

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

SILVÂNIO DA SILVA SOUSA SEGUNDO

CASO PRÁTICO SOBRE ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS

João Pessoa, PB

2019

SILVÂNIO DA SILVA SOUSA SEGUNDO

CASO PRÁTICO SOBRE ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade federal da Paraíba como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

João Pessoa, PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725c Sousa, Silvânio da Silva Segundo.

Caso prático sobre análise de risco em fundações por estacas / Silvânio da Silva Segundo Sousa. - João Pessoa, 2019.

43 f. : il.

Orientação: Fábio Lopes Soares.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Fundação. 2. Probabilidade. 3. Risco. 4. Ruína. I. Soares, Fábio Lopes. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

Silvânio da Silva Sousa Segundo

Caso Prático de Análise de Risco por Fundações em Estaca

Trabalho de Conclusão de Curso em 09/05/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Fábio Lopes Soares APROVADO
Fábio Lopes Soares
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Clovis Dias APROVADO
Clovis Dias
Instituição

Aline Flávia Numes Remígio Antunes APROVADO
Aline Flávia Numes Remígio Antunes
Instituição

ABSilva
Profª. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

“O passado só pode servir como perspectiva para estimular a mudança e a transformação, jamais para justificar a inércia”

Elon Reeve Musk

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a minha querida mãe, Agamenilra Dias Arruda, que nunca mediu esforços para ser e estar presente em cada momento da minha vida, sempre me aconselhando e me guiando em todos os meus anseios e devaneios, lutando dia a dia para mostrar o quanto a vida é boa para quem é bom. Cada um de meus esforços sempre tiveram o seu orgulho como objetivo final.

A minha tia, Agamenilde Dias Arruda Vieira Dantas, que desde o dia que posso me lembrar esteve ao meu lado atuando como um verdadeiro anjo da guarda, sendo exemplo de honestidade, inteligência, amor e muita fé. Neste triunfo, em especial, sua assinatura estará destacada na essência.

A minha avó, Maria Zenilde Dias Arruda, que é o alicerce de minhas fundações e formação, sendo para mim a personificação da palavra sabedoria acrescida de doses gigantescas de resiliência. Você sempre foi o motivo pelo qual eu nunca me permiti falhar.

A minha namorada, Lorena Lima, que é minha inspiradora e inspiração para querer vencer todas as batalhas do dia a dia com um grande sorriso no rosto e com a certeza que jamais estarei sozinho em nenhuma derrota ou vitória.

Aos demais membros da minha família, que direta ou indiretamente sempre me deram suporte para voar até onde minhas asas me permitissem e por sempre me darem um colo para chorar as tristezas e comemorar as alegrias.

Aos meus amigos, que diariamente me alegram, me estimulam e me dão ainda mais motivos para querer ser sempre melhor.

A todos aqueles que já passaram por minha vida e contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal, me ensinando que o segredo da vida é jamais se sentir confortável o suficiente para não desejar subir o próximo degrau.

RESUMO

Os grandes desafios da engenharia na atualidade, no que diz respeito ao desenvolvimento de obras cada vez mais complexas e sofisticadas, reafirma a necessidade do desenvolvimento de projetos que aliem conforto, segurança e confiabilidade. O presente trabalho faz uma análise prática de ruína em uma obra de fundação por estacas metálicas na orla de João Pessoa, localizada no bairro de Cabo Branco, considerando as diversas variáveis envolvidas, a heterogeneidade do solo, o procedimento executivo de cada elemento estrutural de fundação, dentre diversos outros fatores, destacando que estes estão sujeitos a fenômenos aleatórios, acrescentando porcentagem as probabilidades de ruína, o que nos devolve a uma margem de erro probabilística. O trabalho demonstra o monitoramento de solicitação e de resistência dos elementos estruturais da fundação, a partir do estudo do solo, das exigências de projeto e das técnicas para prova de cargas. Para concretização e melhor entendimento dos procedimentos é necessário entender algumas aplicações dos conceitos básicos de probabilidade e estatística, além dos conceitos sobre obras de fundação com o uso de estacas e dos resultados obtidos na análise de risco, a fim de chegarmos a um resultado prático no que diz respeito a qual o nível de risco que a obra apresenta.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação, Probabilidade, Risco, Ruína.

ABSTRACT

The major engineering challenges of today, with respect to the development of more complex and sophisticated works, reaffirms the need to develop projects that combine comfort, safety and reliability. The present work makes a practical analysis of ruin in a foundation work by cuttings in the border of João Pessoa, located in the neighborhood of Cabo Branco, considering the diverse variables involved, the soil heterogeneity, the executive procedure of each structural element of foundation, among several other factors, highlighting that these are subject to random phenomena, increasing the probability of ruin, which returns us to a probabilistic margin of error. The work demonstrates the monitoring of the request and resistance of the structural elements of the foundation, from the study of the soil, the design requirements and the techniques for proof of loads. In order to achieve and better understand the procedures, it is necessary to understand some applications of the basic concepts of probability and statistics, as well as the concepts of foundation works with the use of cuttings and the results obtained in the risk analysis, in order to arrive at a practical result in the which concerns the level of risk that the work presents.

KEY WORDS: Foundation, Probability, Risk, Ruin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forma geral de uma curva normal.	16
Figura 2: Densidade de probabilidade da resistência.	22
Figura 3: Densidade de probabilidade da solicitação.	23
Figura 4: Curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência.	23
Figura 5: Curva hipotética de resistência com menor variabilidade.	26
Figura 6: Diferença de densidade.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição normal padrão.....	17
Tabela 2: Escala subjetiva MIL – STD – 882 ampliada 12/03/2011.....	30
Tabela 3: Classes de consequências de acordo com o Eurocode EN 1990.....	33
Tabela 4: Valores de Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína.....	35
Tabela 5: Valores de confiabilidade e de probabilidade de ruína do Eurocode EN 90.	36
Tabela 6: Risco de Estaqueamento com PCE, segundo NBR 6122/2010	37
Tabela 7: Tempo e frequência de recorrência em função do índice de confiabilidade	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. METODOLOGIA	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA	13
3.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FUNDAÇÕES	17
4. O RISCO DE RUÍNA DA FUNDAÇÃO	20
4.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS	25
4.3 VERIFICAÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA	27
4.5 ESTIMATIVA DE VALORES RECOMENDADOS	33
4.5.1 Intervalos de Segurança para Probabilidade de Ruína.....	34
4.5.2 Coeficientes de Variação	35
4.6 CÁLCULOS PRÁTICOS UTILIZANDO PLANILHA EXCEL	36
5. ANÁLISE FINANCEIRA DO ESTUDO PROBABILIDADE DE RUÍNA	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
7. REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e o avanço das técnicas, há cada vez mais mecanismos com os quais é possível se fazer o controle de qualidade e confiabilidade, impulsionando um novo ramo em relação aos projetos e a execução de obras civis.

Em tempos passados, era de costume crer que, atendidos os fatores de segurança impostos pelas normas em vigor, a estrutura estaria completamente fora de qualquer cenário de risco de colapso, porém, essa ideia vem sendo desmentida a partir de estudos sobre análise de risco e obtenção de índices de confiabilidade, não podendo as obras de fundações ficarem fora dessa tendência.

O conceito sobre risco é conhecido das mais diversas áreas de conhecimento e aplicação, é bastante frequentes no campo financeiro, cirúrgico, ambiental e industrial. Então, fica claro o fato que a análise de risco é de vital importância para que se possa adotar medidas de prevenção e de redução dos possíveis danos as pessoas e aos ambientes. Entretanto, deve-se reforçar a ideia de que a prevenção e a redução não se dão em combate ao risco, visto que este é função de fatores aleatórios e não controláveis, mas sim de seus possíveis reflexos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nos países desenvolvidos a análise da probabilidade de ruína já se tornou normatizada, agregada a verificação dos fatores de segurança. No Brasil, os estudos sobre probabilidade de risco e confiabilidade ainda não são normatizados, entretanto alguns estudos vêm sendo feitos, como serão mostrados e utilizados como parâmetros comparativos durante o desenvolvimento desta análise.

