

## Probabilistic analysis of load capacity of deep foundations using the point estimate method

### Análise probabilística de capacidade de carga de fundações profundas usando o método das estimativas pontuais

Article Info:

Article history: Received 2024-07-01 / Accepted 2024-08-09 / Available online 2024-09-15

doi: 10.18540/jcecv110iss8pp19672



**Rodrigo Morais Costa**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8725-6095>

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil

E-mail: [Rodrigo.mc@discente.ufma.br](mailto:Rodrigo.mc@discente.ufma.br)

**George Fernandes Azevedo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2207-7282>

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil

E-mail: [gf.azevedo@ufma.br](mailto:gf.azevedo@ufma.br)

#### Resumo

Este trabalho aborda a análise probabilística da capacidade de carga de fundações profundas em estacas de hélice contínua, pré-moldada e estaca Strauss, com 3 variações de cargas para cada tipo de estaca e 3 diferentes diâmetros para cada estaca também, assim resultando 9 cálculos para cada estaca. Para o cálculo da capacidade de carga última, foi utilizado o método de Décourt e Quaresma, reconhecido por sua eficácia em análises geotécnicas. A probabilidade de ruptura foi determinada utilizando o método das estimativas pontuais de Rosenblueth, um método robusto para avaliar a incerteza. Os cálculos foram realizados com o auxílio do software MATLAB. Os resultados obtidos mostram que a probabilidade de ruptura varia significativamente em função do diâmetro das estacas, sendo maior em estacas de menor diâmetro, especialmente sob cargas de trabalho mais elevadas. As conclusões indicam a importância de uma seleção criteriosa do diâmetro das estacas para garantir a segurança estrutural, minimizando os riscos de falha. Comparações com estudos anteriores são feitas para validar os resultados obtidos e sugerir melhorias no projeto de fundações profundas.

**Palavras-chave:** Fundações. Capacidade de carga. Probabilidade de ruptura.

#### Abstract

This study addresses the probabilistic analysis of the load capacity of deep foundations in continuous, precast and Strauss stake helix piles, with 3 load variations for each type of stake and 3 different diameters for each stake as well, thus resulting in 9 calculations for each stake. To calculate the ultimate load capacity, the Décourt and Quaresma method was used, recognized for its effectiveness in geotechnical analysis. The probability of rupture was determined using the Rosenblueth point estimates method, a robust method to evaluate uncertainty. The calculations were carried out with the help of the MATLAB software. The results obtained show that the probability of rupture varies significantly depending on the diameter of the piles, being higher in smaller diameter piles, especially under higher workloads. The conclusions indicate the importance of a careful selection of the diameter of the piles to ensure structural safety, minimizing the risks of failure. Comparisons with previous studies are made to validate the results obtained and suggest improvements in the design of deep foundations.

**Keywords:** Foundations. Load capacity. Probability of Failure.

## 1. Introdução

O desenvolvimento do projeto de fundações representa uma das etapas mais cruciais na construção civil, impactando diretamente na segurança estrutural e na viabilidade econômica das edificações. As fundações têm a responsabilidade de transferir as cargas da estrutura para o solo, prevenindo problemas como assentamentos diferenciais e falhas catastróficas (Milititsky *et al.*, 2015). Um projeto de fundações bem dimensionado pode resultar em economia significativa de materiais, como concreto e aço, sem comprometer a segurança da construção (Almeida e Silva, 2017).

Para Velloso e Lopes (2010) o engenheiro de fundações deve ter muito conhecimento sobre: (i) geologia, (ii) classificação dos solos (granulometria, parâmetros físicos, limites de Atterberg etc.), (iii) investigação geotécnicas, (iv) controle da água subterrânea, (v) resistência ao cisalhamento, capacidade de carga e empuxos, (vi) adensamento e compressibilidade, (vii) distribuições e cálculo de recalque.

O ensaio de SPT (Standard Penetration Test) é fundamental na investigação geotécnica de solos, pois fornece dados essenciais para o dimensionamento seguro de fundações. Esse ensaio mede a resistência à penetração do solo, oferecendo informações sobre sua compactidade e consistência, que são cruciais para avaliar a capacidade de carga e prever possíveis recalques. De acordo com Alencar (2018), o SPT é amplamente utilizado por sua simplicidade e baixo custo, sendo normatizado pela ABNT NBR 6484 (ABNT, 2020), o que garante a padronização dos resultados. Milititsky *et al.* (2015) destacam que o uso inadequado de sondagens ou a interpretação incorreta dos dados pode levar a problemas estruturais graves, como fissuras e recalques, aumentando significativamente os custos de construção e manutenção. Velloso e Lopes (2010) ainda completam afirmando que na engenharia de fundações, o profissional vai trabalhar com um material natural, onde se tem pouco ou nenhum controle do solo, sendo assim restando apenas aceitá-lo como se apresenta.

