

## CONFIABILIDADE DE UMA ESTACA QUANTO A RECALQUES ADMISSÍVEIS

*Morgana Driéli Wegmann<sup>1</sup>, Antônio Marcos de Lima Alves<sup>1</sup> e Mauro de Vasconcellos Real<sup>1\*</sup>*

---

### RESUMO

WEGMANN, M. D.; ALVES, A.M.L.; REAL, M.V. Confiabilidade de uma estaca quanto a recalques admissíveis. *Perspectivas Online: Exatas & Engenharias*, v. 8, n.20, p.01-12,2018.

O presente estudo avalia a confiabilidade quanto à ocorrência de recalques admissíveis em uma estaca que compõe as fundações de um cais portuário, ressaltando o efeito da variabilidade dos parâmetros geotécnicos e das solicitações às quais estas estruturas estão expostas. Inicialmente foi aplicado um modelo analítico para a previsão do recalque na estaca, que foi validado confrontando-se os seus resultados com resultados de um modelo numérico e com dados experimentais. Posteriormente procedeu-se à avaliação da influência da variabilidade de alguns parâmetros do modelo analítico na variabilidade do recalque previsto, empregando o método probabilístico de Rosenblueth. Foi realizado também um estudo de

sensibilidade, buscando avaliar a influência individual de cada variável aleatória na variabilidade final do recalque previsto. Em função dos resultados obtidos se verifica que o módulo de cisalhamento do maciço de solo ao redor da estaca é o parâmetro com maior influência na variabilidade do recalque estimado. Por fim, considerando-se valores toleráveis de recalque de estacas correntemente adotados na prática de engenharia, e estimando-se coeficientes de variação para estes recalques toleráveis, foi possível calcular índices de confiabilidade para a ocorrência de recalques abaixo dos limites pré-estabelecidos.

**Palavras-chave:** Cais portuário; Fundações; Recalques.

---

**ABSTRACT**

The present study evaluates the reliability of the occurrence of admissible settlements in a piling that composes the foundations of a port dock, highlighting the effect of the variability of the geotechnical parameters and the requests to which these structures are exposed. Initially, an analytical model was applied for the prediction of piling settlement, which was validated by comparing its results with results of a numerical model and with experimental data. Subsequently, the influence of the variability of some parameters of the analytical model on the variability of predicted settlement was evaluated using the Rosenblueth probabilistic method. A sensitivity

study was also conducted, seeking to evaluate the individual influence of each random variable on the final variability of predicted settlement. Based on the results obtained, it is verified that the shear modulus of solid soil around the piling is the parameter with the greatest influence on the variability of the estimated settlement. Finally, considering tolerable values of piling settlements presently adopted in the practice of engineering and estimating coefficients of variation for these tolerable settlements, it was possible to calculate reliability indexes for the of occurrence of settlements below the pre-established limits.

**Keywords:** Port dock; Foundations; Settlements.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande, FURG – Rua Visc. De Paranaguá, 102, Centro, Rio Grande, RS, CEP: 96203-900, Brasil;

(\*e-mail: [mauroreal@furg.br](mailto:mauroreal@furg.br)

Data de chegada: 07/05/2017 Aceito para publicação: 29/05/2017

## 1. INTRODUÇÃO

Em toda obra de engenharia, existem riscos associados a uma probabilidade de insucesso. Essa probabilidade é gerada devido às incertezas presentes nos dados (variáveis) utilizados para projeto. Assim, sendo estas variáveis aleatórias, faz-se necessário um estudo de confiabilidade visando avaliar quantitativamente a probabilidade de um insucesso no desempenho da obra.

A análise de confiabilidade de um projeto de engenharia envolve a comparação entre as curvas de distribuição probabilística de capacidade e demanda (HARR, 1987). Pode-se avaliar a confiabilidade quanto aos Estados Limites Últimos (ELU), relacionados à ruptura dos elementos que compõem o projeto, ou quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS), relacionados às deformações dos elementos.