Por lei, é obrigatório a comprovação, de forma explícita, pelos fornecedores, a probabilidade de ruína existente ao produto e serviço de engenharia, sendo estes calculados e informados ao proprietário da obra, como já defendia Aoki (2011) de acordo com o Código de Defesa do Consumidor.

Desta forma, fica evidente a tendência de que empresas, seguros e proprietários, em um cenário muito próximo, exijam os resultados da análise de risco do empreendimento, para que seja possível a expedição de apólices e afins.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo prático, aplicando e avaliando os índices de confiabilidade e probabilidades de ruína em um projeto de fundação utilizando estacas executado no bairro de Cabo Branco, na orla de João Pessoa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar conceitos teóricos sobre a análise de ruínas em fundações;
- Verificar a validade, por meio de dados de solicitação e de resistência através das curvas normais, do cálculo da probabilidade de ruína no caso estudado;
- Confirmar a suposição matemática da relação entre fator de segurança e confiabilidade no caso estudado;
- Classificar o risco a partir do índice de confiabilidade no caso estudado.
- Verificar a reação do mercado de seguros de obras civis uma vez apresentado o estudo de confiabilidade da fundação;

2. METODOLOGIA

A partir do desenvolvimento do trabalho, pretende-se aplicar as ferramentas estatísticas de análise de risco para projetos de fundações por estacas, visando o controle de possíveis eventos danosos a estrutura e ao meio ambiente do edifício estudado e de futuras edificação a serem construídas, bem como analisar economicamente a reação de corretoras de seguros dada presença de dados estatísticos concretos com respeito a confiabilidade da estrutura.

A fomentação dos conceitos necessários para desenvolvimento deste trabalho começa com uma revisão sobre os conceitos de probabilidade e estatística que estão envolvidos na determinação da probabilidade de ruína e do índice de confiabilidade.

Tem-se ainda a fundamentação teórica sobre análise de ruína e todas as variáveis envolvidas na sua determinação, assim como os valores recomendados para probabilidade de ruína e para os coeficientes de variação. Podendo assim entender os níveis de classificação do empreendimento em relação à confiabilidade.

Na fase de planejamento foram selecionadas as estacas cravadas, visto que a resistência dessas estruturas é, estatisticamente, constante. Na fase de coleta foi feita a relação e organização dos dados de solicitação de cargas, sapata de referência e posição da estaca. Após a coleta de dados, foi realizada a fase da crítica destes, na qual podemos identificar possíveis erros na fase de coleta bem como averiguar se os dados obtidos são ou não relevantes para o objetivo da nossa análise.

Logo após, foi feita a apresentação dos dados obtidos a partir de gráficos e tabelas, facilitando assim a interpretação dos dados coletados e analisados. Por fim, foi feita a análise dos resultados, objetivando tirar conclusões obtidas a partir da aplicação dos métodos de Estatística Inferencial, sendo possível a realização de previsões sobre a confiabilidade da estrutura e possíveis ações solucionadoras, caso necessário.

O trabalho foi realizado com variáveis aleatórias, pois resultam de uma soma de fatores não controlados, e assim daremos um tratamento probabilístico a essas. Esse tratamento nos mostrará a chance de um determinado evento ocorrer.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA

Para caracterizar e analisar um evento através de questionamentos e apresentá-las de modo eficiente, é necessário que se faça uma análise estatística criteriosa sobre seus fatores de influência, para depois analisar as variáveis obtidas.

Utilizando o seguinte planejamento, sugerido por Larson Farber (2015):

- Planejamento;
- Coleta;
- Crítica;
- Apresentação;
- Análise dos Resultados.

A seguir temos algumas definições importantes abordadas em probabilidade e estatística que servirão como critérios de organização dos dados examinados. Segundo Larson Farber (2015):

- **População:** conjunto de todos os elementos que possuem uma característica em comum, de interesse da pesquisa.
- **Amostra:** qualquer subconjunto da população.
- **Parâmetro:** medida numérica que descreve as características de uma população.
- **Distribuição de frequência:** tabela na qual são representados valores ou classes de valores, associados ao número de ocorrência de cada valor, ou em cada classe de valores.
- **Histograma:** representação gráfica de uma distribuição de frequência, a qual é feita a partir de retângulos justapostos. Nele, a escala horizontal representa os

valores dos dados, enquanto a coluna vertical representa as frequências em cada classe.

- **Experimento aleatório:** Todo e qualquer experimento, no qual não podemos prever o resultado que será obtido.
- **Espaço amostral:** Conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório.
- **Evento:** Qualquer subconjunto do espaço amostral.
- **Probabilidade de um evento:** Valor que representa a “chance de ocorrência” de um determinado evento, quando realizamos um experimento aleatório. Este valor é dado pela razão entre o número de elementos do evento, dado por $n(E)$ e o número de elementos do espaço amostral, dado por $n(U)$. Desse modo:

$$P(E) = \frac{n(E)}{n(U)}$$

- **Variável aleatória:** função que associa um número real a cada elemento de um espaço amostral, como define Walpole (2009). As aleatórias podem assumir valores finitos, sendo chamadas de variáveis aleatórias discretas, como por exemplo: número de estacas para uma certa fundação, número de pilares, etc. Aquelas que podem assumir valores quaisquer dentro de um intervalo real são chamadas de variáveis aleatórias contínuas, como por exemplo: tempo de pega da argamassa, tempo de cura do concreto, etc.
- **Distribuição discreta de probabilidade:** lista os valores possíveis que uma variável aleatória discreta pode assumir e suas respectivas probabilidades de

ocorrência. Desse modo, uma distribuição discreta de probabilidade deve atender as seguintes condições:

- I. A probabilidade de cada valor da variável aleatória está entre 0 e 1, inclusive, ou seja:

$$0 \leq P(X) \leq 1;$$

- II. A soma de todas as probabilidades é sempre igual a 1, ou seja:

$$\sum P(X) = 1$$

- **Função densidade de probabilidade:** dada uma variável aleatória X, definimos como função densidade de probabilidade (fdp), a função f(x), cujo gráfico é uma curva contínua, que satisfaz as seguintes condições:

1. f(x) não pode ser negativa;
2. $\int f(x)dx = 1$

- **Distribuição normal:** é a distribuição de probabilidade contínua, para uma variável X, cujo gráfico que a representa é chamado de curva normal. Segundo Larson (2015), a distribuição normal deve satisfazer as seguintes condições:

- I. A média, a mediana e a moda são iguais;
- II. Uma curva normal tem a forma de sino e é simétrica em torno a média;
- III. A área total sobre a curva normal é igual a 1;
- IV. A medida que a curva normal vai se distanciando da média, ela se aproxima do eixo x, porém sem tocá-lo;
- V. Entre $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$, no centro da curva, o gráfico tem concavidade para baixo. À esquerda de $\mu - \sigma$ e à direita de $\mu + \sigma$, o gráfico tem concavidade para cima e os pontos onde a curva muda de orientação, em relação a concavidade, são chamados de pontos de inflexão.

Temos que μ é a média da distribuição, enquanto que σ é o desvio padrão da mesma.

Desse modo temos que:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x-\mu)/(2\sigma^2)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde $e \approx 2,718$ e $\pi \approx 3,14$, portanto são constantes, o que faz com que a curva normal dependa completamente de μ e σ para definir seu formato. De modo geral essas curvas de densidade de probabilidade apresentam forma similar à descrita na Figura 1:

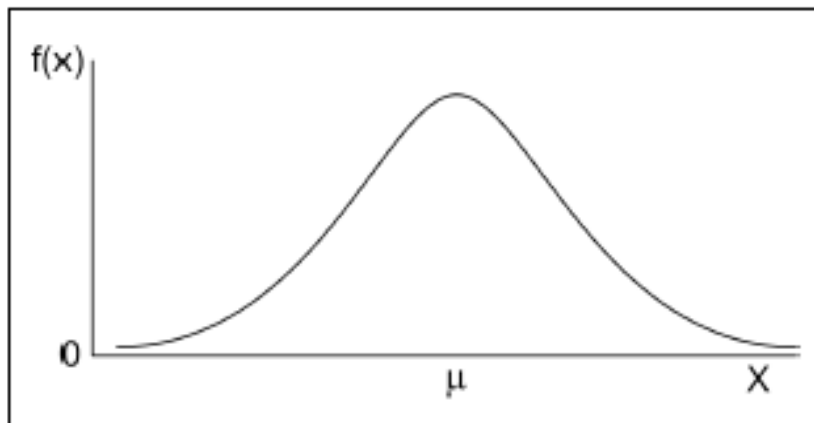


Figura 1: Forma geral de uma curva normal.

