

Algoritmo para estimativa de fatores de escala em cálculos de capacidade de carga, baseado em 22 provas de carga de estacas tipo hélice contínua.

Itamá Rodrigues Silva Filho
IESPLAN, Brasília, Brasil, Itamarsf@hotmail.com

Dickran Berberian
IESPLAN, Brasília, Brasil, infrasoloengenharia@gmail.com

Fernando de Sousa Ruas
Infrasolo, Brasília, Brasil, fernandoruas@hotmail.com

RESUMO: O cálculo de fundações é norteado pelo uso do método de cálculo por diversos autores. Esta diversidade de mecanismos é gerada principalmente pela grande incógnita que o solo representa, sendo que a cada metro, para os lados ou para baixo, podem ocorrer muitas variações, e a conjugação destes mecanismos de cálculo tem sido a melhor solução para o cálculo da capacidade de carga que o solo estaqueado pode suportar. Este estudo permite, através de mecanismos numéricos empregados em planilhas de cálculo do tipo excel, encontrar melhores fatores de escala para o cálculo de estacas do tipo hélice contínua sob a ótica de cálculo do método Berberian. Assim com a variação de passos de 0,1 e considerando constantes certos fatores da fórmula de Berberian (Constante do tipo de solo para ponta e lateral, golpes para o ensaio tipo SPT e as áreas respectivas) como constantes quando se variam os dois fatores de escala (E_p e E_l) foi possível se calcular estes entre 0,1 e 20, se chegando a resultados que melhoram a eficiência do método em 14,17%. Conclui-se assim que o método numérico apresentado é eficiente para cálculo de E_p e E_l , constituindo modelo para cálculo de outros elementos do cálculo de capacidade de carga para elementos de fundação do tipo estacas.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, fundações, método numérico, fator escala.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de estacas do tipo hélice contínua é moldado pela visão de diversos autores. Estudiosos elaboram métodos de cálculo para estacas tipo hélice contínua, este trabalho focou nos métodos empíricos baseados no estudo de solo através de SPT (Standard Penetration Test). Os autores Aoki e Velloso (1978, apud Berberian, 2015), Berberian (2015), Decourt (1986, apud Berberian, 2015), Monteiro (1997, apud Berberian, 2015) e Antunes e Cabral (1996, apud Berberian, 2015) (foram os 5 métodos estudados para o caso de hélice contínua que será abordado neste artigo.

Mesmo com diversos estudos e muitos anos de experiência, se notou a possibilidade da melhora na eficiência destes métodos quando se realiza um comparativo entre as metodologias e com as provas de carga, onde raramente a teoria acerta com a prática, mas que com a devida margem, propicia resultados ótimos e satisfatórios para as fundações. Assim, após a elaboração de método de cálculo em planilha eletrônica, fez-se o afinamento da teoria com o cálculo de E_p e E_l que são constantes utilizadas nas fórmulas de cálculo da capacidade de carga para estas estacas.

Por se tratar de métodos empíricos ou baseados nas experiências de campo que geram as experiências de cálculo, adotou-se modelos

matemáticos de cálculo baseados em algoritmos de maneira a criar passos e critérios de qualidade de resultados onde chega-se a um valor mais razoável para Ep e El.

2 METODOLOGIA APLICADA

2.1 Calculando as capacidades de carga das estacas tipo hélice contínua.

Para ter parâmetros de comparação e poder afinar os resultados foram utilizados 22 provas de carga de diversas regiões do Brasil. Estes ensaios forneceram assim condições de comparação entre os métodos onde sabe-se que o objetivo do método é principalmente poder prever um resultado que se aproxime o máximo possível do resultado da capacidade de carga que aquela estaca apresenta e assim poder melhor dimensionar uma fundação do tipo estaca.

