XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/4

Análise Comparativa entre Métodos Semi-Empíricos e Interpretações da Curva Carga-Recalque na Estimativa de Capacidade de Carga em Estacas Hélice Contínua.

Maurício José Azevedo Pinto dos Santos
Professor e Mestre em Geotecnia, IFF, Rio de Janeiro, Brasil, mauriciojaps@hotmail.com

Fernanda de Melo Alves
Engenheira Civil, Centro Universitário La Salle, Niterói, Brasil, fernandameloa@outlook.com

Kathleen Cristina de Almeida Azevedo
Mestranda em Geotecnia, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, kathleencaa@gmail.com

Nathalia Lourenço Sá
Graduanda em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, nathalialourenco.saas@gmail.com

Arthur Pereira de Moraes Silva
Graduando em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, arthur.moraes@poli.ufrj.br

RESUMO: A estaca tipo hélice contínua, moldada in loco, executada por meio de um trado helicoidal contínuo, é uma das mais difundida atualmente por sua facilidade executiva e por não causar perturbações aos vizinhos, sendo bastante utilizada especialmente nos centros urbanos. As provas de carga estáticas são realizadas em estacas com o principal objetivo de avaliar o comportamento previsto em projeto em termos de capacidade de carga e recalques previstos. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma comparação entre as previsões de capacidade de carga por meio dos métodos Aoki e Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Velloso (1981), com os resultados de provas de carga estáticas realizadas em duas estacas do tipo Hélice Contínua Monitorada de 500 mm de diâmetro. Utilizou-se as metodologias de Van der Veen (1953), modificada por Aoki (1976), e as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 6122 na extrapolação da curva carga-recalque, para as interpretações das curvas carga x recalque e obtenção da carga de ruptura. Os resultados de previsão da capacidade de carga por meio de metodologias semi-empíreicas e por meio da interpretação da prova de carga estática mostraram-se bastante aderentes entre si.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de Carga, Estaca Hélice Contínua, Fundações Profundas, Prova de Carga Estática, Curva Carga-Recalque.

ABSTRACT: The continuous flight auger (CFA) pile, molded in situ, executed using a continuous helical auger, it is one of the most widely used types today due to its ease of execution and and because it does not cause disturbance to neighbors, being particularly useful in urban centers. Static load tests are performed on piles with the main objective of evaluating the behavior predicted in the design in terms of load capacity and predicted settlements. In this sense, the present work intends a comparison between the load capacity predictions using the Aoki and Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), and Velloso (1981) methods, with the results of static load tests performed on two piles with 500 mm diameter. The methodologies of Van der Veen (1953), modified by Aoki (1976), and the guidelines established by ABNT NBR 6122, were used in the extrapolation of the load-settlement curve, for obtaining the ultimate load. The results of predicting the load capacity using semi-empirical methodologies and through the interpretation of the static load test proved to be quite consistent with each other.

KEYWORDS: Load Capacity, Continuous Flight Auger, Deep Foundation, Static Load Test, Load-Settlement Curve.

1 INTRODUÇÃO

A estimativa da capacidade de carga em fundações e dos comprimentos das estacas é extremamente importante na etapa de projeto, podendo-se prever com mais precisão o custo total da edificação, bem como também é importante na qualidade e segurança da fundação a ser executada, especialmente em se tratando de estacas escavadas, como é o caso da estaca hélice contínua.

O presente estudo tem como objetivo comparar os resultados da previsão da capacidade de carga de estacas hélices contínuas, executadas em maciço predominantemente arenoso, por meio dos métodos semi empíricos, como Aoki e Velloso (1975) e Velloso (1981), com os resultados de capacidade de carga obtidos a partir das provas de carga estáticas realizadas, interpretadas pela curva carga-recalque pelas metodologia de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976), pelo método indicado por Davisson (1972) e pelo critério da norma de fundações ABNT NBR 6122/2022.

Com relação a estimativa da capacidade de carga, escolheu-se os métodos de Aoki Velloso (1975), Décourt-Quaresma e Velloso (1981) por serem difundidos e amplamente utilizados nacionalmente. Os dois ensaios de provas de carga estática apresentados no presente trabalho foram do tipo “lento”, realizados em estaca de concreto do tipo Hélice Contínua Monitorada com diâmetro de 500 mm.

2 ESTUDO DE CASO

A investigação geológico-geotécnica disponível, na região de implantação da edificação, foi composta por furos de sondagem à percussão, que indicaram, de modo geral, uma mais superficial composta por aterro argiloso com areia fina e média, siltosa, variando de 0,65 m a 2,90 m de espessura.