Fonte: Larson, 2015.

- **Distribuição Normal Padrão:** é uma distribuição com média $\mu = 0$ e desvio padrão $\sigma = 1$. Sua utilização é muito importante uma vez que, como podemos ter uma infinidade de configurações para a curva normal, podemos transformar as unidades medidas na variável aleatória X , para unidades padronizadas conhecidas como escores z . Este escore z , segundo Larson (2015), “é uma medida de posição que indica o número de desvios padrão em que um valor se encontra a partir da média”. Para transformarmos um valor x em um escore z .

Tabela 1: Distribuição normal padrão.

X	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
-3,4	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
-3,3	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005
-3,2	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007
-3,1	0,0007	0,0007	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009	0,001
-3,0	0,0010	0,0010	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013
-2,9	0,0014	0,0014	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0017	0,0018	0,0018	0,0019
-2,8	0,0019	0,0020	0,0021	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0024	0,0025	0,0026
-2,7	0,0026	0,0027	0,0028	0,0029	0,0030	0,0031	0,0032	0,0033	0,0034	0,0035
-2,6	0,0036	0,0037	0,0038	0,0039	0,0040	0,0041	0,0043	0,0044	0,0045	0,0049
-2,5	0,0048	0,0049	0,0051	0,0052	0,0054	0,0055	0,0057	0,0059	0,006	0,0062
-2,4	0,0064	0,0066	0,0068	0,0069	0,0071	0,0073	0,0075	0,0078	0,008	0,0082
-2,3	0,0084	0,0087	0,0089	0,0091	0,0094	0,0096	0,0099	0,0102	0,0104	0,0107
-2,2	0,0100	0,0113	0,0116	0,0119	0,0122	0,0125	0,0129	0,0132	0,0136	0,0135
-2,1	0,0143	0,0146	0,0150	0,0154	0,0158	0,0162	0,0166	0,017	0,0174	0,0179
-2,0	0,0183	0,0188	0,0192	0,0197	0,0202	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222	0,0228
-1,9	0,0233	0,0239	0,0244	0,0250	0,0256	0,0262	0,0268	0,0274	0,0281	0,0287
-1,8	0,0294	0,0301	0,0307	0,0314	0,0322	0,0329	0,0336	0,0344	0,0351	0,0359
-1,7	0,0367	0,0375	0,0384	0,0392	0,0401	0,0409	0,0418	0,0427	0,0436	0,0446
-1,6	0,0455	0,0465	0,0475	0,0485	0,0495	0,0505	0,0516	0,0526	0,0537	0,0548
-1,5	0,0559	0,0571	0,0582	0,0594	0,0606	0,0618	0,0630	0,0643	0,0655	0,0668

Fonte: Adaptada de LARSON, 2015.

3.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FUNDAÇÕES

O conjunto de elementos estruturais responsáveis pela sustentação da obra, transferindo o peso do conjunto estrutural ao solo é a fundação. Dependendo das especificidades da edificação, como tamanho, altura, cargas, solo e utilização, podemos decidir qual o tipo de fundação adequada para ser utilizada. Esta fundação pode ser rasa, quando o solo superficial suporta a carga necessária sem grandes deformações, ou profunda, quando o solo próximo a superfície não apresenta rigidez suficiente para a determinada situação.

De acordo com Knappett e Craig (2018), para se comportar de maneira satisfatória, a fundação deve ser projetada para atender a duas exigências principais de desempenho (conhecidas como estados limites), a saber:

- Tal que sua capacidade ou resistência seja suficiente para suportar as cargas (ações) aplicadas (isto é, de forma que não entre em colapso).
- Para evitar deformações excessivas sob essas cargas aplicadas, o que pode danificar a estrutura suportada ou levar a uma perda de funcionalidade.

Para realização e execução dos projetos de fundação, é essencial o conhecimento sobre a estrutura do solo, a partir da análise geotécnica, feito por investigação de campo, como sondagens, por exemplo, e das investigações em laboratório, como os ensaios de caracterização, a partir dos quais poderemos aplicar os critérios de dimensionamento e decidirmos qual a melhor solução para dada situação. Cintra [et al.] (2013) alertam que o solo, por ser um material natural, é muito variável quanto à composição e ao comportamento sob carga, o que corrobora a preocupação e necessidade de estudos cada vez mais complexos, seguindo a tendência da engenharia no que diz respeito a obras cada vez mais complexas e esbeltas.

Nas fundações profundas usam-se os diversos tipos de estacas, dependendo da solicitação de cargas observada em projeto e da disponibilidade de material, de tecnologia a ser aplicada, dentre outros fatores. Para cada tipo de fundação por estaca, temos métodos diferentes de dimensionamento, de execução e de controle de recalques, deformações, etc.

Dentre os métodos para dimensionamento de fundações profundas, podemos citar os métodos semiempíricos brasileiros: Método de Aoki-Veloso (1975), o Método de Dècourt-Quaresma (1978), o Método de Teixeira (1996). Esses métodos são baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios *in situ* e ajustados com provas de cargas, como falam Cintra e Aoki (2010).

Os ensaios de prova de carga podem ser feitos de forma estática (PCE) ou dinâmica (PCD). O ensaio de prova de carga estática, segundo a NBR 12131/2006, consiste, basicamente, em aplicar esforços estáticos à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes, sendo que os esforços aplicados podem ser axiais, de tração ou de compressão, ou transversais. Já os métodos dinâmicos, como consta na NBR 6122/2010, são métodos de estimativa de carga de fundações profundas baseados

na previsão e/ou verificação do seu comportamento sob ação de carregamento dinâmico, como o controle de nega e repique, feitos durante a cravação.

A nega, segundo a NBR 6122/2010, trata-se da penetração permanente de uma estaca, causada pela aplicação de um golpe do pilão. Em geral é medida por uma série de dez golpes. Ao ser fixada ou fornecida, deve ser sempre acompanhada do peso do pilão e da altura de queda ou da energia de cravação (martelos automáticos). Já o repique, segundo a mesma NBR, é a Parcela elástica do deslocamento máximo de uma seção da estaca, decorrente da aplicação de um golpe do pilão.

No que diz respeito às características das estacas, é importante revisar conceitos sobre as estacas metálicas, uma vez que este foi o tipo utilizado na fundação do edifício estudado, mais especificamente o perfil HP 310x79.

Segundo Knappett e Craig (2018), as estacas metálicas enquadram-se na categoria das estacas de deslocamento, caracterizadas por sua introdução no terreno através de processo que não promova a retirada do solo. Produzidas industrialmente, são constituídas por peças de aço laminado ou soldado tais como perfis de seção I e H, chapas dobradas de seção circular (tubos), quadrada e retangular, bem como os trilhos, estes geralmente aproveitados após sua remoção de linhas férreas, quando perdem sua utilização por desgaste. Tanto os perfis quanto os trilhos podem ser empregados como estacas em sua forma simples ou como composição paralela de vários elementos.

A cravação das estacas pode ser feita por percussão, prensagem ou vibração. A escolha do equipamento deve ser feita de acordo com o tipo, dimensão da estaca, características do solo, condições de vizinhança, características do projeto e peculiaridades locais. A cravação por percussão é o processo mais utilizado, utilizando-se tato para pilões de queda-livre quanto automáticos.

4. O RISCO DE RUÍNA DA FUNDAÇÃO

É comum e recomendado, na engenharia, se elaborar projetos que atendem as normas específicas para tais e que, no caso de projetos estruturais, tenham fatores de segurança globais preestabelecidos, os quais, no caso de fundações utilizando estacas, baseiam-se na determinação da carga admissível.

