

ANÁLISE DOS MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS NA PREVISÃO DE UMA PROVA DE CARGA ESTÁTICA (PCE)

Jean Carlos Santos Araújo ¹, Prof. Flávio Ricardo Leal da Cunha, M.Sc. ²

¹ Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, jeancarlosantosaraujo42@gmail.com

² Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, flavioleal@pucgoias.edu.br

RESUMO: Este artigo apresenta uma análise dos resultados obtidos de uma Prova de Carga Estática (PCE) de uma estaca do tipo hélice contínua, em comparação aos métodos semiempíricos encontrados na literatura brasileira, tais como: Aoki-Velloso, Laprovitera, Monteiro, Décourt-Quaresma, Antunes-Cabral e Teixeira. Avaliou o recalque, utilizando o método Poulos e Davis, com diferentes coeficientes k , usado para estimativa do módulo de elasticidade em função do ensaio de sondagem SPT, para saber qual valor é o mais adequado na estimativa de recalque em comparação ao resultado encontrado no ensaio. O método semiempírico de Antunes e Cabral, com os parâmetros mínimos, foi o que mais aproximou ao valor máximo aplicado no ensaio da estaca, já os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, foram mais precisos, para carga de ruptura obtida pela extrapolação da curva carga x recalque.

Palavras chaves: *PCE, recalque, método semiempírico, SPT, capacidade de carga.*

ABSTRACT: *This article presents an analysis of the results obtained from a Static Load Test (SLT) performed on a continuous flight auger (CFA) pile, in comparison with semi-empirical methods found in Brazilian literature, such as Aoki-Velloso, Laprovitera, Monteiro, Décourt-Quaresma, Antunes-Cabral and Teixeira. Settlement was evaluated using the Poulos and Davis method, with different k coefficients used to estimate the modulus of elasticity based on the Standard Penetration Test (SPT), in order to determine which value is most suitable for settlement estimation when compared with the test results. The semi-empirical method of Antunes and Cabral, using minimum parameters, was the one that most closely matched the maximum load applied in the pile test, whereas the Aoki-Velloso and Décourt-Quaresma methods were more accurate for the ultimate load obtained by extrapolation of the load-settlement curve.*

Keywords: *SLT, settlement, semi-empirical method, Standard Penetration Test (SPT), load capacity.*

1. Introdução

A população de Goiânia vem crescendo, segundo o IBGE, em 2022 a cidade atingiu 1.437.366 habitantes, com uma densidade de 1.970,90 hab/km². Esse crescimento tem como consequência direta a intensificação da verticalização urbana. A verticalização de Goiânia, impulsionada pelo acelerado crescimento da cidade, tem demandado a utilização de fundações profundas capazes de suportar as elevadas cargas estruturais impostas por edifícios de múltiplos pavimentos. Com prédios cada vez maiores e com maior solicitação de cargas, torna-se necessário um controle mais rigoroso dos resultados, o que reforça a importância da realização do ensaio de Prova de Carga Estática (PCE). Nesse cenário, a estaca hélice contínua tem se destacado como solução eficiente. Segundo [1], a estaca do tipo hélice contínua permite uma execução rápida, com baixa vibração no solo e elevada resistência, características particularmente desejáveis em áreas urbanas densas. Os métodos semiempíricos utilizados na previsão de carga possuem natureza estatística. Como descrito [2], a engenharia geotécnica não é uma ciência exata, uma vez que envolve materiais naturais, como o solo, cujas propriedades apresentam variabilidade inerente. Dessa forma, métodos semiempíricos podem ocasionar imprecisões nos resultados, tornando necessária a análise criteriosa de seus limites de aplicação para garantir maior segurança nas interpretações. Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo analisar um ensaio de Prova de Carga Estática (PCE) e comparar seus resultados com aqueles obtidos por métodos semiempíricos de previsão de carga de estaca do tipo hélice contínua. Em relação ao recalque, analisou o parâmetro de correlação entre o módulo de elasticidade e o ensaio de sondagem SPT.

2. Referencial teórico

2.1. *Métodos semiempíricos para cálculo de capacidade de carga de estacas*

Segundo [3] os métodos teóricos como de Meyerhof (1951) usavam parâmetros da mecânica dos solos, que necessitam de vários ensaios de laboratório para as amostras de solo de uma obra. Assim, como alternativa de dimensionamento buscou outra maneira de calcular, através da criação de métodos semiempíricos, que fazem correlações empíricas com dados de teste in situ em comparação ao resultado da PCE. Os principais métodos semiempíricos brasileiros encontram a carga total da estaca sendo a soma da resistência lateral com a resistência de ponta conforme a Equação (1) e representação gráfica das cargas atuantes na estaca (Figura 1):

$$R = R_L + R_p \quad (1)$$

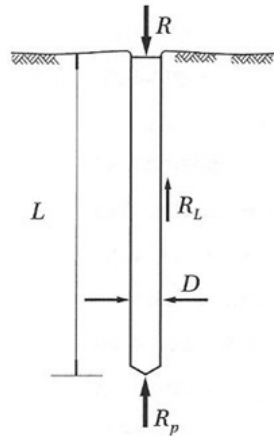


Figura 1: Capacidade ou resistência da estaca. [2]

Sendo que para todos os métodos brasileiros semiempíricos:

R = Resistência total (tf ou kgf);

R_L = Resistência lateral (tf);

R_p = Resistência da ponta (tf);

N_L : N_{SPT} médio da lateral da estaca;

N_p : N_{SPT} médio da ponta da estaca;

U : perímetro da estaca em (cm, m);

ΔL = comprimento das camadas em (cm, m);

N_{SPT} : Índice de resistência a penetração do solo;

A_p : Área da ponta da estaca;

2.1.1 Método de Aoki-Velloso (1975)

De acordo com [1], o método de Aoki-Velloso foi feito inicialmente utilizando o Cone Penetration Test (CPT), mas pelo ensaio SPT ser predominante no Brasil ele acabou adaptando o método para dados obtidos pelo ensaio SPT. O cálculo da resistência é feito conforme a Equação (2):

$$R = \frac{KN_p}{F_1} A_p + \frac{U}{F_2} \sum (\alpha KN_L \Delta L) \quad (2)$$