Em projetos geotécnicos, em decorrência sobretudo da natureza do material com o qual se trabalha, que é o solo, este risco pode ser sensivelmente maior do que nas demais especialidades da engenharia. Neste tipo de projeto, existem diferentes tipos de incertezas relacionados a fatores como: variabilidade das condições do maciço de solo, determinação dos parâmetros geotécnicos que caracterizam o maciço de solo, transferência de carga da estrutura aos elementos de fundação e real solicitação dos elementos de fundação. Em se tratando de fundações, além dos estudos de confiabilidade tradicionais envolvendo os ELU (AOKI, 2002, SILVA, 2003, AMADORI, 2013), são cada vez mais comuns estudos envolvendo os ELS (ZHANG & NG, 2005, WANG & KULHAWY, 2008, ROBERTS & MISRA, 2009, ZHANG et al., 2016).

Desta forma, o objetivo geral do estudo apresentado neste artigo é determinar a confiabilidade quanto à ocorrência de recalques acima dos admissíveis em um cais portuário, levando em conta diferentes incertezas na previsão dos recalques esperados e na definição dos recalques admissíveis. Este estudo compreendeu a aplicação de um modelo analítico de previsão de recalques em fundações profundas, a introdução neste modelo de incertezas associadas a alguns parâmetros, através da aplicação do Método de Rosenblueth, e posteriormente a avaliação do índice de confiabilidade. O recalque, ou deslocamento vertical num dado ponto da fundação, é um parâmetro que permite avaliar o desempenho e a eficiência, não somente da fundação, mas de todo o conjunto solo-estrutura. Portanto, a previsão do comportamento das fundações de obras portuárias, quanto a ocorrência de recalques elevados é de grande importância para a prática da engenharia.

Neste estudo foi avaliado o deslocamento vertical de uma estaca da obra de ampliação do Terminal de Contêineres de Rio Grande TECON/RG, localizado no complexo portuário da cidade do Rio Grande/RS. A empresa TECON/RG está preparada para movimentar cerca de 1.250.000 TEUs e entre os principais investimentos realizados, destacam-se a duplicação do cais de atracação para 600 m e a expansão de suas instalações em mais um berço (Berço-III) de atracação com 250 m (no qual está localizada a estaca em estudo), totalizando 850 m para operação de navios.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Estimativa do recalque da estaca por método analítico

Existem na literatura vários métodos de previsão de recalques de estacas, que podem ser classificados como métodos baseados na Teoria da Elasticidade, métodos numéricos e métodos semiempíricos. A fim de formular um equacionamento prático e que represente o comportamento da estaca e do solo analisado, o método de cálculo utilizado neste estudo foi o método de Randolph e Wroth (1978), cuja formulação é baseada na Teoria da Elasticidade. Neste método, os efeitos da carga transferida pela base e pelo fuste da estaca são agrupados para produzir uma solução aproximada.

O solo é dividido em duas camadas, sendo a camada superior deformada devido à carga transferida pelo fuste e a camada inferior devido à carga transferida pela base. Considera-se a heterogeneidade do solo variando linearmente com a profundidade (Solo de Gibson) e um aumento abrupto do módulo de cisalhamento do solo ( $G$ ) logo abaixo da base da estaca (simulando estacas com base em um substrato mais

rígido do que aquele que envolve o fuste). Na formulação também considera-se a compressibilidade da estaca. A partir da solução de Randolph e Wroth, o recalque ( $w$ ) de uma estaca é descrito pela Equação 1.

$$\frac{Q}{wrG_L} = \left[ \frac{\frac{4}{(1-\nu)\Omega} + \frac{2\pi L \tanh(\mu L)}{\zeta r \mu L} \rho}{1 + \frac{4}{(1-\nu)\Omega} \frac{L}{\pi \lambda r} \frac{\tanh(\mu L)}{\mu L}} \right] \quad (1)$$

Os parâmetros da Equação 1 são:

- $w$ : recalque da estaca;
- $Q$ : carga aplicada no topo da estaca;
- $r$ : raio da estaca;
- $G_L$ : módulo de cisalhamento do solo na profundidade  $L$  (correspondente à ponta da estaca);
- $\nu$ : coeficiente de Poisson do solo;
- $L$ : comprimento enterrado da estaca;
- $E_p$ : módulo de elasticidade da estaca;
- $\lambda$ : razão entre módulo de elasticidade da estaca e módulo de cisalhamento do solo ( $G_L$ );
- $\rho$ : razão entre o módulo de cisalhamento do solo na profundidade  $L/2$  da estaca e o módulo  $G_L$ ;
- $\Omega$ : razão entre o módulo de cisalhamento do solo  $G_L$  e o módulo  $G_B$  logo abaixo da base da estaca;
- $\zeta$ : assume o valor usual igual a 4;
- $\mu$ : é expresso pela Equação 2.