Subjacente ao aterro, observou uma camada predominantemente de areia fina, média e grossa, variando de 2,20 m e 8,80 m de espessura, e índice de resistência à penetração (Nspt) da ordem de 8 a 15 golpes. Alguns furos indicaram também lentes de argila areno-siltosa, de consistência mole, com espessuras da ordem de 1,00 m. O nível d’água observado se apresentou com profundidades na ordem de 1,00 m.

Os boletins próximos às estacas submetidas às provas de carga estáticas são os mostrados na Figura 1, sabendo-se que a estaca A está executada próximo ao SP-01 e a estaca B próxima ao SP-02.

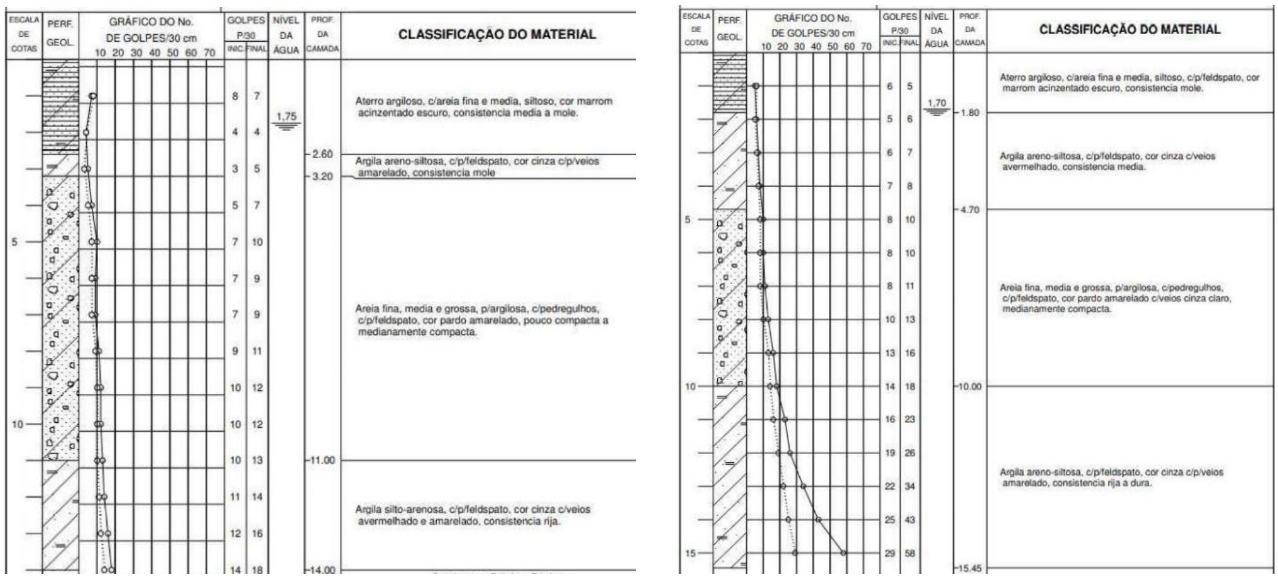


Figura 1 – Boletins de sondagens dos furos SP-01 (esquerda) e SP-02 (direita)

3 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA GEOTÉCNICA

Para a previsão de capacidade carga proposta pela metodologia de Aoki e Velloso (1975), considerando-se os fatores F1 e F2 conforme sugerido por Monteiro (1997), assim como os parâmetros k e α. Conforme os autores, pode-se determinar a capacidade de carga em estaca através da equação 1 mostrada a seguir, sabendo-se que Ap é a Área da ponta da estaca; k um coeficiente função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT; N_P o índice de resistência à penetração na cota de apoio da fundação; N_L o índice de resistência à penetração médio na camada de espessura Δl; U o perímetro do fuste da estaca calculado com o diâmetro equivalente da mesma; ΔL a Profundidade e camada analisada e α o coeficiente função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT.

$$Pr = \frac{A_P K N_P}{F_1} + \frac{U \Sigma \alpha K N_L \Delta L}{F_2} \qquad (1)$$

