

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

SALATIEL DIAS DA SILVA

ESTUDO SOBRE ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS

João Pessoa, PB

2018

SALATIEL DIAS DA SILVA

ESTUDO 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

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586e Silva, Salatiel Dias da.
ESTUDO SOBRE ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS
/ Salatiel Dias da Silva. - João Pessoa, 2018.
42 f. : il.

Orientação: Fábio Lopes Soares.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Fundação, Risco, Probabilidade, Confiabilidade. I.
Soares, Fábio Lopes. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

SALATIEL DIAS DA SILVA

ESTUDO SOBRE ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS

Trabalho de Conclusão de Curso em 15/06/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Fábio Lopes Soares

Fábio Lopes Soares

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Aline Flavia Nunes Remigio Antunes

Aline Flavia Nunes Remigio Antunes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Clovis Dias

Clovis Dias

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

*“As dificuldades são o aço estrutural que
entra na construção do caráter.”*

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar grandes conquistas na minha vida e sempre me guiar da melhor forma nas minhas tomadas de decisão, de modo que, sempre que eu me sentia indeciso, eu sentia que Ele estava a me orientar, até nos momentos de desespero. À Ele, toda honra, glória e gratidão.

Aos meus pais que sempre me encheram de motivação e me proporcionaram uma educação familiar voltada ao respeito, aos valores e à busca do conhecimento, como ferramenta de crescimento e de libertação.

Aos meus familiares que sempre me apoiam e torcem pelo meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Aos meus amigos que se orgulham por cada conquista minha e que me dão suporte nas horas de estresse e me trazem conforto, carinho e companheirismo.

Ao Professor Dr. Fábio Lopes Soares, por me inspirar a querer fazer pesquisas na área de Geotecnia e Fundações e por me orientar na elaboração desse trabalho.

Aos meus colegas/amigos de curso, principalmente àqueles que sempre estiveram comigo nos grupos de estudo, nas elaborações de projetos e trabalhos acadêmicos, dividindo não só momentos de alegrias e conquistas, mas também momentos de medo e de angústias durante essa jornada acadêmica.

Aos meus colegas de trabalho, pelo apoio e incentivo para concluir essa graduação.

Por fim, à Coordenação e à equipe de Professores do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, por dividirem conosco todo conhecimento, o qual levarei para vida profissional e pessoal.

RESUMO

A necessidade de desenvolver projetos de Engenharia que aliam segurança, conforto e confiabilidade, vem se tornando cada vez mais presente. É de fundamental importância atentar que uma obra civil deve atender a parâmetros de segurança, porém estes estão interligados à outros parâmetros, que avaliam a confiabilidade do empreendimento. O presente trabalho faz um estudo bibliográfico sobre a análise de risco de ruína em obras de fundação por estacas, considerando as diversas variáveis envolvidas na elaboração desses projetos, a variabilidade do solo, o processo executivo de cada elemento estrutural de fundação, dentre outros fatores, enfatizando que estes estão sujeitos à ação de fenômenos aleatórios, se tornando passíveis à ruína, o que nos remete a um estudo probabilístico desses fenômenos. O trabalho mostra o quanto é importante o monitoramento das cargas de solicitação e de resistência dos elementos estruturais de fundação, a partir do estudo do solo, das exigências de projeto para cada tipo de estaca, e das técnicas para prova de cargas. Para tanto é necessário entender alguns conceitos básicos sobre probabilidade e estatística, em especial sobre ajustes de dados através de curvas normais, além dos conceitos sobre obras de fundação com o uso de estacas e dos resultados obtidos na análise de risco, a fim de se poder concluir qual o nível de risco que a obra apresenta que, no caso do exemplo hipotético apresentado, resultou em um risco ocasional.

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

ABSTRACT

The need to develop Engineering projects that combine safety, comfort and reliability, is becoming more and more present. It is of fundamental importance to consider that a civil work must meet safety parameters, but these are interconnected to other parameters, which evaluate the reliability of the enterprise. The present work makes a bibliographical study about the risk analysis of ruin in foundation works by stakes, considering the several variables involved in the elaboration of these projects, the soil variability, the executive process of each structural element of foundation, among other factors, emphasizing that these are subject to the action of random phenomena, becoming susceptible to ruin, which brings us to a probabilistic study of these phenomena. The work shows how important is the monitoring of the request loads and resistance loads of the structural foundation elements, from the study of the ground, the design exigence for each type of stake, and the techniques for proof of loads. In order to do so, it is necessary to understand some basic concepts about probability and statistics, especially about data adjustments through normal curves, besides the concepts about foundation works using stakes and the results obtained in the risk analysis, in order to be able to conclude the risk level that the work presents, which, in the case of the hypothetical example presented, resulted in an occasional risk.

KEY WORDS: Foundation, Risk, Probability, Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de uma curva normal.	16
Figura 2 - Formatos de curva normal a partir da influência da média e do desvio padrão.	17
Figura 3 - Curvas normais das variáveis x e z – áreas iguais.	17
Figura 4 - Curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência.	22
Figura 5 - Curvas de probabilidade de ruína.	23
Figura 6 - Aproximação das curvas de solicitação e de resistência.....	24
Figura 7 - Curva de resistência com menor variabilidade.	25
Figura 8 - Gráfico da Função Margem de Segurança.....	26
Figura 9 – Curva: índice de confiabilidade x N	30
Figura 10 - Histogramas de solicitação e resistência.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição Normal Padrão.....	18
Tabela 2 - Classes de consequências de acordo com o Eurocode EN 1990.....	31
Tabela 3 - Valores de Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína.	33
Tabela 4 - Valores de confiabilidade e de probabilidade de ruína do Eurocode EN 1990.....	33
Tabela 5 - Tempo e Frequência de recorrência em função do índice de confiabilidade.	36
Tabela 6 - Risco de Estaqueamento com PCE, segundo NBR 6122/2010.....	37
Tabela 7 -Valores de ξ_3 e ξ_4 em função de n.....	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO.....	12
2. REVISANDO ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS	13
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA	13
2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FUNDAÇÕES.....	19
3. O RISCO DE RUÍNA EM FUNDAÇÕES	21
3.1 CURVAS DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA	21
3.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS.....	24
3.3 VERIFICAÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA.....	26
3.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE.....	27
3.5 ESTIMATIVA DE VALORES RECOMENDADOS	30
3.5.1 Valores para Probabilidade de Ruína	31
3.5.2 Valores para os Coeficientes de Variação.....	32
4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	34
4.1 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE RUÍNA A PARTIR DE HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA: CINTRA E AOKI (2010).....	34
4.2 EXEMPLO HIPOTÉTICO USANDO PLANILHA EXCEL	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
6. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico e a possibilidade cada vez maior de se fazer controle de qualidade e confiabilidade, abre-se um novo horizonte em relação aos projetos e à execução de obras de Engenharia Civil.