Dessa forma, durante muito tempo acreditou-se que, se o coeficiente de segurança for elevado, então a obra estará protegida contra qualquer tipo de risco estrutural e, conseqüentemente fora da margem de risco de colapso. Esta conclusão, porém, se mostrou insuficiente, uma vez levada em consideração a análise de confiabilidade, a qual nos trará uma ideia sobre a probabilidade de ruína e mostrará que “não é possível excluir o risco de ruína”, como é intuitivo quando pensamos de maneira superficial, acreditando que este risco é eliminado apenas considerando o fato de não haverem erros de elaboração de projeto e/ou de execução.

De acordo com Cintra e Aoki (2010), em toda fundação, sempre teremos um risco de ruína e, por isso, no projeto, além de utilizar os fatores de segurança de norma, é necessário adotar uma probabilidade de ruína máxima aceitável, fazendo tanto uma análise probabilística, para fins de controle de engenharia, quanto uma análise financeira, derivada da responsabilidade ao se assumir o risco.

Para Budhu (2017), o grau de risco depende do tipo de obra geotécnica, das necessidades dos clientes e da quantidade e qualidade da informação disponível. O controle dos processos executivos e operacionais durante a execução da obra, além da implementação mais próxima possível das condições impostas no projeto são de extrema importância para diminuição da probabilidade de risco e aumento da eficiência da fundação.

4.1 CURVAS DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA

Nos projetos geotécnicos de fundação por estacas, estaremos sempre preocupados com os valores de carga atuante (solicitação, S) e de capacidade de carga geotécnica (resistência, R) para cada elemento estrutural que será inserido no mesmo.

Mesmo que cada elemento estrutural (estaca) tenha a mesma seção transversal, para certa fundação, em cada um deles, isoladamente, teremos valores de solicitação e resistência diferentes, quer seja pela heterogeneidade da estrutura do solo (no qual serão alocados), ou da resistência dos materiais utilizados para confecção de cada elemento de fundação, ou a forma com que foram executados, dentre outros fatores aleatórios. Desse modo, segundo Cintra e Aoki (2010), dada a variabilidade existente, tanto em R como em S, podemos fazer uma análise estatística e construir curvas de densidade de probabilidade de resistência $f_r(R)$ e de solicitação $f_s(S)$, utilizando dos dados de média e desvio padrão calculados a partir dos dados coletados com a empresa responsável pela execução da fundação.

Do relatório cedido desta empresa foram retirados os dados de solicitação de cada pilar, e conseqüentemente de cada estaca, além dos valores de nega, repique e comprimento cravado da estaca.

Com todos os dados reunidos e organizados foram calculadas as resistências para cada estaca utilizando a fórmula de controle de resistência através do repique:

$$R = \frac{C_2 \times E \times A}{L_e} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$C_2 = 2,5 - K$, sendo K o repique da referida estaca;

E = Módulo de elasticidade do aço composto da estaca;

A = Área bruta da seção da estaca;

L_e = Comprimento da estaca;

Após o cálculo da resistência de cada estaca, foram calculadas as médias da solicitação e resistência, sendo encontrados os valores de:

$$S_{méd} = 818,30 \text{ kN}$$

$$R_{méd} = 1.691,33 \text{ kN}$$

Seguindo, foram calculados os valores de desvio padrão para solicitação e para resistência:

$$\sigma_s = 286,31$$

$$\sigma_r = 137,27$$

De posse dos dados de média e desvio padrão de solicitação e resistência, foi possível montar os gráficos de densidade de probabilidade apresentados nas figuras 3, 4 e 5:

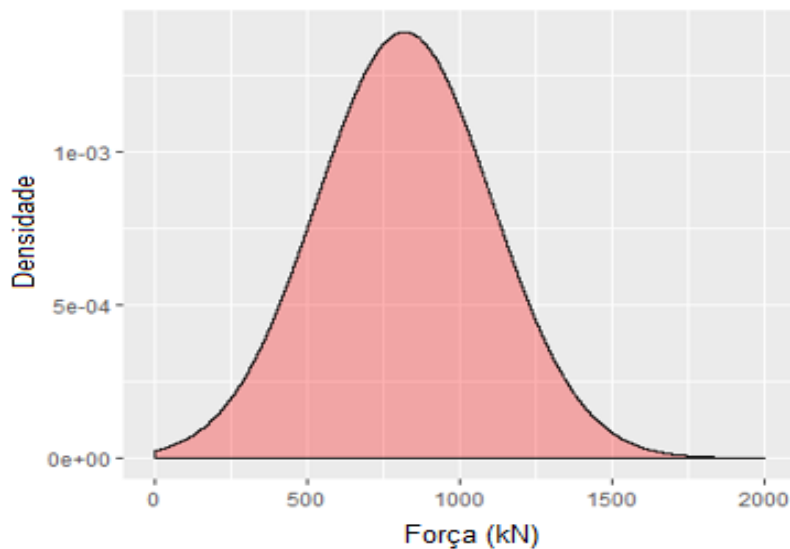


Figura 2: Densidade de probabilidade da solicitação.

Fonte: Programação R.

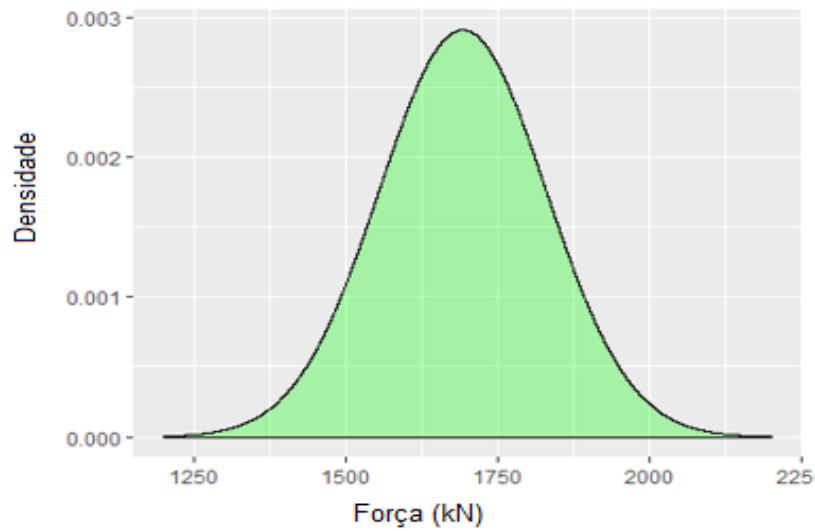
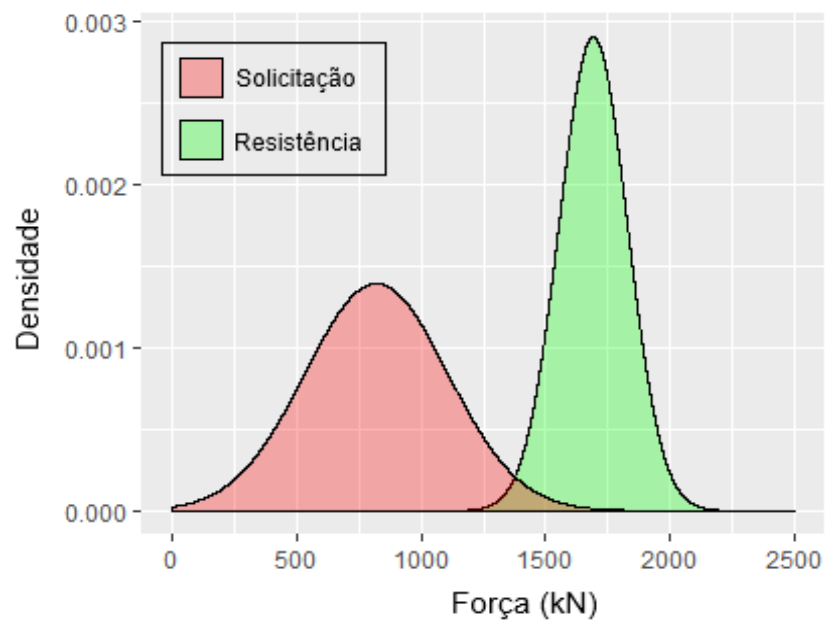


Figura 3: Densidade de probabilidade da resistência.

