

Proposta para Estimativa da Vida Útil nas Fundações do Tipo Estaca Escavada em Silo Armazenador de Grãos Considerando a Probabilidade de Ruína. Estudo de Caso em Alvorada-To

Paulo Ricardo Francisco Ramalho

ITPAC, Porto Nacional, Tocantins- Brasil, ricardopaulo1@hotmail.com

Heverton Aarão Rosa de Freitas

ITPAC, Porto Nacional, Tocantins- Brasil, heverton_engenhariacivil@hotmail.com

Alexandre Cerqueira de Jesus

ITPAC, Porto Nacional, Tocantins- Brasil, 1741@prof.itpacporto.com.br

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo estimar o tempo de vida útil das estacas escavadas que compõem as fundações do silo em diferentes estágios de patologia que repercutem na capacidade de carga das mesmas. Para tais análises foram utilizados métodos probabilísticos correlacionados ao índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruína (P_f) que levam em consideração a variância da resistência e solicitações ao longo do tempo. Baseado nas respostas obtidas e utilizando-se de um modelo estocástico desenvolvido para determinação do índice de confiabilidade em função do tempo é determinado a curva de vida útil ou curva de desempenho da fundação para diferentes níveis de patologia nas fundações. Os resultados obtidos indicam que a uma redução em cerca de vinte por cento da vida útil da fundação quando há uma redução da capacidade de carga das estacas condicionando a fator de segurança global inferiores a dois e parâmetro beta inferior a 3,0. Observou-se que para os primeiros dez anos, independente do grau da patologia o decréscimo da vida útil é maior se comparado para uma condição normal.

PALAVRAS-CHAVE: Silos, Fundações, Probabilidade de Ruína, Vida útil.

1 INTRODUÇÃO

Com a entrada em vigor da norma de desempenho (NBR 15 575) a partir de 2013, uma das preocupações e atribuições do projetista é definir a vida útil de projeto cujo conceito refere-se o tempo durante o qual a edificação ou seus sistemas devem atender aos requisitos de desempenho indicados.

A fundação por se tratar de elemento estrutural importante é sem dúvida um grande desafio para engenharia geotécnica a previsão da vida útil destes elementos, tendo em vista o grau de variabilidade relacionadas as solicitações e resistência, bem como os aspectos relacionados a construção.

Diante da necessidade de se estabelecer a vida útil de um sistema estrutural e em especial

da fundação conforme é preconizado pela norma de desempenho (NBR 15 575) é apresentada uma metodologia baseado nos conceitos de confiabilidade de materiais largamente utilizados pela engenharia aeronáutica transmutada para as necessidades da engenharia geotécnica através dos conceitos de probabilidade de ruína.

2 MATERIAS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em um silo em construção localizado na zona rural do município de Alvorada - TO. Esse silo terá por finalidade armazenar os grãos de soja coletados na região sul do estado do Tocantins. A Figura

1 apresenta a localização do silo



Figura 1 – Localização do Silo de Armazenamento.

O silo apresenta sua estrutura formada por uma base (anel) de diâmetro de 14,6 metros confeccionada em concreto armado usinado com f_{ck} 25 Mpa de resistência e controle tipo B. O corpo ou célula do silo será construído em chapas metálicas de espessura 2,5 mm com altura útil de 92 mm a altura padrão do silo mede 15,00m, apresentando um volume máximo de estocagem aproximado de 2580 m³ de grãos e capacidade máxima de 1880 toneladas. A seguir apresentam-se alguns registros fotográficos e representações gráficas do silo.

2.1.1 Fundações

O Projeto de fundações é composto de 46 estacas escavadas de 11 metros de comprimento e diâmetro de 500 mm. A Figura 2 apresenta a disposição das estacas no anel de concreto que servirá de base para o silo.

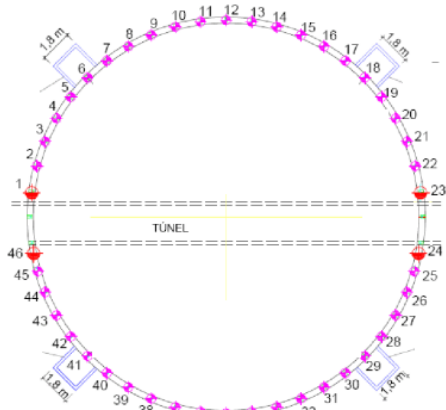


Figura 2 – Detalhe do Projeto de Fundações.

Em função da posição da estaca em relação as

sondagens, verifica-se que a capacidade de carga isolada da estaca variava de 628 a 1270 kN.