A ausência de um projeto de fundação adequado pode resultar em patologias graves, como fissuras, recalques excessivos e até mesmo o colapso da estrutura. Esses problemas, além de comprometerem a segurança da edificação, podem gerar custos de reparo que superam o orçamento inicial da obra, tornando inviável sua correção (Milititsky *et al.*, 2015). De acordo com Alonso (1991), essas falhas podem acarretar a necessidade de evacuação da edificação, além de comprometerem a funcionalidade e a durabilidade da obra.

Fundações profundas, como estacas do tipo hélice contínua, pré-moldada e Strauss, são amplamente utilizadas em terrenos com baixa capacidade de suporte superficial devido à sua eficiência em diferentes condições geotécnicas (Silva e Almeida, 2019). O dimensionamento dessas fundações, tradicionalmente realizado por métodos determinísticos, como o proposto por Décourt-Quaresma (1978) *apud* Aoki & Cintra (2010), visa estimar a capacidade de carga última das estacas. No entanto, esses métodos muitas vezes não consideram a variabilidade dos parâmetros do solo, o que pode resultar em estimativas imprecisas (Lopes, 2017).

Para lidar com essa incerteza, métodos probabilísticos, como o das estimativas pontuais de Rosenblueth (1981), têm sido aplicados. Esse método permite a análise da probabilidade de ruína utilizando um número reduzido de pontos de estimativa, facilitando o cálculo sem a necessidade de métodos mais complexos, como a simulação de Monte Carlo, por exemplo (Lima, 2018). Dessa forma, é possível incorporar variações nos parâmetros geotécnicos e nas cargas aplicadas, obtendo uma estimativa mais precisa da probabilidade de falha da fundação.

Mesmo ao seguir os fatores de segurança estabelecidos pela NBR 6122 (ABNT, 2022), sempre existirá um risco residual de ruína em qualquer fundação. Por isso, além de seguir as normas, é essencial definir uma probabilidade máxima de ruína aceitável para cada caso específico, visando minimizar os riscos a um nível aceitável (Aoki & Cintra, 2010).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise probabilística da capacidade de carga de estacas hélice contínua, Strauss e pré-moldada (centrifugada), utilizando o método de Décourt-Quaresma para calcular a capacidade de carga e o método das estimativas pontuais para determinar

a probabilidade de ruína. A influência dos diferentes diâmetros das estacas nas probabilidades de falha será investigada, oferecendo uma análise mais robusta para projetos de fundações.

## 2. Metodologia

A metodologia deste estudo baseia-se na aplicação do método estatístico de estimativas pontuais ou método de Rosenblueth para avaliar a probabilidade de falha em fundações do tipo estacas de hélice contínua, estaca pré-moldada (centrifugada) e estaca Strauss, em conjunto com o método semi-empírico de Décourt-Quaresma para o cálculo da capacidade de carga das estacas.

Foi utilizado um conjunto de 24 laudos de Sondagem à Percussão (SPT) realizados para a construção das fundações de um presídio localizado na cidade de São Luís – MA, utilizados por Fonseca e Azevedo (2024). A partir desses laudos, obteve-se informações sobre a resistência à penetração do solo, o tipo de solo presente, o nível de água nas camadas, entre outros dados relevantes. Essas informações foram organizadas em planilhas no software Microsoft Excel, onde foi realizada a compilação e análise dos dados. Foram calculadas as médias dos índices de resistência à penetração ( $N_{spt}$ ) e os respectivos desvios-padrões para os 24 pontos de sondagem, considerando metro a metro a classificação do solo. Com isso, foi possível proceder com as análises necessárias para o cálculo da probabilidade de falha das devidas estacas.

Fonseca e Azevedo (2024) verificaram um padrão geotécnico consistente, em relação aos ensaios, até 20 metros de profundidade, com dois tipos de solo predominantes: areia argilosa até 11 metros e silte arenoso entre 12 e 20 metros. Em uma das sondagens, foi encontrada uma camada de areia argilosa a 12 metros, mas a maioria das sondagens seguiu o padrão inicial. A resistência máxima à penetração foi atingida a 17 metros de profundidade. Foram calculados os valores médios e desvios-padrões dos índices de resistência à penetração para cada profundidade. A Tabela 1 apresenta estes valores.