$$\mu = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2}{\zeta \lambda}} \quad (2)$$

Como a determinação do recalque depende dos parâmetros característicos do solo no qual a estaca está assentada, fez-se necessário o cálculo dos módulos de cisalhamento das camadas componentes do subsolo. O reconhecimento do subsolo foi realizado através da análise de relatório de ensaio de sondagem a percussão, realizado no prolongamento do cais do Berço III do terminal TECON/RG. Para cálculo dos módulos de cisalhamento das camadas foi utilizada a metodologia exposta em Velloso e Lopes (2010), descrita pela Equação 3.

$$G = \eta k N_{spt} \quad (3)$$

Nesta metodologia,  $\eta$  e  $k$  são parâmetros estatísticos cujos valores são sugeridos por Lopes et al. (1993) e Laprovitera (1998). O valor de  $N_{spt}$ , representa a resistência a penetração do solo, retirado do boletim de sondagem. Para cada camada de solo, foi calculado o  $N_{spt}$  médio e, posteriormente, o módulo de cisalhamento da camada, aplicando a Equação 3. Foram consideradas oito camadas para o maciço de solo, de acordo com o seu tipo de material. Os valores de módulo de cisalhamento para cada camada encontram-se na Tabela 1.

O valor utilizado para o módulo de cisalhamento do solo ao redor da estaca ( $G_L$ ), foi aquele calculado a partir da média ponderada das camadas componentes do subsolo, sendo que a espessura de cada camada foi escolhida como fator de ponderação. O valor para o módulo de cisalhamento abaixo da ponta da estaca ( $G_B$ ), é aquele correspondente a última camada do subsolo, visto que, é nesta profundidade que a estaca encontra-se assentada.

A estaca analisada é de concreto protendido, de seção transversal anelar, com comprimento de 48 metros, diâmetro externo de 80 centímetros, espessura de parede de 15 centímetros, e diâmetro interno de 50 centímetros. A carga de serviço da estaca, obtida a partir dos memoriais de cálculo do projeto é de 2216,80 kN, e o módulo de elasticidade da estaca é igual a 35 MPa. Para o cálculo analítico, considerou-se a estaca como sendo maciça com um raio equivalente de 31 centímetros.

Tabela 1: Módulos de cisalhamento das camadas componentes do subsolo

Descrição da camada	Espessura (m)	$N_{spt}$ médio	G (kN/m <sup>2</sup> )
Argila pouco siltosa	2,50	0,00	0,00
Argila muito siltosa	2,10	2,03	1525,86
Areia fina, muito argilosa	2,40	3,45	5494,85
Argila muito siltosa, com areia fina	3,00	2,22	1667,81
Argila, pouco siltosa	17,00	5,56	4170,64
Argila pouco arenosa	1,45	11,21	16148,57
Areia fina	0,55	50,00	90000,00
Areia fina siltosa	1,15	50,00	79500,00

A partir dos dados acima citados e aplicando a Equação 1, obteve-se um resultado para o recalque da estaca de 7,48 milímetros.

## 2.2 Validação do modelo analítico

Como a determinação do recalque da estaca depende do reconhecimento do subsolo, que é função da estimativa dos seus parâmetros, procurou-se validar o modelo utilizado, comparando-o com o resultado obtido a partir de uma solução numérica, e posteriormente com o resultado de uma prova de carga estática realizada na estaca.

O estudo pela solução numérica foi realizado por Wegmann e Alves (2015) e o método utilizado foi proposto por Aoki e Lopes (1975), o qual fornece em qualquer ponto no interior de um meio elástico, o recalque e as tensões causados por uma estaca ou conjunto de estacas. Neste método é feita a substituição das tensões transmitidas pela estaca ao terreno, por um conjunto de cargas concentradas cujos efeitos são superpostos no ponto em estudo. A solução requer o conhecimento do modo de transferência de carga, que é determinada pela consideração de que, sob a carga de serviço, toda a capacidade de carga do fuste é utilizada e apenas a parcela que falta para a carga de trabalho é transferida para a ponta.