Décourt -Quaresrna, (1978) apresentaram um método para estimar a capacidade de carga de estacas a partir do ensaio SPT, podendo-se obter a capacidade de carga (R) da estaca, sabendo-se que é a soma das parcelas de resistência lateral (Rl) e de resistência de ponta (Rp), como apresentado na equação 2 abaixo. Adota-se o valor de N_p a média entre o valor de NSPT correspondente a ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior. Além disso, ométodo utiliza o parâmetro C, que é um fator determinado pelo tipo de solo, além dos coeficientes α e β que são dependentes do tipo de solo e estaca.

$$R = \alpha C N_P A_P + \beta 10 \left(\frac{N_L}{3} + 1\right) U \qquad (2)$$

Com relação a limitação de parcela de ponta, na atualização mais recente da ABNT NBR 6122, de 2022, a parcela de ponta deve ser considerada desde que o executor garanta os procedimentos mínimos executivos especificados. Na condição em que se considera a parcela de ponta, ela deve ser limitada pela parcela lateral. Caso contrário, deve-se atribuir a resistência nula para a ponta. O presente trabalho considerou a limitação em 20% da parcela de ponta nas análises e interpretações utilizadas, ou seja, a carga admissível prevista foi limitada ao valor de 1,25 vezes o atrito lateral disponível. Além disso, a carga admissível obtida por meio das metodologias semi-empíricas foi considerada como a parcela de atrito lateral ao longo do fuste disponível utilizando-se o coeficiente de segurança igual a 2,0, como preconizado na norma ABNT NBR 6122.

4 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

O comportamento de uma estaca quando submetido à prova de carga, pode não apresentar ruptura nítida, ou seja, pode representar a denominada ruptura física, em que é necessário a extrapolação da curva carga x recalque. No caso dos ensaios de prova de carga em que não se observa uma ruptura nítida, é necessário o uso de critérios e metodologias para a interpretação e definição do valor da capacidade de carga de estacas.

Nesse sentido, de acordo com o método de Van Der Veen (1953), o critério de ruptura que associa a curva carga x recalque (P x ρ), é apresentado na equação 3 mostrada abaixo.

$$\alpha . P + \ln (1 - P/R) = 0 \qquad (3)$$

Os parâmetros α e R são duas constantes determinadas em um processo por tentativas, adotando-se valores para R e desenhando-se os respectivos gráficos de –ln (1– P/R) contra ρ (recalque). Conforme a metodologia de Van Der Veen (1953), a partir de uma regressão linear, o gráfico que mais se aproximar de uma reta indicará o valor procurado de R e o valor de α, sendo α o coeficiente angular da reta.

Mais tarde, Aoki (1976) propôs uma modificação ao método de Van der Veen (1953), adicionando uma equação de forma a impor que a curva ajustada passasse pela origem do sistema de coordenadas, mostrada na equação 4 a seguir:

$$Q = Qult\,(1 - e^{-(\alpha p + b)}) \quad (4)$$

Nessa equação, o autode escreve que b é o intercepto, no eixo dos recalques, da reta obtida na escala semilogarítmica. Com esse recurso, pode-se obter um valor de referência que proporciona o melhor ajuste da curva carga vs. recalque, a partir dos pontos intermediários e finais do carregamento.

Um método bastante usual nos Estados Unidos, geralmente conservativo, é o de Davisson (1972), que sugeriu o valor da carga limite como sendo fundçaõ do recalque na cabeça da estaca que exceda o encurtamento elástico da estaca por um valor de 4 mm somado a uma parcela correspondente ao diâmetro da estaca dividido por 120, como mostrado na equação 5.

$$\rho = \frac{D}{120} + 4(mm) + \frac{P.L}{EA} \quad (5)$$

Conforme a norma de projeto de fundações (NBR6122), a não ocorrência da ruptura nítida ocorre quando a carga de ruptura da estaca é superior à carga máxima que se pretende aplicar (por exemplo, por limitação de reação) ou quando a estaca ou tubulão é carregada até apresentar recalques elevados, mas que não configuram uma ruptura nítida como descrito.

Portanto, caso não haja a ruptura nítida, a carga de ruptura pode ser convencionada como aquela que corresponde, na curva carga × deslocamento ao recalque obtido pela equação 6:

$$\rho = \frac{D}{30} + \frac{P.L}{EA} \quad (6)$$

As estacas A e B, localizadas ao redor das sondagens SP1 e SP2, respectivamente, foram submetidas à verificação de desempenho por meio das provas de carga estática. O sistema de reação foi composto por 4 estacas projetadas com capacidade de carga à tração ao menos de 50% superior a carga prevista para o ensaio. Os tirantes utilizados com comprimento compatível e o sistema de vigas de reação principal e secundárias projetadas para suportar 1,5 vezes a máxima carga prevista em cada tirante.