Antigamente acreditava-se que, atendidos os fatores de segurança propostos em norma, a estrutura estaria “livre de algum tipo de risco ou colapso”, porém essa ideia vem sendo desmistificada, a partir dos estudos sobre análise de risco e obtenção de índices de confiabilidade e, sendo assim, as obras referentes às fundações não poderiam ficar de fora dessa tendência.

Segundo o Dicionário de Português Online Léxico, risco é “Ameaça ou perigo; possibilidade de uma ocorrência ou episódio futuro arriscado ou incerto”.

O conceito sobre risco se aplica a diversas áreas de estudo. Sempre ouvimos falar sobre risco financeiro, risco de contaminação química, risco à saúde, risco ambiental, risco à segurança no trabalho, etc. o que demonstra que a análise de risco é de grande importância para que se possa adotar medidas de prevenção a fim de minimizar ou até eliminar possíveis danos às pessoas e/ou ao ambiente. Porém deve-se reforçar que o que se “combate” não é o risco, porque este estará sempre presente, já que é função de fatores não controláveis (aleatórios), mas sim suas possíveis consequências.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em países do hemisfério Norte, a análise da probabilidade de ruína já se tornou normatizada, junto com a verificação dos fatores de segurança parciais, como por exemplo na norma do Eurocode, segundo citam Cintra e Aoki (2010). No Brasil, os estudos sobre probabilidade de risco e confiabilidade ainda não são normatizados, porém alguns estudos vêm sendo feitos, como será mostrado durante o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

Por outro lado, segundo Aoki (2011) o Código de Defesa do Consumidor exige que produtos e serviços sejam comprovados de forma explícita pelos fornecedores, tornando-se obrigatório por lei que o risco, ou seja, a probabilidade de ruína inerente ao produto e serviço de engenharia seja calculada e informada ao proprietário da obra.

Fica clara a tendência de que empresas de seguro, num futuro muito próximo, exijam resultados baseados em Análise de Risco, para que possam expedir apólices referentes à projetos de edificações.

É de fundamental importância perceber que, para que uma estrutura, seja ela civil estrutural, civil geotécnica, mecânica, etc., seja bem sucedida, devemos atentar não só para características mecânicas dos materiais envolvidos na confecção e o atendimento aos fatores de segurança globais de cada projeto, mas também a forma como foram feitas as execuções dessas estruturas, além do estudo da variabilidade e da probabilidade de ruína.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo bibliográfico explicando a importância da análise de risco e de confiabilidade em projetos de fundação utilizando estacas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre análise de risco de ruína em fundações;
- Validar, por meio do ajuste de dados de solicitação e de resistência através de curvas normais, o cálculo da probabilidade de ruína em fundações por estacas;
- Verificar que o fator de segurança e a confiabilidade estão matematicamente interligados;
- Classificar o risco a partir do índice de confiabilidade.

1.4 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

A partir da estruturação do trabalho, pretende-se despertar uma conscientização sobre o uso de ferramentas estatística de análise de risco para projetos de fundação por estacas, visando o controle de possíveis eventos danosos à estrutura, à vidas humanas e ao meio ambiente.

O estudo bibliográfico feito neste trabalho começa, no capítulo 2, com uma revisão sobre conceitos de probabilidade e estatística que estão envolvidos na determinação da probabilidade de ruína e do índice de confiabilidade. O capítulo ainda traz conceitos sobre fundações, que também são pertinentes ao estudo.

No capítulo 3, temos 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.

Em seguida, o capítulo 4 traz exemplos de aplicação do método estudado no capítulo 3, a fim de termos resultados, mesmo que por um exemplo hipotético, para, a partir deles, podermos entender os níveis de classificação do empreendimento em relação à confiabilidade.

Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais sobre o trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISANDO ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA

Para se levantar informações sobre determinados questionamentos e apresentá-las de modo eficaz, é necessário que se faça uma pesquisa estatística sobre tais, para depois dar o tratamento adequado às informações (variáveis) obtidas.

De acordo com Larson e Farber (2015), a “Estatística é a ciência que coleta, organiza, analisa e interpreta dados para tomadas de decisões”. Desse modo, o trabalho estatístico deve seguir as seguintes fases:

Planejamento → Coleta → Crítica → Apresentação → Análise dos Resultados

Na fase de planejamento é onde se escolhe a população que será estudada e as formas de coletar os dados sobre o que se vai pesquisar. A fase de coleta se baseia na obtenção dos dados, os quais podem ser representados por variáveis quantitativas (numéricas) ou qualitativas (atributos). Após a coleta de dados, temos a fase da crítica destes, na qual se identifica possíveis erros na fase de coleta e pode-se também averiguar se os dados obtidos são, ou não, relevantes para o objetivo da pesquisa. Em seguida é feita a apresentação dos dados organizados a partir de tabelas e gráficos, pois, muitas vezes, o volume de informações obtidas é muito grande e, com essa organização, fica mais fácil de interpretá-los. Por fim é feita a análise dos resultados, objetivando tirar conclusões obtidas a partir da aplicação de métodos da Estatística Inferencial, podendo fazer previsões e também aplicação de ações mitigadoras, caso necessário.

Quando se trabalha com variáveis aleatórias, ou seja, àquelas que são influenciadas pela aleatoriedade, pois resultam de uma soma de fatores não controlados, é comum que se dê um tratamento probabilístico a essas. Este tratamento nos mostrará “a chance” de ocorrência de um determinado evento ocorrer, quando se está trabalhando com esse tipo de variável.

