



AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA GLOBAL DE UM BLOCO DE FUNDAÇÃO SOBRE ESTACAS UTILIZANDO O MÉTODO FORM PARA O CÁLCULO DE SUA PROBABILIDADE DE FALHA

Alysson R.M.G. de Assis

alyssondeassis@gmail.com

Universidade Alto Vale do Rio do Peixe, Departamento de Engenharia Civil

Rua Victor Baptista Adami, 800, 89500-199, Caçador, SC, Brasil

Marcos Noronha

marcos.noronha@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Rua João Pio Duarte, 241, 88037-000, Florianópolis, SC, Brasil

Patricia O. Faria

patricia.faria@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Nelson Aoki

nelson.aoki@uol.com.br

Universidade de So Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia

Av. Trabalhador São João Carlense, 400, 13566-590, So Paulo, Brasil

Resumo. *Quantificar incertezas permite verificar a segurança de estruturas a partir do cálculo de sua confiabilidade. No caso de estruturas de fundações por estacas, a segurança geralmente é calculada para elementos estruturais isolados e a probabilidade de falha do bloco é considerada igual à probabilidade de falha do elemento de fundação mais solicitado. Esta abordagem desconsidera o efeito de grupo em blocos de estacas. Neste trabalho será utilizado o FORM (First Order Reliability Method) para o cálculo da segurança global de um bloco de fundação por estacas. No FORM as variáveis aleatórias são transformadas de seu espaço aleatório original para um espaço normal padronizado, o método reduz o custo computacional correspondente à integração das curvas de probabilidades. Os dados de entrada do modelo serão as características geométricas do bloco e de suas estacas, solicitações, parâmetros de resistência e parâmetros de deformabilidade acrescidos de suas variabilidades*

Palavras-chave: *Confiabilidade, Efeito de Grupo, Fundação por Estacas, Otimização estrutural, Coeficiente de Segurança*

1 INTRODUÇÃO

Em fundações profundas, os blocos de fundação são elementos estruturais responsáveis por distribuir os efeitos das solicitações externas entre as estacas. Na abordagem convencional, quando avaliamos o problema da estabilidade do bloco de fundação em termos de um fator de segurança prescrito em norma, aplicado a cada estaca, admitimos que a solicitação de cada elemento estrutural de fundação profunda não deve ser superior à capacidade estrutural deste reduzida pelo fator de segurança estipulado. Este procedimento subutiliza a capacidade de redistribuição dos esforços e compatibilização dos deslocamentos do bloco de fundação, principalmente no caso de estruturas submetidas a elevadas solicitações de flexão.

Neste trabalho será proposta uma abordagem que avalia a segurança de um bloco de fundação por estacas, submetido a carregamento vertical e momento fletor, em termos do recalque diferencial máximo admissível, da rigidez do conjunto estacas/solo e sua variabilidade, e das variabilidades das solicitações e resistências das estacas do conjunto. Será utilizada uma rotina de cálculo de grupos de estacas associada a outra rotina de confiabilidade estrutural utilizando o método FORM.

2 EFEITO DE GRUPO EM BLOCOS DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Segundo Potts e Zdravković (2001), a análise de grupos de estacas deve levar em consideração a tridimensionalidade do problema e a continuidade do maciço de solos. De acordo com os autores, a carga aplicada em uma estaca afeta o deslocamento das demais e a carga aplicada ao bloco de fundação é distribuída entre as estacas do grupo. Cintra e Aoki (2010) afirmam que uma estaca em um grupo de estacas apresenta recalques sempre superiores ao de uma estaca isolada submetida ao mesmo carregamento.

Diferentes métodos para o cálculo de grupos de estacas submetidas à combinação de carregamentos verticais, laterais e momentos fletores foram propostos nas últimas décadas. Muitos destes métodos se valem de simplificações grosseiras da teoria da elasticidade ou não levam em consideração a natureza contínua dos maciços de solos, como é o caso do método das curvas p-y de Reese (Potts, D.M. e Zdravković, 2001).

Aoki e Lopez (1975) propuseram um método para o cálculo do recalque de blocos de estacas que leva em conta a interação entre todas as estacas do grupo, estimando a contribuição de cada uma nos recalques das demais com base nas equações de Mindlin.

