



Previsão da Curva Carga-Recalque de Estacas com Base no Método das Duas Retas

Rubenei Novais Souza

Engenheiro Civil, Petróleo Brasileiro SA., Rio de Janeiro, Brasil, rubenei@petrobras.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma adaptação simplificadora da metodologia de interpretação de curvas carga-recalque do topo de estacas medidas em provas de carga estática, desenvolvida pelo professor Façal Massad da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, visando a sua utilização na previsão da curva carga-recalque aproximada do topo dos diversos tipos de estacas em projetos correntes. São apresentados casos de aplicação da nova metodologia que justificam a sua utilização como ferramenta de previsão do comportamento dos edifícios, definição da rigidez da fundação para modelagem numérica da análise da interação solo-estrutura (ISE) e preparação de equipes para o acompanhamento de provas de carga estática.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, curva carga-recalque, previsão.

ABSTRACT: This paper presents a simplifying adaptation of the methodology for interpretation of pile top load-settlement curves measured on static load tests, developed by Professor Façal Massad of Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, aiming to make possible its use for prediction of the approximated load-settlement curve of the top of piles in common projects. Some cases are presented that justify the use of this proposal as a tool for prediction the behavior of buildings, definition of the stiffness of the foundation for numerical modeling in analysis of the soil-structure interaction (ISE) and preparation of teams for the monitoring of static load tests.

KEYWORDS: Piles, load-settlement curve, prediction.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Atualmente a estimativa do recalque de fundações estacadas não é usual entre os projetistas, mas este cenário tende a se alterar brevemente, principalmente em função da disseminação do reconhecimento dos benefícios da aplicação da análise estrutural considerando a deslocabilidade das fundações e o aumento do número de casos em que a análise de fundações mistas, isto é, a consideração do funcionamento conjunto das fundações superficial e profunda, é aplicável. Em ambos os casos é indispensável estimar o recalque das estacas. Dessa forma, disponibilizar uma metodologia de simples aplicação, que envolva parâmetros de fácil obtenção e controle e que apresente resultados representativos, pode ser uma contribuição relevante ao aprimoramento dos projetos de fundações.

Na década de 1990 o honorável professor Faíçal Massad, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, desenvolveu uma metodologia matemática de interpretação de provas de carga estática em estacas, a qual considera funções de transferência de carga do tipo elasto-plástico para o atrito lateral e para a ponta e, para estacas cravadas, leva em conta a ocorrência de carga residual aprisionada na ponta. No caso de estaca escavada do tipo rígida, a metodologia mostra que a curva carga-recalque do topo é composta por uma reta inicial associada à mobilização predominante da resistência por atrito lateral, seguida por uma segunda reta, de menor rigidez, correspondente à mobilização franca da resistência de ponta, até atingir a ruptura, o que ficou conhecido no meio técnico como Método das Duas Retas de interpretação de prova de carga estática.

Este trabalho apresenta sucintamente a metodologia desenvolvida pelo professor Faíçal Massad e, em seguida, mostra a adaptação simplificadora proposta. A obtenção dos parâmetros de entrada e as limitações da nova metodologia são discutidas. Ao final são apresentados alguns casos de aplicação.

2 Método das Duas Retas

O Método das Duas Retas é um caso particular, para estacas escavadas rígidas no primeiro carregamento, da análise de estacas em geral em que se considera a transferência de carga por atrito e na ponta da estaca representada por funções do tipo elasto-plástico, pondendo ainda haver carga aprisionada na ponta, devida ao processo executivo ou a um carregamento anterior. Admitindo o subsolo homogêneo, Massad (1992), tendo como base as relações tensão-deslocamento de estacas propostas por Cambefort (1964), apresenta as funções de transferência de carga por atrito e na ponta da estaca mostradas na Figura 1, onde podem ser identificados os casos de (a) estaca escavada em primeiro carregamento, (b) estaca cravada com resistência predominante de ponta e (c) estaca cravada com resistência predominante de atrito. Como pode ser observado, além das resistências limites unitárias por atrito (f_{max}) e de ponta (R_p) das estacas, o conjunto de parâmetros do modelo proposto contempla:

y_1 = deslocamento relativo necessário para o esgotamento do atrito lateral unitário

y_2 = recalque da ponta necessário para o esgotamento da resistência de ponta unitária