Os dados de capacidade de carga lateral da estaca do cais do TECON foi retirado do estudo já realizado por Amadori (2013), em sua dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio Grande. Assim, obteve-se o recalque da ponta da estaca, empregando o programa computacional Recfor, e a ele somou-se o encurtamento elástico do fuste que é função do material da estaca. O programa Recfor tem por finalidade o cálculo dos deslocamentos elásticos de pontos situados no interior da massa de solo, devido ao carregamento das fundações. Foi originalmente escrito por Urbano Rodriguez Alonso na linguagem Basic, e posteriormente foi adaptado e traduzido para a linguagem Fortran pelo segundo autor do presente trabalho. A análise numérica previu para a estaca um recalque de 7,34 milímetros.

Uma prova de carga estática realizada na estaca em estudo indica, para um estágio de carga de 1950 kN, um valor de recalque igual a 5,66 milímetros, e para um estágio de carga de 2600 kN o valor de recalque 8,78 milímetros. Como a carga de serviço da estaca (2216,80 kN) está no intervalo entre os dois estágios da prova de carga, percebe-se que os valores previstos (7,48 mm segundo o método analítico de Randolph e

Wroth, e 7,34 mm segundo o método numérico de Aoki e Lopes) são compatíveis, e que o modelo analítico é representativo do comportamento da estaca analisada.

## 2.2 Aplicação do método de Rosenblueth ao modelo analítico

O Método das Estimativas Pontuais (ROSENBLUETH, 1975, 1981), consiste na determinação de parâmetros probabilísticos de uma dada variável dependente, a partir de parâmetros probabilísticos de variáveis independentes associadas. De acordo com a metodologia, para uma função de três variáveis aleatórias  $Y=f(X_1, X_2, X_3)$ , o valor esperado para a função é dado pela Equação 4.

$$E[Y] = p_{y+++}y_{+++} + p_{y---}y_{---} + p_{y++-}y_{++-} + p_{y--+}y_{--+} + p_{y+-+}y_{+-+} + p_{y-+-}y_{-+-} + p_{y-+-}y_{-+-} + p_{y-+-}y_{-+-} \quad (4)$$

na qual:

$$y = Y(m_{x1} \pm \sigma_{x1}, m_{x2} \pm \sigma_{x2}, m_{x3} \pm \sigma_{x3}) \quad (5)$$

$$p_{y+++} = p_{y---} = \frac{1}{2^3}(1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (6)$$

$$p_{y++-} = p_{y--+} = \frac{1}{2^3}(1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (7)$$

$$p_{y+-+} = p_{y-+-} = \frac{1}{2^3}(1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (8)$$

$$p_{y+--} = p_{y-+-} = \frac{1}{2^3}(1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (9)$$

Sendo:

- $\rho_{ij}$ : os valores de coeficientes de correlação entre as variáveis aleatórias conhecidas  $X_i$  e  $X_j$ .
- $m_{xi}$  e  $\sigma_{xi}$ : média e desvio padrão, respectivamente, da distribuição da variável aleatória conhecida  $X_i$ .

O valor do desvio padrão da função é descrito pela Equação 10.

$$\sigma_y = \sqrt{E[Y^2] - (E[Y])^2} \quad (10)$$

Definidos o modelo analítico de cálculo para o recalque da estaca, as características geométricas, a carga de serviço e os parâmetros geotécnicos do subsolo, empregou-se o Método de Rosenblueth na estimativa do recalque inserindo variabilidades em três parâmetros.

Para o modelo de cálculo foram consideradas como variáveis aleatórias os módulos de cisalhamento do solo  $G_L$  e  $G_B$  (considerando um coeficiente de variação de 30%) e a carga aplicada na estaca  $Q$  (considerando um coeficiente de variação de 15%). Os valores de coeficiente de variação foram retirados de recomendações de Harr (1987), e as respectivas variáveis aleatórias foram admitidas como sendo não correlacionadas entre si.

A média ( $\mu$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV) para cada variável aleatória é apresentado na Tabela 2. Para aplicação do método utilizou-se planilha eletrônica no software Excel. Os valores de entrada para aplicação do Método de Rosenblueth são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2: Média, desvio padrão e coeficiente de variação adotados para as variáveis aleatórias

	Q (kN)	G <sub>L</sub> (kPa)	G <sub>B</sub> (kPa)
$\mu$	2216,80	5696,95	79500
$\sigma$	221,68	1709,085	23850
CV	10%	30%	30%