A seguir temos algumas definições importantes, abordadas em Probabilidade e Estatística:

- **População:** é o conjunto de todos os elementos (ou indivíduos) que possuem uma característica em comum, de interesse da pesquisa.
- **Amostra:** é qualquer subconjunto da população.
- **Parâmetro:** é uma medida numérica que descreve as características de uma população.
- **Medida Estatística:** é uma medida numérica que descreve as características de uma amostra.
- **Distribuição de Frequência:** é uma tabela na qual são representados valores ou classes (intervalos) de valores, associados ao número de ocorrência (frequência) de cada valor, ou em cada classe de valores.
- **Histograma:** é a 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 que a escala vertical representa as frequências em cada classe.
- **Experimento Aleatório:** é todo e qualquer experimento, no qual não podemos prever o resultado que será obtido.
- **Espaço amostral:** é o conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório.
- **Evento:** é qualquer subconjunto do espaço amostral.
- **Probabilidade de um Evento:** é um 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:

$$P(E) = \frac{n(E)}{n(U)}, \text{ com } 0 \leq P(E) \leq 1$$

- **Variável aleatória:** é uma função que associa um número real a cada elemento de um espaço amostral, como define Walpole [et al.] (2009). As variáveis aleatórias podem assumir valores finitos, sendo chamadas de *variáveis aleatórias discretas*, como por exemplo: número de estacas para uma certa fundação, número de pilares da obra, etc. Àquelas 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 às 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:
 - I. f(x) não pode ser negativa;
 - II. $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1.$

- **Distribuição Normal:** é uma distribuição de probabilidade contínua, para uma variável aleatória 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 da média;
 - III. A área total sob a curva normal é igual a 1;

- IV. À 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 à 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:

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{e} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n-1}}$$

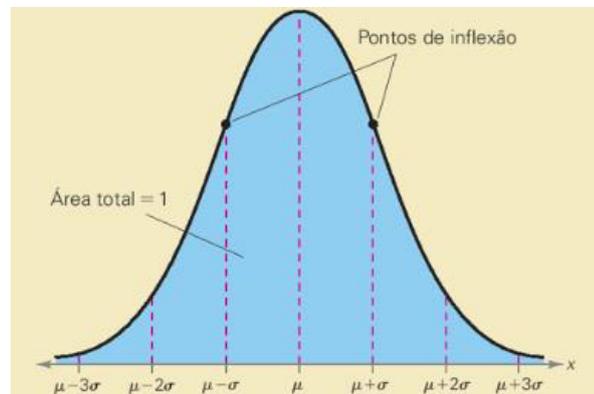


Figura 1 - Gráfico de uma curva normal.

Fonte: LARSON, 2015.

Como Larson (2015) define, uma curva normal com média μ e desvio padrão σ , pode ser representada graficamente através da função densidade de probabilidade normal, pela equação:

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

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 de σ para definir seu formato, como mostra a figura 2.

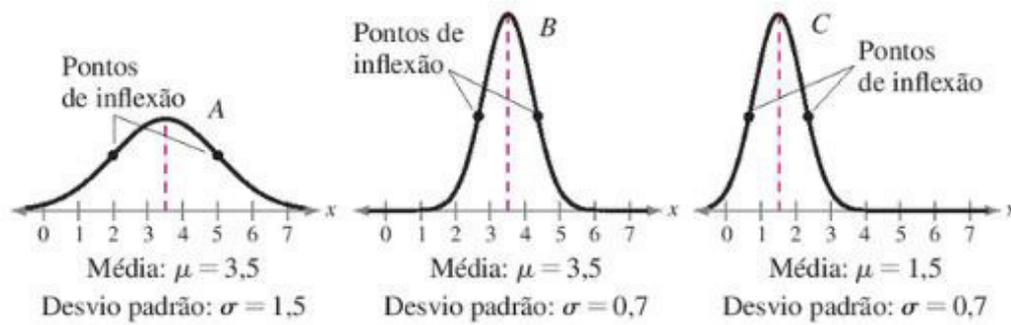


Figura 2 - Formatos de curva normal a partir da influência da média e do desvio padrão.

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 , usamos a fórmula: $z = \frac{x - \mu}{\sigma}$.

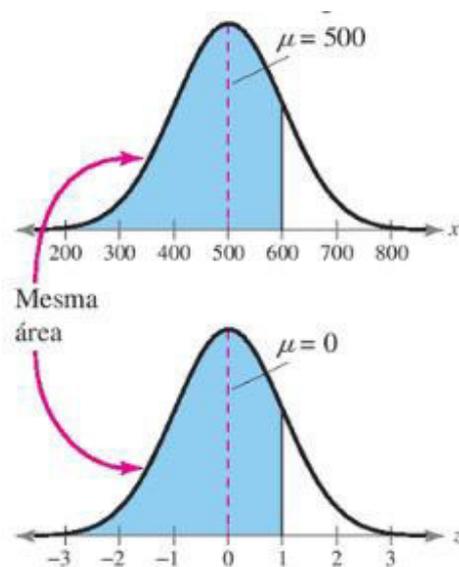


Figura 3 - Curvas normais das variáveis x e z – áreas iguais.

Fonte: LARSON, 2015.

As medidas das áreas para $P(Z \leq z) = A(z)$, são encontradas a partir da Tabela de Distribuição Normal Padrão.

Tabela 1 - Distribuição Normal Padrão.

z	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	0,0004	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	0,0010
-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	0,0047
-2,5	0,0048	0,0049	0,0051	0,0052	0,0054	0,0055	0,0057	0,0059	0,0060	0,0062
-2,4	0,0064	0,0066	0,0068	0,0069	0,0071	0,0073	0,0075	0,0078	0,0080	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	0,0110	0,0113	0,0116	0,0119	0,0122	0,0125	0,0129	0,0132	0,0136	0,0139
-2,1	0,0143	0,0146	0,0150	0,0154	0,0158	0,0162	0,0166	0,0170	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
-1,4	0,0681	0,0694	0,0708	0,0721	0,0735	0,0749	0,0764	0,0778	0,0793	0,0808
-1,3	0,0823	0,0838	0,0853	0,0869	0,0885	0,0901	0,0918	0,0934	0,0951	0,0968
-1,2	0,0985	0,1003	0,1020	0,1038	0,1056	0,1075	0,1093	0,1112	0,1131	0,1151
-1,1	0,1170	0,1190	0,1210	0,1230	0,1251	0,1271	0,1292	0,1314	0,1335	0,1357
-1,0	0,1379	0,1401	0,1423	0,1446	0,1469	0,1492	0,1515	0,1539	0,1562	0,1587
-0,9	0,1611	0,1635	0,1660	0,1685	0,1711	0,1736	0,1762	0,1788	0,1814	0,1841
-0,8	0,1867	0,1894	0,1922	0,1949	0,1977	0,2005	0,2033	0,2061	0,2090	0,2119
-0,7	0,2148	0,2177	0,2206	0,2236	0,2266	0,2296	0,2327	0,2358	0,2389	0,2420
-0,6	0,2451	0,2483	0,2514	0,2546	0,2578	0,2611	0,2643	0,2676	0,2709	0,2743
-0,5	0,2776	0,2810	0,2843	0,2877	0,2912	0,2946	0,2981	0,3015	0,3050	0,3085
-0,4	0,3121	0,3156	0,3192	0,3228	0,3264	0,3300	0,3336	0,3372	0,3409	0,3446
-0,3	0,3483	0,3520	0,3557	0,3594	0,3632	0,3669	0,3707	0,3745	0,3783	0,3821
-0,2	0,3859	0,3897	0,3936	0,3974	0,4013	0,4052	0,4090	0,4129	0,4168	0,4207
-0,1	0,4247	0,4286	0,4325	0,4364	0,4404	0,4443	0,4483	0,4522	0,4562	0,4602
-0,0	0,4641	0,4681	0,4721	0,4761	0,4801	0,4840	0,4880	0,4920	0,4960	0,5000

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Fonte: LARSON, 2015.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE FUNDAÇÕES

A fundação é a parte da estrutura que transmite as cargas para o solo, ou seja, é a parte responsável pela interação solo-estrutura. Dependendo do tipo de edificação, das cargas envolvidas e do tipo de solo, é que podemos decidir qual o tipo de fundação adequada para ser utilizada. Esta fundação pode ser rasa, quando o solo mais superficial tem capacidade de suportar as cargas estruturais, ou profunda, quando o solo próximo a superfície não apresenta rigidez adequada ou quando as cargas aplicadas à fundação são grandes (grandes cargas concentradas).