**Tabela 1 – Valores de média, desvio padrão dos  $N_{spt}$ .**

<b>Profundidade / metros</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
1	4	2,8
2	4	2,8
3	6	4,3
4	7	3,8
5	12	4,3
6	19	5,2
7	19	4,1
8	21	4,4
9	20	4,4
10	21	4,2
11	24	3,5
12	28	3,7
13	31	6,5
14	33	8,4
15	33	8,7
16	37	10,7
17	33	3,4

Fonte: Fonseca e Azevedo (2024).

Os ensaios de SPT foram feitos até 20 metros, entretanto foram atingidos máximos valores de índice de resistência a 17 metros de profundidade. Portanto foram adotados os valores para até 17 metros.

Cada tipo de estaca tem um valor limite de  $N_{spt}$  associado à sua parada e ao comprimento máximo limitado, conforme mostrado na tabela a seguir:

**Tabela 2 – Valores de  $N_{spt}$  limite e suas respectivas profundidades.**

<b>Tipo de Estaca</b>	<b><math>N_{spt}</math> limite</b>
Strauss	$10 < N_{SPT} \leq 25$
Hélice contínua	$10 < N_{SPT} \leq 45$
Pré-Moldada (centrifugada)	$10 < N_{SPT} \leq 35$

Fonte: Adaptado de Aoki e Cintra (2010).

Para realização dos cálculos probabilísticos e de capacidade de carga última, foi desenvolvido um código específico no software MATLAB. Este algoritmo realiza o cálculo de uma amostra de valores de capacidade de carga da estaca em função dos valores de SPT (Standard Penetration Test) e suas variações, utilizando o método de Rosenblueth para cálculo de combinações possíveis de desvio padrão. A seguir, segue uma explicação resumida:

1. **Definição de variáveis:** São definidos os dados iniciais para a análise de uma tipologia específica correspondendo ao diâmetro da estaca, à carga de trabalho e ao fator de capacidade de carga de ponta (C), além de cálculos de área e perímetro da estaca;
2. **Leitura dos dados:** Uma matriz de dados é criada contendo valores médios de SPT, desvios padrões e o comprimento de cada camada homogênea de solo;
3. **Combinações de desvios padrões:** O código gera todas as combinações possíveis de valores médios de SPT somados e subtraídos de seus respectivos desvios padrões, fornecendo as estimativas pontuais;
4. **Cálculos de capacidade de carga:** A partir dessas combinações são geradas amostras, das quais são calculadas as resistências de ponta, lateral e total para a estaca;
5. **Cálculo de estatísticas:** A média, a variância e o desvio padrão das capacidades de carga são calculadas a partir da amostra gerada pelo método das estimativas pontuais. Com isso, o código assume uma distribuição normal para determinar a probabilidade de falha (PR).

Para a organização das informações de SPT, foi gerada uma matriz com a quantidade de linhas indo até a profundidade máxima suportada pelo  $N_{spt}$  limite de acordo com a Tabela 2. Tal matriz possui 3 colunas, cada uma representando a seguinte ordem: índice médio de resistência a penetração do solo, desvio padrão médio do  $N_{spt}$  e a última coluna representando a espessura da camada de solo referente aos dados de SPT. A figura abaixo exemplifica esta organização:

```
Dados = [4 2.8 1;
         4 2.8 1;
         6 4.3 1;
         7 3.8 1;
         12 4.3 1;
         19 5.2 1;
         19 4.1 1;
         21 4.4 1;
         20 4.4 1;
         21 4.2 1;
         24 3.5 1;
         28 3.7 1;];
```

**Figura 1 – Exemplo de entrada de dados do subsolo para análise de uma estaca tipo Strauss.**

Para o cálculo da capacidade de carga das estacas foi utilizado o método de Décourt-Quaresma (1978 *apud* Aoki & Cintra, 2010), que se baseia principalmente nos resultados do ensaio de

penetração padrão (SPT) para determinar a carga última do elemento de fundação. Consideram-se dois componentes principais para calcular a capacidade de carga, os quais seriam:

Resistência de Ponta ( $Q_{p,ult}$ ): Refere-se à resistência do solo na ponta da estaca, que é a capacidade de carga que o solo oferece na extremidade inferior da estaca.