Sendo que os coeficientes F_1 e F_2 são fatores de correção que dependem do tipo de estaca, Quadro 1, e os coeficientes α e K estão relacionados ao tipo de solo, Quadro 2. Segundo [4] existem dois métodos modificados de Aoki-Velloso (1975): o Laprovitera (1988), no qual utiliza coeficientes próprios e o N_p é dado pela média de N , numa faixa de 1 diâmetro da ponta da estaca para cima e 1 diâmetro abaixo da ponta, ou pelo menos 1 metro acima e 1 metro abaixo da cota da ponta. Já o Método de Monteiro (1997), além de utilizar coeficientes diferentes, usa a Equação (3) para encontrar o R_p , sendo que o N_p é o valor determinado pela média do intervalo representado na Figura 2, com N tendo um limite inferior a 40 e o valor 'q' é determinado pelo produto 'N' do ensaio de sondagem pelo coeficiente 'K' em função do tipo de solo.

Quadro 1: Coeficientes F_1 e F_2 método Aoki-Velloso et al. Adaptado de [4]

Tipo de estaca	Aoki-Velloso		Laprovitera		Monteiro	
	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
Franki	2,5	5	2,5	3	2,3-2,3	3,0-3,2
Metálica	1,75	3,5	2,4	3,4	1,75	3,5
Pré-moldada	1,75	3,5	2	3,5	2,5-1,2	3,5-2,3
Escavada	3	6	4,5	4,5	3,5	4,5
Raiz	2	4	-	-	2,2	2,4
Hélice contínua	2	4	4,5	4,5	3	3,8
Ômega	2	4	-	-	-	-

Quadro 2: Coeficientes α e k do método Aoki-Velloso et al. [4]

Tipos de solos	Aoki-Velloso		Laprovitera		Monteiro	
	k (tf/m ²)	α (%)	k (tf/m ²)	α (%)	k (tf/m ²)	α (%)
Areia	100	1,4	60	1,4	73	2,1
Areia siltosa	80	2	53	1,9	68	2,3
Areia siltoargilosa	70	2,4	53	2,4	63	2,4
Areia argilosiltosa	50	2,8	53	2,8	57	2,9
Areia argilosa	60	3	53	2,8	54	2,8
Silte arenoso	55	2,2	48	2,2	50	3
Silte arenoargiloso	45	2,8	48	3	45	3,2
Silte	40	3	48	4	48	3,2
Silte argiloarenoso	25	3	38	3,4	40	3,3
Silte argiloso	23	3,4	38	3,4	32	3,6
Argila arenosa	35	2,4	48	3	44	3,2
Argila arenosiltosa	30	2,8	30	3	30	3,8
Argila siltoarenosa	33	3	30	3,5	33	4,1
Argila siltosa	22	4	25	3	26	4,5
Argila	20	6	25	6	25	5,5

$$Q_{ult} = \frac{Q_{ps} + Q_{pi}}{2} \quad (3)$$

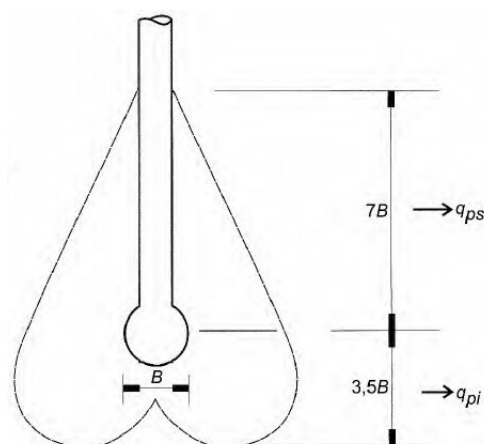


Figura 2: Média da ponta utilizada no método de Monteiro (1997). [4]

2.1.2 Método de Décourt – Quaresma (1978, ajustado em 1996)

De acordo com [3], este método é uma versão do antigo método de Décourt-Quaresma (1978), no qual engloba outros tipos de estaca além da pré-fabricada, como a estaca hélice-contínua. A resistência total é dada pela Equação (4). O Quadro 3 apresenta os valores dos coeficientes K, α e β .

$$R = \alpha K N_p A_p + \beta_D \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) U L \quad (4)$$

Quadro 3: Coeficientes do método do Décourt-Quaresma [4]

Tipo de solo	K (tf/m ²)	α	β
Areia	40	0,3	1
Argila	12	0,3	1
Silte arenoso	25	0,3	1
Silte argiloso	20	0,3	1

Os α e β são coeficientes que dependem do tipo de estaca e do tipo de solo, enquanto o coeficiente K depende apenas do solo. N_p é o valor de N_{SPT} obtido pela média de N no intervalo da cota da ponta da estaca, uma cota acima e outra abaixo. U é o perímetro do fuste, e N_L é o valor de N_{SPT} obtido pela média de cada metro do fuste, exceto o metro correspondente à média da ponta, adotando-se o limite inferior a $N_L \leq 50$.

2.1.3 Método de Teixeira (1996)

Com base em diversos métodos de estimativa de capacidade de carga de estacas, tais como Aoki–Velloso, Décourt-Quaresma e outros, propôs-se uma metodologia em que os coeficientes α e β dependem do tipo de estaca. A Equação (5) apresenta a carga total. [3]

$$R = R_p + R_L = \alpha N_p A_p + \beta N_L UL \quad (5)$$

Sendo o N_L igual N_{SPT} médio ao longo do fuste e N_p o N_{SPT} médio no intervalo de 4 diâmetros acima e 1 diâmetro abaixo da cota da ponta. Os valores de α e β estão representados no Quadro 4.