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.

É de fundamental importância para o projeto de fundação, que se tenha conhecimento sobre a estrutura do solo, a partir do reconhecimento geotécnico, feito por investigações de campo, como sondagens, por exemplo, e das investigações em laboratório, como os ensaios de caracterização, para, a partir dessas análises, serem decididos o tipo de fundação e os critérios de dimensionamento. Cintra [et al.] (2013) alertam que o solo, por ser um material natural, é muito variável quanto à composição e ao comportamento sob carga.

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-Velloso (1975), o Método de Décourt-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).

A prova de carga pode ser feita 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.

3. O RISCO DE RUÍNA EM FUNDAÇÕES

É usual (e correto), na Engenharia, se elaborar projetos que atendam as normas específicas para tais e que, no caso de projetos estruturais, tenham fatores de segurança globais adequados, os quais, no caso de fundações utilizando estacas, baseiam-se na determinação da carga admissível. Desse modo, acredita-se que, se o coeficiente de segurança for elevado, então a obra estará protegida contra qualquer tipo de dano e, conseqüentemente fora da margem de risco de colapso. Esta conclusão, porém, tornou-se ultrapassada, uma vez levada em consideração a análise de confiabilidade, a qual nos trará uma ideia sobre a probabilidade de ruína e mostrará que “não existe risco zero de ruína”, como podem supor algumas pessoas que tomam como base para suas conclusões, apenas 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.

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.

3.1 CURVAS DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA

Em um projeto geotécnico 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 de 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 as curvas de densidade de probabilidade de resistência $f_R(R)$ e de solicitação $f_S(S)$, como mostra a Figura 4.

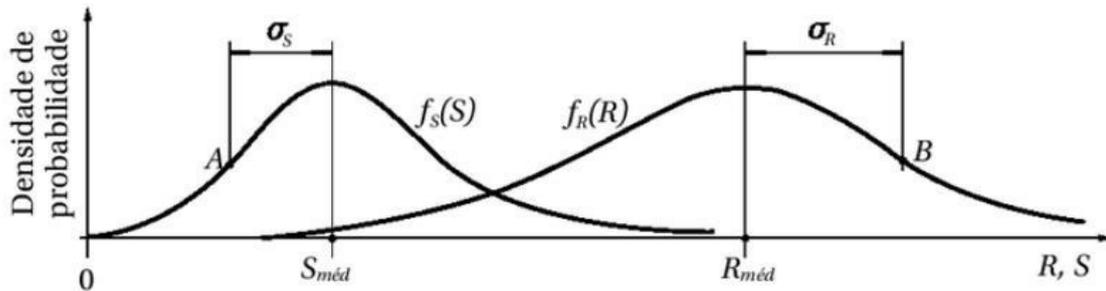


Figura 4 - Curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

As curvas mostradas na Figura 4 são para o caso de distribuição normal. Os valores $S_{méd}$ e $R_{méd}$ mostrados 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 A e B, nas curvas, representam os pontos de inflexão das mesmas, que caracterizam os valores de cada desvio padrão.

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

$$v_S = \frac{\sigma_S}{S_{méd}} = \text{coeficiente de variação da solicitação}$$

$$v_R = \frac{\sigma_R}{R_{méd}} = \text{coeficiente de variação da resistência}$$

Porém, quando falamos de fator de segurança global, envolvemos apenas a razão entre os valores médios de resistência e de solicitação, como segue:

$$F_S = \frac{R_{méd}}{S_{méd}}$$

Observamos, portanto, que o fator de segurança global não leva em consideração a variabilidade de R e S, o que cria uma falsa ideia de que o problema é determinista e, por

consequente, não haverá, sob hipótese alguma, risco de ruína da 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.

Na Figura 4 também podemos observar que, enquanto mais próximos forem os valores médios de solicitação e de resistência, 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 pontilhada, na Figura 5). 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:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(S)F_R(S)dS$$

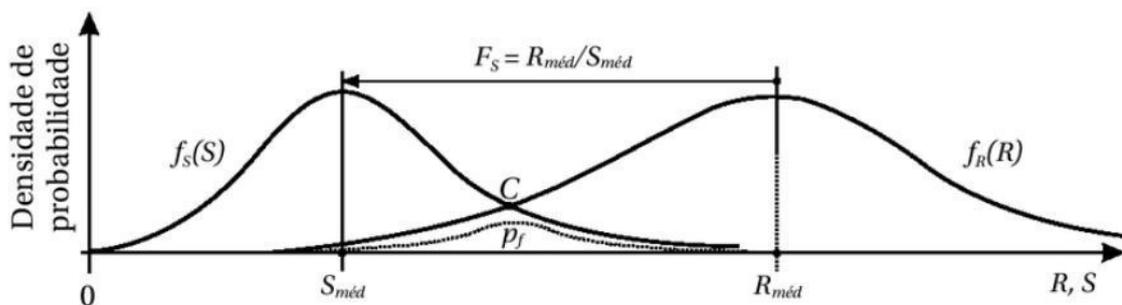


Figura 5 - Curvas de probabilidade de ruína.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

Se o fator de segurança global for diminuído, as curvas de solicitação e de resistência serão aproximadas, acarretando numa maior probabilidade de ruína, como mostra a Figura 6.