P_h = carga aprisionada (residual) na ponta de estacas cravadas

μ = coeficiente de carga residual dado por $1 + \frac{P_h}{A_{lr}}$, onde A_{lr} é a resistência por atrito total

y_{1R} = deslocamento relativo necessário para desmobilizar o atrito lateral unitário máximo.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



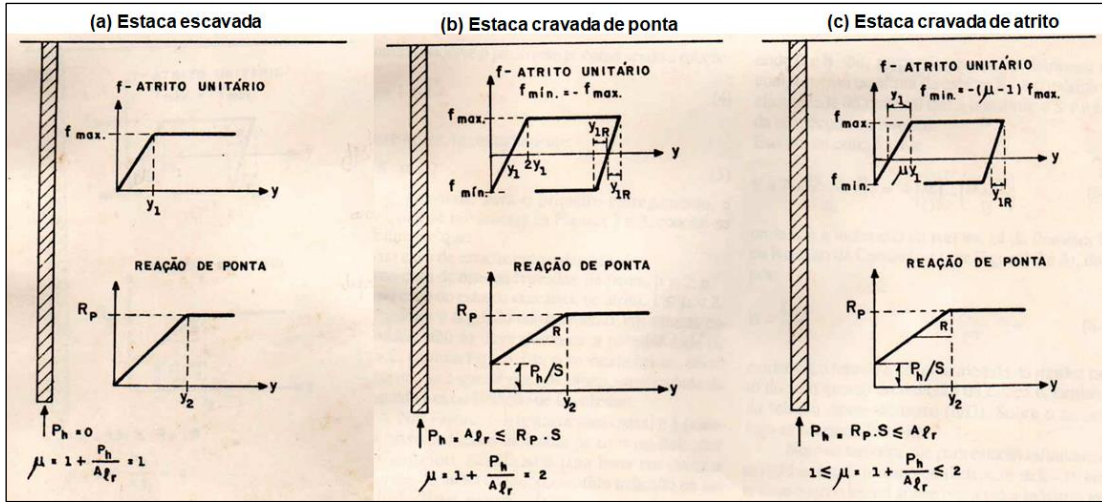


Figura 1: Funções de transferência de carga, adaptada de Massad (1992).

A partir do modelo de transferência de carga apresentado na Figura 1, Massad (1992) apresenta equações matemáticas para o cálculo da curva carga-recalque do topo da estaca, no carregamento e no descarregamento, dividindo-a em sete trechos como mostra esquematicamente a Figura 2. O propósito do referido autor é utilizar o equacionamento matemático para, dada uma curva carga-recalque do topo de uma estaca medida em prova de carga estática, calcular a curva teórica ajustando iterativamente os parâmetros de entrada até obter a convergência e, assim, a interpretação da curva medida em termos da distinção das parcelas de resistência por atrito e de ponta mobilizadas e da identificação da ocorrência e quantificação da carga residual na ponta da estaca.

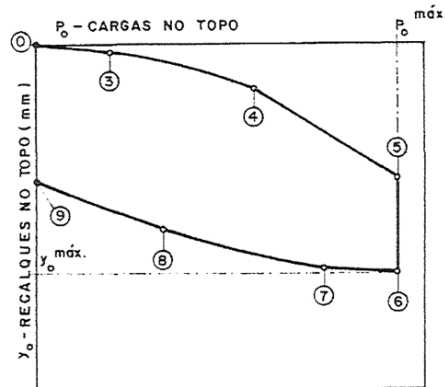


Figura 2: Curva carga-recalque do topo teórica, Massad (1992).