Neste contexto apresentamos abaixo a relação de provas de carga que foram utilizadas no estudo:

Tabela 1 - Relação das Provas de Carga

Ensaio	Local	Fuste; altura
01	Brasília-DF	40 cm;19,0 m
02	Belo Horizonte - MG	80 cm;29,0 m
03	Brasília-DF	30 cm;8,1 m
04	Barra da Tijuca/RJ	50 cm;22,0 m
05	Belo Horizonte - MG	30 cm;20,0 m
06	Belo Horizonte - MG	30 cm;16,0 m
07	Belo Horizonte - MG	50 cm;21,0 m
08	Barreiro - BH	60 cm;15,0 m
09	Belo Horizonte - MG	60 cm;15,0 m
10	Campos dos Goytacazes - RJ	70 cm;26,7 m
11	Petrópolis - RJ	50 cm;11,0 m
12	Brasília-DF	35 cm;8,8 m
13	Goiânia - GO	40 cm;17,2 m
14	Goiânia - GO	40 cm;14,8 m
15	Goiânia - GO	30 cm;16,5 m
16	Unicamp - SP	40 cm;12 m
17	Unicamp - SP	40 cm;12 m
18	Unicamp - SP	40 cm;12 m
19	Gama - DF	60 cm;17 m
20	Gama - DF	60 cm;17 m
21	Gama - DF	60 cm;17 m
22	Samambaia - DF	60 cm;25 m

Como a descrição detalhada destas provas de carga se tornaria extensa indica-se que é possível visualizá-las em endereço eletrônico

(<https://drive.google.com/open?id=0B34Eif3ajJlhVnBnd0VtbzJTMmM>) no anexo do texto.

2.1.1 Métodos empíricos

Assim as provas de carga foram calculadas através de 5 métodos de cálculo de capacidade de carga para estacas tipo hélice contínua.

Destacamos os autores abaixo relacionados;

- Aoki e Velloso,
- Berberian,
- Decourt,
- Monteiro, e
- Antunes e Cabral.

As metodologias aplicadas de cálculo seguiram o objetivo de calcular a carga suportada por uma estaca nas condições indicadas pela estaca de ensaio, assim todos os métodos deveriam ter como resultado o valor de capacidade de carga da estaca indicado pela prova de carga, deixando assim um parâmetro de comparação ou relação comum entre os métodos. Desta maneira pode-se comparar todos os métodos e principalmente os resultados esperados para Ep e El que advém da aplicação do método de Berberian.

2.1.2 Análise da Capacidade de carga das estacas.

Para analisar a capacidade de carga das estacas foi adotado o método de Van der Veen para achar a carga de ruptura. Dispondo da carga de ruptura e aplicando um coeficiente de segurança 2 se obtém a capacidade de carga para a estaca em estudo.

2.1.3 Método Berberian modificado para carga ponta em 20%

Para o método de Berberian foi criado uma variação de maneira que o método sempre atenda a norma NBR 6122 no sentido de que sempre a carga de ponta tenha no máximo 20% de toda a carga suportada pela estaca. Desta maneira podemos demonstrar a metodologia através das equações abaixo:

Sabe-se que a Resistência total é:

$$R_t = R_p + R_l \quad (1)$$

Onde:

Rt: Resistência Total;

Rp: Resistência da Ponta;

Rl: Resistência Lateral;

Mas pela NBR temos a condição para máximo:

$$\frac{Rp}{Rt} = 20\% \quad (2)$$

Assim podemos substituir a equação acima na primeira e teremos:

$$Rt = 0,2Rt + Rl \quad (3)$$

Assim temos um máximo também para Rl quando Rp vai ao máximo,

$$Rl = 0,8Rt \quad (4)$$

Ou

$$Rt = 1,25Rl \quad (5)$$

Substituindo novamente no início temos uma equação que descreve Rp em função da Rl;

$$1,25Rl = Rp + Rl \quad (6)$$

Ou o Rp é no máximo,

$$Rp = 0,25Rl \quad (7)$$

Assim a fórmula fica preservando sempre o método de cálculo de Rp e Rl por Berberian, mas sim modificando apenas seu somatório:

$$Rt = \begin{cases} \text{se } Rp \leq 0,25Rl : Rp + Rl \\ \text{se } Rp > 0,25Rl : 1,25Rl \end{cases} \quad (8)$$

2.2 Método numérico para cálculo de Ep e El para Berberian.

Para se calcular novos valores para Ep e El foi criado um mecanismo de substituição destes fatores (Coeficientes de estaca tipo hélice contínua) com o intuito de afinar os resultados usando as condições de contorno apresentadas pelas provas de carga.

