

## Use of SPT tests for the analysis of load capacity of foundations in deterministic and probabilistic terms

### Uso de ensaios tipo SPT para a análise de capacidade de carga de fundações em termos determinísticos e probabilísticos

Article Info:

Article history: Received 2023-09-01 / Accepted 2024-01-04 / Available online 2024-01-04

doi: 10.18540/jcecv110iss1pp17712



**Jorge Felipe Garcez Fonseca**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0784-0202>

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil

E-mail: [jorge.garcez@discente.ufma.br](mailto:jorge.garcez@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

O presente trabalho tem como objetivo elaborar uma análise determinística e probabilística de três elementos adotados de fundação profunda: estaca Strauss, Hélice contínua e Pré-moldada (centrifugada), por meio do uso de dados de ensaios tipo SPT. Para a análise determinística, utilizou-se o método de Aoki-Velloso (1975) para a determinação da capacidade de carga do elemento de fundação, que utiliza o índice de resistência à penetração do solo. Para a análise probabilística, utilizou-se a metodologia FOSM para o cálculo de probabilidade de ruptura para as três estacas escolhidas conforme os valores de diâmetro, valores médios dos índices de resistência a penetração e fator de correção apresentados na literatura. Tanto a abordagem determinística, quanto a abordagem probabilística, foi realizada por meio da implementação computacional, através de linguagem de programação com uso do software Matlab. A compilação dos dados obtidos dos ensaios tipo SPT foi estabelecida em planilhas no software Excel com os seguintes parâmetros: classificação do solo, nível de água, índices de resistência a penetração do solo, coeficiente em relação ao tipo de solo ( $K$ ), coeficiente de atrito do solo ( $\alpha$ ) e variação da espessura das camadas. Em seguida, verificou-se capacidade de carga média e a probabilidade de ruptura para três cargas adotadas e três diâmetros conforme a literatura para cada estaca adotada. Após resultados obtidos, encontrou-se valores aceitáveis de probabilidade de ruptura para todas as estacas analisadas, tendo a estaca Strauss, com sua maior carga de trabalho de 600 kN e menor diâmetro de 0,27m, apresentando a maior probabilidade de ruptura e a estaca Hélice Contínua, com sua menor carga de trabalho de 500 kN e menor diâmetro de 0,275m, apresentando a menor probabilidade de ruptura. A estaca Pré-moldada (centrifugada), portanto, apresentou as maiores cargas últimas calculadas. Os resultados encontrados foram satisfatórios e os cálculos deverão servir de base para possíveis estudos geotécnicos envolvendo ensaios tipo SPT.

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

#### Abstract

The present work aims to elaborate a deterministic and probabilistic analysis of three adopted elements of deep foundation: Strauss pile, continuous helix and precast (centrifuged), through the use of SPT type test data. For the deterministic analysis, the Aoki-Velloso method (1975) was used to determine the load capacity of the foundation element, which uses the index of resistance to soil

penetration. For the probabilistic analysis, the FOSM methodology was used to calculate the probability of failure for the three cuttings chosen according to the diameter values, mean values of the penetration resistance and correction factor indexes presented in the literature. Both the deterministic approach and the probabilistic approach were performed through computational implementation, through programming language using Matlab software. The compilation of data obtained from SPT tests was established in spreadsheets in Excel software with the following parameters: soil classification, water level, soil penetration resistance indexes, coefficient in relation to soil type (K), soil friction coefficient ( $\alpha$ ) and variation of layer thickness. Then, it was verified average load capacity and the probability of failure for three loads adopted and three diameters according to the literature for each pile adopted. After obtained results, acceptable values of rupture probability were found for all the piles analyzed, with the Strauss pile, with its higher workload of 600 kN and smaller diameter of 0.27m, presenting the highest probability of failure and the Continuous Helix pile, with its lower workload of 500 kN and smaller diameter of 0.275m, presenting the lowest probability of failure. The precast pile (centrifuged), therefore, presented the highest last loads calculated. The results were satisfactory and the calculations should serve as a basis for possible geotechnical studies involving SPT tests.

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

## 1. Introdução

As fundações são responsáveis pela transferência das cargas da construção para o solo, garantindo a estabilidade da estrutura. O solo deve suportar as tensões e as cargas em que os esforços solicitantes causam nas fundações, com o intuito de manter a estrutura estável e segura. (De Sousa *et al.*, 2018). De acordo com Alonso (1991), a maneira como a segurança, a funcionalidade e a durabilidade das fundações é atendida, irá refletir no desempenho das mesmas. Tal desempenho é nitidamente associado ao grau de qualidade que as equipes que projetam e executam impõem aos elementos construídos. Minozzo *et al.* (2016) complementam que é de extrema importância garantir o controle de qualidade em todas as etapas de dimensionamento e construção das fundações, pois estas permanecem enterradas e, portanto, não podem ser inspecionadas regularmente.