No caso particular de estacas escavadas rígidas em primeiro carregamento é possível mostrar que os pontos 3 e 4 da curva apresentada na Figura 2 coincidem, resultando que, no carregamento, a curva carga-recalque do topo desse tipo de estaca é composta por duas retas, uma primeira, mais rígida, correspondente à mobilização predominante da resistência por atrito lateral, e uma segunda, menos rígida, correspondente à mobilização franca da resistência de ponta. A aplicação do cálculo dessa curva teórica na interpretação de curvas carga-recalque do topo de estacas escavadas de grande diâmetro medidas em provas de carga estática tem sido denominada Método das Duas Retas.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



3 Adaptação Simplificadora da Metodologia de Massad (1992)

A aplicação da metodologia de Massad (1992) na previsão de curvas carga-recalque do topo de estacas não requer, necessariamente, adaptação. Seria suficiente estimar os parâmetros de entrada do modelo constitutivo estabelecido, isto é, das funções de transferência de carga, e aplicar o equacionamento matemático para os diversos trechos da curva. Ocorre que, como alguns dos parâmetros envolvidos são de difícil estimativa, parece justificável simplificar a metodologia de modo a reduzir o número de parâmetros de entrada, reconhecendo que o resultado será apenas uma aproximação da curva carga-recalque do topo da estaca. Neste sentido, apresenta-se a seguir a análise dos aspectos da metodologia que podem ser simplificados visando atender o propósito de disponibilizar um procedimento simples e representativo de estimativa da curva-recalque aproximada do topo de estacas em geral.

O primeiro aspecto da metodologia de Massad (1992) que pode ser simplificado é admitir o deslocamento relativo necessário para esgotamento do atrito lateral unitário, y_1 , constante igual a 5 mm. Resultados de interpretação de inúmeras provas de carga tem mostrado que este é um valor médio recorrente e que raras variações significativas em torno desse valor, como ocorre em solos francamente granulares, que apresentam valores maiores, não alteram substancialmente a forma da curva carga-recalque. A segunda simplificação pertinente é prescindir da determinação do ponto 3 da curva apresentada na Figura 2, admitindo que o trecho entre a origem da curva e o ponto 4, o qual corresponde ao esgotamento da resistência por atrito, pode ser representado por uma única reta, qualquer que seja o tipo e as dimensões da estaca. É claro que, como mostra Massad (1992), em estacas de menor rigidez a curva real é não linear no final desse trecho, mas tal simplificação não prejudica o uso pretendido da curva aproximada.

Em relação à mobilização da resistência de ponta, o recalque necessário para o esgotamento dessa parcela de resistência, y_2 , realmente é de difícil estimativa, mas é possível, admitindo uma certa variabilidade, adotar valores representativos da constante R de mobilização da resistência de ponta para os diferentes tipos de estacas. Considerando a experiência de interpretação de inúmeras provas de carga, bem como os resultados apresentados por Massad (1992), propõe-se adotar valores básicos de R iguais a 100 kPa/mm para os diversos tipos estacas escavadas e 1000 kPa/mm e 500 kPa/mm respectivamente para estacas cravadas com resistência predominante de ponta e por atrito. Experiências regionais e procedimentos executivos peculiares poderão suscitar a adoção de valores diferentes desses propostos.