Um algoritmo testará a eficácia do método no sentido de verificar se é possível atingir melhores valores sob a ótica de Berberian

comum e por Berberian a 20% (método descrito em 2.1.3) onde substituiu-se Ep e El encontrando uma Resistência Total mais próxima ao resultado da prova de carga. Em segundo momento se utilizará este método consolidado e em conjunto com as 22 provas de carga para verificar a eficiência encontrada.

Assim para o algoritmo foi considerada a fórmula de Berberian conforme abaixo:

$$Rt = \sum_1^m \frac{Kpb \times N72}{2 \times Ep} \times Ap + \frac{Klb \times N72}{2 \times El} \times Al \quad (9)$$

Observa-se que pelo cálculo comum se varia metro a metro os valores até atingir o comprimento da estaca. Quando isto acontece os valores de Ep e El são sempre os mesmos ao longo do fuste e em todo o cálculo. Quando se chega ao resultado final em que se calculou a carga total observa-se que as duas constantes são apenas fatores multiplicativos no total calculado. Assim, criou-se um algoritmo baseado na carga final e baseando as contas apenas no resultado final, poderemos variar Ep e El e analisarmos as cargas totais encontradas. Isto pode ser evidenciado nas equações a seguir.

No cálculo da Rt em sua parte final ou no comprimento da estaca podemos variar Ep e El usando Kpb, N72, Ap, Al e Klb como constantes pois em nada muda-se os valores dos fatores vai variar estas entradas, assim pode-se rescrever para efeito de cálculo a equação de Berberian:

$$A = \sum_1^m \frac{Kpb \times N72}{2} \times Ap \quad (10)$$

$$B = \sum_1^m \frac{Klb \times N72}{2} \times Al \quad (11)$$

$$Rt = \frac{A}{Ep} + \frac{B}{El} \quad (12)$$

Partindo assim deste princípio se construiu o algoritmo em excel mostrado abaixo (fig 1) e que pode ter seu download realizado para acompanhamento no link <https://drive.google.com/open?id=0B34Eif3ajJIhNWxSR3NmaU5ZX1E>.

	0,1	0,1			
40000	20	20	1579,47	1181,87	1181,87
Número da interação	Fep	Fel	Soma RL em KN	Rp comum em KN	Rp NBR 20% - sem tratamento de 20% em KN
1	0,1	0,1	1579,47	118,19	118,19
2	0,1	0,2	1579,47	118,19	118,19
3	0,1	0,3	1579,47	118,19	118,19
4	0,1	0,4	1579,47	118,19	118,19
5	0,1	0,5	1579,47	118,19	118,19
6	0,1	0,6	1579,47	118,19	118,19
7	0,1	0,7	1579,47	118,19	118,19
8	0,1	0,8	1579,47	118,19	118,19

Figura 1. Início do algoritmo em excell

Este algoritmo baseia-se na variação de Ep e El em passos de 0,1 em 0,1 até um final de 20 o que geram para cada fator um total de 200 passos. Assim o total de variações para cada prova de carga é de 200 x 200 o que gera um total de 40.000 interações para cada prova de carga. Esta variação é importante pois permite saber todos os resultados para a prova de carga entre o espaço amostral escolhido que é de 0 a 20. Este espaço foi escolhido pois pelas equações foram utilizados os coeficientes 3 e 3,8, assim foi escolhido esta variação por se tratar de mais próxima a realidade esperada para estes coeficiente ou seja o espaço amostral foi estimado. Com os resultados verificou-se que foi uma boa escolha (vide conclusões).

O resultado final destas substituições pode ser verificado na figura 2 abaixo:

Rt comum - Aceitabilidade - Média ou divide por 22	Rt NBR 20% - Aceitabilidade - Média ou divide por 22	Interação	Fep	Fel
41,77%	43,00%	25231	12,7	3,1
41,77%	43,00%	25431	12,8	3,1
41,78%	43,01%	25031	12,6	3,1
41,79%	43,00%	25631	12,9	3,1
41,79%	43,02%	24831	12,5	3,1
41,80%	43,03%	24631	12,4	3,1
41,81%	42,84%	26830	13,5	3
41,81%	43,05%	24431	12,3	3,1
41,82%	43,00%	25831	13	3,1
41,82%	42,83%	26630	13,4	3

Figura 2. Resultado final para Ep e El

Destaca-se que a porcentagem representa o quão próximo a média das substituições chegaram ao resultado esperado ou a medida da capacidade de carga da estaca média na substituição. Diga-se em média, pois a conta estima a discrepância total ou desvio simples em relação entre a substituição de Ep e El (equação12) e o percentual em módulo da diferença da capacidade de carga da estaca estimada do ensaio de prova de carga. Assim quão menor for o percentual mais a substituição acertou no cálculo e esta é melhor para ser utilizada.