Modelos tridimensionais que simulam o maciço de solos como meio contínuo podem fornecer resultados realistas para o problema de blocos de fundações profundas, desde que adotados parâmetros de entrada e leis constitutivas adequados. Entretanto, análises tridimensionais de blocos de fundações profundas em meio contínuo demandam um custo computacional significativo. Neste trabalho a rotina de cálculo do grupo de estacas será executada repetidas vezes para a determinação da confiabilidade do bloco, desta forma, optou-se por adotar o método proposto por Jardine e Potts (1988), que utiliza os resultados de uma análise axissimétrica de uma estaca isolada para construção da matriz de flexibilidade do bloco de estacas.

2.1 Análise de grupos de estacas, Método de Jardine e Potts

Em linhas gerais, o método proposto por Jardine e Potts (1988) consiste em elaborar um modelo axissimétrico de uma estaca isolada e determinar as curvas de cargas versus recalque

abaixo da ponta da estaca e nas posições das pontas das demais estacas do grupo, permitindo assim a montagem da matriz de flexibilidade correspondente ao conjunto de estacas. O método admite que o bloco que liga as estacas é perfeitamente rígido, desta forma, a rotação do bloco deverá ser constante. Associando esta condição de contorno às demais equações de equilíbrio, é possível determinar a distribuição das forças e deslocamentos entre as estacas (Fig. 1).

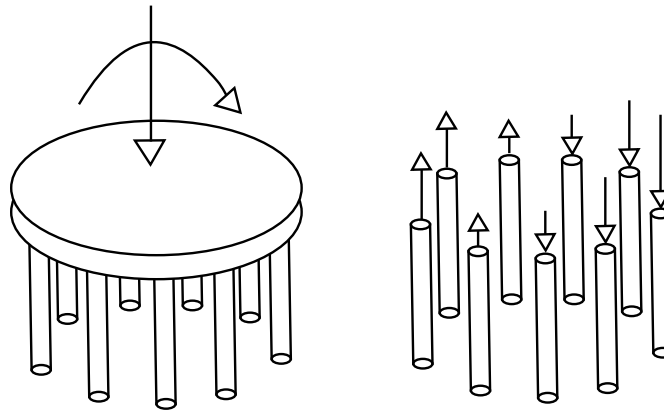


Figura 1: Distribuição de forças verticais entre estacas no caso de rotação do bloco

Neste artigo será utilizado o software livre VisualFEA para a criação e análise de um modelo de elementos finitos axissimétrico em estágios. Os deslocamentos calculados no modelo serão utilizados na determinação das curvas de carga versus recalque e dos coeficientes de influência das estacas no grupo.

2.2 Comentários sobre o coeficiente de segurança na análise de blocos de estacas

De acordo com Cintra e Aoki (2010), é um conceito ultrapassado considerar que fatores de segurança prescritos em norma garantem a ausência de risco de ruína. Para projetos de engenharia seguros e econômicos é necessário o conhecimento das variabilidades das ações e das resistências.

No caso de blocos de estacas, a adoção de coeficientes de segurança gera um outro inconveniente, por exemplo, ao analisarmos um grupo de estacas submetido a um carregamento de flexão e levarmos em consideração a ligação entre as estacas e a continuidade do maciço de solos, podemos encontrar uma distribuição de forças que ultrapasse o valor da resistência de cálculo (resistência reduzida por um coeficiente de segurança) estabelecida. Entretanto, levando em consideração que o bloco que une as estacas é suficientemente rígido, e que as demais estacas do grupo podem possuir uma reserva de resistência, é razoável admitir que, em alguns casos, considerar este bloco inseguro seria subestimar a capacidade de distribuição de esforços do bloco. Uma forma alternativa, seguindo na filosofia dos coeficientes de segurança globais, seria alterar as curvas não lineares de carga versus recalque correspondentes às estacas do bloco, reduzindo a carga de ruptura, ou seja, a força resultante nas estacas não poderia ultrapassar o valor de sua resistência dividida por um coeficiente de segurança (Fig. 2).