Resistência Lateral ( $Q_{l,ult}$ ): Refere-se à resistência ao longo do fuste da estaca, que é a capacidade de carga oferecida pelo atrito entre o solo e a superfície lateral da estaca.

A capacidade de carga última total ( $Q_{ult}$ ) é dada pela soma da resistência de ponta e da resistência lateral:

$$Q_{ult} = Q_{p,ult} + Q_{l,ult} \quad (1)$$

Para o cálculo da capacidade de carga de ponta das estacas utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Q_{p,ult} = C \cdot N_p \cdot A_p \quad (2)$$

Onde:

- $C$ : Coeficiente que depende do tipo de solo, os quais são valores tabelados para diferentes solos, fornecidos por Décourt-Quaresma (1978);
- $N_p$ : Índice de resistência à penetração do solo obtido no ensaio SPT próximo a ponta da estaca (média entre os  $N_{spt}$  na cota de assentamento, na profundidade imediatamente acima e na imediatamente abaixo);
- $A_p$ : Área da ponta da estaca.

Já para a capacidade de carga lateral utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Q_{l,ult} = P \cdot 10 \cdot \left( \frac{N_{med}}{3} + 1 \right) \cdot \Delta L \quad (3)$$

Onde:

- $N_{med}$ : Média do índice de resistência à penetração do solo  $N_{spt}$  ao longo do fuste;  
 $\Delta L$ : comprimento da estaca;  
 $P$ : perímetro da estaca.

Embora o método original tenha sido desenvolvido para estacas cravadas em solos arenosos, ele foi posteriormente adaptado para outros tipos de estacas e solos, incluindo estacas hélice contínua e estacas escavadas, muito utilizadas no Brasil. A principal adaptação do método para essas estacas envolve ajustes nos coeficientes empíricos que relacionam os resultados do SPT com a capacidade de carga de estacas em solos coesivos ou mistos.

Em solos argilosos, por exemplo, a contribuição do atrito lateral é ajustada para refletir as características específicas desse tipo de solo, uma vez que o comportamento do fuste da estaca varia significativamente em relação aos solos arenosos. No caso de estacas hélice contínua, os coeficientes empíricos são ajustados para refletir o processo de execução da estaca, que envolve a introdução de concreto no solo sob pressão, o que melhora a interação solo-estaca. O método de Décourt-Quaresma para hélice contínua e estacas Strauss faz-se adaptações na fórmula original da estaca pré-moldada, colocando-se coeficiente de correção  $\alpha$  para resistência de ponta e  $\beta$  para lateral, logo a equação fica da seguinte forma:

$$Q_u = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot P \cdot 10 \cdot \left( \frac{N_{med}}{3} + 1 \right) \cdot \Delta L \quad (4)$$

As tabelas abaixo resumem os valores  $\alpha$  e  $\beta$  para as estacas hélice contínua e Strauss, respectivamente.

**Tabela 3 – Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para estaca hélice contínua para o método de Decourt-Quaresma.**

Estacas Hélice contínua		
Tipo de solo	$\alpha$	$\beta$
Argila	0,3	1
Solos intermediários	0,3	1
Areia	0,3	1

Fonte: Adaptado Aoki e Cintra (2010).

**Tabela 4 – Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para estaca tipo Strauss para o método de Decourt-Quaresma.**

Estacas escavadas sem lama bentonítica		
Tipo de solo	$\alpha$	$\beta$
Argila	0,85	0,9
Solos intermediários	0,6	0,75
Areia	0,5	0,6

Fonte: Adaptado Aoki e Cintra (2010).

O código no Matlab foi alterado para cada tipo de situação, fazendo-se os ajustes necessários nas fórmulas.

Para o cálculo da probabilidade de ruptura, foi usado o método das estimativas pontuais, também conhecido como Método de Rosenblueth (1981). Esta é uma técnica estatística usada para calcular a incerteza em sistemas onde as variáveis aleatórias têm distribuição conhecida, mas não necessariamente normal.

Rosenblueth (1981) propôs um método aproximado que simplifica a estimativa dos momentos estatísticos (como média e desvio padrão) de uma variável dependente a partir de variáveis aleatórias independentes. Esse método é eficiente mesmo quando as dispersões das variáveis são grandes e não requer o conhecimento completo das distribuições de probabilidade, apenas dos momentos, como média e desvio-padrão.