Segundo Chini e Leal (2020), é importante ressaltar que a falta de estudos de sondagem prévia a execução de projetos ou interpretações equivocadas da capacidade de carga podem acarretar diferentes prejuízos, como o surgimento de patologias, prejuízos financeiros, alterações no projeto, alterações no cronograma de execução da obra e atraso na entrega do empreendimento.

O custo de uma fundação geralmente é variável e dependem das características do solo e de suas condições. Em casos usuais o custo fica em torno de 3 a 6% do custo total de uma obra. Em casos mais específicos, dependendo das solicitações e tamanho da estrutura que irá suportar, podem chegar a uma faixa de 10 a 15% do custo total. A ocorrência de patologias determina a necessidade de reforços nas funções, necessidade de evacuação da edificação, com um custo alto para investigação e solucioná-la pode provocar falência em determinadas empresas (Milititsky *et al.*, 2005).

Conforme explicam Alencar (2018) e Lobo (2005), uma das alternativas mais utilizadas para investigação do solo é a sondagem a percussão denominada ensaio SPT (Standard Penetration Test) que, no Brasil, é regido pela norma ABNT (NBR 6484:2020). O sistema de reconhecimento de sondagem (SPT) traz consigo vantagens como simplicidade, economia e rapidez, além de proporcionar perfurações de grandes profundidades, identificação do nível do lençol freático, resistência a penetração em que o solo possui em diferentes níveis de profundidade, permitindo, ainda, a observação em tempo real do solo estudado.

De forma a garantir que a fundação atue dentro dos critérios ELU (Estado de Limite Último), deve-se atender os limites de segurança contra ruína, apresentando valores satisfatórios contra falhas, tanto do solo como do projeto de fundação. Logo, a capacidade de carga que um elemento de fundação tende a suportar é um equilíbrio entre a solicitação e a resistência que o solo transmite ao elemento da fundação, seja ao longo da seção transversal do fuste quanto em sua base. A capacidade de carga pode ser calculada por métodos racionais, semi-empíricos e empíricos, na qual

o método semi-empírico consiste nos resultados de laudos tipo CPT e SPT, sendo o SPT mais comumente praticado pela engenharia brasileira para investigações geotécnicas. Isso faz com que métodos que utilizam o Nspt para cálculo de capacidade de carga sejam amplamente difundidos, como o método de Aoki-Velloso (1975) (Lopes, 2017).

É fato que toda fundação corre um risco de entrar em colapso. Para isso, nos projetos geotécnicos, é preciso estipular um fator de segurança adequado, juntamente com uma adoção do valor de probabilidade de ruptura máximo, de modo que possam ser feitos cálculos com parâmetros aceitáveis de falha. Desta forma, para o público geral e até mesmo para quem está projetando e executando precisam entender que a engenharia civil é uma atividade que envolve diversos riscos, na qual os projetos devem atender uma confiabilidade aceitável, assumindo valores máximos para probabilidade de ruína, analisando os riscos (Aoki e Cintra, 2010).

Montoya (2013) afirma que, “métodos probabilísticos são aqueles que permitem avaliar a distribuição de probabilidades de uma variável dependente em função do conhecimento das distribuições estatísticas de variáveis independentes que a geram”. Um dos principais métodos para análise probabilística usuais é o Método FOSM, que significa “Aproximação de Primeira Ordem da Variância”. É desenvolvido a partir de uma expansão da série de Taylor para determinar a distribuição de probabilidade de uma função que se utiliza de diversas variáveis independentes aleatórias. Este método é comumente utilizado em estudos geotécnicos. Para a realização deste cálculo, precisa-se, como dados de entrada, a média e o desvio padrão das variáveis independentes estatísticas.

Este trabalho teve como objetivo um estudo comparativo entre três estacas para verificar a confiabilidade quanto ao solo estratificado. As características do solo, bem como sua profundidade máxima para penetração foram conseguidas com uso de ensaios tipo SPT. Para verificação da viabilidade dos métodos, utilizou-se de métodos semi-empírico e probabilístico (FOSM) implementados em uma rotina computacional para obtenção dos resultados conjuntamente. Isso foi realizado com o intuito de demonstrar análises que embasam a escolha de uma boa execução de obras civis, tanto para cálculos, como para projetos, a fim de mostrar a importância de avaliar o solo a partir de investigações geotécnicas.