Quando reduzimos a capacidade resistente das estacas de um modelo tridimensional de um bloco, que considera o meio contínuo e está submetido à um carregamento de flexão, utilizando

um coeficiente de segurança, estamos, de certa forma, verificando a capacidade de convergência do modelo. Em outras palavras, estamos testando a hipótese de haver uma configuração de recalques que permite distribuir o esforço externo entre as estacas para atender às equações de equilíbrio. Esta configuração de recalques pode não ser realista, tão pouco segura, no que diz respeito aos recalques diferenciais.

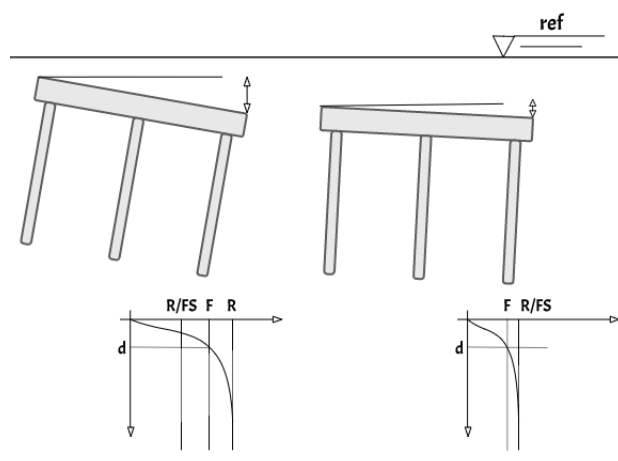


Figura 2: a) curva de carga recalque das estacas sem redução b) curva de carga recalque com redução da resistência de ruptura das estacas

Uma alternativa seria realizar uma verificação adicional de estado limite de serviço, sem redução das resistências, aplicando, por segurança, um coeficiente de majoração ao recalque diferencial calculado. Porém, a adequabilidade do valor adotado para o coeficiente de segurança aplicado ao recalque diferencial dependerá da sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada e de suas correspondentes variabilidades.

3 CÁLCULO DA CONFIABILIDADE UTILIZANDO O MÉTODO FORM

Para um projeto incontestavelmente seguro é necessário um total conhecimento de suas variáveis. Entretanto, há sempre um grau de incerteza na determinação de uma variável. Desta forma, convém a utilização de parâmetros estatísticos que representem a distribuição das probabilidades das variáveis do problema. Podemos avaliar a segurança de uma estrutura realizando um cálculo de seu índice de confiabilidade. O valor do índice de confiabilidade β aplicado na função de distribuição de probabilidade acumulada $\phi(x)$ é o complemento da probabilidade de falha de uma estrutura (Choi, S. et al, 2007).

$$\phi(\beta) = 1 - Pf. \quad (1)$$

No FORM as variáveis aleatórias do problema são transformadas de seu espaço de projeto aleatório original para um espaço normal padronizado (Transformação $T(x)$, Figura 3), o método reduz o custo computacional correspondente à integração das curvas de probabilidades. O cálculo da confiabilidade no FORM consiste em minimizar o vetor β , ou seja, encontrar a menor distância entre a origem do espaço normal padronizado e uma reta tangente à função de restrição $g(u)=0$ (Du, X. e Chen, W., 2001). O ponto da extremidade do vetor β contido na função de restrição $g(u)=0$ é o ponto provável de falha, também chamado de MMP (*Most*