Fonte: Programação R.

Figura 4: Curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência.



Fonte: Programação R.

As curvas mostradas na Figura 5 são para o caso de distribuição normal. Os valores $S_{méd}$ e $R_{méd}$ representam os valores médios de solicitação e de resistência, respectivamente, enquanto que os valores σ_s e σ_r representam os respectivos desvios padrões, que quantificam a dispersão em torno do valor médio, em cada caso, para as

variáveis aleatórias S e R. Os pontos de inflexão das curvas caracterizam os valores de cada desvio padrão.

À razão entre o desvio padrão e média, chamamos de coeficiente de variação, o qual também pode representar, em termos percentuais, a dispersão (ou variabilidade), tanto para solicitação, quanto para resistência.

Para o nosso caso estudado, foram calculados cada um desses fatores:

$$v_s = \frac{\sigma_s}{S_{méd}} = \frac{286,31}{818,30} = 0,35 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$v_r = \frac{\sigma_r}{R_{méd}} = \frac{137,27}{1691,33} = 0,08 \quad (\text{Eq. 4})$$

Entretanto, ao falarmos de fator de segurança global, envolvemos apenas a razão entre os valores médios de resistência e de solicitação, portanto, o fator de segurança global não leva em consideração a variabilidade de R e de S, o que cria falsa ideia de que o problema é determinista e, por consequente, não haverá, sob hipótese alguma, risco de ruína de fundação. Este problema é análogo quando falamos de fatores de segurança parciais, os quais empregam o conceito de carga característica, sem levar em consideração também o risco de ruína.

Para o caso estudado, segue o cálculo do fator de segurança global:

$$F_s = \frac{R_{méd}}{S_{méd}} = \frac{1691,33}{818,30} = 2,07 \quad (\text{Eq. 5})$$

Na Figura 4 também podemos observar a relação direta entre a média da solicitação e a média da resistência, de modo que quanto mais próximos forem os valores, menor será o fator de segurança global e mais próximas as curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência estarão. Desse modo, vemos que a recíproca também é verdadeira.

Chamando o ponto de intersecção entre as curvas de solicitação e de resistência de C, verificamos que nessas curvas existem pontos em que a solicitação supera a resistência. Desse modo, incluiu-se a curva de densidade de probabilidade de ruína, na região onde há a superposição das curvas de solicitação e de resistência (curva mais escura, na Figura 4). Assim, temos que a probabilidade de ruína (P_f) da fundação será dada pela integral da curva de densidade de probabilidade de ruína, que corresponde à área sob a referida curva, a qual é dada por:

$$P_f = \int_{-}^{+} f_s(S)F_r(S)ds \quad (\text{Eq. 6})$$

Dessa forma, podemos verificar que, quanto menor for o fator de segurança global, mais próximas estarão as curvas de solicitação e de resistência e, acarretando em uma maior probabilidade de ruína. Caso contrário, quanto maior for o fator de segurança global, mais afastadas estarão as curvas de solicitação e de resistência acarretando em uma menor probabilidade de ruína.

Logo, há uma relação direta entre o fator de segurança global (F_s) e a probabilidade de ruína (P_f). Como em todo estaqueamento há variabilidade de R e de S , então podemos entender que, a cada valor de F_s , está implicitamente ligada uma probabilidade de ruína.

Dessa forma, fica comprovado matematicamente, com a aplicação do caso prático, a afirmação de Cintra e Aoki (2010), que descrevem que somente a aplicação do valor de F_s não implica na inexistência de risco de ruína. Sendo assim, torna-se necessário analisarmos se o valor da probabilidade de ruína é aceitável ou não. Devemos também ficar atentos ao fato de que, mesmo atendendo a fatores de segurança previstos em norma, poderemos obter valores indesejáveis para P_f . O que não ocorreu para o caso estudado, uma vez que este valor se encontra dentro de padrões aceitáveis do ponto de vista de engenharia.

4.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

Como já descrito, demonstrado e aplicado, as variáveis F_S e P_f são interdependentes, pois a variação de uma, implica na alteração dos valores de outra. Desse modo, vamos partir para analisar outras possibilidades.

Considerando o fato de que o fator de segurança global se mantenha o mesmo calculado anteriormente, para o estaqueamento estudado, porém com menor variabilidade nos valores de resistência (menor desvio padrão, implicando numa curva de R mais fechada em torno de $R_{méd}$). A Figura 5 mostra esse caso hipotético.

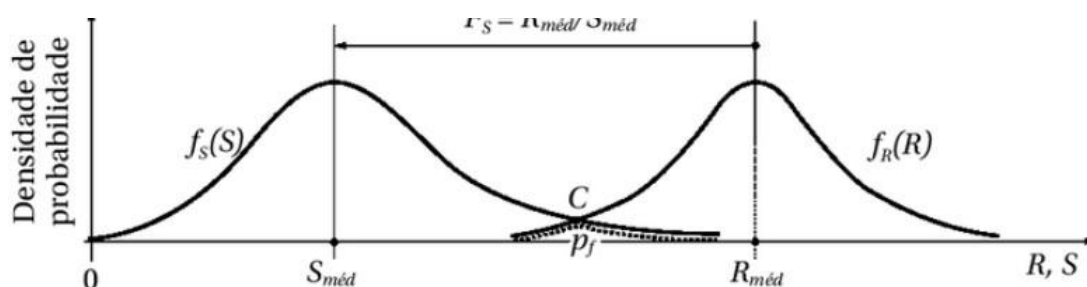


Figura 5: Curva hipotética de resistência com menor variabilidade.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

A Partir da Figura 5, podemos concluir que, quanto menor for a variabilidade da resistência, ou seja, menor o desvio padrão, mantido o fator de segurança global, menor será a probabilidade de ruína. Analogamente, pode-se verificar que, quanto maior for essa variabilidade na resistência, mais aberta a curva será, implicando numa maior probabilidade de ruína. Sendo assim, podemos concluir que, para estaqueamento de obras diferentes (condições de solos diferentes, por exemplo), mesmo que se mantenha o mesmo valor de F_S , teremos probabilidades de ruína diferentes.

Assim, se levarmos em consideração a forma da curva, para o caso da distribuição normal, com valor médio conhecido, teremos que considerar, também, os coeficientes de variação. Portanto, concluímos que temos quatro variáveis que comandam a análise de risco: F_S , P_f , v_S e v_R . Todos já calculados, traçados e apresentados no tópico anterior.

Por fim, sabe-se que os valores médios de resistência ($R_{\text{méd}}$) e de solicitação ($S_{\text{méd}}$) indicam apenas um ponto em cada uma das curvas de R e de S, então, conclui-se que, no cálculo tradicional, que utilizava apenas o fator de segurança global, comete-se um equívoco em substituir uma curva por um de seus pontos, como afirma Cintra e Aoki (2010). Esse mesmo equívoco é provocado quando se utilizam valores característicos, a partir de fatores de segurança parciais.

Esta conclusão remete a uma indagação sobre todas as estruturas calculadas mediante esse equívoco, uma vez que, em casos extremos, a ruína da fundação pode acarretar em desastres sociais e ambientais. Além disto, o cálculo mais sofisticado da análise de ruína pode servir como base para estimativa de preços de seguros sociais e do empreendimento, confiabilidade da edificação e etc.

4.3 VERIFICAÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA

Um conceito largamente utilizado em atividades que envolvem risco é o de margem de segurança. A função da margem de segurança $f_z(Z)$, para estaqueamentos, segundo Cintra e Aoki (2010), é definida pela diferença entre as curvas de resistência R e solicitação S, considera-se que a solicitação e a resistência sejam estaticamente independentes, logo:

$$f_z(Z) = f_r(R) - f_s(S) \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo assim, pode-se dizer que a fundação sofre ruína quando houver $Z \leq 0$, ou seja, quando $R \leq S$ e, de modo recíproco, a fundação não sofrerá ruína quando $Z > 0$.