Tabela 3: Valores de entrada do cálculo de w pelo Método de Rosenblueth

Aplicação do Método de Rosenblueth para o cálculo do recalque (w)					
Q (kN)	G <sub>L</sub> (kPa)	G <sub>B</sub> (kPa)	Configuração	w (mm)	w <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )
2549,32	7406,035	103350	+++	7,4187	5,5E+01
1884,28	3987,865	55650	---	7,8853	6,2E+01
2549,32	7406,035	55650	++-	7,5820	5,7E+01
1884,28	3987,865	103350	--+	7,4564	5,6E+01
2549,32	3987,865	103350	+ - +	10,0880	1,0E+02
1884,28	7406,035	55650	- + -	5,6041	3,1E+01
2549,32	3987,865	55650	+ - -	10,6683	1,1E+02
1884,28	7406,035	103350	- + +	5,4834	3,0E+01

Os valores de w foram calculados pela fórmula de Randolph e Wroth (Equação 1).

## 2.4 Análise da confiabilidade

Problemas de confiabilidade em engenharia podem ser definidos como a determinação da capacidade de um sistema para atender a determinadas condições, podendo ser chamadas de exigências, segundo Silva (2003). As incertezas inerentes a um projeto de fundações estão ligadas a determinação das solicitações, à variabilidade do maciço de solo, à determinação dos parâmetros geotécnicos e o grau ao qual o modelo analítico representa o comportamento real da fundação.

A função de desempenho para o modelo é obtida pelo conceito de margem de segurança, mostrada na Equação 11. De acordo com Ang e Tang (1984) o desempenho limite pode ser definido como  $g(X)=0$ , que é o estado limite do sistema, ou seja, se  $g>0$  a estaca atua com o desempenho desejado, se  $g<0$  ocorre o desempenho indesejado.

$$g(R_a - R_p) = R_a - R_p \tag{11}$$

sendo  $R_a$  a variável para o recalque admissível e  $R_p$  a variável do recalque previsto.

A análise do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) de um sistema visa garantir a ocorrência de um determinado evento, pré-estabelecido, geralmente na análise de resistência e solicitação de uma determinada

estrutura. Neste estudo porém, foi avaliado o índice de confiabilidade para a ocorrência de recalques elevados em fundações profundas, a partir do valor de recalque estimado e de valores toleráveis disponíveis na literatura.

A confiabilidade pode ser determinada em função da margem de segurança expressa em unidades de desvio padrão, como mostrado na Equação 12.

$$\beta = \frac{\mu_a - \mu_p}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_p^2}} \tag{12}$$

Sendo  $\mu_a$  e  $\mu_p$  os valores médios de recalque admissível e previsto, respectivamente, e  $\sigma_a$  e  $\sigma_p$  os valores de desvios padrões para o recalque admissível e o recalque previsto, respectivamente. Admite-se nesta formulação que os recalques previstos e admissíveis são independentes entre si e têm distribuição normal.

Valores limites para o recalque admissível absoluto em estacas são escassos e quase inexistentes na literatura, já que o recalque admissível de qualquer fundação dependerá principalmente da sensibilidade da estrutura quanto aos movimentos da fundação. A própria NBR 6122 (Projeto e Execução de Fundações) não especifica claramente os limites que devem ser adotados. Barros (2012) em seu estudo, estabelece como limite para o recalque admissível em estacas hélice contínua o valor de 15 mm.

No presente estudo, foram adotados cinco valores médios possíveis para os recalques admissíveis, e para cada um deles, em combinação com o recalque previsto, calculou-se um índice de confiabilidade. Os valores admissíveis médios considerados são respectivamente 10, 15, 25, 40 e 62 milímetros. O valor de 62 mm correspondente ao limite de 10% do diâmetro da estaca, o qual já configura um estado de ruptura, que ultrapassa os limites da teoria da elasticidade utilizada no modelo de cálculo. Foram adotados para os recalques admissíveis coeficientes de variação iguais a 10%, 20% e 30%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos de acordo com a metodologia adotada são apresentados na Tabela 4. Estes valores são referentes ao valor esperado, desvio padrão e coeficiente de variação do recalque na estaca.