A consideração da ocorrência da carga residual aprisionada na ponta de estacas cravadas na estimativa da curva carga-recalque do topo parece, em princípio, de grande dificuldade de implementação em função da complexidade do mecanismo físico envolvido e da provável variabilidade da sua magnitude, a qual é influenciada pelas características do perfil do subsolo e pela energia aplicada no final da cravação. Contudo, analisando a metodologia de Massad (1992), resumida na Figura 1, constata-se que a máxima carga residual aprisionada é a resistência de ponta máxima, no caso de estacas com predominância da resistência por atrito, ou a resistência por atrito total, no caso de estacas em que predomina a resistência de ponta. Com base nesta constatação, é possível adotar, como previsão, que em estacas cravadas tende a ocorrer uma carga residual aprisionada na ponta igual a sua resistência por atrito lateral ou sua resistência de ponta, a que for menor, cabendo pontuar que estes são valores limites superiores e que, em certos casos, dependendo do excesso de poropressão gerado durante a cravação das estacas, que reduz provisoriamente, durante a cravação, a parcela de resistência por atrito, a carga residual aprisionada na ponta poderá ser menor que estes valores limites.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Adicionalmente ao exposto acima, é importante enfatizar que as incertezas associadas ao valor real da carga residual aprisionada em estacas cravadas não devem ser tomadas como empecilho para a adoção da metodologia proposta, pois, embora a sua ocorrência influencie significativamente o diagrama de esforço normal na estaca em um carregamento posterior, como mostrou Fellenius (2000), a sua influência na curva carga-recalque do topo da estaca é bem menos pronunciada. A Figura 3 apresenta curvas carga-recalque do topo estimadas utilizando a metodologia proposta para uma estaca pré-moldada centrifugada de 50 cm de diâmetro e 10 m de comprimento, considerando diversas condições idealizadas de resistência por atrito e de ponta e capacidade de carga total sempre igual a 2600 kN. Como pode ser observado, o efeito da carga residual aprisionada na curva carga-recalque, que sempre é torná-la mais rígida na fase inicial do carregamento, tende a ser insignificante quando a carga residual é pequena ou muito elevada.

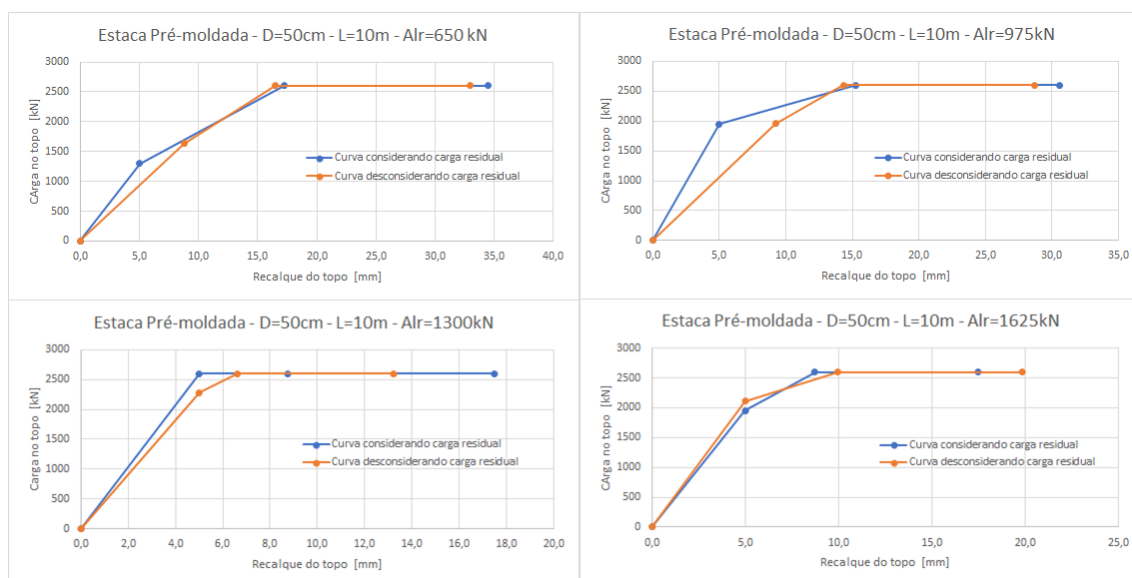


Figura 3: Estimativa de curvas carga-recalque do topo de uma estaca pré-moldada centrifugada com 50 cm de diâmetro, 10 m de comprimento e capacidade de carga total igual a 2600 kN.