Para o caso estudado, tem-se:

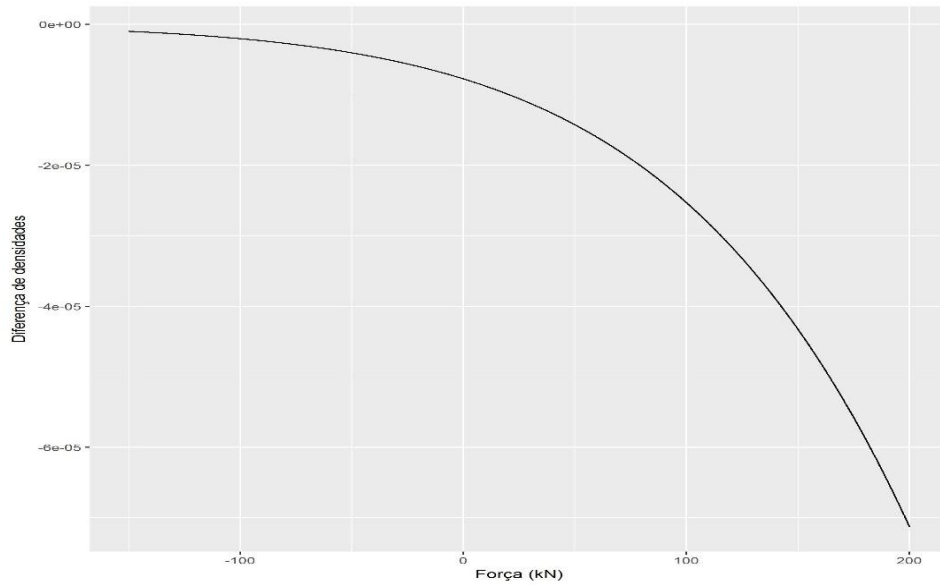


Figura 6: Diferença de densidades.

Fonte: Programação R.

Para o caso da distribuição normal de R e S, temos que o desvio padrão σ_z da função margem de segurança, é dado por:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

Logo:

$$\sigma_z = \sqrt{137,27^2 + 286,31^2} \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$\sigma_z = 317,52 \quad (\text{Eq. 8.2})$$

O valor médio da margem de segurança é:

$$Z_{méd} = R_{méd} - S_{méd} = 1691,33 - 818,30 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$Z_{méd} = 873,03 \text{ KN} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

Como é sabido da Equação 5:

$$F_s = \frac{R_{méd}}{S_{méd}} \Rightarrow R_{méd} = F_s \cdot S_{méd}$$

Substituindo:

$$Z_{méd} = F_s \cdot S_{méd} - S_{méd} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\therefore Z_{méd} = S_{méd} \cdot (F_s - 1) \quad (\text{Eq. 10.1})$$

$$Z_{méd} = 81,83 \cdot (20,67 - 1) \quad (\text{Eq. 10.2})$$

$$Z_{méd} = 1.609,50 \text{ KN} \quad (\text{Eq. 10.3})$$

4.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

Será utilizado agora a relação matemática direta entre a segurança e a confiabilidade. Inicialmente se utilizou o valor médio da margem de segurança ($Z_{méd}$) em termos de unidade do desvio padrão (σ_z) através de um parâmetro (β) chamado de índice de confiabilidade:

$$Z_{méd} = \beta \cdot \sigma_z \quad (\text{Eq. 11})$$

Como visto anteriormente, quanto menor for o valor de $Z_{méd}$, maior é a probabilidade de ruína, para o mesmo desvio padrão. Sendo assim, quanto menor for o valor de $Z_{méd}$, menor será o valor de β e maior, portanto, será o valor de P_f . Desse modo, utilizou-se β e P_f como fatores inversamente proporcionais e, mais que isso, β como sendo uma medida indireta de P_f , do estaqueamento, como mencionam Cintra e Aoki (2010).

Daí tem-se, por definição, que o índice de confiabilidade é inversamente proporcional ao coeficiente de variação de margem de segurança:

$$\beta = \frac{Z_{méd}}{\sigma_z} = \frac{1609,50}{317,52} = 5,07 \quad (\text{Eq. 11.1})$$

Tabela 2: Escala subjetiva MIL – STD – 882 ampliada 12/03/2011

β	Ocorrência
-7,94	Certeza
0,00	0% probabilidade
0,52	Frequente
1,88	Provável
2,75	Ocasional
3,43	Remota
4,01	Muito remota
4,53	Improvável
7,27	Nunca

Fonte: Adaptada de P.L. Clemens (1983)

Observando a Tabela 2, pode-se afirmar que, segundo o fator β , a probabilidade de ruína da fundação por estacas do edifício estudado é classificada como IMPROVÁVEL.

Por fim, combinando as equações, obtêm-se uma relação entre a margem de segurança, o fator de segurança global e o índice de confiabilidade, utilizando de sua dependência estatística, como segue:

$$S_{méd} = (F_s - 1) = \beta \cdot \sigma_z \quad (\text{Eq. 12})$$

Elevando os dois membros dessa expressão ao quadrado, vem:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_s^2 - 2F_s + 1) = \beta^2 \cdot \sigma_z^2 \quad (\text{Eq. 12.1})$$

Como sabido, da Equação 8, $\sigma_z^2 = \sigma_r^2 + \sigma_s^2$, segue:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_s^2 - 2F_s + 1) = \beta^2 \cdot (\sigma_r^2 + \sigma_s^2) \quad (\text{Eq. 12.2})$$

Visto que $v_s = \frac{\sigma_s}{S_{méd}}$ e $v_r = \frac{\sigma_r}{R_{méd}}$, nas Equações 3 e 4, segue:

$$\sigma_s = v_s \cdot S_{méd} \Rightarrow \sigma_s^2 = v_s^2 \cdot S_{méd}^2$$

Substituindo a expressão acima na Equação 12.2, temos:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_s^2 - 2F_s + 1) = \beta^2 \cdot (v_r^2 \cdot R_{méd}^2 + v_s^2 \cdot S_{méd}^2) \quad (\text{Eq. 13})$$

Dividindo os dois lados da igualdade por $S_{méd}^2$, segue:

$$F_s^2 - 2F_s + 1 = \frac{\beta^2 \cdot v_r^2 \cdot R_{méd}^2}{S_{méd}^2} + \frac{\beta^2 \cdot v_s^2 \cdot S_{méd}^2}{S_{méd}^2} \quad (\text{Eq. 13.1})$$

Como $F_s = \frac{R_{méd}}{S_{méd}}$, então $F_s^2 = \frac{R_{méd}^2}{S_{méd}^2}$, portanto:

$$F_s^2 - 2F_s + 1 = \beta^2 \cdot v_r^2 \cdot F_s^2 + \beta^2 \cdot v_s^2 \quad (\text{Eq. 13.2})$$

Obtendo por fim, na equação de segundo grau:

$$(\beta^2 \cdot v_r^2 - 1)F_s^2 + 2F_s + (\beta^2 \cdot v_s^2 - 1) = 0 \quad (\text{Eq. 13.3})$$

Resolvendo essa equação, obtemos a raiz positiva:

$$F_s = \frac{1 + \beta(\sqrt{v_s^2 + v_r^2 - \beta^2 \cdot v_s^2 \cdot v_r^2})}{1 - \beta^2 \cdot v_r^2} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$F_s = \frac{1 + 5,07(\sqrt{(0,35)^2 + (0,08)^2 - (5,07)^2 \cdot (0,35)^2 \cdot (0,08)^2})}{1 - (5,07)^2 \cdot (0,08)^2} \quad (\text{Eq. 14.1})$$

$$F_s = 3,21 \quad (\text{Eq. 14.2})$$

Interessante notar que o valor de F_s encontrado através do método é até mesmo superior ao previamente calculado utilizando os valores de $R_{méd}$ e $S_{méd}$.