Quadro 4: Valores de α e β conforme o tipo de estaca e solo [4]

Solo	Pré-moldada e perfil metálico (tf/m ²)	Franki (tf/m ²)	Escavada a céu aberto (tf/m ²)	Raiz (tf/m ²)	Tipo de estaca	β (tf/m ²)
Argila siltosa	11	10	10	10	Pré-moldada e Perfil metálico	4
Silte argiloso	16	12	11	11	Franki	5
Argila arenosa	21	16	13	14	Escavada a céu aberto	4
Silte arenoso	26	21	16	16	Raiz	6
Areia argilosa	30	24	20	19	Hélice Contínua	4
Areia siltosa	36	30	24	22		
Areia	40	34	27	26		
Areia com pedregulhos	44	38	31	29		

2.1.4 Método de Antunes e Cabral (1996)

O método de Antunes e Cabral foi feito para estacas do tipo hélice-contínua tendo como Equação (6) para carga última, sendo β_1' e β_2' coeficientes em função do tipo de solo no Quadro 5, N_p é o valor de N_{spt} no nível da ponta, A_p sendo a área da ponta e N é o índice de resistência à penetração. Deve-se levar em consideração que o produto $\beta_2' \cdot N_p \leq 40 \text{ kgf/cm}^2$. [3]

$$Q_{ult} = (\beta_2' \cdot N_p) A_p + U \sum (\beta_1' N) \Delta L \quad (6)$$

Quadro 5: Valores de $\beta 1'$ e $\beta 2'$ conforme o tipo de estaca e solo [4]

Tipo de solo	$\beta 1'$ (%) (mínimo)	$\beta 2'$ (mínimo)	$\beta 1'$ (%) (média)	$\beta 2'$ (média)	$\beta 1'$ (%) (máximo)	$\beta 2'$ (máximo)
Areia	4	2	4,5	2,25	5	2,5
Silte	2,5	1	3	1,5	3,5	2
Argila	2	1	2,75	1,25	3,5	1,5

2.2. Normas necessárias para o ensaio de Prova de Carga Estática (PCE)

Segundo [5] a prova de carga estática pode ser do tipo lento, rápido ou misto, mas o ensaio do tipo lento é o que apresenta melhores resultados. Para que o ensaio seja realizado é necessário seguir essas três normas:

2.2.1 ABNT NBR 6484 (2020): Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio

A ABNT NBR 6484 (2020) é a norma que estabelece as diretrizes para o ensaio de SPT (Stand Penetration Test). Por meio dela, obtém-se o tipo de solo, o nível do lençol freático e o índice de penetração do solo. [6]

2.2.2 ABNT NBR 6122 (2022)

A ABNT NBR 6122 (2022) é a norma responsável por regulamentar projeto e execução de fundações rasas ou profundas. Esta norma exige que o projeto da estaca garanta a ela resistir ao Estado Limite Último (ELU) e ao Estado Limite de Serviço (ELS). A Figura 3 apresenta a curva carga x recalque de um ensaio de PCE e a reta traçada a partir da reta elástica, acrescentando o diâmetro da estaca dividido por 30, considerando o diâmetro em milímetro, onde segundo a norma é caracterizada a deformação de ruptura de uma estaca. [2]

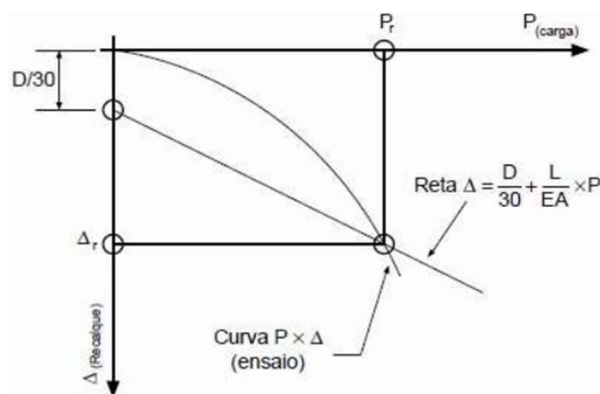


Figura 3: Curva carga - recalque e a reta que caracteriza a deformação de ruptura [2]

Esta norma estabelece a obrigatoriedade da realização de prova de carga estática em função do tipo de estaca, quando se atende os critérios de tensão máxima usada ou o número de estaca do projeto de fundação, conforme a Figura 4.

Tabela 6 – Quantidade de provas de carga

Tipo de estaca	A Tensão de trabalho abaixo da qual não serão obrigatórias provas de carga, desde que o número de estacas da obra seja inferior à coluna (B), em MPa ^{b c d}	B Número total de estacas da obra a partir do qual serão obrigatórias provas de carga ^{b c d}
Pré-moldada ^a	7,0	100
Madeira	–	100
Aço	0,5 f_{yk}	100
Hélice, hélice de deslocamento, hélice com trado segmentado (monitoradas)	5,0	100
Estacas escavadas com ou sem fluido $\phi \geq 70$ cm	5,0	75
Raiz ^e	$\leq \phi 310$ mm = 15,0	75
	$\geq \phi 400$ mm = 13,0	
Microestaca ^e	15,0	75
Trado vazado segmentado	5,0	50
Franki	7,0	100
Escavadas sem fluido $\phi < 70$ cm	4,0	100
Strauss	4,0	100

Figura 4: Tabela 6 da ABNT NBR 6122:2022 que exige a realização da PCE [2]

2.2.3 ABNT NBR 16903 (2020) – Prova de carga estática em fundação profunda

A ABNT NBR 16903 (2020) estabelece as diretrizes fundamentais para os ensaios de carga estática, apresentando as definições e cargas, equipamentos utilizados e o processo do ensaio e também, estabelece que para o ensaio de prova de carga é necessário realizar pelo menos o ensaio SPT. Segundo a norma, o ensaio deve ser realizado em estágio com duração mínima de 30 minutos e máxima de 120 minutos, no qual o incremento de carga é igual entre cada estágio, com carga mínima de 10% do dobro da carga de trabalho e máxima de 20% dela, para que em um estágio seja considerado estabilizado é necessário que não ocorra uma diferença de leitura entre dois estágios consecutivos de 5% do recalque. [7]