O resultado do ensaio de prova de carga estática para a estaca A, de profundidade aproximada igual a 13,60 metros, situado próximo ao furo de sondagem SP-1, é apresentado na Figura 2.

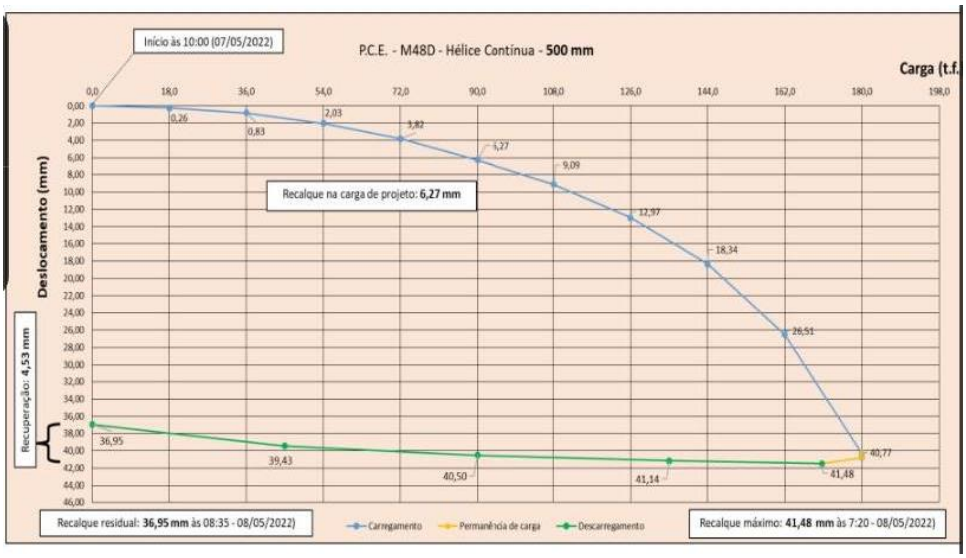


Figura 2 – Curva carga vs. recalque – Estaca A

A figura 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de prova de carga estática para a estaca B, de profundidade aproximada de 17,30 metros, situado próximo ao furo de sondagem SP-2.

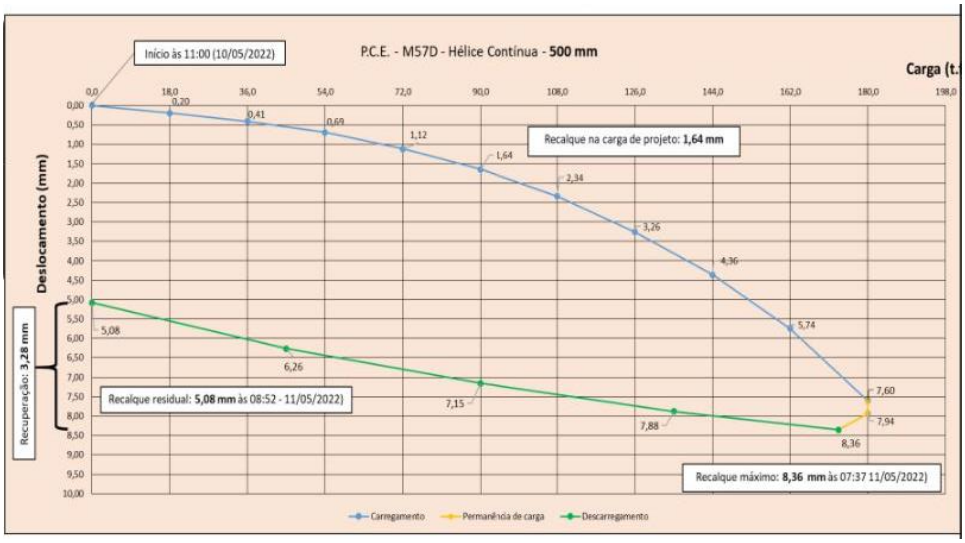


Figura 3 – Curva carga vs. recalque – Estaca B

5 INTERPRETAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE

A interpretação da curva Carga x Recalque foi realizada baseando-se no método de Van Der Veen (1953), modificado por Aoki (1976), para as provas de carga estáticas realizadas nas estacas A (sondagem de referência SP-1) e a estaca B (sondagem de referência SP-2).