Isso indica, segundo Cintra e Aoki (2010), que, uma vez fixadas as curvas R e S, definidas pelos respectivos coeficientes de variação v_r e v_s , o fator de segurança global F_s torna-se dependente do índice de confiabilidade β , indicando que a segurança e a confiabilidade são inseparáveis do ponto de vista matemático.

O valor da probabilidade de ruína P_f , demonstrado por Ang Tang (1984), como citam Cintra e Aoki (2010), é função direta do índice de confiabilidade:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde Φ se trata da função de distribuição normal.

Utilizando o Excel pode-se calcular a probabilidade de ruína P_f a partir do valor de β , através da expressão:

$$P_f = 1 - DIST.NORM(\beta; 0; 1; VERDADEIRO) \quad (\text{Eq. 15.1})$$

Obteve-se o valor de probabilidade de ruína:

$$P_f = 1,99996 \times 10^{-7} \quad (\text{Eq. 15.2})$$

Calculada a probabilidade de ruína, também é possível calcular um valor estimado para o tempo de ocorrência de ruína, sendo este, para o nosso caso:

$$T = 13.701,67 \text{ anos}$$

Assim, pode-se confirmar a impossibilidade de considerar apenas o fator de segurança global como se este fosse independente da probabilidade de ruína, pois, mesmo que o fator de segurança global atinja valores infinitamente grandes, sempre a risco de ruína nas fundações por estacas, mesmo que seu valor seja infinitamente pequeno, o risco de ruína é real, calculável e importante para uma análise financeira, como será descrita neste trabalho.

4.5 ESTIMATIVA DE VALORES RECOMENDADOS

Tomando como referência Norma Brasileira, NBR 6122/2010, para projetos de execução de fundações, notaremos que esta não estipula valores para análise da probabilidade de ruína e das variáveis que estão envolvidas na análise de risco, normatizando apenas os fatores de segurança.

Desse modo, fica a cargo do projetista determinar a probabilidade de ruína a partir dos fatores de segurança propostos em norma e acordar com o proprietário a decisão relativa ao risco aceitável para cada fundação por estacas, dependendo do tipo de obra e das consequências que sua ruína pode acarretar, em termos sociais, econômicos e ambientais.

O risco, como se sabe, depende do tipo de obra e da vulnerabilidade específica do conjunto de variáveis estruturais analisadas, como cita Aoki (2008).

Aoki (2008) ainda apresenta, para dimensionamento no estado limite último, as classes de consequências da ruína prevista no Eurocode 90, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Classes de consequências de acordo com o Eurocode EN 1990.

Classe de consequência	Descrição	Exemplos de edificações e obras civis
CC3	Alta consequência em termos de perdas de vidas humanas e consequência muito grande em termos econômico, social ou ambiental.	Estádios, edifícios públicos onde as consequências da ruína são altas (por exemplo, sala de concertos).
CC2	Média consequência em termos de perdas de vidas humanas e consequência considerável em termos econômico, social e ambiental.	Edifício residencial e edifício de escritórios, edifícios públicos onde as consequências de ruína são médias (por exemplo, edifícios de escritórios).
CC1	Baixa consequência em termos de perdas de vidas humanas e consequência pequena ou negligenciável em termos econômico, social ou ambiental.	Edificações agrícolas onde normalmente não entram pessoas (por exemplo, edifício de estocagem, estofas).

Fonte: Adaptado de AOKI, 2010.

Para o caso examinado, a classificação mais precisa para o Edifício estudado, é a CC2, a qual remete a edifícios residenciais com médias consequências em termos de perda de vidas humanas e consequências consideráveis em termos econômicos, sociais e ambientais.

4.5.1 Intervalos de Segurança para Probabilidade de Ruína

Na literatura ainda não há prescrições para elementos isolados de fundações por estacas, mas apenas referências à probabilidade de ruína de obras de fundação. Ainda segundo os mesmos, Lumb (1996) recomenda um valor de risco para estabilidade das fundações, da ordem de 1/10.000.

1. Adotando a interpretação frequencista (população finita) e impondo limite superior compatível com a literatura, temos:

$$\frac{1}{10.000} \geq P_{f_{m\acute{a}x}} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\frac{1}{10.000} \geq 1,9996 \times 10^{-7} \quad (\text{Eq. 16.1})$$

Também dentro desse parâmetro de comparação para o valor de probabilidade de ruína, verificou-se que a fundação estudada se encontra dentro da faixa segura recomendável pela literatura.

A sugestão apresentada se aplica às estacas isoladas, lembrando que no caso de grupos de estacas, a iminência da probabilidade de ruína para uma estaca sobre o bloco de fundação, pode causar a redistribuição das cargas para as demais estacas, o que não acarretará, necessariamente, a ruptura do apoio representado pelo bloco. Então a metodologia desenvolvida para estacas isoladas, torna-se conservadora, quando aplicada para fundações com grupos de estacas, como citam Cintra e Aoki (2010).

4.5.2 Coeficientes de Variação

Considerando o grupo de estacas, haverá pelo menos duas causas para a variação dos valores de solicitação: o arredondamento do número de estacas do grupo e o fato de que a própria distribuição de cargas entre as estacas do grupo não é homogênea. Logo, um valor considerado plausível para o coeficiente de variação da solicitação é de, pelo menos, 10%, ou seja, $v_s = 0,1$.

Para o caso estudado, obteve-se um valor de $v_s = 0,35$, ou, aproximadamente 35%, valor este muito acima do valor mínimo considerado plausível para o coeficiente e, portanto, dentro dos padrões de confiabilidade.

No caso da variação da resistência, como esta é uma função do tipo de estaca e

das condições do solo na qual elas estão sendo implantadas, então, considerando um fator de segurança global aproximadamente igual a 2,0 (sendo 2 o mínimo por norma), nosso v_s de , aproximadamente, 35% e v_r entre 10% e 35%, obteve-se a tabela 3, apresentada a seguir.

Tabela 4: Valores de Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína.

V_r	β	Pf
0,1	4,472	1/258.100
0,15	3,162	1/1.280
0,2	2,425	1/130
0,25	1,961	1/40
0,3	1,644	1/20
0,35	1,414	1/13

Fonte: Adaptada de CINTRA E AOKI, 2010.

Uma vez que utilizado o v_r calculado para o caso, aproximadamente 9%, e realizando uma interpolação não linear com base nos valores observados na tabela, calculou-se os valores para β e P_f :

$$\beta = 4,364$$

$$P_f = \frac{1}{259.400}$$

Também observando a Tabela 4, podemos identificar o quanto à probabilidade de ruína aumenta, a partir do aumento da variação da resistência. Isso nos faz refletir que, mesmo atendendo a valores de coeficiente de segurança global determinados em norma, não conseguimos impedir o aumento da probabilidade de ruína, principalmente quando a variação da resistência ultrapassa os 15%. Para casos assim, seria indispensável o aumento do fator de segurança, até um limite máximo aceitável, a fim de diminuir a probabilidade de ruína.

O Eurocode EN 1990 estipula valores mínimos para o fator de confiabilidade e valores máximos para a probabilidade de ruína, a fim de diminuir a probabilidade de ruína. Como mostra a Tabela 5, apresentada por Aoki (2008).

Tabela 5: Valores de confiabilidade e de probabilidade de ruína do Eurocode EN 1990.

Classe de confiabilidade	Período de referência de um ano		Período de referência de 50 anos	
	Valor mínimo fator de confiabilidade β	Máxima probabilidade de ruína Pf	Valor mínimo fator de confiabilidade β	Máxima probabilidade de ruína Pf
RC3	5,2	9,964E-08	4,3	8,540E-06
RC2	4,7	1,301E-06	3,8	7,325E-05
RC1	4,2	1,335E-05	3,3	4,834E-04

Fonte: Adaptada de AOKI, 2008.

Dessa forma, utilizando do valor de β já calculado ($\beta = 5,07$), sendo este valor coerente para ambas as referências, tanto no período de um ano quanto de 50 anos, pode-se classificar o empreendimento estudado com classe de confiabilidade RC1, no que diz respeito ao período de referência de um ano, e como RC2, no que diz respeito ao período de referência de 50 anos.