## 2. Metodologia

O presente trabalho aborda a análise de um conjunto de dados de sondagens do tipo SPT presentes em laudos técnicos e sua aplicação em um estudo correspondente a avaliações determinísticas e probabilísticas de capacidade de carga de fundações profundas. Um conjunto de ensaios SPT foi analisado com a finalidade de elaborar um estudo sobre a probabilidade de ruptura de fundações profundas, sendo escolhidas três tipos de fundações por estacas: estaca Strauss, estaca hélice contínua e estaca pré-moldada (centrifugada). Para o cálculo da probabilidade de ruptura, foi empregado o método FOSM (First Order Second Moment) em conjunto com o modelo semi-empírico de capacidade de carga referente a Aoki-Velloso (1975), com implementação computacional por meio da linguagem de programação do software Matlab. A pesquisa foi dividida em 4 etapas: (a) Seleção das informações dos ensaios SPT: verificação da classificação do solo, do índice de resistência do solo e as respectivas profundidades; (b) Avaliação estatística: obtenção das médias e desvios padrões das resistências à penetração por meio do software Microsoft Excel; (c) Aplicação de modelos diretos para cálculo da capacidade de carga: método Aoki-Velloso. (d) Aplicação do modelo probabilístico para a determinação da probabilidade de ruptura: metodologia FOSM, com a utilização do software Matlab, para diferentes cargas de trabalho e configurações geométricas.

Inicialmente, foi obtido um conjunto de informações de ensaios tipo SPT correspondendo a 24 furos de sondagem a percussão para a construção de uma penitenciária localizada em São Luís do Maranhão. A análise dos laudos permitiu a definição dos dados extraídos para os cálculos, tanto os valores médios de resistência quanto ao tipo de solo. Estas informações serviram de parâmetros para os cálculos da probabilidade de ruptura.

Durante a extração e organização das informações, foram observados e compilados, em planilhas no software Microsoft Excel, dados que continham: índice de resistência à penetração do solo ( $N_{SPT}$ ), profundidade do nível de água, profundidade das camadas do solo e classificação das camadas do solo. Após a análise dos dados geotécnicos contidos nos laudos, partiu-se para um estudo estatístico mais detalhado, com definição de parâmetros como média e desvio padrão para os 24 pontos de  $N_{SPT}$  para cada metro dentro do perfil estratigráfico.

Em seguida, foi realizada a escolha das fundações para estudo, sendo adotados três tipos de fundações profundas: Estaca Strauss, Estaca Hélice Contínua e Estaca Pré-moldada (centrifugada), seguido da escolha de três cargas de trabalho e três diâmetros (ou seção transversal do fuste) para cada estaca abordada. Cada tipo de estaca possui uma cota de parada associada a valores limites de  $N_{SPT}$ , conforme explica a Tabela 1.

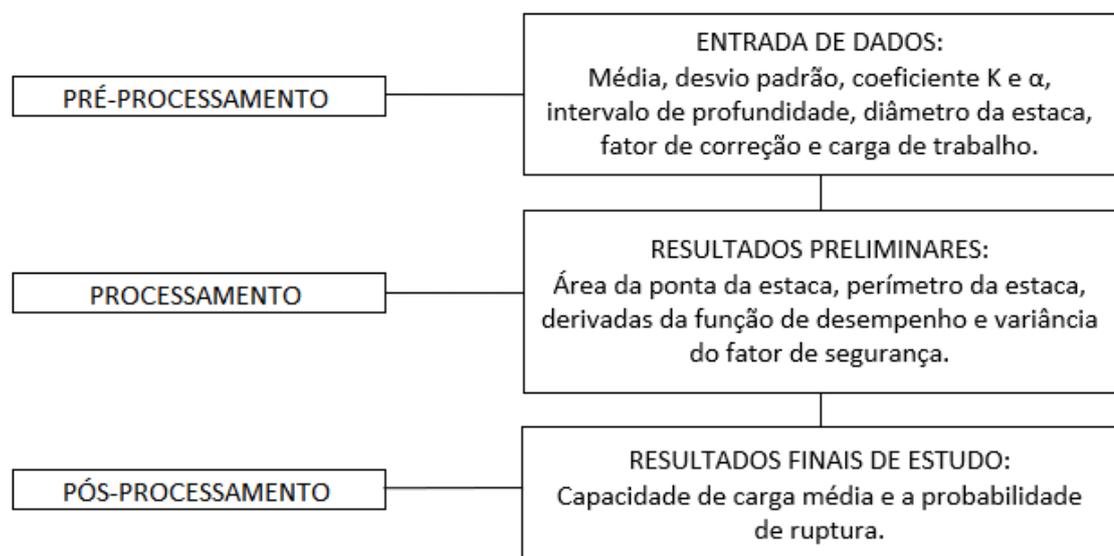
**Tabela 1 – Valores de  $N_{SPT}$  limite e suas respectivas profundidades.**

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

Fonte: Adaptado (Aoki e Cintra, 2010).