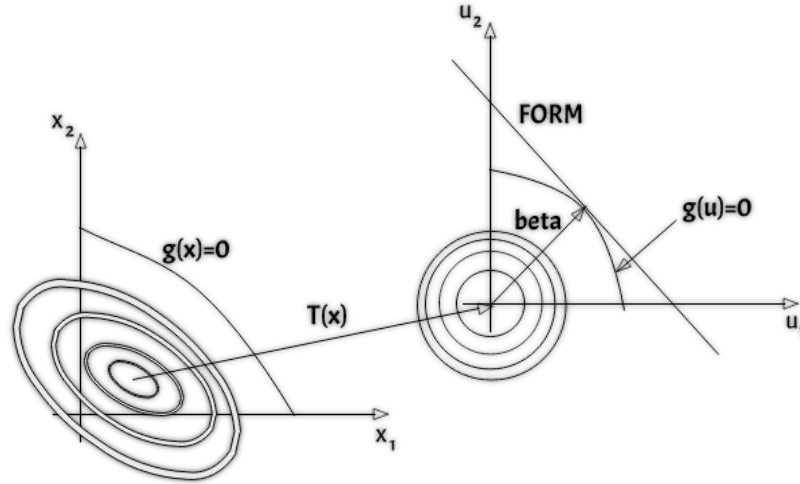


Figura 3: Espaço de projeto normalizado, FORM

probable point). Para minimizar o vetor β , foi utilizada neste trabalho a rotina meta-heurística de otimização *Firefly*.

Na seção 4 deste artigo, as variáveis Carregamento Vertical, Módulo de Elasticidade do Solo, Resistência por Atrito Lateral e Resistência de Ponta foram admitidas variando conforme uma distribuição normal, e seus valores de projeto foram calculados pela equação:

$$x = \mu + \sigma u \quad (2)$$

Sendo u a variável normal equivalente, μ o valor médio de um parâmetro e σ seu desvio padrão.

Para o momento fletor, será considerada uma distribuição de valor extremo máximo de Gumbel. A utilização desta distribuição se justifica por admitir-se que este esforço, no caso do problema a ser estudado, está associado a uma carga de vento. O valor de projeto da ação de momento fletor será calculado por:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(\frac{\pi}{\sigma} \right). \quad (3)$$

$$\psi = \mu - \frac{0,5772}{\delta}. \quad (4)$$

$$x = \psi - \frac{\ln[-\ln(\phi(u))]}{\delta}. \quad (5)$$

Sendo $\phi(u)$ a função de distribuição normal padronizada acumulada das variáveis normais equivalentes.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4.1 Problema proposto

Para ilustrar a metodologia apresentada, foi proposto um problema que corresponde a um bloco de fundação de uma torre eólica. As características geométricas do bloco em questão e de suas estacas podem ser observadas na tabela abaixo:

Tabela 1: Características geométricas do bloco de fundação e de suas estacas

Diâmetro do bloco (m)	16
Máxima distância entre duas estacas (m)	15
Número de estacas do bloco	12
Diâmetro das estacas (m)	1
Comprimento das estacas (m)	15

Na Figura (4), abaixo, pode-se observar as distâncias entre os eixos das estacas $d_{i=1:n}$ e distâncias entre estacas medidas paralelamente ao plano vertical que corta as estacas mais e menos solicitadas, $dp_{i=1:n}$. No problema em questão, devido à sua simetria, $d_7 = d_5$, $d_8 = d_4, \dots$, $d_{11} = d_1$, a mesma relação é válida para as distâncias $dp_{i=1:n}$.

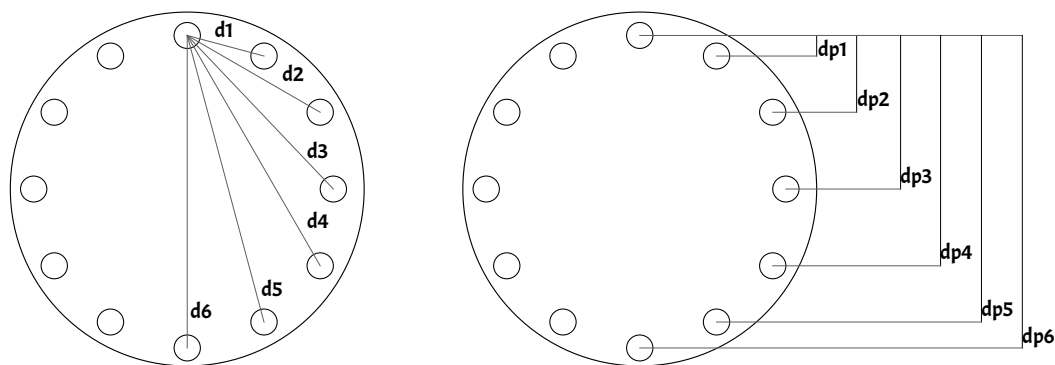


Figura 4: Distância entre as estacas

O maciço de solos do problema proposto foi considerado homogêneo e constituído de uma argila sobreadensada. As estacas foram consideradas do tipo hélice contínua e imersas em um meio homogêneo semi-infinito. A coesão c e o módulo de elasticidade E do solo em questão foram definidos a partir do índice de penetração N_{SPT} , conforme Teixeira e Godoy (Eq. (6)) e Aoki (Eq. (8)), respectivamente.