2.3. Previsão de Recalque

2.3.1 Método Poulos e Davis (1980)

O método de Poulos e Davis (1980) é amplamente utilizado para estimar o recalque de estacas com base na teoria da elasticidade. A abordagem considera as propriedades do concreto e do solo, utilizando parâmetros como o módulo de elasticidade do concreto (E_c), o módulo de elasticidade do solo (E_s), o diâmetro da estaca (D) e a carga aplicada (P). O recalque no topo da estaca (ρ_s) é calculado por meio das equações propostas pelos autores, que também incorporam o fator de influência (I) e a compressibilidade relativa (K). O fator de influência é

obtido pela utilização de gráficos (Anexo A), considerando parâmetros adimensionais. Esse método oferece uma estimativa confiável do comportamento carga-recalque, sendo amplamente empregado em projetos de fundações profundas. As Equações (7), (8) e (9) são as utilizadas para se obter o recalque em mm. [4]

$$K = \left(\frac{E_c}{E_s} \right) \quad (7)$$

$$\rho S = \frac{P \cdot I}{E_s \cdot D} \quad (8)$$

$$I = I_0 \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v \quad (9)$$

A Figura 5 ilustra a distância da estaca em relação ao estrato rígido, quando a estaca encontra-se longe do estrato rígido é considerada uma estaca flutuante e aplica-se a Equação (9) para obter o fator de influência.

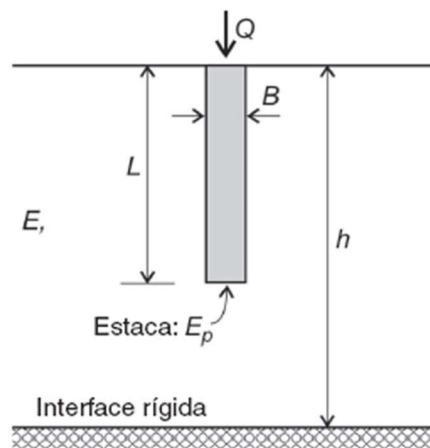


Figura 5: Esquema ilustrativo de estacas compressíveis de solo finito [4]

3. Programa Experimental

3.1 Ensaio de prova de carga lento

O ensaio foi feito em uma obra no setor Bueno em Goiânia. A Figura 6 apresenta o sistema de reação do ensaio PCE e a Figura 7, o sistema de reação montada no ensaio, composto por quatro estacas à tração de reação e uma estaca de ensaio, no centro, sendo comprimida. O ensaio de Prova de Carga Estática (PCE) foi conduzido em uma estaca hélice contínua de 16,0 m de comprimento, 0,5m de diâmetro, com início da perfuração a partir do subsolo da obra, considerado em torno de 4,0 m de profundidade em relação a sondagem e término a 20,0 m de

profundidade, de acordo com os resultados do ensaio SPT (Figura 8). Foi usado o concreto de f_{ck} igual a 30 MPa para a estaca de teste. Na obra onde foi realizado o ensaio a tensão era de apenas 2,89 MPa, mas o número de estacas ultrapassou a quantidade mínima de 100 estacas tornando o ensaio obrigatório.

A Figura 9 mostra a leitora digital acoplado ao atuador hidráulico para realizar os incrementos de cargas gradativo. Na Figura 10 mostra o atuador hidráulico responsável por transmitir a carga na estaca teste, este deve resistir a pelo menos 10% de carga extra do projeto, os quatro deflectômetros vão registrar o recalque na estaca com precisão de 0,01 mm

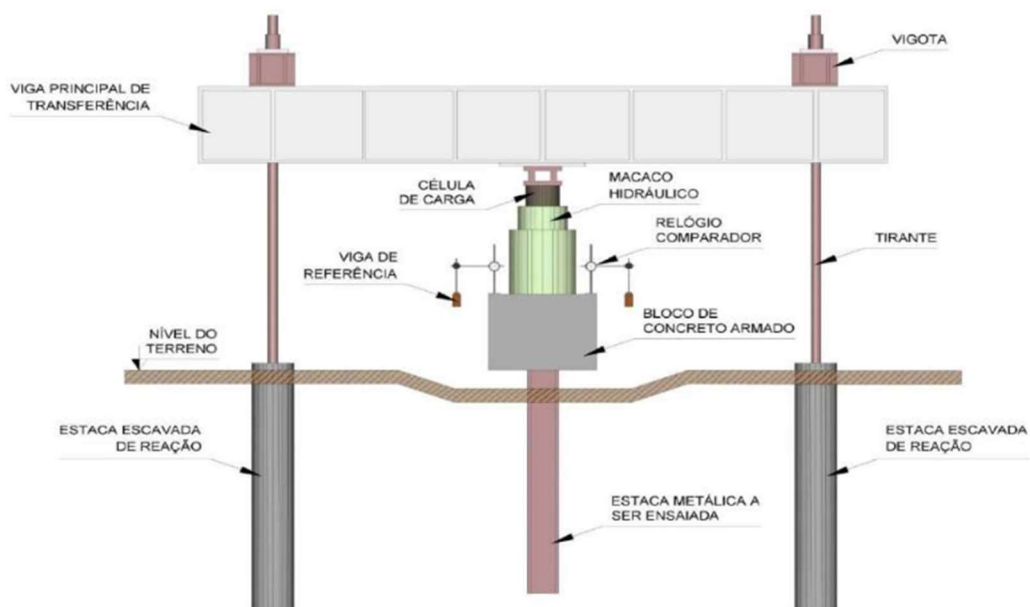


Figura 6: Equipamentos utilizados no sistema de reação do ensaio PCE [5]