4.6 CÁLCULOS PRÁTICOS UTILIZANDO PLANILHA EXCEL

A partir das fórmulas apresentadas neste trabalho, pode-se montar uma planilha Excel para a análise estatística da probabilidade de ruína e cálculo do fator de confiabilidade. Obtidos os valores nessa planilha, podemos verificar se a obra apresenta níveis aceitáveis de confiabilidade e de probabilidade de ruína.

A seguir, apresentam-se os resultados de resistência calculados, e mostram-se os valores obtidos das variáveis que foram analisadas nesse trabalho de pesquisa, além do valor N que é o inverso da probabilidade de ruína.

Tabela 6: Risco de Estaqueamento com PCE, segundo NBR 6122/2010

Análise de segurança e confiabilidade			
SOLICITAÇÃO	Solicitação média	μ_s	818,3
	Desvio padrão	σ_s	286,31328
	Coefficiente variação	v_s	0,349887
	Solicitação característica	S_k	1289,2853
RESISTÊNCIA	Resistência média	μ_r	1691,3294
	Desvio padrão	σ_r	137,26525
	Coefficiente variação	v_r	0,081158
	Resistência característica	R_k	1465,5279
CONFIANÇA	Margem segurança média	μ_m	873,02939
	Desvio padrão	σ_m	317,51704
	Fator de confiabilidade	$\beta_{ruína}$	5,069
	Probabilidade de ruína	P_f	1,9996E-07
	Tempo recorrência	anos	13701,671
SEGURANÇA	Fator global	F_s	2,0668818
	Fator característico	F_k	1,1366979
	Fator parcial majoração carga	γ_f	1,4
	Fator parcial minoração resistência	γ_m	0,811927
	Fator parcial resistência	γ_r	1,1540752
	Fator parcial solicitação	γ_s	1,5755656

Fonte: Adaptado do arquivo Excel fornecido pelo Prof. AOKI.

De posse desses dados pode-se utilizar a Tabela 7 para classificar a obra quanto ao nível de risco.

Tabela 7: Tempo e frequência de recorrência em função do índice de confiabilidade

β	Ocorrência	Tempo de recorrência	Frequência	Nível de risco	Nível de prob.	P_f
-7,94	Certeza	1 dia	Todo dia		1	1,000000
0,00	50%	2 dias	A cada 2 dias		2×10^0	0,500000
0,52	Frequente	1 semana	Toda semana	A	3×10^{-1}	0,300000
1,88	Provável	1 mês	Todo mês	B	3×10^{-2}	0,030000
2,75	Ocasional	1 ano	Todo ano	C	3×10^{-3}	0,003000
3,43	Remota	10 anos	A cada década	D	3×10^{-4}	0,000300
4,01	Extr. Remota	100 anos	A cada século	E	3×10^{-5}	0,000030
4,53	Impossível	1000 anos	A cada milênio		3×10^{-6}	0,000003
7,27	Nunca	$5,47 \times 10^{12}$	Idade do universo		0	$1,82 \times 10^{-13}$

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2013.

Portanto, por meio da Tabela 7, verifica-se que a fundação por estaca estudada se classifica dentro de padrões aceitáveis de confiabilidade e probabilidade de ruína.

5. ANÁLISE FINANCEIRA DO ESTUDO DA PROBABILIDADE DE RUÍNA

Calculados, analisados e classificados todos os parâmetros quanto à confiabilidade e a probabilidade de ruína foi realizada uma pesquisa de mercado, na cidade de João Pessoa, entre três empresas que trabalham com a realização de seguros de obras civis.

Apresentou-se todos os parâmetros estatísticos, metodologias de cálculo e valores de fato de probabilidade de ruína, confiabilidade e tempo de recorrência para a fundação por estacas do edifício estudado nesse trabalho, bem como descrito todas as características do empreendimento em termos arquitetônicos, quantitativos e de usabilidade, para que todos esses fossem ponderados na realização do orçamento.

Após análise, por parte das seguradoras, a conclusão das três empresas foi similar. Observou-se que o órgão regulador de suas atividades, a SUSEPE (Superintendência de Seguros Privados), não apresenta nenhuma tabela atuarial que pondere, no que diz respeito à precificação, os dados demonstrados e evidenciados com o trabalho.

Entretanto, buscou-se informações a respeito dos fatores de ponderação em que pesam sobre os parâmetro de confiabilidade, probabilidade de ruína e tempo de recorrência em uma empresa que tem sede nos Países Baixos, na Europa. Essa empresa afirmou que já utiliza um algoritmo no qual a inserção dos dados probabilísticos é não só utilizada, mas também exigida para realização de precificação e garantia dos serviços prestados pela empresa.

Buscadas referências em demais países onde a engenharia de ponta é utilizada em larga escala, como Estados Unidos, Alemanha e Emirados Árabes, nos quais a empresa citada no parágrafo anterior também atua, foi caracterizada a mesma metodologia de precificação, na qual todos os fatores tradicionais são acrescidos das probabilidades e dados estatísticos para montagem do plano financeiro da seguradora.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando as funções estatísticas como mais um meio de controle no dimensionamento e monitoramento da segurança nas obras de Engenharia, a análise de confiabilidade e probabilidade de ruína mostram-se não só como poderosos aliados no que diz respeito a estabilidade das estruturas mas também como uma tendência de mercado, uma vez que esta análise de dados probabilísticos pode conduzir as discussões no que diz respeito a tomada de responsabilidade, uma vez conhecidos os dados de probabilidade de ruína, tanto pelos responsáveis das obras quanto pelo mercado de seguros de obras civis.

Com base nas análises realizadas durante este trabalho, percebeu-se a relação direta entre o fator de segurança global e o índice de confiabilidade, na qual a fundação analisada apresentou condições estatísticas favoráveis em todos os índices de segurança, bem como nos fatores de confiabilidade, concluindo assim um conjunto com a interação solo-estrutura coerente no que diz respeito à margem de segurança.

Convém ressaltar que, apesar das respostas negativas das seguradoras locais consultadas nesse trabalho, é clara a tendência do mercado de seguros a utilização, cada vez mais analítica, dos dados estatísticos e probabilísticos. Isto se deve não só pelo avanço matemático no que diz respeito à previsibilidade das variáveis aleatórias não controladas, mas também a tendência de construções civis cada vez mais esbeltas, complexas, com usabilidades variadas e com a implementação, cada vez mais forte, da diminuição de materiais utilizados nas obras.

Sugere-se para trabalhos futuros,

- Verificar outros tipos de Análise Estatística e de simulação, para que se possa fazer comparação de resultados entre diferentes métodos de análise;
- Verificar, de maneira mais profunda, a Análise de Risco Econômico-Financeiro, tomando como base uma maior quantidade de empresas de seguros, para que o proprietário da obra tenha noção, em termos de custos, de quanto sua obra é devidamente segura;
- Verificar a Análise Estatística em outras fundações em diferentes tipos de solo, buscando associação entre os fatores e as características geológicas da região.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT (2006). *Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12131, Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT (2010). *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6122, Rio de Janeiro, 91p.
- AOKI, N. (2008). *Dogma do fator de Segurança*. VI Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 1: 9-42.
- AOKI, N. (2011). *A probabilidade de ruína e os fatores de segurança em fundações*. 7ª. Palestra ABMS, CD-ROM, Recife, Brasil.
- BUDHU, M. (2017). *Fundações e estruturas de contenção*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- CINTRA, J. C. A. [et al.] (2013). *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- CINTRA, J. C. A; AOKI, N. (2010). *Fundações por Estacas: projeto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R.F. (2018). *Mecânica dos Solos*. 8. ed. – [Reimp.]. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- LARSON, R.; FARBER, B. (2010). *Estatística aplicada*. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- LÉXICO – Dicionário de Português Online. Disponível em: < <https://www.lexico.pt/>>. Acesso em: 05 Jun. 2018.
- OLIVEIRA, P. E. S. (2013). *Análise de Prova de Carga e Confiabilidade para Edifício Comercial na Região Metropolitana do Recife*. 165 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.
- WALPOLE, R. E. [et al.] (2009). *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