$$c = 10N_{SPT}. \quad (6)$$

$$E = 4KN_{SPT}. \quad (7)$$

Sendo K um coeficiente empírico, igual a 200 kPa para argilas.

A capacidade de carga das estacas foi calculada pelo método de Aoki-Velloso (1975), no método, a capacidade de carga é dividida em duas parcelas de resistência, uma associada ao atrito desenvolvido na lateral do fuste, R_L , e outra mobilizada na ponta da estaca, R_P . As equações propostas para estas parcelas de resistência são:

$$R_L = \frac{U}{F_2} \sum_{i=1}^n \alpha K N_{SPT_L} \Delta. \quad (8)$$

$$R_P = \frac{KN_{SPT_P}}{F_1} A_P. \quad (9)$$

$$R = R_L + R_P. \quad (10)$$

Onde: F_1 e F_2 são coeficientes empíricos associados ao tipo de estaca, no caso de estaca tipo hélice contínua estes coeficientes valem 2 e 4, respectivamente;

U é o perímetro da estaca;

α é a razão de atrito, igual a 6% para solos argilosos;

Δ_L é o comprimento da camada de solo que envolve um determinado trecho da estaca;

N_{SPT_L} é o índice à penetração médio da camada de solo que envolve um determinado trecho da estaca;

N_{SPT_P} é o índice à penetração na cota de apoio da estaca;

A_P é a área da ponta da estaca.

Na Tabela (2) pode-se observar os valores dos parâmetros calculados e seus desvios padrão. Constam também nas tabelas os valores da ação vertical P e do momento fletor M aplicados ao bloco de fundação, bem como seus respectivos desvios padrão.

Tabela 2: Parâmetros Médios e Variabilidades

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
E (kPa)	20.000	4.000
R (kN)	5.498	1.100
P (kN)	25000	2.500
M (kN.m)	40.000	13.600

As curvas obtidas nas análises do modelo de elementos finitos axissimétrico com carregamento aplicado em estágios, utilizadas na montagem da matriz de flexibilidade do bloco, podem ser observadas nas Figuras (5) e (6).

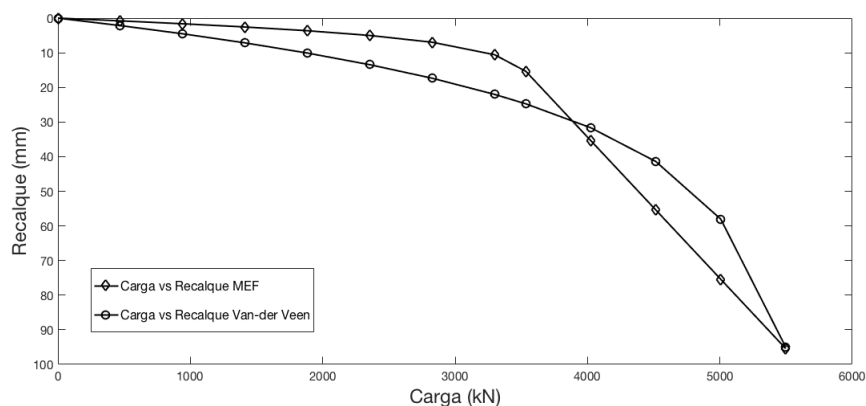


Figura 5: Curva de Carga versus Recalque de uma Estaca Isolada

Na Figura (5) pode-se observar a comparação entre a curva de carga versus recalque obtida pelo MEF e a curva de Van-der-Veen, determinada a partir da resistência geotécnica e de um valor

de recalque calculado pelo método proposto por Aoki (1984). Vale destacar que a análise pelo método dos elementos finitos com modelo constitutivo elastoplástico perfeito mostrou coerência com a resistência geotécnica calculada pelo método semi-empírico, ao se aproximar da carga de ruptura, a superfície de plastificação do modelo de elementos finitos se expande, e ao alcançar este valor o modelo encontrou dificuldades para convergir.