Figura 7: Sistema de reação do ensaio PCE montando

Camada	profundidade(m)	Nspt	Tipo de solo	Estaca Hélice continua	lençol freático
0 a 1m	1	0	Silte arenoso		
1m a 2m	2	3	Argila arenosa		
2m a 3m	3	3	Argila arenosa		
3m a 4m	4	3	Argila arenosa		
4m a 5m	5	4	Argila arenosa		
5m a 6m	6	6	Argila arenosa		
6m a 7m	7	8	Argila arenosa		
7m a 8m	8	7	Argila arenosa		
8m a 9m	9	9	Argila arenosa		
9m a 10m	10	10	Silte argiloso		
10m a 11m	11	13	Silte argiloso		
11m a 12m	12	17	Silte argiloso		
12m a 13m	13	17	Silte argiloso		
13m a 14m	14	14	Silte arenoso		
14m a 15m	15	11	Silte arenoso		
15m a 16m	16	22	Silte arenoso		
17m a 17m	17	22	Silte arenoso		
17m a 18m	18	18	Silte arenoso		
18m a 19m	19	13	Silte arenoso		
19m a 20m	20	13	Silte arenoso		
20m a 21m	21	21	Silte arenoso		
21m a 22m	22	17	Silte arenoso		
22m a 23m	22	17	Silte argiloso		
24m a 25m	22	17	Silte argiloso		
25m a 26m	22	17	Silte argiloso		

Figura 8: Dados extraídos da sondagem SPT-05.



Figura 9: Leitora da célula de carga e sistema de aquisição dos dados.

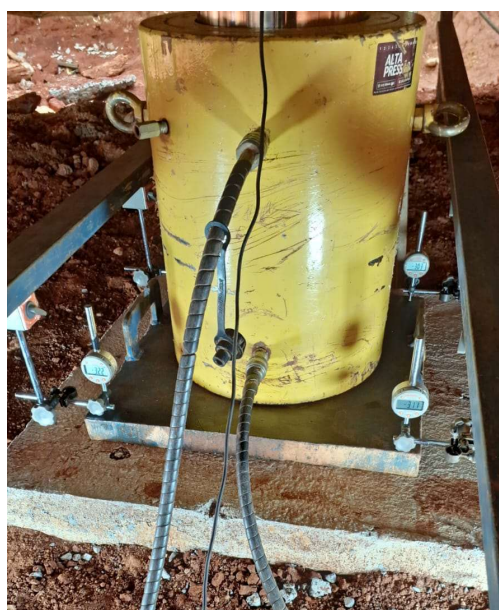


Figura 10: Atuador Hidráulico e deflectômetros.

Durante o acompanhamento do ensaio não ocorreram grandes deformações entre estágios; ao chegar no último estágio com a carga de 110 tf, que é duas vezes a carga de trabalho, a estaca não teve uma deformação correspondente a 1% do diâmetro da estaca, considerado ainda no regime elástico. A Figura 11 apresenta a curva carga x recalque encontrada após a realização do ensaio.

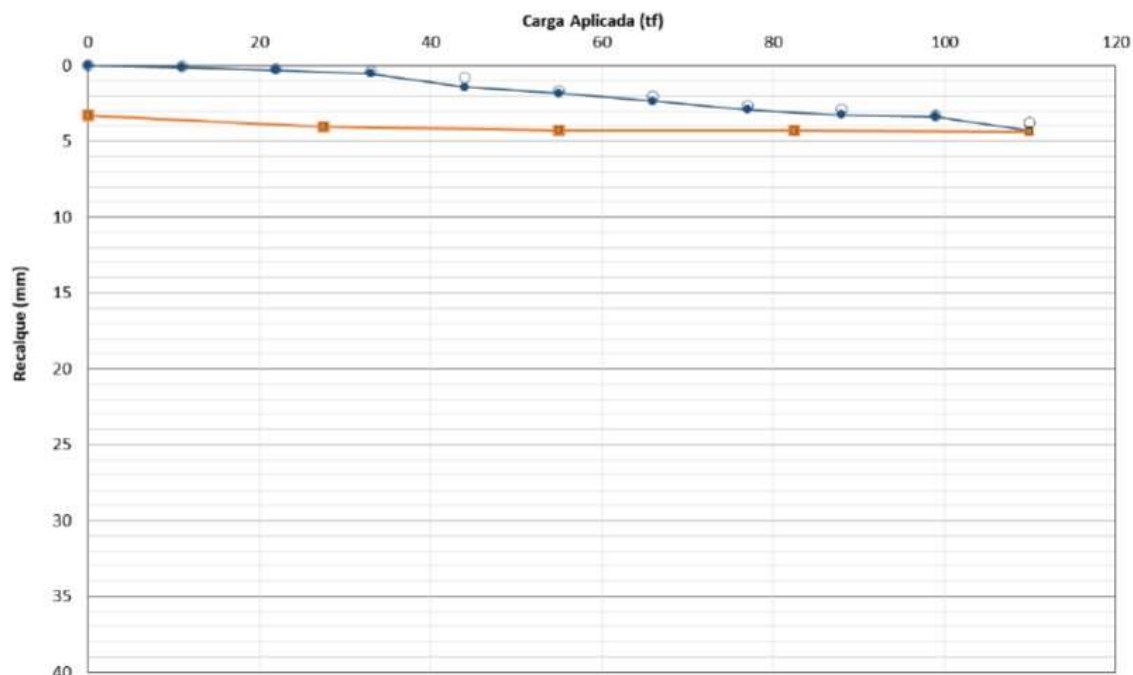


Figura 11: Curva carga x recalque pelo ensaio de carga estática tipo lento

O recalque para a carga de trabalho, correspondente a 55tf, foi igual a 1,84mm. Já na carga máxima de 110tf aplicada no ensaio, alcançou 4,38mm. Aplicando a interpretação da ABNT NBR 6122 (2022), de extrapolar a curva carga versus recalque para determinar a provável carga de ruptura da estaca, obteve um valor estimado de 150tf, como pode ser visto na Figura 12.

