

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS, APLICADOS A ESTACA TIPO HÉLICE-CONTÍNUA

Carolina Tami Kuboyama¹, Kurt André Pereira Amann²

^{1,2} Engenharia Civil, Centro Universitário FEI

carolinakuboyama@hotmail.com, kpereira@fei.edu.br

Resumo:

O presente trabalho propõe o estudo acerca do conceito de “aplicabilidade” dos métodos semiempíricos de capacidade de carga de estacas a partir de uma metodologia estatística para avaliá-la. Classificou-se os métodos quanto à sua acurácia e segurança dentro do conceito de aplicabilidade.

1. Introdução

A aplicabilidade de alguns métodos semi-empíricos em solos específicos, têm sido vastamente abordados em diversos ramos acadêmicos. Entretanto, o conhecimento estatístico dos métodos estudados é restrito quando se compara um com o outro. Propôs-se um estudo com base estatística para se classificar um dado método semi-empírico como “a favor da segurança”, “acurado”, ou “contra a segurança”, comparando-se os mesmos com diferentes critérios de ruptura.

2. Métodos e Procedimentos

A metodologia embasou-se no teste de hipótese ‘t’ de Student para amostras pareadas (fig.1), de modo a comparar o conjunto de valores calculados pelos métodos semiempíricos com os valores obtidos de critérios de ruptura aplicados às curvas carga-recalque de ensaios de prova de carga. Para os casos em que os conjunto de dados não se demonstrou seguindo uma distribuição de probabilidade Normal, os autores realizaram a dedução matemática para aplicação do teste ‘t’ a variáveis com distribuição Lognormal, que se demonstrou adequada ao conjunto de dados analisado. O estudo foi desenvolvido por meio do banco de dados da estaca raiz, extraído da Dissertação de Mestrado de Amann (2000) [1], onde analisou-se os métodos semiempíricos de Aoki-Velloso (AV) e David Cabral (CA), que foram comparados com o critério de ruptura de Van der Veen (VDV). O mesmo estudo foi realizado sobre o banco de dados de 48 estacas do tipo Hélice-Contínua de Falconi et al (1999) [2], no qual comparou-se os métodos de Décourt-Quaresma (DQ), Alonso (AL) e Antunes e Cabral (ACPR) com Van der Veen (VDV).

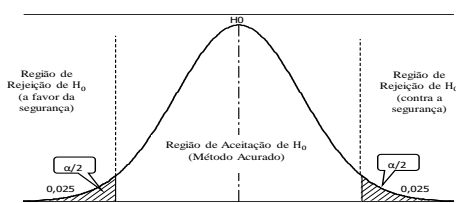


Figura 1- Regiões de classificação dos métodos pelo teste de hipótese bilateral ‘t’ de Student para amostras pareadas.

Critério de Ruptura de Van der Veen (1953)

O critério de Van der Veen, com o qual se vai comparar cada um dos métodos anteriores, baseia-se na definição da carga de ruptura segundo um ajuste exponencial da curva carga(P)–recalque (δ), dado por:

$$P = P_R \cdot (1 - e^{-(a\delta + b)}) \quad (1)$$

A linearização de (1) para regressão linear fica (2):

$$a\delta + b = -\ln\left(1 - \frac{P}{P_R}\right) \quad (2)$$

Onde: "P" é a carga aplicada durante o ensaio de carga de estaca; P_R é a assíntota da exponencial, obtida por tentativas até que se obtenha uma reta e representando o valor de ruptura extrapolada; "a" é coeficiente angular da reta de regressão; "b" é o intercepto da reta de regressão, proposto por Aoki (1976).

Os resultados de P_R dados por este critério representam os valores de ruptura extrapolada matematicamente, obtidos no ensaio de prova de carga quando a ruptura física por afundamento rápido da estaca não for verificada.

Os autores aprofundaram o estudo sobre a estaca raiz, incorporando o método Décourt-Quaresma e o critério de ruptura da NBR6122, no trabalho de Amann et al (2018) [3].

Quando os limites inferior e superior dos intervalos de confiança resultarem negativos, a classificação dos métodos será “a favor da segurança” (ou conservador); positivo, “contra a segurança” e entre estes, “acurado”.

3. Análise dos resultados

Todos os dados foram analisados com relação à distribuição Normal pelo Teste de Kolmogorov-Smirnov e com o auxílio das ferramentas estatísticas, obteve-se as seguintes informações:

Tabela I – Dados coletados da estaca raiz

Variáveis ('teste t')	μd	IC [95%]		Classificação
		Inf.	Sup.	
AV1-VDV	821,22	-729	-289	A favor da segurança
AV2-VDV	1446	-69,4	300,8	Acurado
CA1-VDV	1688,1	145	571	Contra a segurança
CA2-VDV	1553,1	31,2	414,4	Contra a segurança

Onde μd é a diferença entre as variáveis.

É interessante notar que o método Aoki-Velloso recebe as classificações de “a favor da segurança” e “acurado”, porém pode-se atestar sua aplicabilidade de forma geral, dado que não se portou contra a segurança.

Procedeu-se da mesma forma para analisar as estacas tipo Hélice-contínua. Todavia, algumas distribuições indicaram ser claramente variáveis com distribuição Lognormal, como ilustrado na figura 2, no qual mesmo retirando as estacas 48 e 27 (ver detalhe da figura 2), o P-valor continuava abaixo do esperado para este teste resultar Normal.