As soluções gráficas desenvolvidas para se obter os parâmetros α e R para os dois ensaios dispomníveis estão apresentadas nas figuras 4 e 5. Como pode se observar, os valores de capacidade de carga obtidos são iguais a 1962 kN, coincidentemente, para ambas as estacas A e B ensaiadas, através do método de Van der Veen (1953), modificado por Aoki (1976). As curvas carga x recalque interpretadas são apresentadas em seguida na figura 6 para os dois ensaios analisados.

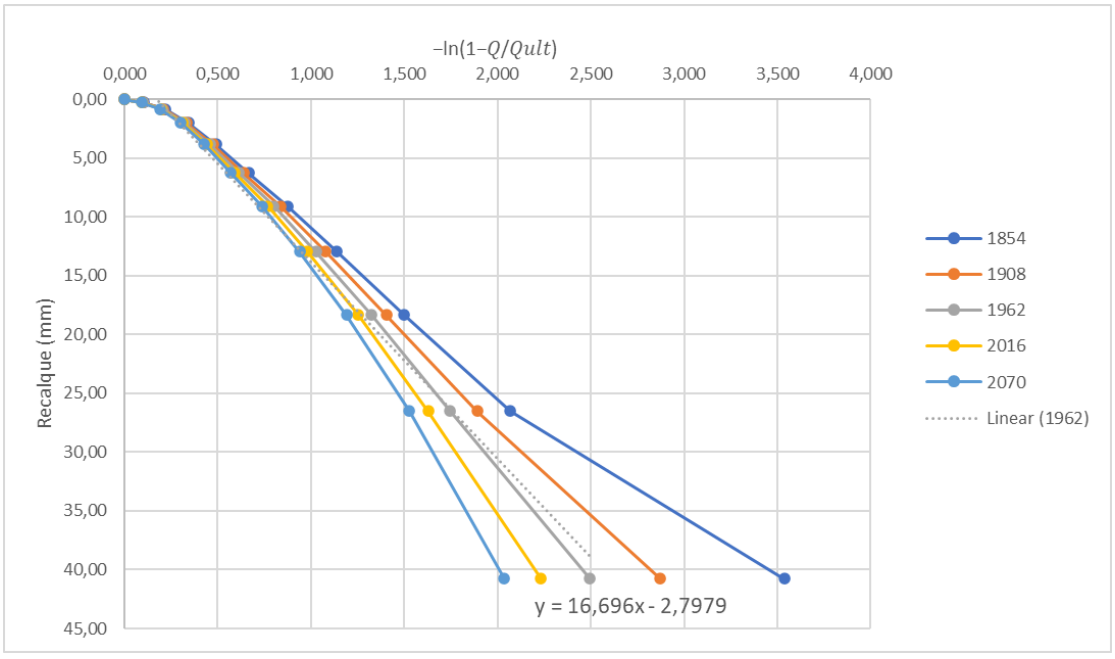


Figura 4 – Curva carga x recalque para a Estaca A

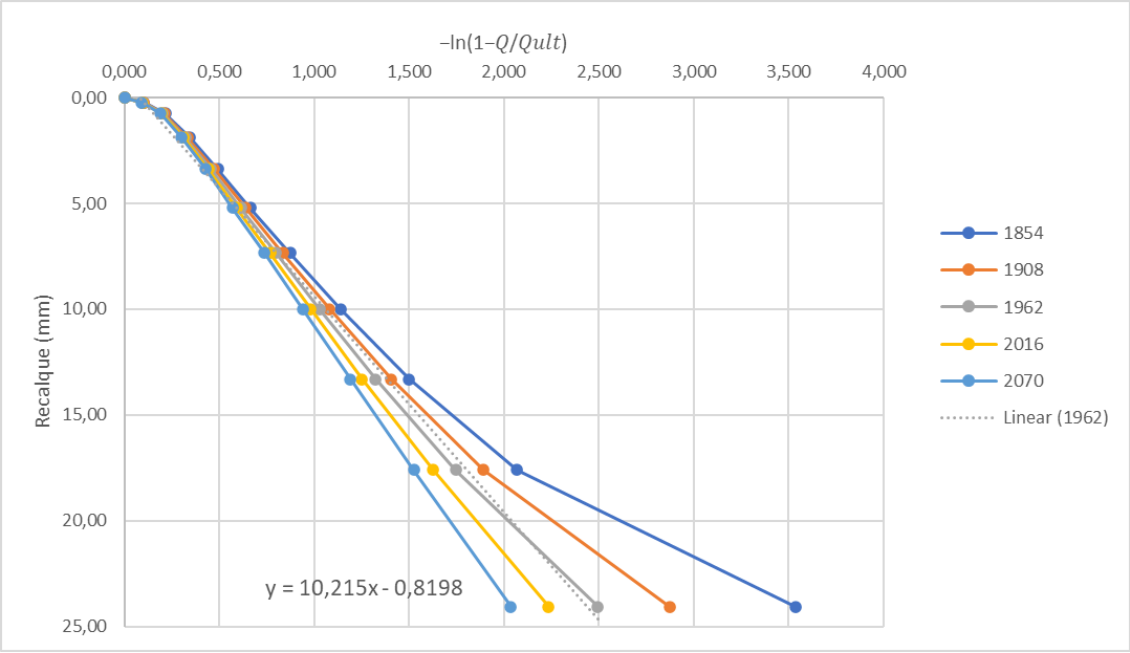


Figura 5 – Curva carga x recalque para a Estaca B

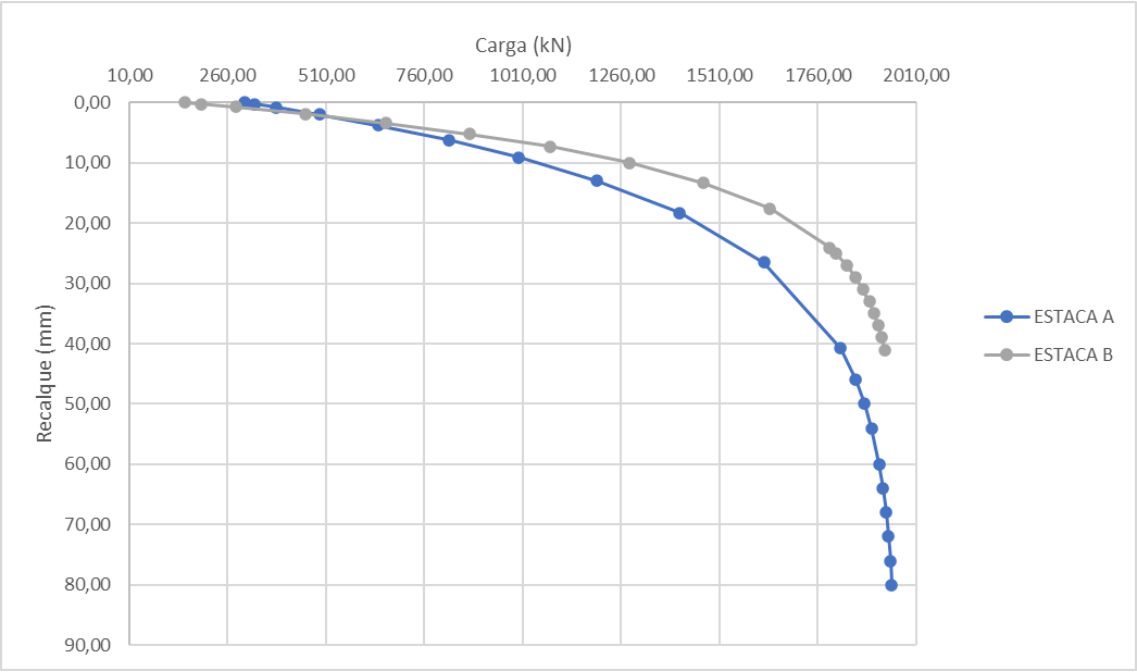


Figura 6 – Curva carga x recalque interpretada

A norma brasileira NBR 6122 de 2022 estabele um critério de ruptura convencional para qualquer porva de carga em que não se observa o tipo de ruptura nítida, sendo possível estimar o valor da carga limite a partir da equação 6 apresentada.

Adotando-se as estacas hélices contínuas, de diâmetros iguais a 500 mm, com módulos de elasticidade iguais a 21 GPa, comprimentos de 13,60 m e 17,30 m para as estacas A e B, respectivamente, chega-se pela metodologia preconizada na NBR 6122 os valores de 1520 kN para a estaca A e 1790 kN para a estaca B.

Por outro lado, consiserando-se o proposto por Davisson (1972), e fazendo uso da equação 5 mostrada, obtem-se os valores de carga limite iguais a 1250 kN e 1550 kN, respectivamente, para as estacas A e B.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, podemos apontar, para as análises e resultadas ao redor da Estaca A, que os métodos semi-empíricos apresentaram previsões conservadores comparadas com os dados obtidos pelas interpretações da curva carga x recalque, como mostrado na Figura 8. Ainda, o método de Davisson (1972) foi o que estimou valor menor da carga de ruptura dentre os métodos utilizados na interpretação da curva carga x recalque. Do mesmo, o método de Velloso (1981) preveu valores mais conservadores da capacidade de carga da Estaca A com o maciço de fundação representado pela sondagem SP-01.