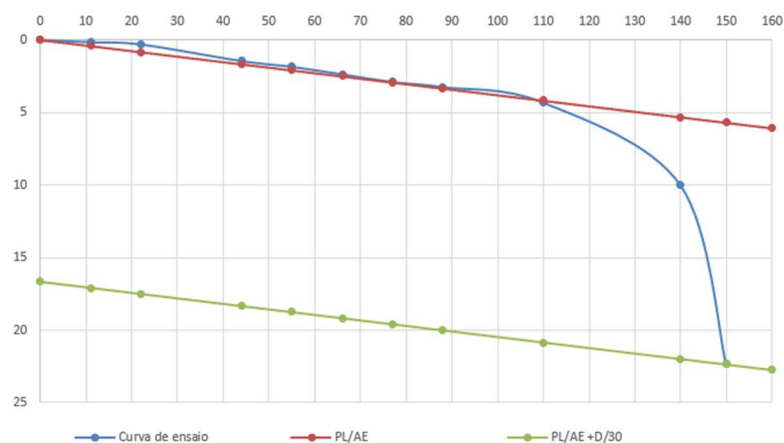


Figura 12: Extrapolação da curva carga versus recalque para obtenção da carga de ruptura

4. Resultados e discussões

A partir dos dados da sondagem SPT-05 e informações da estaca hélice contínua realizada no local, foram efetuados os cálculos necessários para analisar a capacidade de carga e o recalque da fundação. A seguir, são apresentados os resultados alcançados e as análises correspondentes.

4.1. Cálculo da capacidade de carga estimada pelos métodos semiempíricos

Os métodos semiempíricos utilizados foram Aoki-Velloso, Laprovitera, Monteiro, Antunes e Cabral, Décourt-Quaresma e Teixeira, sendo o comprimento da estaca igual a 16 metros e o diâmetro correspondente a 0,50m. Os resultados obtidos foram comparados com a carga de ensaio de 110 tf, como pode ser visto na Figura 13.

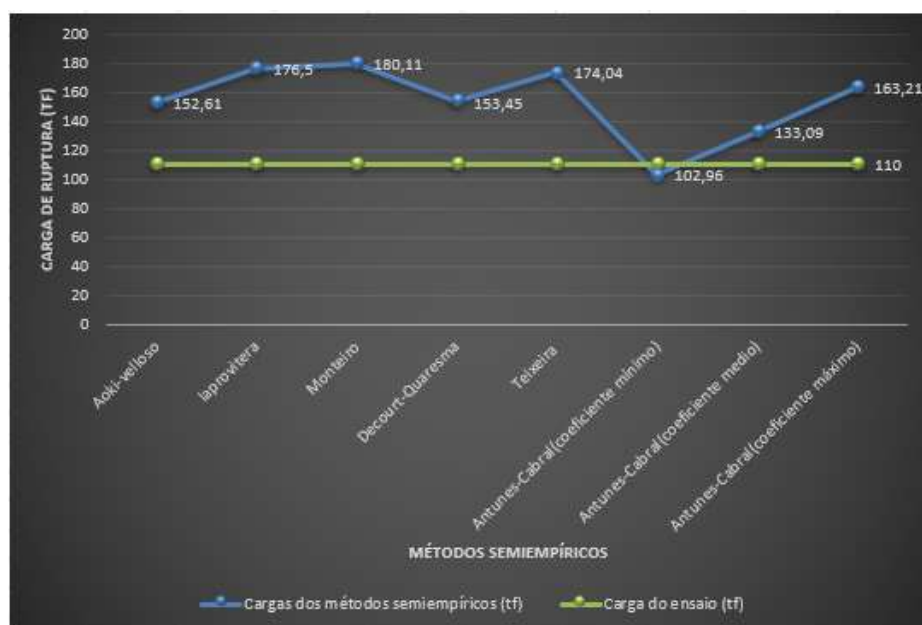


Figura 13: Gráfico de comparação de cargas obtidas pelos métodos semiempíricos e pelo ensaio de prova de carga estática

Na Figura 14 pode observar os resultados dos métodos semiempíricos comparados com o valor obtido pela extrapolação da curva carga versus recalque, segundo a ABNT NBR 6122:2022.

A partir dos resultados dos métodos semiempíricos avaliados, quando comparados à carga de ensaio, apenas o método de Antunes e Cabral (coeficiente mínimo) não foi superior à carga de ensaio, sendo considerado o melhor resultado. Porém, utilizando a carga estimada de ruptura de 150 tf, os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma foram mais eficientes, com valores bastante precisos. As Figuras 15 e 16 apresentam a comparação entre as distorções encontradas pelos resultados com a carga máxima de ensaio e carga estimada de ruptura, respectivamente.

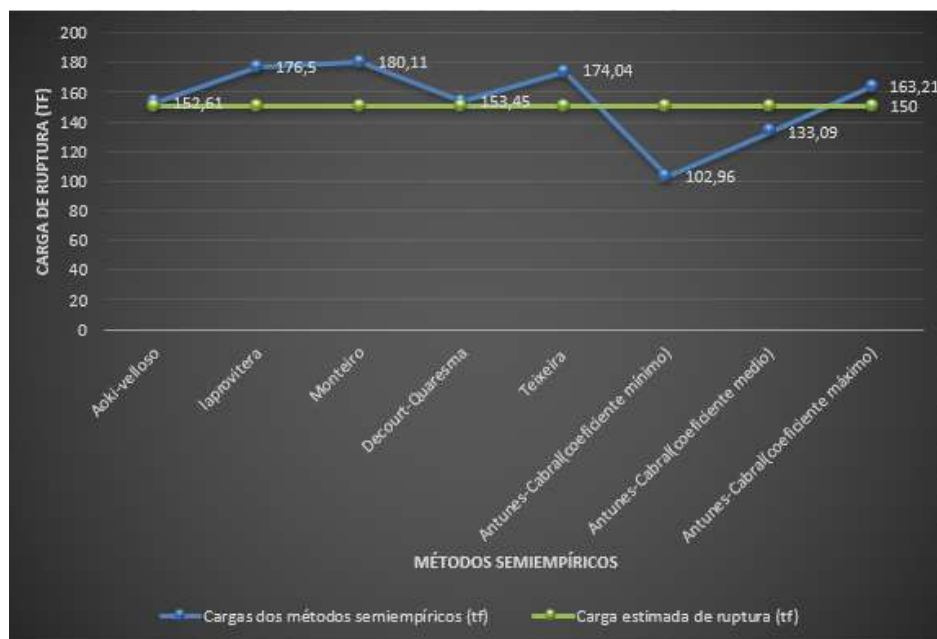


Figura 14: Gráfico de comparação de cargas obtidas pelos métodos semiempíricos e carga extrapolada pela norma