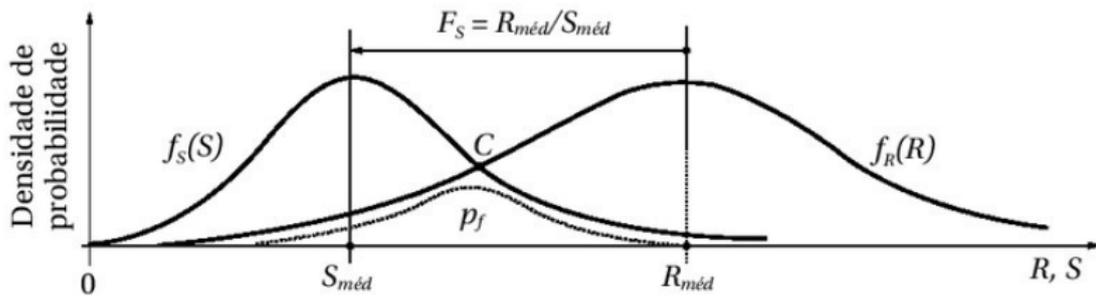


Figura 6 - Aproximação das curvas de solicitação e de resistência.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

Sendo assim, podemos concluir que, quanto menor for o fator de segurança global, mais próximas estarão as curvas de solicitação e de resistência e, conseqüentemente, maior será a probabilidade de ruína. De modo contrário, quanto maior for o fator de segurança global, mais afastadas estarão as curvas de solicitação e de resistência e menor será a 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.

Cintra e Aoki (2010) falam que “trata-se de um mito a crença de que a utilização de um valor adequado de F_S implica a 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 .

3.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

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

3.3 VERIFICAÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA

Um conceito que é muito utilizado na Engenharia, é o de margem de segurança. A função margem de segurança $f_z(Z)$, segundo Cintra e Aoki (2010), é definida pela diferença entre as curvas de resistência R e de solicitação S , se considerarmos que a solicitação e a resistência sejam estatisticamente independentes. Desse modo:

$$f_z(Z) = f_R(R) - f_S(S)$$

Sendo assim, podemos dizer que a fundação sofre ruína quando tivermos $Z \leq 0$, ou seja, quando $R \leq S$ e, de modo recíproco, a fundação não sofrerá ruína quando $Z > 0$, como mostra a figura 8. A área hachurada da referida figura corresponde à probabilidade de ruína da fundação.

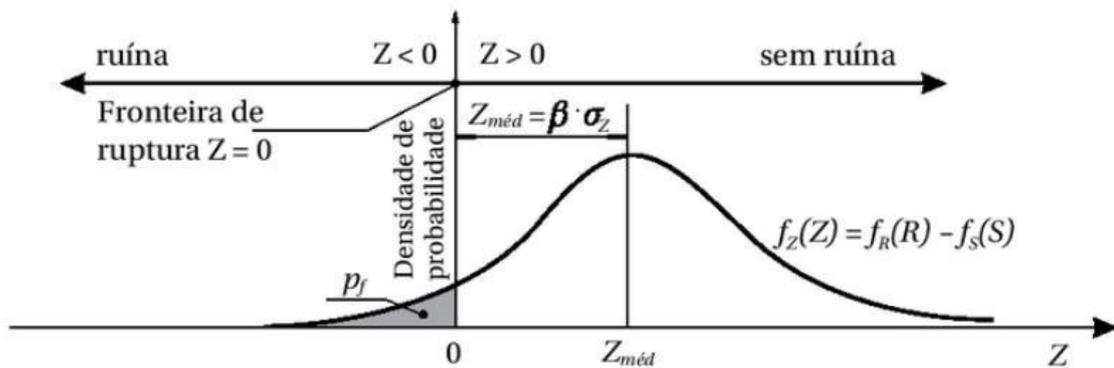


Figura 8 - Gráfico da Função Margem de Segurança.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

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:

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2,$$

ou seja,

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

O valor médio da margem de segurança é

$$Z_{méd} = R_{méd} - S_{méd} \quad (I)$$

Como é sabido que

$$F_S = \frac{R_{méd}}{S_{méd}} \Rightarrow R_{méd} = F_S \cdot S_{méd} \quad (II)$$

então, substituindo em (I), temos

$$Z_{méd} = F_S \cdot S_{méd} - S_{méd}$$

$$\therefore Z_{méd} = S_{méd} \cdot (F_S - 1) \quad (III)$$

3.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

Veremos agora como a segurança e a confiabilidade estão matematicamente relacionadas. Inicialmente vamos definir que o valor médio da margem de segurança ($Z_{méd}$) pode ser escrito em termos de unidade do desvio padrão (σ_Z) através de um parâmetro (β) chamado de índice de confiabilidade:

$$Z_{méd} = \beta \cdot \sigma_Z \quad (IV)$$

Como vimos 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, concluímos que β e p_f são inversamente proporcionais e, mais que isso, que β é uma medida indireta de p_f , do estaqueamento, como fala Cintra e Aoki (2010).

Daí temos, por definição, que o índice de confiabilidade é inversamente proporcional ao coeficiente de variação da margem de segurança:

$$\beta = \frac{z_{méd}}{\sigma_Z} = \frac{1}{v_Z}$$

Por fim, combinando as equações (III) e (IV), vamos obter uma relação entre a margem de segurança, o fator de segurança global e o índice de confiabilidade, para mostrar que esses valores são estatisticamente dependentes, como segue:

$$S_{méd} \cdot (F_S - 1) = \beta \cdot \sigma_Z$$

Elevando os dois membros dessa expressão ao quadrado, vem:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_S^2 - 2F_S + 1) = \beta^2 \cdot \sigma_Z^2$$

Como $\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$, segue que:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_S^2 - 2F_S + 1) = \beta^2 \cdot (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)$$

Vimos que $v_S = \frac{\sigma_S}{S_{méd}}$ e $v_R = \frac{\sigma_R}{R_{méd}}$. Daí:

$$\begin{cases} \sigma_S = v_S \cdot S_{méd} \Rightarrow \sigma_S^2 = v_S^2 \cdot S_{méd}^2 \\ \sigma_R = v_R \cdot R_{méd} \Rightarrow \sigma_R^2 = v_R^2 \cdot R_{méd}^2 \end{cases}$$

Substituindo na expressão acima, temos:

$$S_{méd}^2 \cdot (F_S^2 - 2F_S + 1) = \beta^2 \cdot (v_R^2 \cdot R_{méd}^2 + v_S^2 \cdot S_{méd}^2)$$

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

$$F_S^2 - 2F_S + 1 = \frac{\beta^2 \cdot v_R^2 \cdot R_{méd}^2}{S_{méd}^2} + \frac{\beta^2 \cdot v_S^2 \cdot S_{méd}^2}{S_{méd}^2}$$

Como $F_S = \frac{R_{méd}}{S_{méd}}$, então $F_S^2 = \frac{R_{méd}^2}{S_{méd}^2}$. Portanto:

$$F_S^2 - 2F_S + 1 = \beta^2 \cdot v_R^2 \cdot F_S^2 + \beta^2 \cdot v_S^2$$

Obtendo, por fim, na equação do segundo grau:

$$(\beta^2 \cdot v_R^2 - 1)F_S^2 + 2F_S + (\beta^2 \cdot v_S^2 - 1) = 0$$

Resolvendo essa equação, obtemos a raiz positiva:

$$F_S = \frac{1 + \beta \sqrt{v_S^2 + v_R^2 - \beta^2 v_S^2 v_R^2}}{1 - \beta^2 v_R^2}$$

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.