Destaca-se que, no caso da Estaca A, os três métodos semi-empíricos considerados na previsão de capacaidade de carga produziram valores próximos e inferiores a média da carga de ruptura determinada pelas metodologias que interpretam o resultado da prova de carga estaca.

Já para a Estaca B, pode-se observar uma boa aproximação entre as previsões de capacidade de carga através dos métodos semi-empíricos, empregados com base na sondagem SP-02, com os resultados da interpretação da prova de carga. Do mesmo modo que para a Estaca A, obteve-se valores mais conservadores considerando a metodologia semi-empírica de Velloso (1981) e a proposição de Davisson (1972) para a determinação da carga de ruptura atráves da prova de carga estática.

Ressalta-se que é imprescindível para obras com grandes quantidades de estacas a realização do ensaio de prova de carga estática, para a comparação da carga projetada com a carga real ensaiada, representando melhor o comportamento das fundações sobre as solicitações da carga de trabalho.

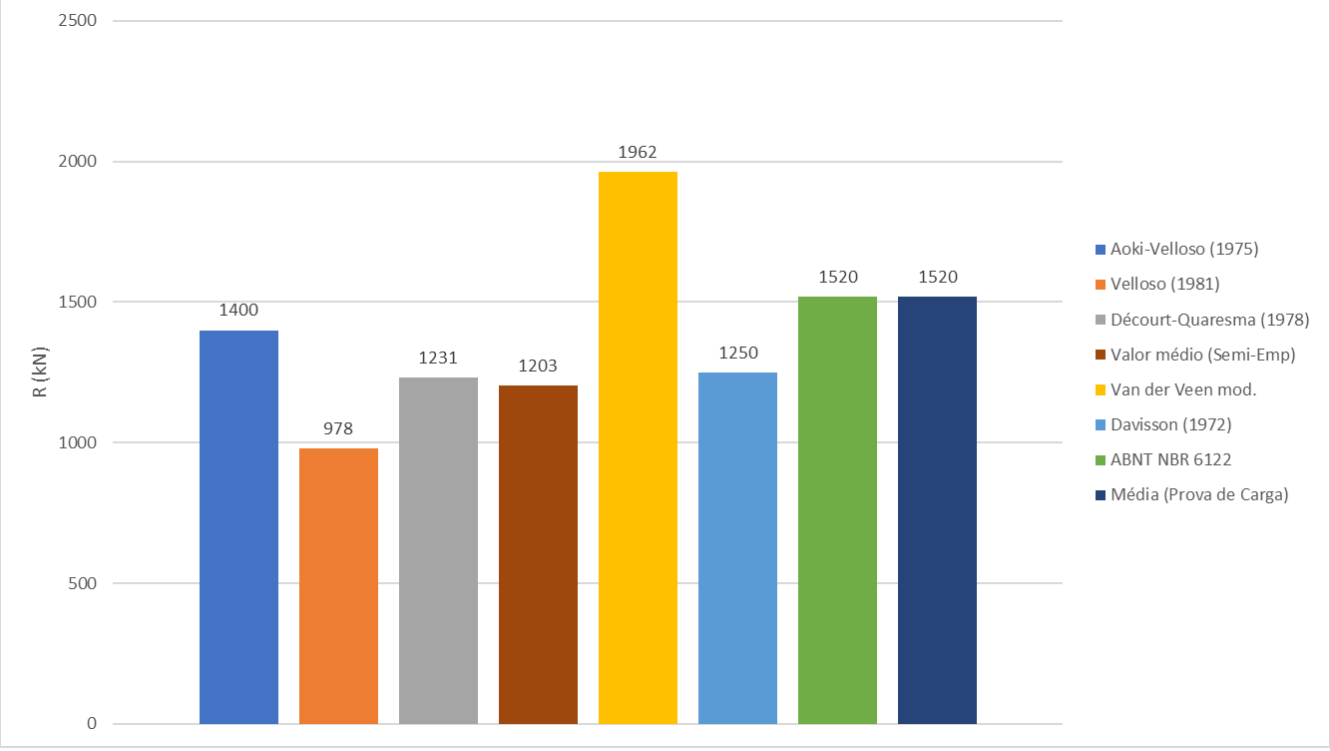


Figura 7 – Gráfico comparativo a capacidade de carga da Estaca A