Esse valores de resistência esta relacionada a capacidade geotecnica da fundação, entretanto para este trabalho foram determinados valores de capacidade de carga considerando a perda de resistencia da estaca devido a contaminação do concreto com solo, durante a exução da estaca. Estes valores indicaram que a capacidade de carga da estaca isolada variava entre 97 a 980 kN.

2.2 Plano de Trabalho

Para o desenvolvimento deste artigo foram realizadas três etapas distintas de trabalho. A primeira etapa foi a coleta de dados a respeito dos aspectos de projeto da fundação do silo, através do levantamento das solicitações e características geométricas do silo e tipologia da fundação. Nesta etapa também foram coletadas informações sobre as características geotecnicas do solo.

A segunda etapa foi destinada a realização de ensaios para caracterização do solo, bem como a determinação da capacidade estrutural da estaca, através da expressão (1) apresentada abaixo.

$$N_d = 0,85 * A_c * \frac{f_k}{1,8} \quad (1)$$

Onde:

N_d – Capacidade de Carga Estrutural da Estaca

A_c – Seção Transversal da Estaca

f_k – Resistência a compressão da Estaca

Foram realizados ensaios para determinação da resistência a compressão do concreto considerando diferentes níveis de contaminação do solo (10 % , 30% e 50%).

A última etapa consistiu na determinação da probabilidade de ruína através de diferentes modelos de curva de variabilidade de resistência obtidas através de simulação de Monte Carlo para diferentes condições de contorno. (níveis de patologia).

Diante das curvas de densidade probabilística obtidas para resistência e solicitação foram determinados os valores de probabilidade de ruína e índice de confiabilidade (β).

Por fim foram definidos através do modelo proposto de Simonetti (2009) a curva de desempenho da fundação (Curva de vida útil) em função da probabilidade de Ruína calculada.

2.2.1 Simulação Monte Carlo e Probabilidade de Ruína

Para a determinação das curvas de densidade de probabilidade para as solicitações e Resistência foi utilizado o método de Monte Carlo.

Esse método consiste em atribuir um valor para cada variável aleatória e de acordo com a distribuição de probabilidade assumida, obtém-se um resultado da função de performance que é armazenado.

Esses números aleatórios são gerados dentro do intervalo ($\mu \pm \sigma$), onde (μ) representa a média e o (σ) desvio padrão da variável, obedecendo uma curva de distribuição probabilística. Para o presente trabalho foi adotada a distribuição normal como a curva de função de densidade.

O conceito de probabilidade de ruína foi apresentado por diversos autores. Aoki (2002) afirma que a probabilidade de ruína está associado a um índice de confiabilidade através da seguinte expressão

$$Pf = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

A confiabilidade é obtido através da posição relativa e do grau de dispersão das curvas de densidade de probabilidade da solicitação e da resistência., cuja expressão final é apresentada abaixo:

$$\beta_1 = \frac{R_m - S_m}{(\sigma_s^2 + \sigma_R^2)^{0,5}} \quad (3)$$

Onde : (3)

σ_s é o desvio padrão das solicitações, σ_R é o desvio padrão das resistências;

R_m a resistência média e S_m a solicitação média.

Segundo Aoki (2005), na área de engenharia de fundações são considerados aceitáveis valores de índice de confiabilidade superiores a 3,09, que conduzem a probabilidades de ruína inferiores a 1/1000 eventos.

2.2.2 Curva de Vida útil – Modelo de Simonetti

Existem diferentes métodos para se determinar o tempo de Vida útil de uma estrutura. Dentre elas pode-se destacar os métodos probabilísticos se refere às técnicas de tratamento estatístico empregadas nos cálculos de vida útil prevista (VUP). Esses métodos estuda a probabilidade de ocorrência das alterações das estruturas analisadas (SOUSA, 2008).

Em geral é elaborado um modelo de degradação que demonstre seu comportamento ao longo do tempo de utilização. A análise de vida útil baseada em um estudo que considera a probabilidade estática do desempenho da estrutura fornece resultados mais condizentes com a realidade.

Nesse aspecto os métodos probabilísticos se mostram bastante promissores na engenharia aeronáutica se utiliza de métodos que correlaciona o índice de confiabilidade em função do tempo (β).