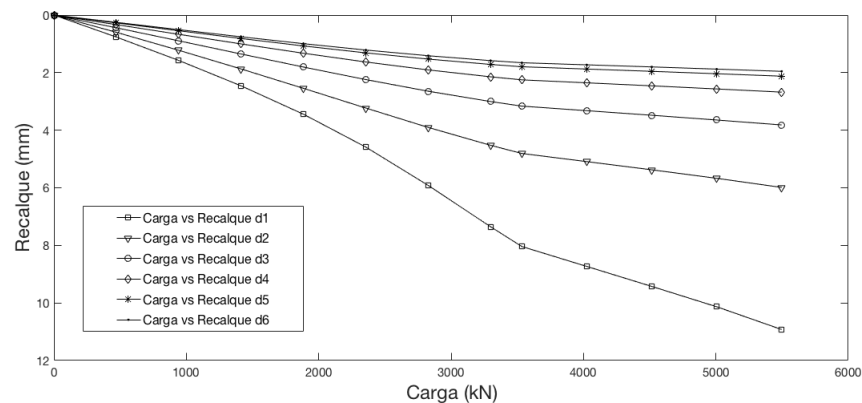


Figura 6: Curvas de Influência de uma estaca sobre as demais

4.2 Resultados para os Parâmetros médios

Os recalques e forças encontrados para os valores médios dos parâmetros aplicados ao modelo proposto para avaliar o comportamento de grupos de estacas podem ser observados nas Figuras (7) e (8).

Na Tabela (3) pode-se observar que, para os valores médios de resistências e solicitações, a estaca da extremidade mais solicitada possui coeficiente de segurança igual a 1,7, valor abaixo do recomendado pela norma brasileira NBR 6122:2010 para fatores de segurança globais.

No caso deste problema específico, modificar as curvas de carga versus recalque, reduzindo as resistências pelo coeficiente de segurança global resulta em não convergência do modelo.

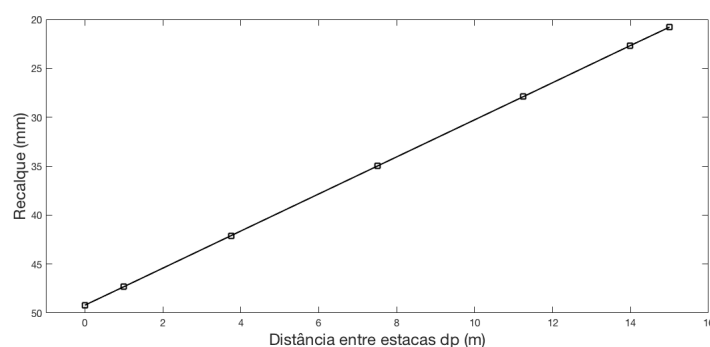


Figura 7: Recalques Calculados para os Valores Médios dos Parâmetros

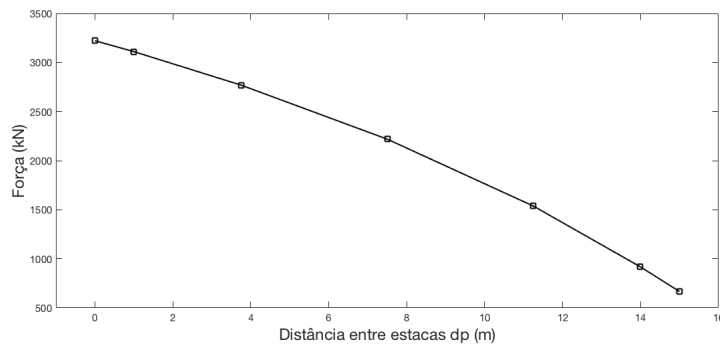


Figura 8: Distribuição de Forças para os Valores Médios dos Parâmetros

Tabela 3: Resumos de Resultados para os Valores Médios dos Parâmetros

Força na estaca mais solicitada (kN)	3.221,93
Força na estaca menos solicitada (kN)	666,21
Força na estaca mais solicitada / R (kN)	1,70
Recalque na estaca mais solicitada (mm)	49,20
Recalque na estaca menos solicitada (mm)	20,79
Recalque diferencial (mm)	28,41