Para a definição das fundações profundas utilizadas nos estudos probabilísticos, optou-se por escolher as estacas com maior diferença de índice de resistência médio para diferenciar os resultados obtidos. Então, houve a necessidade de escolher uma estaca com valor limite de parada com  $N_{SPT}$  superior a 25 e inferior a 40, pois durante a observação dos resultados com valores de  $N_{SPT}$  acima 35 e inferior a 25, tornariam os valores de probabilidade de ruptura repetidos. Para uma maior diferença entre os resultados e distinção do valor limite de  $N_{SPT}$  para base de cálculos, foi necessário adotar, para a estaca pré-moldada centrifugada, um diâmetro maior ou igual a 30 cm.

A proposta da abordagem do estudo com uso de linguagem de programação no software Matlab para obtenção dos resultados, corresponde a uma rotina computacional baseada em modelos determinístico (Aoki-Velloso) e probabilístico (metodologia FOSM), constituída de pré-processamento, processamento e pós-processamento, conforme a Figura 1 abaixo.



**Figura 1 – Rotina computacional.**

Para verificação dos estudos estatísticos que envolve a metodologia FOSM para cálculo de probabilidade de ruptura, calcula-se o valor médio e a variância do fator de segurança, conforme as Equações 1 e 2, respectivamente:

$$E[FS] = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta FS_{ii}}{\delta X_i} \right)^2 \cdot V[X_i] \quad (2)$$

Onde  $E[FS]$  é o valor médio da função de FS. OS termos  $x_i$  são as variáveis independentes, que, no presente problema, correspondem aos valores de  $N_{SPT}$ . Já  $V[FS]$  é a variância do Fator de Segurança. As derivadas das variáveis com caráter estatístico são representadas por  $\frac{\delta FS_{ii}}{\delta X_i}$  e  $V[X_i]$  é a variância em cada variável estatística.

Para a obtenção da capacidade de carga última ( $Q_{ult}$ ), foi usado o método semi-empírico de Aoki-Velloso (1975), descrito na Equação 3.

$$Q_{ult} = A_b \cdot \frac{k \cdot N_P}{F_1} + U \cdot \sum \frac{\alpha \cdot K \cdot N_L}{F_2} \cdot \Delta l \quad (3)$$

Onde  $A_b$  é a área da seção transversal da base da estaca,  $[m^2]$ ,  $U$  é o perímetro da estaca,  $[m]$ ,  $\Delta l$  é a espessura de cada camada do solo homogêneo  $[m]$ ,  $N_P$  é o valor de  $N_{SPT}$  próximo da ponta da estaca,  $N_L$  é o valor médio de  $N_{SPT}$  para cada camada do solo homogêneo,  $\alpha$  e  $K$  são variáveis dependentes do solo e  $F_1$  e  $F_2$  são fatores de correção entre os resultados dos ensaios SPT e de cone.

Na etapa de pré-processamento são inseridas duas informações de entrada, a primeira com parâmetros compilados em uma planilha no software Excel contendo, para cada metro em profundidade: média e desvio padrão dos índices de resistência à penetração, coeficiente em relação ao tipo de solo ( $K$ ), coeficiente de atrito do solo ( $\alpha$ ) e a distância em metros para cada camada de solo. Na segunda entrada, aplica-se os dados de diâmetros da estaca, carga de trabalho e fator de correção correspondente à cada estaca analisada.

Durante a fase de processamento, são calculados os valores da área de ponta da estaca e seu respectivo perímetro para cada fundação aos três diâmetros correspondentes, além do cálculo da variância da função de desempenho (modelo de Aoki-Velloso) para cada tipo de fundação analisado. Em seguida, são calculados a capacidade de carga média e probabilidade de ruptura, na qual correspondem a etapa de pós-processamento.

Entre as camadas observadas nos laudos, as características presentes foram de areia argilosa e silte arenoso que tem valores correspondentes para coeficientes de  $K$  e  $\alpha$  conforme a tabela 2 abaixo.

**Tabela 2 – coeficientes  $K$  e  $\alpha$ .**

Tipo de solo	$K$ / MPa	$\alpha$ / %
Areia argilosa	0,60	3
Silte arenoso	0,55	2,2

Fonte: Adaptado (Aoki e Cintra, 2010).