Observa-se que os valores de 12,7 e 3,1 foram os que melhor se aproximaram da Resistência total esperada. Observa-se que diversos outros valores também dariam certo ou seja com um percentual de diferença muito próximos dos valores com melhor performance, desta maneira destacam-se que diversas seriam as soluções para Ep e El mas as que mais se aproximam são as do topo da planilha.

O total de interações foi da ordem aproximada de 10^8 ($40000 \times 24 \times 10$) o que representa um algoritmo de pequeno tamanho

comparado aos algoritmos da física ou química que testam as propriedades da matéria e tem ordens de grandeza do tamanho de mol de átomos ou 10^{23} . Este algoritmo leva então 5 minutos para ser calculado para estas condições.

3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS EMPÍRICOS

3.1 Comparando assim os resultados indicados pelas planilhas.

Após diversos cálculos foi possível chegar a tabelas de comparação destes métodos. Abaixo os resultados resumidos (tabela 2):

Tabela 2 – Resultados para método Aoki

Ensaio	Carg. Admi. Em KN	Aoki Veloso em KN	Porc.
1	600,00	683,10	13,85%
2	3445,00	4190,90	21,65%
3	200,00	223,40	11,68%
4	1470,00	618,60	-57,91%
5	615,00	972,90	58,19%
6	190,00	269,00	41,59%
7	1075,00	1299,60	20,89%
8	900,00	1523,20	69,25%
9	1600,00	1896,60	18,54%
10	1605,00	1990,00	23,99%
11	705,00	232,80	-66,99%
12	725,00	540,00	-25,51%
13	1030,00	803,90	-21,95%
14	635,00	278,20	-56,19%
15	450,00	285,50	-36,57%
16	480,00	151,50	-68,44%
17	487,50	151,50	-68,92%
18	360,00	151,50	-57,92%
19	1137,50	421,40	-62,95%
20	1287,50	332,70	-74,16%
21	1175,00	314,40	-73,24%
22	1274,70	2110,90	65,60%
		Soma dos módulos	1015,97%
		Média	46,18%

As porcentagens aqui representam a diferença entre o esperado e a carga admissível provida pela prova de carga. Observa-se também a soma das discrepâncias e a média geral das discrepâncias que representa o resultado geral para o método de Aoki/Veloso. Abaixo a tabela 3 com os demais resultados.

Tabela 3 – Resultados em porcentagens para vários

métodos

Ensaio	Decourt	Monteiro	Berberian Conven.	Antunes- Cabral
1	73,66%	0,70%	34,93%	38,04%
2	26,38%	27,31%	44,38%	41,75%
3	3,41%	-11,22%	-11,84%	-6,01%
4	-22,31%	-43,21%	-56,57%	-43,21%
5	100,89%	65,17%	42,05%	64,95%
6	235,50%	122,30%	27,43%	109,43%
7	58,02%	39,38%	44,63%	66,04%
8	139,45%	126,79%	34,05%	130,97%
9	-7,26%	4,97%	-6,96%	0,30%
10	50,28%	31,57%	-7,25%	54,48%
11	-40,86%	-57,85%	-62,82%	-60,49%
12	31,07%	-3,35%	-17,58%	11,28%
13	-8,05%	-22,78%	-33,05%	-22,22%
14	-20,18%	-44,43%	-63,33%	-49,14%
15	21,23%	-25,97%	-48,25%	-17,90%
16	-35,64%	-59,42%	-73,02%	-58,82%
17	-36,63%	-60,04%	-73,43%	-59,45%
18	-14,19%	-45,89%	-64,03%	-45,09%
19	-25,18%	-49,91%	-57,57%	-55,61%
20	-45,52%	-69,52%	-70,18%	-70,33%
21	-39,30%	-53,45%	-76,61%	-64,90%
22	54,20%	41,52%	120,73 %	-68,82%
Soma	1089,19	1006,73	1071%	1139,23
mod.	%	%	%	%
Média	49,51%	45,76%	48,67%	51,78%

Observa-se assim que para cada método se obteve uma média final que descreve a qualidade de acerto em relação ao valor esperado na prova de carga.