SIMONETTI et al. (2009) apresentaram a seguinte expressão, baseado em uma densidade probabilista Weibull:

$$C(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Essa expressão tenta traduzir a curva de desempenho da estrutura afetada por Ações relacionadas com fenômenos físicos e químicos;

Onde a ação inicial lenta com um potencial de degradação crescente ao longo do tempo. Tal modelo é adequado para ser utilizado em estruturas enterradas como o caso de fundações.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Geotécnica

Os resultados obtidos através de sondagens de simples reconhecimento indicam que a região é formada por solo residual de textura silto-arenosa de cor avermelhada com a profundidade média de dois metros. Subsequente a esta camada arenosa, apresenta-se um solo de textura silto-argilosa cor variegada. As sondagens revelaram que entre o contato das duas camadas há presença de nível de água.

Os valores de resistência a penetração apresentam crescimento com a profundidade indicando que as primeiras camadas o solo apresenta consistência mole - média e nos últimos metros com consistência dura a Rija.

A Figura 3 apresenta a síntese dos resultados obtidos nas oito sondagens realizadas no em torno da obra, mostrando os valores médios de resistência a penetração, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

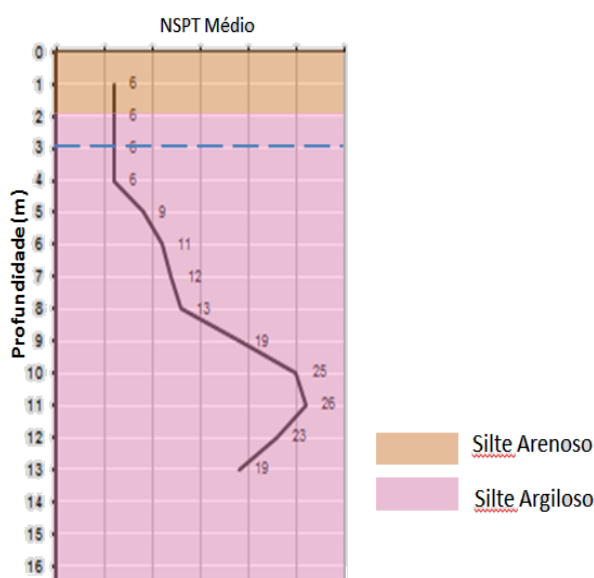


Figura 3. Perfil geotécnico com valores de N-SPT médio

Além das sondagens realizadas, foi retirado amostras deformadas de solo nas camadas iniciais para caracterização granulométrica do solo. A Tabela 1 sintetiza os resultados obtidos para as camadas de solo.

Tabela 1 – Caracterização Granulométrica

Granulometria (%)				ρ_s	Limite (%)		
Argila	Silte	Areia	Ped.		wl	wp	IP
2,2	82,5	15,3	0	2,73	42	22	20

3.2 Caracterizações das Solicitações e Resistência

Os principais carregamentos atuantes no projeto de silos são devidos aos materiais armazenados. Porém, devem ser considerados outros carregamentos, não menos importantes, como as cargas acidentais dos equipamentos e os esforços, devido o atrito provocado pelo material armazenado nas paredes dos silos.

As solicitações sobre a fundação podem ser diretas (peso próprio do anel, tensão vertical devido o peso próprio do material armazenado) ou ações indiretas provenientes da reação das paredes.

Considerando o armazenamento de arroz, milho, soja e trigo como os principais produtos a serem armazenados no silo e levando em consideração que carga será transmitida diretamente para o solo através da base da laje de fundo e outra parte será transmitida para as estacas, foram considerados os coeficientes de transferência de carga de 0,3 e 0,7 conforme preconiza Fank et al (2015) e portanto obtemos a seguinte expressão para a faixa de variação de carregamento para cada estaca:

$$S_d = 251,45 \pm 93,4 \text{ (kN)} \quad (5)$$

Para os valores de resistência (capacidade de carga da estaca) foram utilizado diferentes modelos de resistência em função das condições de contorno distintas obtidas através da expressão (I) quando a ruptura da fundação ocorrer pelo elemento estrutural e pelo método de determinação de capacidade de carga Decourt e Quaresma (1978) quando a ruptura ocorrer pelo solo. A Tabela 2e dos resultados experimentais realizados.

Tabela 2 – Valores Típicos de Capacidade de Carga da Estaca isolada

Integridade da Estaca	Resistência (kN)	
	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)

Padrão	891,62	147,69
A	620,21	121,72
B	399,83	67,94
C	68,22	24,68

Consideraram-se os seguintes níveis de integridade da estaca:

- Padrão – Estaca sem qualquer tipo de Patologia
- Padrão A – Estaca com 10% do volume de concreto contaminado com solo.
- Padrão B – Estaca com 30% do volume de concreto contaminado com solo.
- Padrão C – Estaca com 50% do volume de concreto contaminado com solo.