Durante a análise geotécnica do ensaio tipo SPT, verificou-se que a investigação do solo alcançava a profundidade máxima de 20 m, porém a profundidade máxima que se obteve valores dos índices de resistência à penetração atingiu seu máximo em 17 m. Assim, para fins de pesquisa, foram utilizados e calculados valores para até 17 m de profundidade. Até a profundidade de 11 m, as camadas foram predominantemente compostas por areia argilosa e a partir da profundidade de 13 m, a predominância se tornou de silte arenoso. Para critério de cálculo, foram utilizados os valores de  $K$  e  $\alpha$  para areia argilosa até a profundidade 11 m e a partir da profundidade 12 m empregou-se  $K$  e  $\alpha$  para silte arenoso. Utilizou-se valores de  $K$  e  $\alpha$  para silte arenoso a partir da

profundidade 12 m, mesmo com a presença de uma camada de areia argilosa contida no laudo de número 2. Ressalta-se que apenas uma de vinte e quatro sondagens na profundidade 12 m apresentava areia argilosa, sendo que as demais sondagens apresentavam silte arenoso, para fins de obter mais coerência e distinção dos resultados.

Na aplicação do código desenvolvido no software Matlab para o cálculo da probabilidade de ruptura, foi necessário a entrada manual de três parâmetros: carga de trabalho, diâmetro do fuste e fator de correção, em conjunto com parâmetros compilados em planilhas no Excel: média, desvio padrão, coeficientes  $K$  e  $\alpha$  e a variação das distâncias das camadas. Os fatores de correção são específicos para cada tipo de estaca, conforme a tabela 3.

**Tabela 3 – Fator de correção F1 e F2.**

Tipo de solo	F1	F2
Strauss	3,0	6
Hélice contínua	2,0	4
Pré-Moldada (centrifugada)	1,75	3,5

Fonte: Adaptado (Aoki e Cintra, 2010).

Para o cálculo de probabilidade de ruptura, foi aplicado a metodologia FOSM, que corresponde a uma metodologia probabilística a qual se baseia na média e na variância dos valores de  $N_{SPT}$  em cada profundidade, calculado com auxílio da implementação computacional. O cálculo de capacidade carga das fundações por meio do ensaio a percussão (SPT) realizou-se por meio da aplicação direta de um modelo de capacidade de carga. O trabalho em questão empregou o método semi-empírico de Aoki-Velloso implementado como parte integrante da metodologia FOSM usando a mesma linguagem de programação. Em cada carga de trabalho, verificou-se, para três diâmetros distintos, a probabilidade de ruptura, seguindo assim o cálculo para os três tipos de estacas adotadas. A tabela 4, compreende os valores aplicados na implementação computacional.

**Tabela 4 – Valores de entrada no software Matlab.**

Tipo de solo	Carga de trabalho / KN	Diâmetro / metros
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

Para os laudos de ensaio tipo SPT com 24 sondagens, observou-se uma classificação geotécnica até os 20 metros de profundidade com apenas dois tipos de solo identificados: areia argilosa, presente até a profundidade de onze metros e silte arenoso, presente a uma profundidade de doze a vinte metros. É importante ressaltar que apenas na sondagem 02 deste laudo apresenta uma camada de areia argilosa na profundidade de 12 m, as demais sondagens seguem o padrão. Outra informação a ser observada foi dada pelo índice de resistência a penetração, alcançando seu limite máximo a uma profundidade de 17 metros.

Verificou-se que o nível de água nas 24 sondagens, presente nas camadas do solo estratificado atingiu sua profundidade mínima a 6 m, presente na sondagem 21 do ensaio e seu limite máximo a 10 m de profundidade, correspondente à sondagem 22 do ensaio.

A partir da análise e compilação dos ensaios tipo SPT, verificou-se os seguintes resultados para média e desvio padrão para cada profundidade, nos quais se obteve os índices de resistência à penetração do solo, conforme a Tabela 5 abaixo:

**Tabela 5 – Valores de média, desvio padrão dos  $N_{SPT}$ 's.**

Profundidade / metros	Média	Desvio padrão
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

Conforme valores de  $N_{SPT}$  limite, encontrou-se as profundidades que correspondem a cota de parada em consequência dos valores médios dos índices de resistência à penetração obtidos no ensaio tipo SPT. Esse critério se dá em decorrência dos valores limites de resistência média à penetração para estacas profundas conforme a literatura. Os resultados estão presentes na Tabela 6.