Cintra e Aoki (2010) dizem que a relação inversa, deduzida por Cardoso e Fernandes (2001), é dada pela expressão:

$$\beta = \frac{1 - \frac{1}{F_S}}{\sqrt{v_R^2 + \left(\frac{1}{F_S}\right)^2 \cdot v_S^2}}$$

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

$$P_f = 1 - \Phi(\beta)$$

onde Φ se trata da função de distribuição normal.

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

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

Desse modo, podemos concluir que não podemos apenas considerar 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 haverá risco de ruína nas fundações por estacas.

Na Figura 9, dada abaixo, temos a relação entre o índice de confiabilidade β e o inverso da probabilidade de ruína $\left(N = \frac{1}{P_f}\right)$.

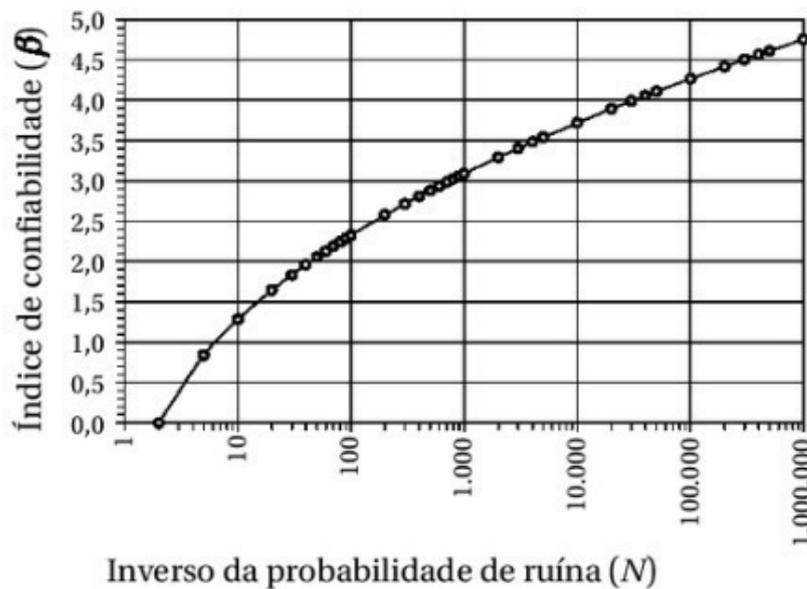


Figura 9 – Curva: índice de confiabilidade x N.

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

3.5 ESTIMATIVA DE VALORES RECOMENDADOS

A Norma Brasileira, NBR 6122/2010, para projetos de execução de fundações 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 a ruína pode acarretar, em termos sociais, econômicos e ambientais.

O risco, por sua vez, depende do tipo de obra e da vulnerabilidade específica do conjunto de elementos estruturais analisado, como cita Aoki (2008).

Aoki (2008) ainda apresenta, para fins de dimensionamento no estado limite último, as diferentes classes de consequências (CC) da ruína previstas no Eurocode EN 1990, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - 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 perda 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 perda de vidas humanas e consequência considerável em termos econômico, social ou ambiental.	Edifício residencial e edifício de escritórios, edifícios públicos onde as consequências da ruína são médias (por exemplo, edifício de escritórios)
CC1	Baixa consequência em termos de perda 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), estufas.

Fonte: AOKI, 2008.

3.5.1 Valores para Probabilidade de Ruína

Segundo Cintra e Aoki (2010), 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) sugere um valor de risco para estabilidade das fundações, da ordem de 1/1.000 a 1/100.000, enquanto que Meyerhof (1969) leva em consideração que, para fatores de segurança de 2 a 3, usados em projetos de fundações, a probabilidade de ruína varia de 1/1.000 a 1/10.000. Cintra e Aoki (2010), ainda falam que, para Whitman (1984), uma indicação para o risco admissível em fundações seria de 1/100 a 1/1.000.

Como indicação preliminar de projeto, Cintra e Aoki (2010) sugerem para valores máximos de probabilidade de ruína de elementos isolados de fundação por estaca, considerando n como o número total de estacas da obra, os seguintes passos:

1. adotar a interpretação frequencista (população finita) e impor limites inferior e superior compatíveis com a literatura, de modo que:

$$\frac{1}{10.000} \leq P_{f_{\max}} = \frac{1}{n+1} \leq \frac{1}{100}$$

2. a critério do projetista, para baixos valores de n , substituir o denominador $n + 1$ por $2n$, $3n$, ou até $5n$, sempre que considerar que n seja um valor baixo, o que fará com que a probabilidade $1/(n + 1)$ seja alta.

As sugestões apresentadas se aplicam às estacas isoladas, lembrando que no caso de grupos de estacas, a iminência de probabilidade de ruína para uma estaca sob 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. Desse modo, a metodologia desenvolvida para estacas isoladas, torna-se conservadora, quando aplicada para fundações com grupos de estacas, como citam Cintra e Aoki (2010).

3.5.2 Valores para os Coeficientes de Variação

Levando em consideração os grupos de estacas, teremos pelo menos duas causas para a variação dos valores de solicitação: o arredondamento no número de estacas do grupo e o fato de que a própria distribuição de cargas entre as estacas do grupo não é homogênea. Desse modo, um valor considerado plausível para o coeficiente de variação da solicitação é de, pelo menos 10%, ou seja, $v_S = 0,10$.

No caso da variação da resistência, como esta é função do tipo de estaca e das condições do solo na qual elas estão sendo implantadas, então, considerando um fator de segurança global igual a 2,0 (por norma), v_S de 10% e v_R entre 10% e 35%, obteve-se a Tabela 3, apresentada a seguir.

Tabela 3 - Valores de Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruína.

v_R	β	P_f
0,10	4,472	1/258.100
0,15	3,162	1/1.280
0,20	2,425	1/130
0,25	1,961	1/40
0,30	1,644	1/20
0,35	1,414	1/13

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

Pela Tabela 3 podemos observar o quanto a 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 probabilidade de ruína, como mostra a Tabela 4, apresentada por Aoki (2008).