Para cada variável, são escolhidos dois pontos que representam a distribuição da variável aleatória: um ponto "superior" e um ponto "inferior". Esses pontos são geralmente escolhidos como:

- Ponto inferior:  $x_i^- = \mu_i - \sigma_i$ ;
- Ponto superior:  $x_i^+ = \mu_i + \sigma_i$ ;

Onde  $\mu_i$  é a média e  $\sigma_i$  é o desvio padrão da variável  $x_i$ .

Tomando-se como base as variáveis X e Y aleatórias, tem-se:

- Ponto inferior para X:  $X^- = \mu_x - \sigma_x$
- Ponto superior para X:  $X^+ = \mu_x + \sigma_x$
- Ponto inferior para Y:  $Y^- = \mu_y - \sigma_y$
- Ponto superior para Y:  $Y^+ = \mu_y + \sigma_y$

A partir disso, a função é avaliada para os quatro pontos possíveis:

- $f(X^-, Y^-)$
- $f(X^-, Y^+)$
- $f(X^+, Y^-)$

- $f(X^+, Y^+)$

A média estimada da função é dada por:

$$E[f(X, Y)] \approx \frac{1}{4} [(X^-, Y^-) + (X^-, Y^+) + (X^+, Y^-) + (X^+, Y^+)] \quad (5)$$

Pode-se generalizar as condições para o caso multivariado, onde a variável  $Y$  depende de  $n$  variáveis aleatórias. Se essas variáveis não forem correlacionadas entre si, as estimativas da média e do desvio padrão de  $Y$  podem ser obtidas por fórmulas específicas:

$$\bar{Y} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} y_i \quad (6)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} (y_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

Para este trabalho, as combinações das variações da resistência do SPT ao longo da profundidade configuraram-se como as variáveis independentes estatísticas, sendo que foi necessário calcular as combinações possíveis por meio do software Matlab.

Para cada tipo de estaca foi realizada uma análise no código programado, onde o algoritmo se baseia em fazer todos os cálculos estatístico em todas as combinações possíveis (método das estimativas pontuais) e cálculos das capacidades de cargas das fundações (método de Décourt-Quaresma). As variáveis de entrada correspondem a média e desvios padrões dos índices  $N_{spt}$  para cada metro, profundidade do solo, o diâmetro da estaca, carga de trabalho, coeficiente  $C$  e valores de correção  $\alpha$  e  $\beta$  (usados para a estaca hélice contínua e estacas Strauss). O código foi feito inicialmente para fazer os cálculos para estacas pré-moldadas e depois foi-se adaptando o código para atender aos outros tipos de estacas.

Nos laudos de sondagens foram observados que havia predominância de solo classificado como silte arenoso em suas respectivas profundidades analisadas para cada tipo de estaca e camadas de solo. Foi adotado o fator de correção para o solo silte arenoso de 250 kPa que é o recomendado por Décourt e Quaresma (1978). Os valores do coeficiente  $C$  são apresentados na tabela abaixo.

**Tabela 5 – Valores de  $C$  (Décourt-Quaresma, 1978).**

Tipos de solo	$C$ (kPa)
Argilas	120
Siltes arenosos	200
Siltes arenosos	250
Areias	400

Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010).

Para estacas do tipo Strauss foram adotadas cargas de trabalho de 600 kN, 560 kN e 520 kN, sendo que cada carga de trabalho desse tipo foi testada nos diâmetros de 0,42 m, 0,32 m e 0,27 m. Para a estaca do tipo hélice contínua foram usadas cargas de trabalho de 100 kN, 750 kN e 500 kN e cada carga foi testada nos diâmetros de 0,40 m, 0,35 m e 0,275 m. E, por último, para estaca pré-moldada (centrifugada) foram usadas cargas de trabalho de 2550 kN, 2350 kN e 2150 kN, e cada carga dessa estaca foi testada para os diâmetros das estacas de 0,70 m, 0,50 m e 0,42 m. As variáveis

de diâmetro e carga de trabalho para dados de entrada para cada tipo de estaca são resumidas na tabela abaixo.

**Tabela 6 – Valores de entrada no software Matlab.**

<b>Tipos de Estacas</b>	<b>Carga de trabalho (kN)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>
Strauss	600	0,42
	560	0,32
	520	0,27
Hélice contínua	1000	0,40
	750	0,35
	500	0,275
Pré-Moldada (centrifugada)	2550	0,70
	2350	0,50
	2150	0,42

### 3. Resultados e discussões

Utilizando o método de estimativas pontuais programado no software Matlab, foram calculadas a capacidade de carga última por Décourt-Qaresma (1978 *apud* Aoki & Cintra, 2010) e a probabilidade de ruptura para cada tipo de estaca, considerando diferentes cargas de trabalho e diâmetros. Os resultados estão apresentados nas tabelas seguintes.