**Tabela 6 – Valores de  $N_{SPT}$  limite e suas respectivas profundidades.**

Tipo de Estaca	$N_{SPT}$ limite (Aoki-Cintra, 2010)	Profundidade / metros
Strauss	$N_{SPT} \leq 25$	11
Hélice contínua	$N_{SPT} \leq 45$	17
Pré-Moldada (centrifugada)	$N_{SPT} \leq 35$	15

Pela aplicação do método FOSM, utilizando software Matlab, obteve-se a capacidade de carga última e a probabilidade de ruptura para cada tipo de estaca, carga de trabalho e diâmetro. Os resultados encontram-se nas Tabelas 7, 8, 9.

**Tabela 7 – Carga Última e Probabilidade de Ruptura da estaca.**

Tipo de estaca	Carga de trabalho / kN	Diâmetro / m	Carga Última / kN	Probabilidade de Ruptura
Strauss	600	0,42	1259,3	$3,6 \times 10^{-6}$
	600	0,32	826,5	$2,0 \times 10^{-6}$
	600	0,27	641,3	$6,3 \times 10^{-2}$
	560	0,42	1259,3	$3,0 \times 10^{-6}$
	560	0,32	826,5	$1,6 \times 10^{-6}$
	560	0,27	641,3	$1,3 \times 10^{-3}$
	520	0,42	1259,3	$2,5 \times 10^{-6}$
	520	0,32	826,5	$1,2 \times 10^{-6}$

520	0,27	641,3	$4,1 \times 10^{-6}$
-----	------	-------	----------------------

**Tabela 8 – Carga Última e Probabilidade de Ruptura da estaca.**

Tipo de estaca	Carga de trabalho / kN	Diâmetro / metros	Carga Última / kN	Probabilidade de Ruptura
Hélice contínua	1000	0,40	2745,2	$6,7 \times 10^{-7}$
	1000	0,35	2266,6	$3,4 \times 10^{-6}$
	1000	0,275	1621,3	$2,8 \times 10^{-6}$
	750	0,40	2745,2	$6,2 \times 10^{-7}$
	750	0,35	2266,6	$2,1 \times 10^{-6}$
	750	0,275	1621,3	$1,5 \times 10^{-6}$
	500	0,40	2745,2	$5,7 \times 10^{-7}$
	500	0,35	2266,6	$8,4 \times 10^{-7}$
	500	0,275	1621,3	$1,2 \times 10^{-7}$

**Tabela 9 – Carga Última e Probabilidade de Ruptura da estaca.**

Tipo de estaca	Carga de trabalho / kN	Diâmetro / metros	Carga Última / kN	Probabilidade de Ruptura
Pré-Moldada (centrifugada)	2550	0,70	6896	$3,0 \times 10^{-6}$
	2550	0,50	4024,6	$2,3 \times 10^{-6}$
	2550	0,42	3077,9	$6,4 \times 10^{-5}$
	2350	0,70	6896	$2,9 \times 10^{-6}$
	2350	0,50	4024,6	$2,0 \times 10^{-6}$
	2350	0,42	3077,9	$9,7 \times 10^{-7}$
	2150	0,70	6896	$2,8 \times 10^{-6}$
	2150	0,50	4024,6	$1,8 \times 10^{-6}$
	2150	0,42	3077,9	$3,9 \times 10^{-7}$

A probabilidade de ruína consiste em uma relação entre solicitação e resistência (Silva, 2004). Montoya (2013) completa que, devido à grande pluralidade de variáveis envolvidas, há uma dificuldade em se obter um real valor para encontrar um nível de risco aceitável para probabilidade de ruptura, sendo medido majoritariamente por experiências de profissionais que realizam análises ou um estudo local. Não há valores máximos para probabilidade de ruínas em normas brasileiras. Desta forma, cabe ao projetista estimar implicitamente este valor no fator de segurança (Aoki e Cintra, 2010). Para isso, encontrou-se uma forma de comparar tais níveis e consequentemente as probabilidades de rupturas, que conforme apresentam Beacher e Chrstian (2003): as cartas F-N (F-N Charts), que calculam a probabilidade de ocorrer as falhas em decorrência das consequências e apresentam valores aceitáveis de probabilidade de falhas em obras de construção civis, mais especificamente em fundações, em torno de 1/100 a 1/10.

Aoki e Cintra (2010) ainda explicam que na literatura há algumas referências, como Lumb (1996) que estipula valores aceitáveis para fundações de 1/1.000 a 1/100.000 e Whitman (1984), que estipula o risco de ruptura em torno de 1/1.000 a 1/100.

