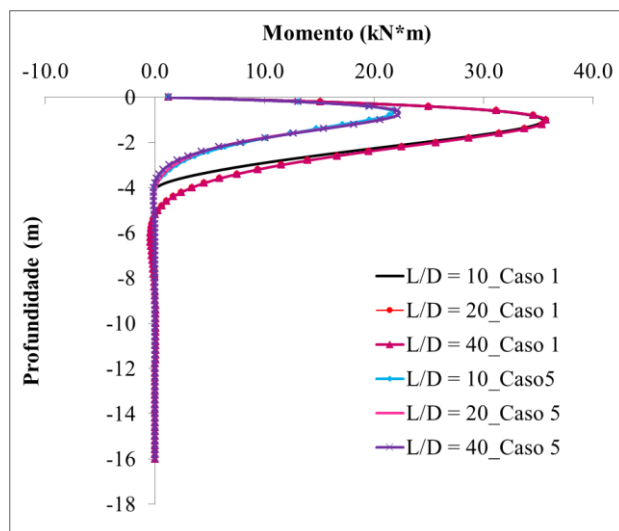


Figura 11. Momento gerado ao longo da estaca com  $D = 40$  cm.

Na Figura 11, foi avaliada a distribuição do momento fletor ao longo da estaca, para uma estaca mais curta, uma média e outra mais longa, variando-se o  $L/D$  da estaca para os casos 1 e 5. Essa figura mostra que as estacas mais longas apresentaram um engastamento no solo a

certa profundidade, o que não acontece com as estacas mais curtas. Os resultados de momento obtidos para os casos de L/D iguais a 10, 20 e 40 foram bem semelhantes. Aumentar o tamanho da estaca não diminuiria o seu deslocamento lateral.

## 5 COMENTÁRIOS FINAIS

O presente artigo apresentou exemplos de estacas carregadas lateralmente, levando-se em conta o efeito da interação solo-estaca. A partir disso, foi analisado o deslocamento sofrido pela estaca e o momento fletor distribuído ao longo mesma.

Destacou-se, portanto, que o perfil do solo tem grande importância no modo como a estaca se comporta, ou seja, tanto o deslocamento, quanto o momento dependem muito das propriedades do solo.

Foi possível observar ainda, que as camadas superiores são as que mais exercem influência nos resultados de momento e deslocamento, ou seja, a primeira camada (de 0 a 30% do comprimento da estaca) foi decisiva no comportamento da estaca. Sendo que foram avaliadas estacas imersas em solos heterogêneos, com diferentes valores de módulos de elasticidade nas várias camadas do solo, mas resultando no mesmo valor médio de módulo de elasticidade. O comportamento da estaca, entretanto, foi bastante distinto dependendo da combinação dos módulos de elasticidade de cada camada. Logo, não é o módulo de elasticidade médio que define o comportamento da estaca, mas sim o módulo de elasticidade do solo das camadas mais superficiais.

Quanto ao comprimento da estaca, observou-se que, dependendo da interação solo-estaca, essa estará mais ou menos engastada no solo, ou seja, a certa profundidade, ao longo do comprimento da estaca, o carregamento não exerce efeito na mesma em termo de deslocamento e momento.

Também foi estabelecido que a partir de certo comprimento, em que a estaca já está engastada no solo, o deslocamento e o momento não são alterados, mas ao diminuir o

comprimento da mesma os processos de deslocamento e de geração de momento da estaca foram alterados. Para comprimentos relativos menores, em que a estaca não está perfeitamente engastada no solo, portanto, o padrão de rotação é diferente, o que altera além do deslocamento, o momento gerado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradem à CAPES e CNPQ pelo apoio ao programa de pós-graduação PPG-GECON/UFG.

## REFERÊNCIAS

- BROWN, D.A.; MORRISON, C. e REESE, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114, n. 11, p. 1261 – 1276.
- FAN, C.C. e LONG, J.H. (2005). Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of The Laterally Loaded Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, Taiwan, Vol. 32, n. 04, p. 274-289.
- GONZÁLEZ, J.R. (2014). *Estudo numérico do comportamento de estacas carregadas lateralmente*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 118 p.
- HAN, F.; SALGADO, R. e PREZZI, M. (2015). Nonlinear analyses of laterally loaded piles – A semi-analytical approach. *Computers and Geotechnics*, West Lafayette, USA, Vol. 70, p. 116-129.
- HIGGINS, W.; VASQUEZ, C.; BASU, D.; GRIFFITHS, D.V. (2013). Elastic solutions for laterally loaded piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v 139, n. 7, p. 1096-1103.
- KIM, Y. e JEONG, S. (2011). Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction. *Computers and Geotechnics*, Seoul, Republic of Korea, Vol. 38, p. 248-257.
- PENG, J.R.; ROUAINIA, M. e CLARKE, B.G. (2010). Finite element analysis of laterally loaded fin piles. *Computers and Geotechnics*, Newcastle, UK, Vol. 88, p. 1239-1247.
- POULOS, H.G. e DAVIS, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. 1st ed., Rainbow-Bridge Book Co., USA, 1980. 397 p.
- SALES, M.M.; CUNHA, R.P. e FARIAS, M.M. (1998). O uso do Método das Diferenças Finitas na análise de estacas carregadas lateralmente. In: *COMBRAMSEG*, 1998, Brasília, Brasil. *Anais...* Brasília, Brasil: ABMS, Vol. 1, p. 245-252.

SU, D. e LI, J.H. (2013). Three-dimensional finite element study of a single pile response to multidirectional lateral loadings incorporating the simplified state-dependent dilatancy model, *Computers and Geotechnics*, China, Vol. 50, p. 129–142.

TNO. Disponível em: < <http://tnodiana.com/History> >.  
Acesso em: 06 de novembro de 2014, às 20h15min.