**Tabela 7 – Carga última e probabilidade de ruptura para estacas tipo Strauss.**

<b>Tipo de estaca</b>	<b>Carga de trabalho / kN</b>	<b>Diâmetro / m</b>	<b>Carga Última / kN</b>	<b>Probabilidade de Ruptura</b>
Strauss	600	0,42	1035,50	$7,40 \times 10^{-7}$
	600	0,32	697,23	$1,42 \times 10^{-2}$
	600	0,27	549,59	$5,00 \times 10^{-1}$
	560	0,42	1035,50	$1,30 \times 10^{-6}$
	560	0,32	697,23	$9,89 \times 10^{-4}$
	560	0,27	549,59	$5,00 \times 10^{-1}$
	520	0,42	1035,5	$1,84 \times 10^{-6}$
	520	0,32	697,24	$3,60 \times 10^{-5}$
	520	0,27	549,59	$2,02 \times 10^{-1}$

**Tabela 8 – Carga última e probabilidade de ruptura para estacas tipo hélice contínua.**

<b>Tipo de estaca</b>	<b>Carga de trabalho / kN</b>	<b>Diâmetro / metros</b>	<b>Carga Última / kN</b>	<b>Probabilidade de Ruptura</b>
Hélice contínua	1000	0,40	1803,70	$2,73 \times 10^{-6}$
	1000	0,35	1542,89	$3,73 \times 10^{-7}$
	1000	0,275	1170,50	$4,20 \times 10^{-3}$
	750	0,40	1803,70	$2,12 \times 10^{-6}$
	750	0,35	1542,89	$1,07 \times 10^{-7}$
	750	0,275	1170,50	$3,67 \times 10^{-6}$
	500	0,40	1803,70	$1,52 \times 10^{-6}$
	500	0,35	1542,89	$3,83 \times 10^{-6}$
	500	0,275	1170,50	$3,47 \times 10^{-6}$

**Tabela 9 – Carga última e probabilidade de ruptura para estacas pré-moldadas.**

<b>Tipo de estaca</b>	<b>Carga de trabalho / kN</b>	<b>Diâmetro / metros</b>	<b>Carga Última / kN</b>	<b>Probabilidade de Ruptura</b>
Pré-Moldada (centrifugada)	2550	0,70	5603,90	$1,96 \times 10^{-7}$
	2550	0,50	3328,60	$2,9 \times 10^{-3}$
	2550	0,42	2569,50	$4,62 \times 10^{-1}$
	2350	0,70	5603,90	$5,30 \times 10^{-7}$
	2350	0,50	3328,60	$2,61 \times 10^{-4}$
	2350	0,42	2569,50	$1,41 \times 10^{-1}$
	2150	0,70	5603,90	$8,69 \times 10^{-7}$
	2150	0,50	3328,60	$1,85 \times 10^{-5}$
	2150	0,42	2569,50	$1,99 \times 10^{-2}$

Conforme Aoki e Cintra (2010), considerar ausência de ruína assegurada por fatores de segurança prescritos por norma configura-se em um conceito ultrapassado. Em qualquer fundação há sempre risco de ruína, portanto é necessário projetar colocando além do fator de segurança, uma probabilidade de ruptura máxima para cada caso.

As normas brasileiras não impõem valores máximos para probabilidades de ruínas, assim fica responsável por determinar os valores os projetistas da subestrutura, sempre com bom senso e experiência para decidir a melhor alternativa possível para o seu trabalho.

Aoki e Cintra (2010) afirmam que, de acordo com a literatura, existem diversas referências para os valores aceitáveis de probabilidade de falhas em fundações. Lumb (1996) propõe que esses valores variam entre 1/1.000 e 1/100.000, enquanto Whitman (1984) aponta que o risco de ruptura pode estar entre 1/1.000 e 1/100.