3.3 Simulações Monte Carlo

Diante destes valores médios e desvio padrão para as solicitações e resistência e utilizando-se da simulação de Monte Carlo para geração de dados aleatórios (10 000 pontos) seguindo uma distribuição normal, definiu-se a curva de função de probabilidade de solicitações e resistência, apresentada nas Figuras 4 e 5.

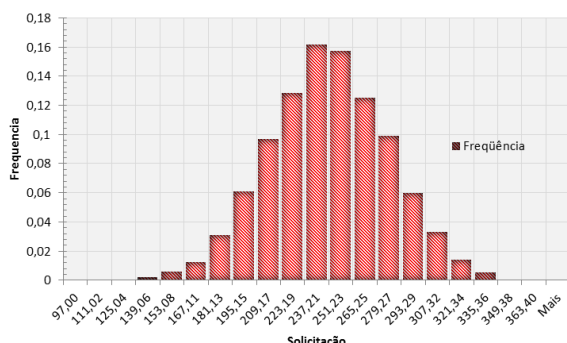


Figura 4 – Simulação Monte Carlo para Solicitações

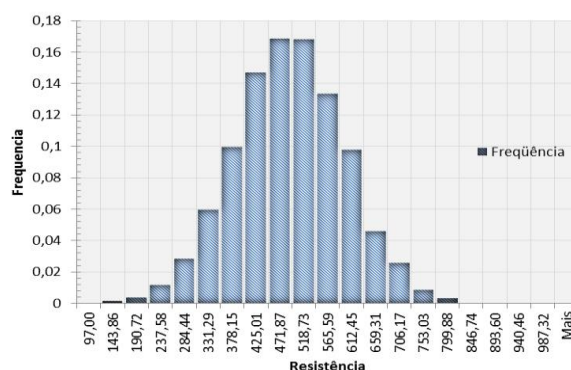


Figura 5 – Simulação Monte Carlo para Resistência

3.4 Probabilidade de Ruína

De acordo com as expressões apresentadas nas equações 2 e 3 e nas informações apresentadas nas Figuras 4 e 5, foram calculados os valores de probabilidade de ruína e índice de confiabilidade da fundação e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores Probabilidade de Ruína e Confiabilidade calculados para diferentes níveis de Patologia.

Integridade da Estaca	Critério de Segurança	
	Prob.Ruína (pf)	Desvio Padrão (β)
Padrão	0,046	4,32
A	0,156	3,04
B	0,375	3,15
C	2,000	-3,95

A Figura 6 apresenta um dos modelos analisados das curvas de solicitação e Resistência, onde a para determinação do índice de confiabilidade é analisada a zona de interpolação entre a curva de distribuição normal de solicitação e a curva de distribuição normal de resistência, conforme Figura abaixo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

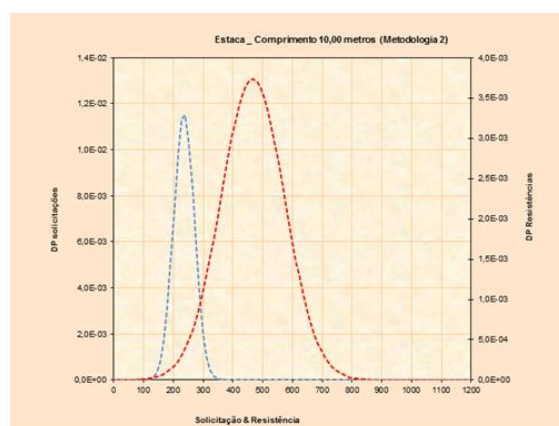
O presente trabalho apresentou um estudo de caso onde se analisou e propôs uma estimativa de vida útil considerando a probabilidade de ruína das fundações do tipo estaca escavada, executada em um silo localizado na zona rural do município de Alvorada -TO distante 304 Km da capital Palmas –TO.

A partir da análise, adotando o método probabilístico proposto por Cintra e Aoki (2005), foi descritas as curvas de solicitação e resistência utilizada para cálculo dos dados necessários para o dimensionamento das estacas do silo objeto deste estudo de caso. Considerando a amostra padrão obtive se os seguintes resultados: Desvio Padrão (σ) de 147,69; Variância (v) de 0,17; Probabilidade de Ruína (P_f) de 0,046; Parâmetro índice de confiabilidade (β) de 4,325833 e Coeficiente de Segurança (C_s) de 3,78.

Este estudo de caso permitiu confirmar as afirmativas contidas no trabalho de Cintra e Aoki (2005), onde através da curva de solicitação e resistência é observada a interdependência do fator do segurança (F_s) a distribuição da solicitação e resistência com a probabilidade de ruína (P_f).