Tabela 4: Parâmetros de distribuição de w calculados pelo Método de Rosenblueth

<b>E[w] (mm)</b>	7,77
<b><math>\sigma_w</math> (mm)</b>	1,73
<b>CV (%)</b>	22

Buscando avaliar a influência individual de cada variável aleatória na variabilidade final do recalque previsto foi estudada a sensibilidade do recalque em relação aos três parâmetros. O resultado é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Variabilidade do recalque previsto em função das variáveis aleatórias

	<b>Q (kN)</b>	<b>G<sub>L</sub> (kPa)</b>	<b>G<sub>B</sub> (kPa)</b>	<b>CV do recalque previsto (%)</b>
<b>CV das variáveis (%)</b>	15	0	0	15
	0	30	0	16
	0	0	30	1,7



Observa-se que a variável de maior influência na variabilidade do recalque previsto é o módulo de cisalhamento do solo ao redor da estaca ( $G_L$ ), induzindo um coeficiente de variação de 16% no recalque previsto. A variabilidade da carga aplicada na estaca ( $Q$ ) possui relação direta com a variabilidade do recalque previsto, e o módulo de cisalhamento do solo abaixo da ponta da estaca induz apenas 1,7% da variabilidade no recalque.

As distribuições de probabilidade para os valores de recalque admissível, considerando um CV igual a 20%, são apresentadas na Figura 1, e a distribuição adotada para as variáveis foi a distribuição normal. Os valores obtidos para o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) são apresentados na Tabela 6. A relação entre os recalque médios admissíveis, seus coeficientes de variação, e o índice de confiabilidade alcançado, está demonstrada na Figura 2.

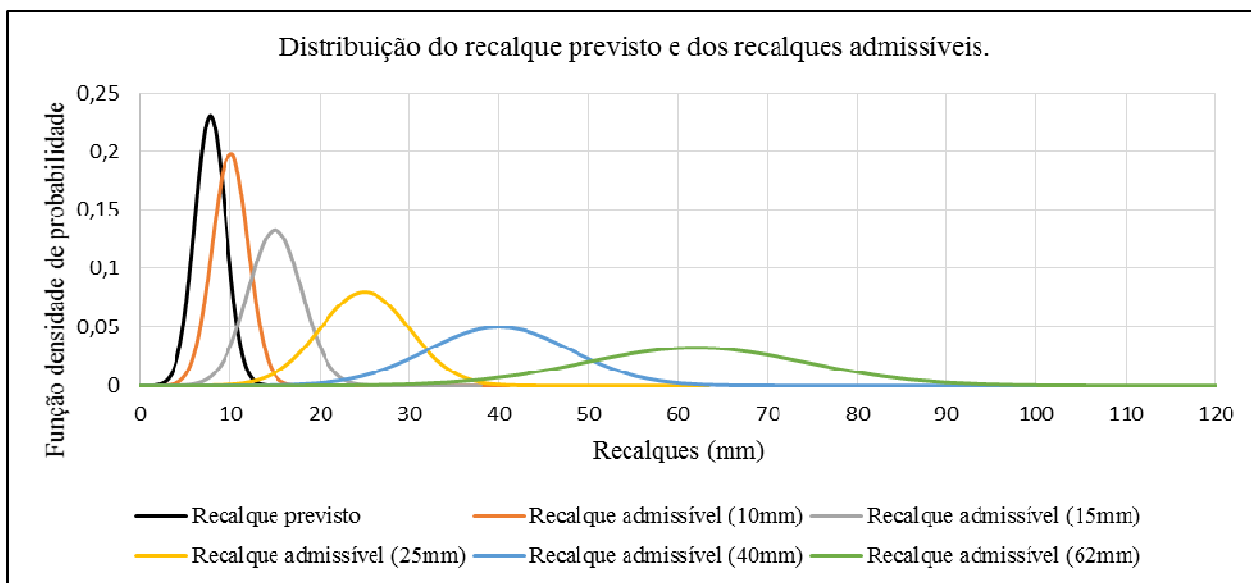


Figura 1: Distribuição normal do recalque previsto e dos recalques admissíveis (CV=20%)

Tabela 6: Índice de confiabilidade ( $\beta$ ) de acordo com o recalque admissível

Recalque previsto (mm)		Recalque admissível (mm)		$\beta$
Média	CV	Média	CV	
7,77	22%	10,00	10%	1,24
		15,00		3,42
		25,00		5,92
		40,00		7,55
		62,00		8,50
		10,00	20%	0,89
		15,00		2,16
		25,00		3,30
		40,00		3,96
		62,00		4,34
10,00	30%	0,66		
15,00		1,52		