### **Estacas Strauss**

A Tabela 7 resume os resultados obtidos para as estacas Strauss, com diferentes cargas de trabalho e diâmetros de 0,27 m, 0,32 m e 0,42 m. A capacidade de carga última variou entre 549,59 kN e 1035,50 kN. A probabilidade de ruptura mostrou variações significativas, indo de  $7,4 \times 10^{-7}$  a  $2,02 \times 10^{-1}$ , indicando que, para uma mesma carga de trabalho, os diâmetros maiores tendem a fornecer uma probabilidade de ruptura menor, conforme esperado. Observa-se que o comportamento da probabilidade de falha é diferenciado para cada diâmetro quando se varia a carga de trabalho. Para o diâmetro de 0,42 m, a probabilidade de ruptura se mantém relativamente estável, mantendo-se entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$ . Isso pode ser entendido pelo fato de que o maior diâmetro fornece a maior capacidade de carga média, o que impacta na definição da área da distribuição normal que fica à esquerda do valor da carga de trabalho. Quando se avalia os resultados para o diâmetro de 0,32 m, outra tendência já é observada. Neste caso, a redução da carga de trabalho provoca também a diminuição da probabilidade de ruptura. O valor inicial de probabilidade de falha é da ordem de  $10^{-2}$  para a carga 600 kN. Para uma carga de trabalho de 560 kN, a probabilidade decresce para  $9,89 \times 10^{-4}$ . A menor carga de trabalho utilizada (520 kN) produziu uma probabilidade de ruptura de  $3,6 \times 10^{-5}$ .

### **Estacas Hélice Contínua**

Na Tabela 8, foram analisadas estacas de hélice contínua com cargas de trabalho entre 500 kN e 1.000 kN, e diâmetros de 0,275m, 0,35m e 0,40m. As capacidades de carga última variaram de 1170,5 kN a 1803,7 kN. A probabilidade de ruptura para estas estacas apresentou valores relativamente baixos, com variações de  $1,07 \times 10^{-7}$  a  $4,2 \times 10^{-3}$ , indicando uma maior confiabilidade

das estacas com maior diâmetro. Nota-se que a probabilidade de ruína, varia para cada diâmetro adotado e se varia a carga de trabalho. Para o diâmetro de 0,40 m e variando as cargas para 1000 kN, 750 kN e 500 kN a ordem de grandeza das probabilidades de ruína não se alterou ( $10^{-6}$ ), já para o diâmetro de 0,35 m e variando para as mesmas cargas também se mantiveram próximas as ordens de grandeza, e por último o diâmetro de 0,275 m teve mais variações o que era de se esperar por ser o menor diâmetro dos 3 analisados, logo resultando em suportar uma capacidade de carga menor. Para carga de 500kN e 750 kN as ordens de grandeza da PR se mantiveram na casa de  $10^{-6}$ , já para a carga de 1000kN a probabilidade de ruptura foi pra ordem de  $10^{-3}$  para o menor diâmetro, divergindo das outras cargas. A menor probabilidade de ruína está atrelada ao diâmetro de 0,35 m e para a carga de trabalho de 750 kN.

#### **Estacas Pré-Moldadas (Centrifugadas)**

Na Tabela 9 foram consideradas estacas pré-moldadas com cargas de trabalho de 2.150 kN a 2.550 kN e diâmetros de 0,42 m, 0,5 m e 0,7 m. A capacidade de carga última variou entre 2569,5 kN e 5603,90 kN. As probabilidades de ruptura variaram de  $1,96 \times 10^{-7}$  a  $4,62 \times 10^{-1}$ , com uma tendência semelhante às outras estacas, onde maiores diâmetros resultam em menores probabilidades de falha. Para este tipo de estaca, observa-se que para um diâmetro de 0,7 m a probabilidade de ruína ficou na ordem de  $10^{-7}$ , mesmo variando as cargas. Para um diâmetro de 0,5 m, a PR diminuiu uma ordem de grandeza conforme iam-se diminuindo a carga de trabalho. Para esse diâmetro, aumentando a carga trabalho diminui-se a probabilidade de falha. A menor carga de trabalho junto com o maior diâmetro resultou na menor probabilidade de ruína para estaca pré-moldada que foi de  $8,69 \times 10^{-7}$ .

#### **4. Conclusão**

Este trabalho apresentou uma análise probabilística da capacidade de carga de fundações profundas em estacas de hélice contínua, pré-moldada e estaca Strauss, com variações de diâmetros. Utilizando o método de Décourt e Quaresma para o cálculo da capacidade de carga última e o método de Rosenblueth para a avaliação da probabilidade de ruptura, foi possível identificar as principais tendências e fatores de risco associados a cada tipo de estaca.