Na tabela 4, abaixo, verifica-se a vantagem do recálculo no uso de novos Ep e El conforme descrito em 2.2:

Tabela 4 – Resultados em porcentagens nas substituições

Ensaio	Berberian comum Ep=12,7 e El=3,1.	Berberian 20% Ep=12,7 e El=3,1.
1	0,43%	0,43%
2	-0,03%	-0,03%
3	-41,62%	-41,86%
4	-53,10%	-53,10%
5	34,51%	34,51%
6	27,98%	27,98%
7	-5,55%	-6,66%
8	4,74%	4,74%
9	-39,65%	-40,59%
10	9,35%	9,35%
11	-69,52%	-69,52%
12	-26,88%	-26,88%
13	-43,39%	-43,39%
14	-71,19%	-71,19%
15	-52,94%	-52,94%

16	-75,37%	-75,37%
17	-75,75%	-75,75%
18	-67,16%	-67,16%
19	-65,21%	-65,21%
20	-76,49%	-76,49%
21	-77,72%	-77,72%
22	0,45%	-25,20%
Soma em módulo	919,00%	946,03%
Média	41,77%	43,00%

4 CONCLUSÃO

Observa-se assim que a aplicação de um algoritmo para o cálculo dos coeficientes E_p e E_l resultaram em uma melhor eficiência nos resultados médios. Isto se caracteriza na redução do erro médio de 48,67% para 41,77%, ou seja uma melhora de 14,17% nas condições de acerto. Este mesmo método pode ser utilizado com adaptações para cálculos de coeficientes diversos como o caso de coeficientes de solos.

O tempo de cálculo é reduzido permitindo realizar testes diversos com este modelo ou adaptá-lo a outras condições.

Outro ponto importante deste trabalho é a análise de provas de cargas por diversos métodos onde percebe-se que diversos resultados são apresentados mas na média modular os métodos são semelhantes entre si em erro variando de 41 a 52%.

Em relação a introdução de novo método de cálculo (2.1.3) que deixa sempre um máximo de 20% na ponta observou-se que este método novo atinge índices de acerto tão bons quanto as fórmulas originais podendo assim ser utilizado com segurança.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que de alguma forma ajudaram na elaboração deste trabalho em especial à equipe da Infrasolo, pelo apoio e fornecimento de provas de carga, à Bruno Mingardi pelo fornecimento de ensaios de estacas tipo hélice contínua.

Agradecemos também à COBRAMSEG pela realização do Congresso e possibilidade de exposição deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alves, Rubens (2014). *Estudo da previsão da carga de ruptura de estacas pré-moldadas de concreto*. Dissertação de Mestrado, 81. UFRN, Natal, RN.
- Berberian, Dickran (2015). *Engenharia de fundações*. Brasília, DF. INFRASOLO, 2ª EDIÇÃO. Vol único, 906p.
- Burden, Richard; Faires J (2003). *Análise numérica*. São Paulo, SP: Thomson, 1ª edição. Vol único, 740p.
- Hachich, Waldemar et al (1998). *Fundações Teoria e Prática*. São Paulo, SP: Pini, 2ª edição. Vol único, 751p.
- Linearidade. Disponível em <https://www.totvs.com/mktfiles/tdiportais/helponlineprotheus/portuguese/sigaqmt_linearidade.htm>. Acesso em 8/10/2015.
- Mantuano, Raphael (2013). *Comparação entre métodos de dimensionamento e influência do processo executivo no comportamento de estacas hélice*. Graduação, 99p. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Reis, Neurivaldo (2014). *Métodos semi-empíricos/estatísticos para cálculo de estacas comparados com provas de cargas estáticas*. Graduação, 278. UDF, Brasília, DF.