4.3 Resultados da Análise de Confiabilidade

A análise de confiabilidade do bloco de fundação em questão foi realizada de acordo com a metodologia exposta no item 2 e utilizando dados apresentados no item 3.1.

Adotou-se como função objetivo do problema o módulo da diferença entre o recalque diferencial calculado, para um determinado vetor de variáveis normais equivalentes, e o recalque diferencial máximo admissível (40 mm). As variáveis normais equivalentes $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$, $u(4)$ e $u(5)$ (Tabela 4), do cálculo da confiabilidade, estão associadas aos parâmetros: Força Vertical, Momento Fletor, Módulo de Elasticidade, Resistência por Atrito Lateral e Resistência de Ponta (Tabela 5), respectivamente.

Tabela 4: Coordenadas do vetor de variáveis equivalentes u

$u(1)$	$u(2)$	$u(3)$	$u(4)$	$u(5)$
1,49	0,75	-0,94	-0,88	-0,57

O valor da confiabilidade β encontrado foi 2,19, que corresponde a 1,43% de probabilidade do recalque diferencial da estrutura ser maior que o recalque diferencial admissível de 40 mm. As solicitações vertical e de momento fletor no ponto provável de falha foram 44% e 21%, respectivamente, superiores aos seus valores médios. A resistência por atrito lateral encontrada no ponto de falha foi 21% inferior à média, e a resistência de ponta foi 13% inferior (Tabela 5).

Tabela 5: Parâmetros Calculados no Ponto Provável de falha

P (kN)	M (kN.m)	E (kPa)	R_L	R_P
28.729,57	48.364,64	16.236,89	2.910,98	1.738,04

Tabela 6: Resumos de Resultados Encontrados no Cálculo da Confiabilidade

Força na estaca mais solicitada (kN)	3.735,25
Força na estaca menos solicitada (kN)	467,41
Força na estaca mais solicitada / R (kN)	1,24
Recalque na estaca mais solicitada (mm)	74,73
Recalque na estaca menos solicitada (mm)	34,73
Recalque diferencial (mm)	40

Nas Figuras (9) e (10) pode-se observar os valores dos parâmetros correspondentes ao vetor de variáveis normais equivalentes e os resultados de forças e deslocamentos para o valor de β mínimo.