Metodo	Carga ultima(tf)	Relação entre carga calculada e carga alcançada pelo ensaio(%)
Aoki-velloso	152,61	38,74
laprovitera	176,5	60,45
Monteiro	180,11	63,74
decourt-quaresma	153,45	39,5
teixeira	174,04	58,22
antunes-cabral(coeficiente minimo)	102,96	-6,4
antunes-cabral(coeficiente medio)	133,09	20,99
antunes-cabral(coeficiente maximo)	163,21	48,37

Figura 15: Tabela de comparação de cargas obtidas pelos métodos semiempíricos e carga máxima de ensaio

Metodo	Carga ultima(tf)	Relação entre carga calculada e carga estimada de ruptura(%)
Aoki-velloso	152,61	1,74
laprovitera	176,5	17,67
Monteiro	180,11	20,07
decourt-quaresma	153,45	2,3
teixeira	174,04	16,03
antunes-cabral(coeficiente minimo)	102,96	-31,36
antunes-cabral(coeficiente medio)	133,09	-11,27
antunes-cabral(coeficiente maximo)	163,21	8,81

Figura 16: Tabela de comparação de cargas obtidas pelos métodos semiempíricos e carga estimada de ruptura

Como pode ser visto na análise das distorções entre os valores calculados e a carga de ensaio, que o método Antunes-Cabral (coeficiente mínimo) apresenta uma distorção inferior a 7% e, por ser um valor menor que a carga de ensaio, encontra-se dentro da margem de segurança. Já para a carga obtida por extrapolação, os métodos Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma apresentam diferença inferior a 3% em relação à carga de ruptura estimada, apresentando resultados melhores em relação aos outros.

4.2. Avaliação de recalque usando o método de Poulos e Davis (1980)

Um dos parâmetros necessários para a determinação do recalque é o módulo de elasticidade longitudinal do solo (E_s). Existem na literatura estimativas para obtenção deste parâmetro a partir do ensaio de sondagem SPT. Segundo [8] encontrou valores entre 2 e 3 para solos da região de Goiânia na estimativa do módulo de elasticidade a partir da Equação (10). Outros trabalhos sugerem valores do parâmetro 'k' variando de 2 a 5. A Figura 17 apresenta os recalques obtidos pelo método de Poulos e Davis (1980) em comparação ao valor encontrado na prova de carga estática, avaliando a distorção em relação ao recalque real obtido e os valores estimados.

$$E_s = k \cdot N_{SPT} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

Recalque estimado pelo método de Poulos e Davis (1980)			Relação entre recalque estimado e recalque de ensaio(%)	
Carga(tf)	k	Recalque(mm)		
55	2		2,77	47,34
55	3		2,01	6,91
55	3,5		1,77	-5,85
55	4		1,64	-12,77
55	5		1,4	-25,53

Figura 17: Tabela da estimativa do parâmetro 'k' em comparação ao recalque de ensaio igual a 1,84mm

Observa-se que o valor de 'k' entre 3 a 3,5 alcançaram resultados mais próximos ao recalque obtido no ensaio de campo, porém o valor de 'k' igual a 3 pode ser considerado o melhor, por apresentar uma estimativa de recalque um pouco maior do que o medido no ensaio de prova de carga estática. Este valor de 'k' está em conformidade com o obtido na dissertação de [8].

5. Conclusão

A estaca apresentou uma resistência maior do que a esperada durante o ensaio, exibindo uma curva carga versus recalque praticamente linear. Como não houve indícios de ruptura, a [2] permite a extrapolação da curva para determinar a estimativa da carga última. Por meio dessa extrapolação, obteve-se uma carga de 150 tf. Considerando a carga de ensaio, que foi de 110tf, o método de Antunes e Cabral, que utiliza coeficientes mínimos, apresentou o resultado mais satisfatório por não ultrapassar a carga de ensaio e por apresentar baixa margem de erro. Contudo, como observado no próprio ensaio, mesmo no último estágio de carregamento com 110 tf a estaca manteve um comportamento linear na curva carga $\times$ recalque, sem atender aos critérios para caracterizar ruptura. Assim, tornou-se necessária a extrapolação, que resultou na

carga de ruptura estimada de 150 tf. Com esse valor extrapolado, os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma foram os mais precisos, apresentando margens de erro de apenas 1,74% e 2,3%, respectivamente.

Na avaliação de recalque, foi avaliada a estimativa do módulo de elasticidade longitudinal a partir da sondagem SPT. O valor do coeficiente k igual a 3,5 apresentou a menor distorção em relação ao ensaio PCE, com valor de 5,85%, porém o recalque foi inferior ao observado no ensaio. Já, o coeficiente ' k ' igual a 3, foi o que apresentou melhor desempenho, fornecendo recalque superior ao real, com margem de erro de 6,91%. Esse coeficiente também foi o que obteve melhor resultado segundo [8], que analisou recalques na região de Goiânia.

Dessa forma, observa-se que os métodos de cálculo podem apresentar variações pequenas ou significativas, reforçando a necessidade de realizar os ensaio de campo para compreender o comportamento das fundações, quanto às cargas aplicadas e às deformações medidas.

6. Agradecimentos

Agradeço à Deus, minha família, ao orientador professor Flávio e ao engenheiro Eduardo, que me acompanhou em campo, durante o ensaio da PCE.