Ao analisar o gráfico de estimativa de vida útil, nota-se que ocorre a interferência da porcentagem de contaminação por solo no desempenho ao longo do tempo, pois as amostras com mais contaminação por solo deixaram de ter desempenho absoluto em menos tempo.

Observou-se que o concreto com o traço padrão obteve o melhor desempenho, pois permaneceu por mais tempo sobre o eixo de desempenho absoluto, decaindo menos que as outras amostras a partir de 30 anos de utilização. A amostra com 10% ficou entre a amostra padrão e a de 30%, permanecendo no eixo de desempenho absoluto até os dez anos de utilização. A amostra com 30% de solo desviou-se do eixo absoluto ainda nos primeiros cinco anos de utilização. Já a amostra com 50% de solo não foi demonstrada no gráfico, pois não atingiu desempenho suficiente para suportar o carregamento crítico que ocorre no momento do completo carregamento do silo.



FONTE: Arquivo próprio, (2015).

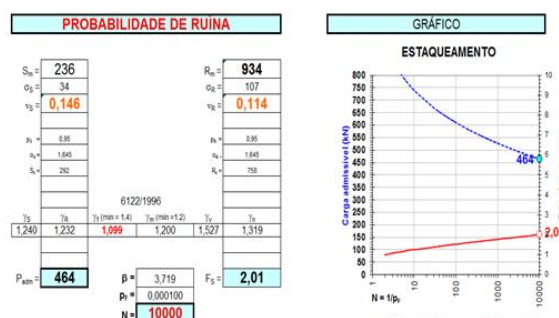


Figura 6 – Envoltória de Probabilidade de Ruína

3.5 Vida útil

O modelo de comportamento da vida útil para as condições de contornos utilizados neste trabalho são apresentadas na Figura 7.

O modelo foi desenvolvido a partir da relação entre o índice de confiabilidade (β) e tempo de vida útil e a função de confiabilidade (expressão 4), obedecendo uma distribuição Weibull.

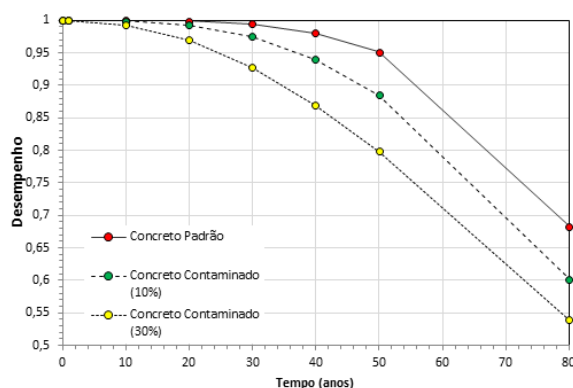


Figura 7 – Curvas de Vida Útil para as fundações.

Adotou-se o tempo de vida útil padrão de 50 anos, conforme se preconiza na Norma 15575/2010.

A análise considerando o combinatório do índice de confiabilidade (β) descrito por Cintra e Aoki (2005) e a Distribuição bi - paramétrica de Weibull até então não descrita na literatura se mostrou satisfatória como ferramenta para análise estimativa de vida útil em fundações do tipo estaca escavada para silos.

Esse método além de fornecer as vantagens intrínsecas da metodologia Cintra e Aoki (2005), acrescentou os conceitos inovadores baseados na durabilidade característicos da engenharia da confiabilidade.

Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SIMONETTI, MARCELO J. et al (2009). A Importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos da distribuição de Weibull. Revista Sapere, Tatui, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos (ITPAC-PORTO) através da COPPEX, pelo apoio dado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6122 (2010): projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro. 170 p.

AOKI, Nelson (2005). Segurança e confiabilidade de fundações profundas. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 2005. P 1-15.

DÉCOURT, Luciano; QUARESMA, Artur R.(1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. 1978. p. 45-53.

FANK, MarivoneZ. et al (2015). Coeficiente de transferência de carga nas fundações de silos verticais cilíndricos. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v. 19, n. 9, p. 887-891,.

NETO J. P. L.; NASCIMENTO J.W. B.; FANK. E Z.(2014) Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.18, n.6, p.652–657,Campina Grande.

SANTOS, M. R. P.(2010) Metodologias de previsão da vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção. Revisão bibliográfica. Dissertação De Mestrado. Departamento de Engenharia Civil Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto.

SILVA, J. L(2007). Metodologia de Projeto de Fundação por Estacas Incluindo probabilidade de Ruína. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de