Tabela 4 - 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 confiabilidade β	Máxima probabilidade ruína p_f	Valor mínimo fator confiabilidade β	Máxima probabilidade ruína p_f
RC3	5,2	9,964E-08	4,3	8,540E-06
RC2	4,7	1,301E-06	3,8	7,235E-05
RC1	4,2	1,335E-05	3,3	4,834E-04

Fonte: AOKI, 2008.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE RUÍNA A PARTIR DE HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA: CINTRA E AOKI (2010).

Veremos a seguir como calcular a probabilidade de ruína a partir dos histogramas das funções de resistência e de solicitação, referentes à fundação de uma obra, como mostrados na Figura 10.

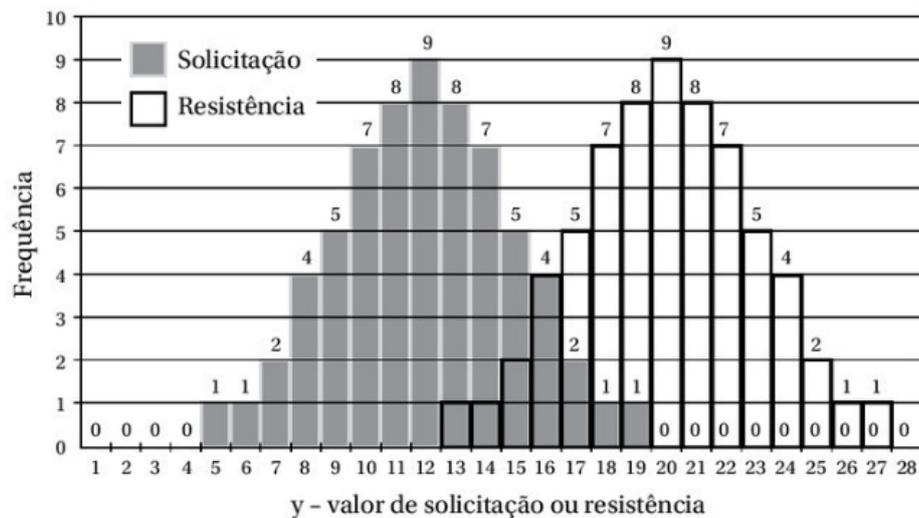


Figura 10 - Histogramas de solicitação e resistência

Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

Na Figura 10, observa-se que o intervalo entre dois valores ao longo do eixo horizontal, chamado de y , é $\Delta y = 1$. Vemos ainda que a soma dos eventos aleatórios é igual a 65 valores para solicitação (S) e 65 valores para resistência (R), escolhidos aleatoriamente, e que os números que consta no topo de cada coluna do histograma indica a quantidade de vezes que ocorreu o determinado evento.

Dáí:

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 13 é $F_R(13) = 1/65$ e a frequência de solicitação $f_S(13) = 8/65$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$1/65 \times 8/65 \times 1 = 8/65^2 \approx 1,893 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 14 é $F_R(14) = 2/65$ e a frequência de solicitação $f_S(14) = 7/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$2/65 \times 7/65 \times 1 = 14/65^2 \approx 3,314 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 15 é $F_R(15) = 4/65$ e a frequência de solicitação $f_S(15) = 5/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$4/65 \times 5/65 \times 1 = 20/65^2 \approx 4,734 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 16 é $F_R(16) = 8/65$ e a frequência de solicitação $f_S(16) = 4/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$8/65 \times 4/65 \times 1 = 32/65^2 \approx 7,574 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 17 é $F_R(17) = 10/65$ e a frequência de solicitação $f_S(17) = 2/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$10/65 \times 2/65 \times 1 = 20/65^2 \approx 4,734 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 18 é $F_R(18) = 11/65$ e a frequência de solicitação $f_S(18) = 1/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$11/65 \times 1/65 \times 1 = 11/65^2 \approx 2,604 \times 10^{-3}$$

- a probabilidade de ocorrência de valores de resistência menores ou iguais a 19 é $F_R(19) = 12/65$ e a frequência de solicitação $f_S(19) = 1/85$. Desse modo, para o intervalo $\Delta y = 1$, temos a seguinte frequência de ocorrência de ruína:

$$12/65 \times 8165 \times 1 = 12/65^2 \approx 2,840 \times 10^{-3}$$

O somatório desses produtos nos dá a probabilidade de ruína:

$$P_f = (8 + 14 + 20 + 32 + 20 + 11 + 12)/65^2 = 117/65^2 = 1,8/65 \approx 1/36$$

Isso implica dizer que teremos, aproximadamente, um caso de ruína a cada 36 eventos.

4.2 EXEMPLO HIPOTÉTICO USANDO PLANILHA EXCEL

A partir das fórmulas apresentadas no Capítulo 3, podemos montar uma planilha Excel para a análise estatística da Probabilidade de Ruína e cálculo do fator de confiabilidade. Obtidos os valores nessa planilha, podemos, por exemplo, verificar se a obra apresenta níveis aceitáveis de confiabilidade e de probabilidade de ruína.

A Tabela 5, apresentada por Oliveira (2013), adaptada por Aoki (2011) e originalmente apresentada por Clemens (1983), nos mostra a classificação dos níveis de ocorrência de Probabilidade de ruína e uma estimativa de tempo e frequência de recorrência desse evento para intervalos de valores de β . Sendo assim, se $-7,94 \leq \beta < 0,00$, teremos certeza de ocorrência de ruína; se $0,00 \leq \beta < 0,52$, termos 50% de chance de ruína; e assim por diante.

Tabela 5 - Tempo e Frequência de recorrência em função do índice de confiabilidade.

β	Ocorrência	Tempo de Recorrência	Frequência	Nível de Risco	Nível de Prob.	pf
-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	1.000 anos	A cada milênio		3×10^{-6}	0,000003
7,27	Nunca	5,475E+12	Idade do Universo		0	1,82E-13

Fonte: OLIVEIRA, 2013.

A seguir apresentam-se possíveis resultados de resistência, para ensaios de prova de carga estática em estacas, e mostram-se os valores obtidos das variáveis que foram analisadas nesse trabalho de pesquisa, além do valor de N que é o inverso da probabilidade de ruína.

A partir dos índices obtidos, podemos compará-los aos valores dados na Tabela 5, para podermos classificar a obra, quanto ao nível de risco.

No primeiro exemplo hipotético, mostrado na Tabela 6, temos os resultados de PCE's em 12 estacas, cujas resistências estão representadas na coluna R_i .

De posse dos valores das cargas, faz-se a escolha do coeficiente de segurança global para a estrutura de fundação e, em seguida, escolhe-se um coeficiente de variação de solicitação, para daí poder encontrar os demais resultados, referentes à análise estatística.