Analisando os resultados verificou-se que com a diminuição do diâmetro das estacas, seja pra qualquer tipo a probabilidade de ruína aumenta, o inverso também é verdadeiro, onde aumentando o diâmetro das estacas a tendência é a que a PR diminua. Nota-se que, dentre as possibilidades feitas, a que apresentou a menor maior probabilidade de falha foi a estaca tipo Strauss, com diâmetro de 0,27 m e com carga de trabalho de 600 kN, resultando em uma PR de  $5 \times 10^{-1}$ . Já a menor probabilidade de ruína apresentada foi da estaca hélice contínua com diâmetro de 0,35 m, com carga de trabalho de 750kN, resultando um PR de  $1,07 \times 10^{-7}$ .

Esses resultados confirmam que, ao aumentar o diâmetro das estacas, há uma melhora significativa na capacidade de carga e uma redução correspondente na probabilidade de ruptura. Esse efeito é particularmente relevante em projetos onde a segurança é crítica, e a escolha de estacas com maior diâmetro pode ajudar a compensar incertezas geotécnicas.

O método de Rosenblueth possibilitou uma quantificação prática da incerteza nos parâmetros de entrada, fornecendo uma avaliação mais realista da segurança das fundações. Essa abordagem probabilística mostrou-se eficaz na previsão de comportamentos que um modelo determinístico não conseguiria capturar com a mesma precisão. Ao levar em conta a variabilidade do solo e dos materiais, o método ofereceu uma visão mais precisa dos riscos envolvidos no projeto de fundações.

Conclui-se, portanto, que o uso do método de estimativas pontuais, aliado ao método de cálculo de capacidade de carga de Décourt e Quaresma, é uma ferramenta eficaz para a avaliação da segurança de fundações profundas. O dimensionamento adequado das estacas, considerando suas características geométricas e a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, resultou em uma diminuição significativa da probabilidade de falhas. Essa abordagem proporciona um dimensionamento mais confiável e econômico, aumentando a segurança dos projetos e minimizando

os riscos de falhas estruturais. Os resultados indicam que, à medida que o diâmetro das estacas diminui, a probabilidade de ruptura tende a aumentar, especialmente em situações de carga de trabalho elevada. Estacas de menor diâmetro, embora possam ser economicamente mais viáveis, apresentam um risco significativo de falha, o que reforça a necessidade de uma escolha cuidadosa das dimensões das estacas durante o projeto de fundações. A utilização de estacas de maior diâmetro mostrou-se mais segura, apresentando probabilidades de ruptura substancialmente menores.

## Referências

- ALMEIDA, M. S. S., & SILVA, J. L. (2017). Impacto econômico do projeto de fundações em edificações. *Revista de Engenharia Civil*, 42(3), 201-210.
- ALONSO, U. R. (1991). *Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações*. São Paulo: Blucher.
- AOKI, N.; & CINTRA, J. C. A. (2010). *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2020). *ABNT NBR 6484: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2022). *NBR 6122: Projeto de execução de fundações*. Rio de Janeiro: ABNT.
- FONSECA, J. F. G., & AZEVEDO, G. F. (2024). Uso de ensaios tipo SPT para a análise de capacidade de carga de fundações em termos determinísticos e probabilísticos. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC*, 10(01), 1-11. <https://www.archus.com/dynamiccad/site/2024/07/22/uso-de-ensaios-tipo-spt-para-a-analise-de-capacidade-de-carga-de-fundacoes/>.
- LIMA, S. R. (2018). Análise probabilística de fundações: uma abordagem com base no método de Rosenblueth. *Revista de Engenharia Civil*, 34(2), 122-136.
- LOPES, L. M. P. C. (2017). Projeto das Fundações de um Edifício Considerando a Probabilidade de Ruptura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- LUMB, P. (1996). The variability of natural soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), 74-97. <https://trid.trb.org/View/127944>.
- MILITITSKY, J., CONSOLI, N. C., & SCHNAID, F. (2015). *Patologia das Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- ROSENBLUETH, E. (1981). Two-point estimates in probabilities. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 61(1), 251-252. [https://doi.org/10.1016/s0307-904x\(81\)80054-6](https://doi.org/10.1016/s0307-904x(81)80054-6).
- SILVA, J. L., & ALMEIDA, M. S. S. (2019). Estacas: tipos, dimensionamento e aplicações. *Revista Brasileira de Geotecnia*, 46(2), 134-147
- VELLOSO, D. V., & LOPES, F. R. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo*. São Paulo: Oficina de Textos.