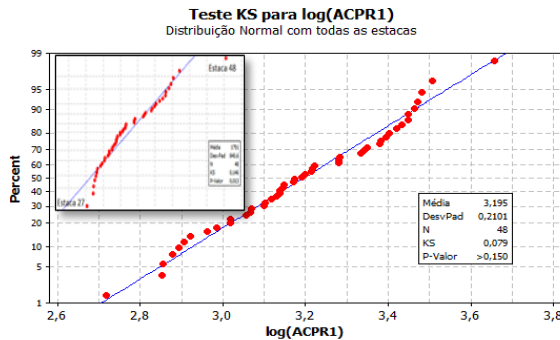


Figura 2- Resultado do Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) para o logaritmo dos valores do método de Antunes e Cabral, valores mínimos (ACPR1).

3. Dedução da aplicação do teste ‘t’ a dados lognormais

Realizada pelos autores (KUBOYAMA; AMANN, 2018) [4] a dedução matemática da aplicação do teste de hipótese (1) bilateral ‘t’ de Student para diferença ‘d’ (2) entre médias de amostras pareadas com distribuição Lognormal, obtiveram-se as seguintes equações:

$$\begin{cases} H_0: \mu_{Y_d} = 1 \\ H_1: \mu_{Y_d} \neq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$d = \ln(\text{MSE}) - \ln(\text{EC}) = \ln\left(\frac{\text{MSE}}{\text{EC}}\right) = \ln(Y_d) \quad (4)$$

Onde: MSE refere-se ao método semiempírico e EC o critério de ruptura, no caso, Van der Veen (VDV).

O intervalo de confiança (5) para a mediana \tilde{m}_{Y_d} da distribuição Lognormal, e a media da variável Y_d (6) ficam:

$$IC[\tilde{m}_{Y_d}]_{95\%} = \tilde{m}_{Y_d} \cdot e^{\pm [t_{\text{crit}} \cdot S_d / \sqrt{n}]} \quad (5)$$

$$\mu_{Y_d} = \tilde{m}_{Y_d} \cdot e^{\left(\frac{S_d^2}{2}\right)} \quad (6)$$

Tabela II – Valores da média, mediana e limites do intervalo de confiança da mediana para $Y_d = \text{MSE}/\text{VDV}$.

MSE	μ_{Y_d}	\tilde{m}_{Y_d}	$IC_{95\%}[\tilde{m}_{Y_d}]$	$IC_{95\%}[\tilde{m}_{Y_d}]$
ACPR1	0,633	0,606	0,556	0,660

ACPR4	0,863	0,831	0,767	0,900
DQ	0,708	0,670	0,608	0,738
AL	0,908	0,862	0,785	0,947

O banco de dados das 48 estacas tipo Hélice-Contínua apresenta algumas estacas (15 a 19; 30 a 35 e 43 a 47) instaladas cada conjunto no mesmo terreno, de modo que a proposta pode ser usada para se verificar a aplicabilidade de um dado método aos solos locais em cada caso. A Tabela III mostra o exemplo dessa aplicação para o método ACPR1:

Tabela III – Valores da média, mediana e limites do intervalo de confiança da mediana para $Y_d = \text{ACPR1}/\text{VDV}$.

Obra	μ_{Y_d}	\tilde{m}_{Y_d}	$IC_{95\%}[\tilde{m}_{Y_d}]$	$IC_{95\%}[\tilde{m}_{Y_d}]$
15-19	0,752	0,727	0,526	1,003
30-35	0,493	0,491	0,440	0,548
43-47	0,630	0,607	0,433	0,852

4. Conclusões

Aplicou-se a análise proposta a um banco de dados de estacas tipo Raiz e verificou-se que para estes dados o método Aoki-Velloso pode ser considerado a favor da segurança, enquanto o método de David Cabral resultou contra a segurança, devendo ser corrigido para garantir sua aplicabilidade. Por fim, apresentaram-se resultados para um banco de dados de estacas tipo Hélice-Contínua, no qual indicaram que todos podem ser considerados “a favor da segurança” para o conjunto de dados analisado, sendo, portanto, aplicáveis no sentido indicado pelas normas técnicas.

5. Referências

- [1] AMANN, K. A. P. Avaliação crítica de métodos de previsão da carga de ruptura, aplicados a estacas raiz. 2000. 117 f. Dissertação de Mestrado da faculdade de Engenharia Civil e departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.
- [2] FALCONI, F.F., et al (1999). Estaca Hélice-Contínua: a experiência atual. ABMS/ABEF. São Paulo, 162p.
- [3] AMANN, K. A. P., KUBOYAMA, C.T., SILVA, C.O. Metodologia para a avaliação estatística da aplicabilidade de métodos semi-empíricos de cálculo da capacidade resistente última de estacas. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 16., 2018. Ponta Delgada. *Anais...* Açores: SPG, 2018. p. 1-12.
- [4] KUBOYAMA, C.T., AMANN, K.A.P. Análise estatística da aplicabilidade dos métodos semiempíricos de estacas Hélice-Contínua à luz da NBR6122 e Eurocode 7. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018. Salvador. *Anais...* Bahia: SPG, 2018. p. 1-10.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI o apoio e o auxílio à publicação desta comunicação.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI (PIBIC-FEI). Projeto com vigência de Jun/16 a Jul/17.