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

NÚMERO DE PROVAS DE CARGA		$n =$	12	
RESISTENCIA	Número provas carga estáticas	$n \geq 2$	12	R_i
	Resistência média	R_{cm}	847	1150
	Resistência mínima	R_{min}	500	730
	Resistência característica	R_{ck}	500	500
	Desvio padrão	σ_R	211	1150
	Coeficiente variação	v_R	0,25	730
	Coeficiente 3 norma	ξ_3	1,00	990
Coeficiente 4 norma	ξ_4	1,00	800	
SOLICITAÇÃO	Solicitação média	μ_s	212	570
	Coeficiente variação	v_s	0,18	1140
	Desvio padrão	σ_s	38	980
	Solicitação característica	S_k	274	690
SEGURANÇA	Fator segurança global	F_s	4,00	730
	Fator segurança característico	F_k	1,82	
	Fator parcial resistência	γ_R	1,69	
	Fator parcial solicitação	γ_s	1,30	
	Fator parcial majoração carga	γ_f	1,40	
	Fator parcial minoração resistenc	γ_m	1,30	
CONFIABILIDADE	Margem segurança média	μ_M	635	
	Desvio padrão	σ_M	214	
	Coeficiente variação	v_M	0,337	
	Fator de confiabilidade	β	2,965	
	Probabilidade ruína	p_f	0,001513	
	Inverso probabilidade ruína (dias)	$1/p_f$	661	

Fonte: Arquivo Excel fornecido pelo Prof. AOKI.

Observemos que foram adotados um coeficiente de segurança global $F_S = 4,0$, o qual ultrapassa o valor recomendado em norma, e um coeficiente de variação de solicitação $v_S = 0,18$. A resistência média dessa amostra foi obtida pela relação $R_{cm} = \frac{\sum_1^n R_i}{n}$. Os valores dos fatores ξ_3 e ξ_4 foram escolhidos pela Tabela 7, em função do número de prova de carga em estacas de mesma característica n , segundo a NBR 6122/2010.

Tabela 7 -Valores de ξ_3 e ξ_4 em função de n

n	1	2	3	4	≥ 5
ξ_3	1.14	1,11	1,07	1,04	1,00
ξ_4	1.14	1,10	1,05	1,02	1,00

Fonte: NBR 6122/ 2010.

O valor da resistência característica é obtida pela relação de comparação $R_{CK} = \text{MIN}[R_{méd}/\xi_3 : R_{mín}/\xi_4]$ e, da curva normal de resistência característica do concreto, temos que $R_{CK} = R_{méd} - 1,645 \cdot \sigma_R$, daí, o valor de σ_R foi calculado pela relação $\sigma_R = (R_{méd} - R_{CK})/1,645$. O valor do coeficiente de variação da resistência foi então obtido através da relação $v_R = \frac{\sigma_R}{R_{méd}}$.

A solicitação média foi obtida pela razão $S_{méd} = \frac{R_{méd}}{F_S}$ e o desvio padrão da solicitação, pela relação $\sigma_S = v_S \cdot S_{méd}$. Da curva característica do concreto para solicitação, temos que $S_K = S_{méd} + 1,645 \cdot \sigma_S$, daí, o fator de segurança característico será dado por $F_K = \frac{R_{CK}}{S_K}$.

O fator parcial de resistência é obtido pela razão $\gamma_R = \frac{R_{méd}}{R_{CK}}$. Para obter o fator parcial de solicitação, foi usada a relação $\gamma_S = \frac{S_K}{S_{méd}}$ e o fator parcial de majoração de carga utilizado, por norma, foi $\gamma_f = 1,40$. Daí, obteve-se o valor do fator parcial de minoração da resistência, dado por $\gamma_m = \frac{F_S}{\gamma_S \cdot \gamma_R \cdot \gamma_f}$.

Na parte da confiabilidade, a margem de segurança foi calculada por $Z_{méd} = R_{méd} - S_{méd}$, o desvio padrão por $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$, o coeficiente de variação por $v_Z = \frac{\sigma_Z}{Z_{méd}}$, o

fator de confiabilidade por $\beta = \frac{1}{vz}$, a probabilidade de ruína por $P_f = 1 - \text{DIST.NORM}(\beta;0;1;\text{VERDADEIRO})$ e o inverso da probabilidade de ruína por $N = \frac{1}{P_f}$.

Ao compararmos o valor obtido para o fator de confiabilidade, que foi $\beta = 2,965$, onde $2,75 \leq \beta < 3,43$, concluímos que a ocorrência de ruína é classificada como OCASIONAL e o tempo de ocorrência é de $\frac{661}{365} \approx 1,8$ anos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Surgindo como mais uma ferramenta para auxiliar no dimensionamento e no controle de segurança de obras de Engenharia, a Análise de Risco se mostra indispensável, uma vez que fica clara a atuação de eventos aleatórios nos processos de concepção e execução, ocasionados pela variabilidade dos materiais, do solo, das condições de execução, dentre outras.

Durante a pesquisa bibliográfica feita neste trabalho, percebeu-se a inter-relação entre o fator de segurança global e o índice de confiabilidade, o que reforça a necessidade de se fazer uma análise probabilística de risco para casos de obras de fundação, já que nessas obras devemos considerar a interação do conjunto solo-estrutura. Desse modo, pôde-se concluir que, apenas o fator de segurança global, se torna insuficiente para afirmarmos que uma obra é, ou não, segura.

Para se tirar conclusões relevantes a partir da Análise de Risco, devem-se escolher parâmetros adequados e fazer ensaios de prova de carga para determinação das cargas de solicitação e de resistência, para cada estaca, salientando que, se um mesmo projeto de fundação for executado em dois locais diferentes, teremos como resultado probabilidades de ruína diferentes, devido à influência dos eventos aleatórios já citados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros,

- fazer Análise de Risco para uma obra real em João Pessoa, partindo dos resultados de PCE's, para que se tenha um perfil de probabilidade de ruína na respectiva obra;
- verificar a Análise de Risco Econômico-Financeiro, atrelada à Análise de Risco de Ruína, para que o proprietário da obra tenha noção, em termos de custo, de quanto sua obra é devidamente segura;
- considerar outros tipos de curvas estatísticas de ajuste para os valores de solicitação e de resistência;

- verificar outros tipos de Análise Estatística e de simulação, para que se possa fazer comparação de resultados entre diferentes métodos de análise.

6. 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. (2011). *A probabilidade de ruína e os fatores de segurança em fundações*. 7^a. Palestra ABMS, CD-ROM, Recife, Brasil.
- AOKI, N. (2008). *Dogma do fator de Segurança*. VI Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 1: 9-42.
- BUDHU, M. (2017). *Fundações e estruturas de contenção*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. (2010). *Fundações por Estacas: projeto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CINTRA, J. C. A. [et al.] (2013). *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- 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.