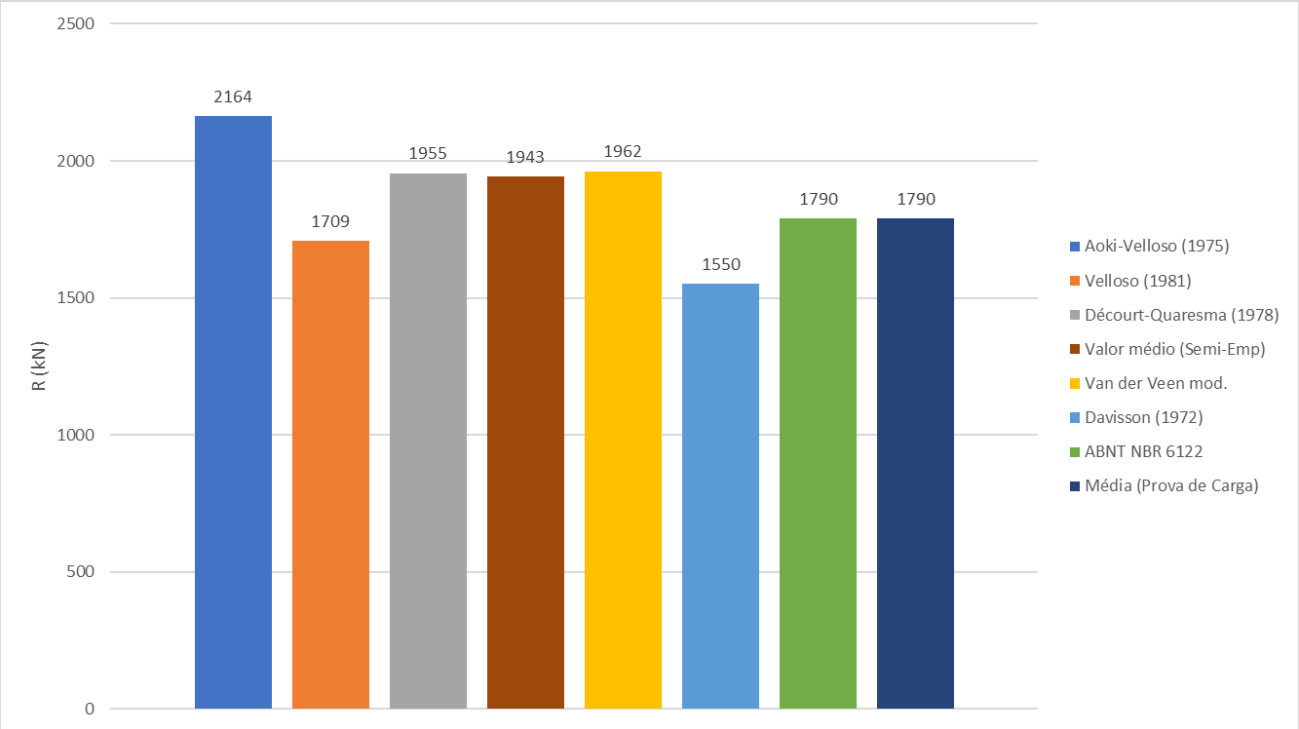


Figura 8 – Gráfico comparativo a capacidade de carga da Estaca B

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOKI, N; VELLOSO, D. A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: V pan american csmfe, 5, Buenos Aires. Proceeding. Buenos Aires, v. 1, p. 367-376.

AOKI, N. (1976). Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas. Notas de Aula, Universidade Gama Filho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

DAVISSON, M.T. (1972). High Capacity Piles. Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, Chicago.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. (1978) Carga resistente de estacas a partir de valores de SPT. In: COBRAMSEF, 6., 1978. Anais, Rio de Janeiro: ABMS, 1978. v.1, p. 45-53.

MONTEIRO, P. F. (1997). Capacidade de carga de estacas – método Aoki-Velloso, Relatório interno de Estacas Franki Ltda..

VAN DER VEEN, C. The bearing capacity of a pile. In: ICSMFE, 3., 1953, Zurich. Proceedings... Zurich, 1953. V2, 9. 84 – 90.

VELLOSO, P. P. C. Estacas em solo: dados para a estimativa do comprimento, Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, 1981.