25,00	2,25
40,00	2,66
62,00	2,90

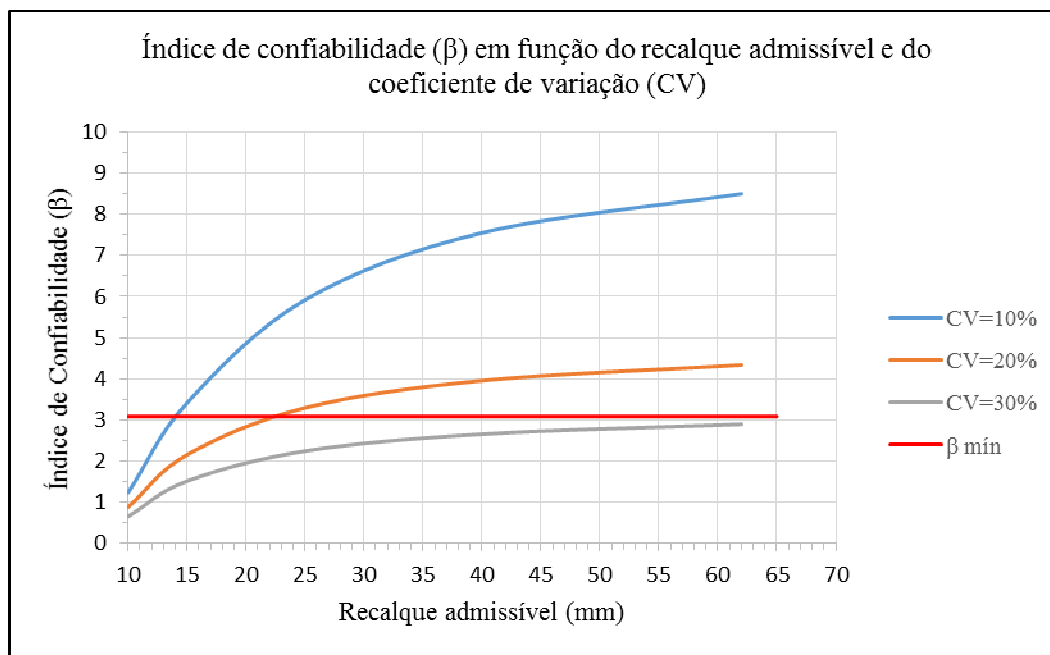


Figura 2: Distribuição de  $\beta$  em função da variação do recalque admissível

De acordo com os resultados mostrados nas Figuras 1 e 2 e os valores da Tabela 6, observa-se que quanto maior a área entre as curvas das distribuições dos recalques admissíveis e previstos, menor será o índice de confiabilidade para o recalque da estaca. Ou seja, quanto menor a variação do recalque admissível, maior será o índice de confiabilidade para a situação analisada.

A fim de obter um parâmetro de análise para os índices de confiabilidade obtidos para os recalques (ELS), comparou-se os mesmos com o valores propostos para a probabilidade de ruína (ELU). Na área da engenharia de fundações, são geralmente considerados aceitáveis probabilidades de ruína inferiores a 1/1000 eventos (AOKI, 2002), e segundo Ang e Tang (1984) este valor é proporcional a um índice de confiabilidade ( $\beta$ ) mínimo igual a 3,09. Este valor mínimo foi destacado na Figura 2 com uma linha vermelha horizontal.

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido apresentou a aplicação de um modelo analítico para estimativa do recalque em uma estaca de cais portuário, bem como a avaliação da influência da variabilidade de alguns parâmetros do modelo na estimativa do recalque previsto, empregando o método probabilístico de Rosenblueth. Posteriormente, foi analisado o índice de confiabilidade para ocorrência de recalques excessivos, adotando-se diferentes valores para o recalque admissível da estaca.

O modelo analítico utilizado se mostrou adequado à estimativa dos recalques da estaca, visto que os resultados obtidos apresentaram boa concordância com previsão a partir de método numérico, e também com resultados medidos em prova de carga estática.

No estudo da sensibilidade das variáveis envolvidas no modelo analítico, observou-se que a variável de maior influência individual na variabilidade final do recalque previsto, é o módulo de cisalhamento do solo ao redor da estaca. Este fato comprova a importância do reconhecimento do subsolo na análise de

estruturas portuárias, pois geralmente estas obras se encontram em locais em que o maciço de solo pode apresentar alta deformabilidade.