Conforme a amostragem dos dados de probabilidade de ruptura para fundações escolhidas, a estaca Strauss apresenta valores de probabilidade de ruptura aceitáveis para todas as cargas e diâmetros calculados. Apresentando uma margem em torno de 1/1.000.000 como valor mínimo e 1/100 para valor máximo, indicando, no geral, bons índices de confiabilidade da fundação para quaisquer carga e diâmetro calculados, com sua carga última variando entre 1.259,3 kN a 641,3 kN. Observa-se que, para as cargas de trabalho de 560 kN e 600 kN, a probabilidade de ruptura cresce em quatro ordens de grandeza quando se compara a os resultados entre o menor diâmetro (0,27 m) e os dois maiores (0,42 m e 0,32 m). Já para a carga de trabalho de 520 kN, a probabilidades de falha permanecem com valores na ordem de  $10^{-6}$ .

A estaca Hélice Contínua apresenta valores de probabilidade de ruína aceitáveis para todas os diâmetros calculados e todas as cargas de solicitação, tendo como margem em torno de  $1/10.000.000$  como valor máximo e  $1/1.000.000$  para valor mínimo, apresentando no geral ótimos índices de confiabilidade da fundação para quaisquer carga e diâmetro calculado, tendo uma variação de apenas  $1/10$ , com uma carga última variando entre 2.745,2kN máximo e 1.621,3kN mínimo. Nota-se para as cargas de trabalho de 1000 kN e 750 kN, a probabilidade de ruptura cresce em uma ordem de grandeza quando se compara a os resultados entre o menor diâmetro (0,275 m) e os dois maiores (0,35 m e 0,40 m). Já para a carga de trabalho de 500 kN, a probabilidades de falha permanecem com valores na ordem de  $10^{-7}$ .

Por fim, para a estaca Pré-moldada (centrifugada), também apresentou valores de probabilidade de ruptura aceitáveis para todas as cargas e diâmetros calculados. Apresentando uma margem em torno de  $1/10.000.000$  como valor máximo a  $1/1.000.000$  para valor mínimo, considerado no geral, ótimos índices de confiabilidade da fundação para quaisquer carga e diâmetros calculado, tendo uma variação de  $1/10$ , com sua carga última variando entre 6.896 kN a 3.077,9 kN.

#### 4. Conclusão

É de extrema importância realizar estudos no solo antes da execução de qualquer atividade envolvendo construção civil. Tal importância, surge pela necessidade de elaborar estudos geotécnicos, como os ensaios do tipo SPT, que permitem análises de características do solo, nível de presença de água, e análises de resistências à penetração para determinar até qual profundidade é viável a escavação desse solo. Através desses laudos, é possível, para um projetista, estipular qual tipo de fundação é adequada, bem como a sua profundidade. Porém é necessário averiguar a probabilidade de estabilidade dessa estrutura. Sabe-se que na engenharia não é possível determinar com exatidão que um elemento estrutural será imune a falhas, rupturas ou ruínas, principalmente para aqueles que apresentam altos índices de incertezas. Assim, cabe ao engenheiro e o corpo técnico de engenharia analisar laudos, projetos e estudar a viabilização de técnicas e métodos necessários para obtenção de melhores índices de probabilidade ou chances de ruína para a estrutura se manter estável. É preciso entender que no decorrer do tempo, a estrutura poderá apresentar falhas e fragilidade. Assim, é necessário prevenir e estimar o tempo de vida útil através de estudos determinísticos e probabilísticos através de pesquisas in loco.