7. Referências bibliográficas

1. DANZIGER, B. R.; LOPES, F. de R. **Fundações em estacas**. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:2022 – Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022. 126p.
3. CINTRA, J.C.A; AOKI, N. **Fundações por Estacas: projeto geotécnico**. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 96p.
4. VELLOSO, Dirceu A; LOPES, Francisco R. **Fundações: Volume único**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 568p.
5. DAVID, J.; PAULO, R. **Prova de carga estática em fundações: conceitos e aplicações**. 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2023.
6. _____. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020. 32 p.
7. _____. **NBR 16903: Prova de carga estática em fundação profunda**. Rio de Janeiro, 2020. 15p.
8. MAGALHÃES, P. H. L. **Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via provas de carga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

ANEXO A

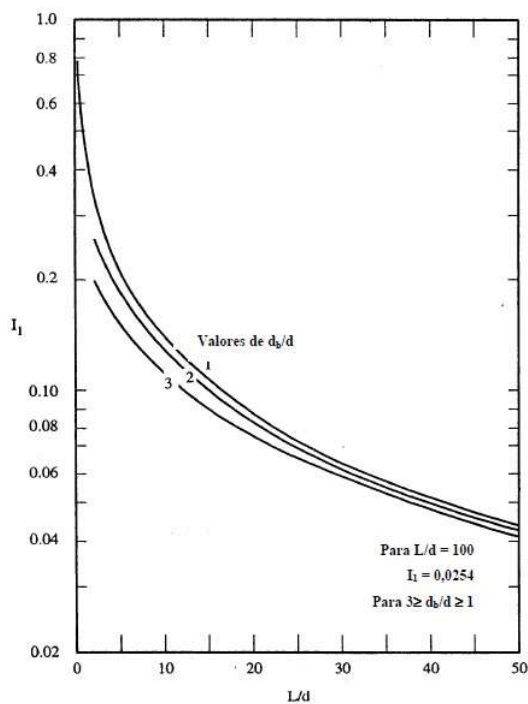


Figura A.1 – Fator de influência para estacas incompressíveis

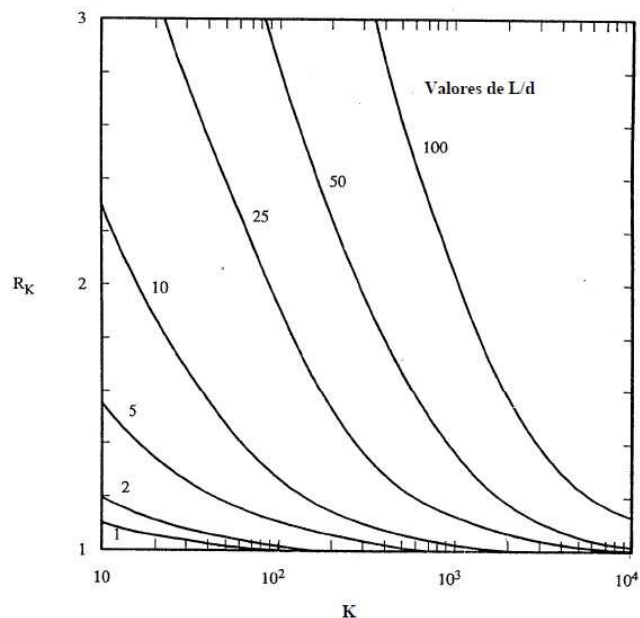


Figura A.2 – Fator de correção devido à compressibilidade do material da estaca

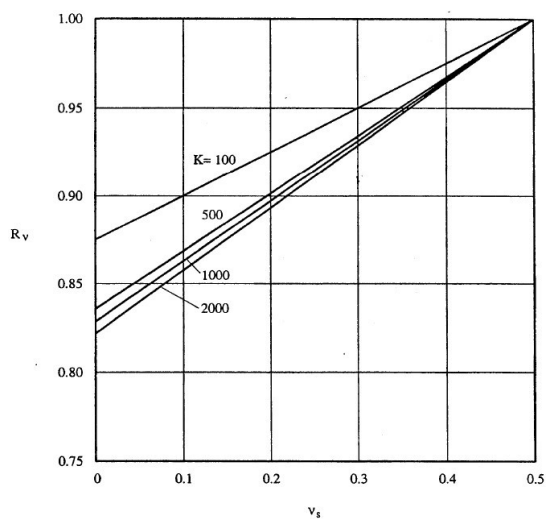


Figura A.3 – Fator de correção do coeficiente de Poisson do solo

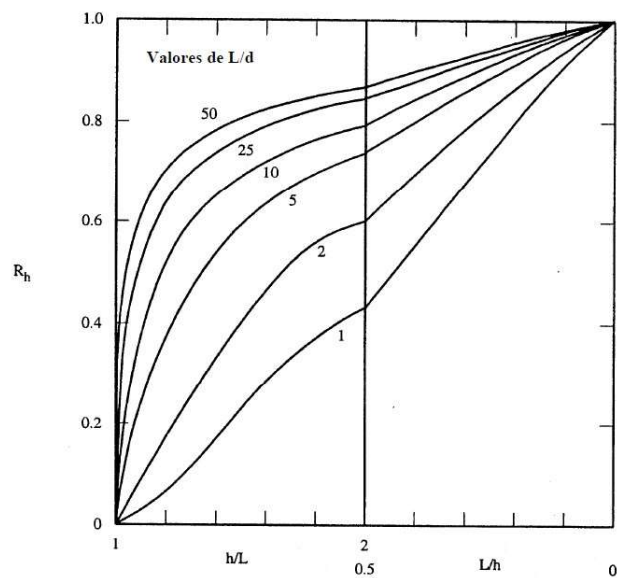


Figura A.4 – Fator de correção devido à presença do estrato rígido

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE**ANEXO I****APÊNDICE ao TCC****Termo de autorização de publicação de produção acadêmica**

O(A) estudante JEAN CARLOS SANTOS ARAÚJO do Curso de Engenharia Civil, matrícula 2019.2.0025.0009-1, telefone: (62) 98566-7510 e-mail Jean180carlosgamer@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROVA DE CARGA ESTÁTICA E MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS DE UMA ESTACA HÉLICE-CONTÍNUA, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 30 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br JEAN CARLOS SANTOS ARAÚJO
Data: 30/09/2025 19:07:32-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Jean Carlos Santos Araújo

Documento assinado digitalmente
gov.br FLAVIO RICARDO LEAL DA CUNHA
Data: 30/09/2025 20:26:44-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: Flávio Ricardo Leal da Cunha