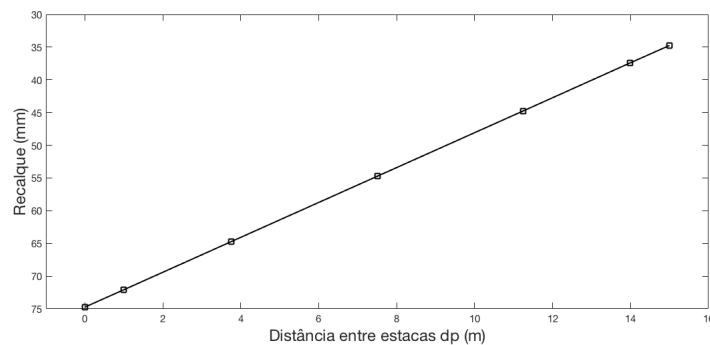


Figura 9: Recalques Calculados para o Ponto Provável de Falha

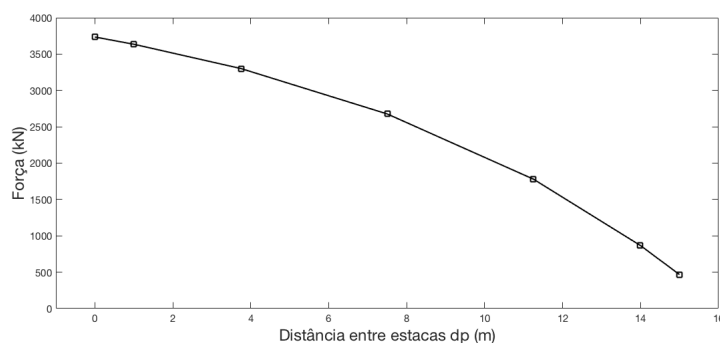


Figura 10: Distribuição de Forças para o Ponto Provável de Falha

CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma metodologia para a avaliação da segurança de blocos de fundações por estacas baseada no cálculo da confiabilidade estrutural. A metodologia proposta corresponde ao cálculo de recalques em grupo de estacas considerando o maciço de solos um meio contínuo, associado ao cálculo da confiabilidade estrutural pelo mtodo FORM.

O mecanismo de funcionamento de blocos de estacas é explicado e são apresentadas as vantagens do método em comparação à abordagem convencional.

A partir da análise de um problema proposto foi possível avaliar e ilustrar as hipóteses levantadas. As possibilidades de análise do problema proposto baseadas na abordagem convencional, por coeficientes de segurança prescritos por normas, conduziu a resultados considerados insatisfatórios, ora desconsiderando a capacidade de distribuição de esforços do grupo de estacas, ora se mostrando inconclusivas no que diz respeito à sensibilidade do cálculo de recalque diferencial aos parâmetros de entrada do modelo e suas variabilidades. A análise em termos dos valores médios das resistências e solicitações mostrou que o coeficiente de segurança da estaca mais solicitada poderia ser considerado inadmissível, enquanto a análise à partir do cálculo da confiabilidade resultou em uma probabilidade de falha relativamente baixa (1,43%). É importante frisar que a aceitabilidade da probabilidade de falha deve seguir valores orientativos, com base nas consequências da falha da estrutura.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se elencar: considerar as propriedades das estacas variando individualmente no cálculo da confiabilidade estrutural de blocos de fundação; calcular a confiabilidade estrutural de blocos de fundação considerando estacas de diferentes comprimentos e perfil de solos variável; ajustar uma superfície de resposta ao problema do bloco de fundações por estacas em meio contínuo para reduzir o custo computacional do cálculo da confiabilidade estrutural.

REFERÊNCIAS

- Arora, J., 2002. Introduction to optimum design. *Elsevier Inc.* pp. 530-532.
- Aoki, N. & Lopes, F. de R., 1975. Estimating Stresses and Settlements Due to Deep Foundations by the Theory of Elasticity. *V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, pp. 377-386.
- Choi, S., Grandhi, R. V. & Canfield, R. A. B., 2007. Reliability-based Structural Design. *Springer-Verlag*, pp. 153-46.
- Cintra, J. C. A. & Aoki, N., 2010. Fundações por Estacas - Projeto Geotécnico. *Oficina de Textos*, pp. 15-65.
- Cintra, J. C. A. & Aoki, N., 2010. Fundações Diretas. *Oficina de Textos*, pp. 77-105.
- Du, X. & Chen, W., 2001. A Most Probable Point Based Method for Uncertainty Analysis. *Journal of Design and Manufacturing Automation*, v. 4, n. 1.
- Du, X. & Chen, W., 2005. Collaborative Reliability Analysis under the Framework of Multi-disciplinary Systems Design. *Optimization and Engineering*, v. 6, n. 1.
- Jardine, R. J., Hight, D. W. & McIntosh, W., 1988. Hutton Tension Leg Platform Foundations: Measurement of Pile Group Axial Load-displacement Relations. *Geotechnique*, v. 38, n. 2, pp. 219-230.
- Lobato, F. & Steffen Jr. V., W., 2013. Multi-Objective Optimization Firefly Algorithm Applied to (Bio)Chemical Engineering System Design. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, v. 1, pp. 110-116.
- Potts, D. M. & Zdravković, 2001. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. *Thomas Telford Ltda.*, p.p. 281-317.
- Tori, A. J. & Lopez, R. H., 2012. Reliability Analysis of Water Distribution Networks Using Adaptive Response Surface Approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, n. 138, pp. 227-236.