O presente trabalho baseou-se na análise de um laudo tipo SPT, na qual verificou-se a variabilidade do solo estratificado conjuntamente com a análise dos índices de penetração deste solo para utilização de métodos probabilísticos de cálculo, através da metodologia FOSM para o cálculo obtenção da probabilidade ruptura para três estacas: Hélice Contínua, Strauss e Pré-moldada (centrifugada). Encontrou-se valores aceitáveis para todas as estacas, com margem variando de  $1/10.000.000$  a  $1/100$ , tendo a maior probabilidade de ruptura para estaca Strauss com uma carga de 600 kN e diâmetro de 0,27 m com margem de  $10^{-2}$  e a menor probabilidade de ruptura, portanto, para estaca Hélice Contínua com valor de  $1,2 \times 10^{-7}$  para a carga de 500 kN e diâmetro de 0,275 m, ambos valores de probabilidade de ruína, tanto para máximo como para mínimo estão indicados pelo menor diâmetro estudado. Portanto, obter conhecimento sobre a probabilidade da estrutura ruir possibilita entender o comportamento solo e do elemento estrutural, permitindo avaliações prévias no sentido de indicar soluções necessárias para evitar danos consideráveis.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Secretaria de Administração Penitenciária do Estado do Maranhão e à empresa M & Z Construtora por disponibilizarem e autorizarem os dados de sondagem para fins exclusivamente de pesquisa.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6484: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: *Solo Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8036: *Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios*. Rio de Janeiro, 1983.
- ALONSO, U. R. (1991). *Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações*. São Paulo: Blucher. 142 p.
- ALONSO, U. R. (2019). *Previsão e controle das fundações*. Editora Blucher.
- AOKI, N. and VELLOSO, D.A. (1975). *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. Proceedings, 5th. Pan American CSMFE, Buenos Aires, vol.1, p. 367-376*.
- BAECHER, C. & CHRISTIAN, J. T. (2003). *Spatial variability and geotechnical reliability. In Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering* edited by K.K. Phoon, Taylor-Francis, New York, USA: 76-133.
- BARROS, N. B. F.(2012). *Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- BERNARDES, H. C. (2021). *Aplicação de Análise Probabilística ao Cálculo de Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua*. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 8, n. 1, p. 53-68. <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3459/2840>
- BRETAS, T. C. (2020). *Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte/MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.
- CAMPOS, D. D. (2017). *Análise numérica da capacidade de carga de sapatas*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, PR, Brasil.
- CARVALHO, I. S. *et al.* (2012) *Proposta para certificação das empresas de sondagens à percussão-tipo SPT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil
- CHINI, P., & Leal, M. E. S. (2020). *A importância do uso da sondagem em projetos de fundações*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC, Brasil.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. (2010). *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. Oficina de textos.
- DE SOUSA, A. A., *et al.*, (2018). *DISCUTINDO O CONCEITO DE FUNDAÇÕES*. In: Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar (ISSN-2527-2500) & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar. <https://publicacoes.unifimes.edu.br/index.php/coloquio/article/view/398>.
- FALCÃO, P. R.; FAGUNDES, D. F.; ALVES, A. M. L. (2020). *Análise Probabilística de Aterro sobre Solos Moles*. VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias, v. 30, n. 1, p. 38-48. <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/12905>
- FALCONI, F., *et al.* (2019). *Fundações: teoria e prática*. Oficina de Textos. 2ª reimpressão, p. 215.
- FERREIRA, M. Q. (2016). *Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.
- GALVÃO, B. B., *et al.* (2019). *Importância da sondagem SPT na construção civil: tipos de sondagens, seus métodos e utilidades*. Pesquisa e ação, Mogi das Cruzes, v. 5, n. 2. <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/683>

- MONTOYA, C. A. H. (2013). *Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- LOBO, B. O. (2005). *Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- LOPES, F. R.; VELLOSO, D. A. (2004). *Fundações -Volume I*. Oficina de Textos. Nova edição.
- 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, v. 3, n. 2, p. 74-97.
- FILHO, J. M.; SOUZA, H. P.; ELIAS, D. S. (2019). *Análise da Probabilidade de Falha de uma Estrutura de Solo Reforçado*. Geocentro, Brasília. <https://qe.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/V4hdK6Rd8L4U9YCqc4hKF7Y11Aa8.pdf>
- MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. (2005). Patologia das Fundações. São Paulo, Oficina de Textos.
- MINOZZO, M., et al. (2016). *A importância da investigação do subsolo no dimensionamento de fundações*. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Paraná. <https://www.archus.com/dynamiccad/site/2021/07/05/a-importancia-da-investigacao-do-subsolo-no-dimensionamento-de-fundacoes/>
- NEVES, L. F. S. (2004). *Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- PINTO, C. S. (2016). *Curso básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos.
- PEDREIRA, L. S.; PACHECO, T. M. (2016). *PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CAPACIDADE DE CARGA E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE ESTACAS*. Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, v. 15, 2016. <https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/view/4312>
- PINTO, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. Oficina de Textos. 3ª edição, p. 263.
- REBELLO, Y. C. P. (2008). *Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. Ziguarte, 2008.
- RIBEIRO, M. R. R. (2019). *Aplicação da teoria de confiabilidade na análise estrutural de edifícios considerando a interação solo-estrutura*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVA, J. L. (2006). *Metodologia de projeto de fundações por estacas incluindo probabilidade de ruína*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo São Carlos, SP, Brasil.
- SOUSA, T. C., et al., (2018). *Análise de Métodos Semi-Empíricos para o Cálculo da Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua Monitorada em Obras de Fortaleza*. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA-COBRAMSEG, Salvador.
- WHITMAN, R. V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. The seventeenth Terzaghi lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.110, n. 2, p.145-188.