A variabilidade da carga aplicada na estaca possui uma relação direta com a variabilidade do recalque estimado, e o módulo de cisalhamento do solo abaixo da ponta da estaca apresentou uma pequena influência na variabilidade do recalque final estimado. Porém destaca-se a importância da análise conjunta das variáveis envolvidas no processo.

Para a análise do índice de confiabilidade quanto a recalques excessivos, foram testados alguns valores para o recalque admissível, pois as normas brasileiras não especificam limites para os recalques em fundações profundas, e poucas são as indicações disponíveis na literatura.

Os resultados mostrados na Figura 2 indicam que, para o caso estudado no presente trabalho, o índice de confiabilidade alcançado depende muito da média e da variância do recalque admissível, dados cuja avaliação dependerá muito da sensibilidade da estrutura quanto a recalques. Ainda assim, no exercício realizado, observa-se que um índice de confiabilidade superior a 3,09 (correspondente a uma probabilidade de “falha” de 1/1000) é alcançado para um recalque admissível médio acima de 14 mm (admitindo-se um coeficiente de variação de 10%) ou acima de 22 mm (admitindo-se um coeficiente de variação de 20%). Uma incerteza no valor do recalque admissível correspondente a um CV de 30% impede a obtenção de um  $\beta$  igual ou superior a 3,09.

Destaca-se a potencialidade dos métodos probabilísticos na avaliação das incertezas associadas ao projeto de fundações, seja relacionado à ruptura do sistema solo-fundação, seja relacionado aos recalques admissíveis.

## 5. REFERÊNCIAS

AMADORI, T. Análise de confiabilidade das fundações da obra de ampliação do cais do Terminal de Contêineres do Porto de Rio Grande (RS) aplicando metodologia bayesiana. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, 2013.

ANG, A.H.S. & TANG, W.H. Probability concepts in engineering planning and design: decision, risk and reliability. Vol. 2. New York, 1984.

AOKI, N. & LOPES, F.R. Estimating stresses and settlements due to deep foundations by the theory of elasticity. Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol.1, pp. 377-386, Buenos Aires, Argentina, 1975.

AOKI, N. Probabilidade de falha e carga admissível de fundação por Estacas. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Vol. XIX, p. 48-64, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de fundações, NBR-6122, Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, N.B.F. Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2012.

HARR, E.M. Reliability-based design in civil engineering, McGraw-Hill, New York, 1987.

LAPROVITERA, H. Reavaliação de método semi-empírico de previsão da capacidade de carga de estacas a partir de banco de dados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1988.

LOPES, F.R.; LAPROVITERA, H.; OLIVEIRA, H.M. & BENEGAS, E.Q. Utilização de um banco de dados para previsão do comportamento de estacas. Simpósio Geotécnico comemorativo dos 30 anos da COPPE (COPPEGE), pp. 281-294, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1993.

- RANDOLPH, M.F. & WROTH, C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 104, No. GT12, p. 1465-1488, 1978.
- ROBERTS, L.A. & MISRA, A. Reliability-based design of deep foundations based on differential settlement criterion. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, p. 168-176, 2009.
- ROSENBLUETH, E. Point estimates for probability moments. Proc., Nat. Acad. of Sci., 72(10), p. 3812-3814, 1975.
- ROSENBLUETH, E. Two-point estimates in probabilities, Appl. Math. Modelling, Vol. 5, p. 329-335, 1981.
- SILVA, F.C. Análise de segurança e confiabilidade de fundações profundas em estacas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2003.
- VELLOSO, D.A. & LOPES, F.R. Fundações. Vol. 2, Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- WANG, Y. & KULHAWY, F.H. Reliability index for serviceability limit state of building foundations. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 11, p. 1587-1594, 2008.
- WEGMANN, M.D. & ALVES, A.M.L. Comparação entre os recalques estimados para os estaqueamentos de dois cais portuários. In: Congresso de Iniciação Científica, 14a. Mostra de Produção Universitária, Univerdidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2015 (Resumo disponível em: [http://www.mpu-historico.furg.br/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=11&Itemid=189&limitstart=420](http://www.mpu-historico.furg.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11&Itemid=189&limitstart=420)).
- ZHANG, L.M. & NG, A.M.Y. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations. Géotechnique, Vol. 55, No. 2, p. 151-161, 2005.
- ZHANG, S.; ZHONG, L. & XU, Z. Reliability of foundation pile based on settlement and a parameter sensitivity analysis. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2016, Article ID 1659549, 7 p., 2016.