Tendo como base o exposto acima, verifica-se que a curva carga-recalque do topo aproximada de qualquer estaca, considerando apenas o carregamento, pode ser estimada com base no Método das Duas Retas, calculando-se apenas 2 pontos da curva, tendo como parâmetros de entrada, além das dimensões da estaca, os seguintes:

- y_1 = deslocamento relativo necessário para esgotamento do atrito lateral unitário = 5 mm
- A_{lr} = resistência por atrito total
- Q_u = resistência de ponta total
- R = constante de rigidez de mobilização da resistência de ponta igual a 100 kPa/mm para estacas escavadas e 1000 kPa/mm e 500 kPa/mm respectivamente para estacas cravadas com resistência predominante de ponta e por atrito
- P_h = carga aprisionada (residual) na ponta de estacas cravadas = A_{lr} ou Q_u , a que for menor

As Figuras 4 e 5 mostram esquematicamente as curvas carga-recalque do topo estimadas e as expressões para o cálculo das coordenadas dos pontos A e B dessas curvas, respectivamente para os casos de estacas escavadas e cravadas. Um aspecto importante a comentar neste ponto é

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



que a previsão de se mobilizar uma resistência igual a duas vezes P_h com o deslocamento do topo da estaca cravada de apenas y_1 , que em princípio pode parecer menor do que o esperado, decorre do fato de que observações práticas têm indicado que a desmobilização do atrito ocorre com deslocamento relativo muito baixo, isto é, y_{1R} é muito pequeno.

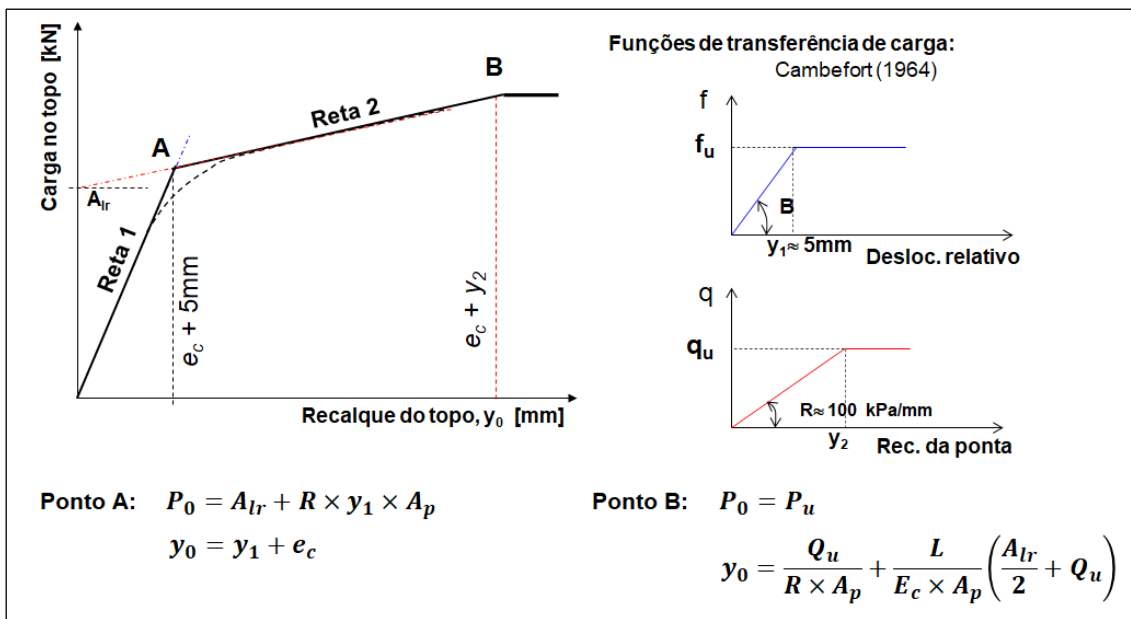


Figura 4: Estimativa da curva carga-recalque do topo de estacas escavadas.

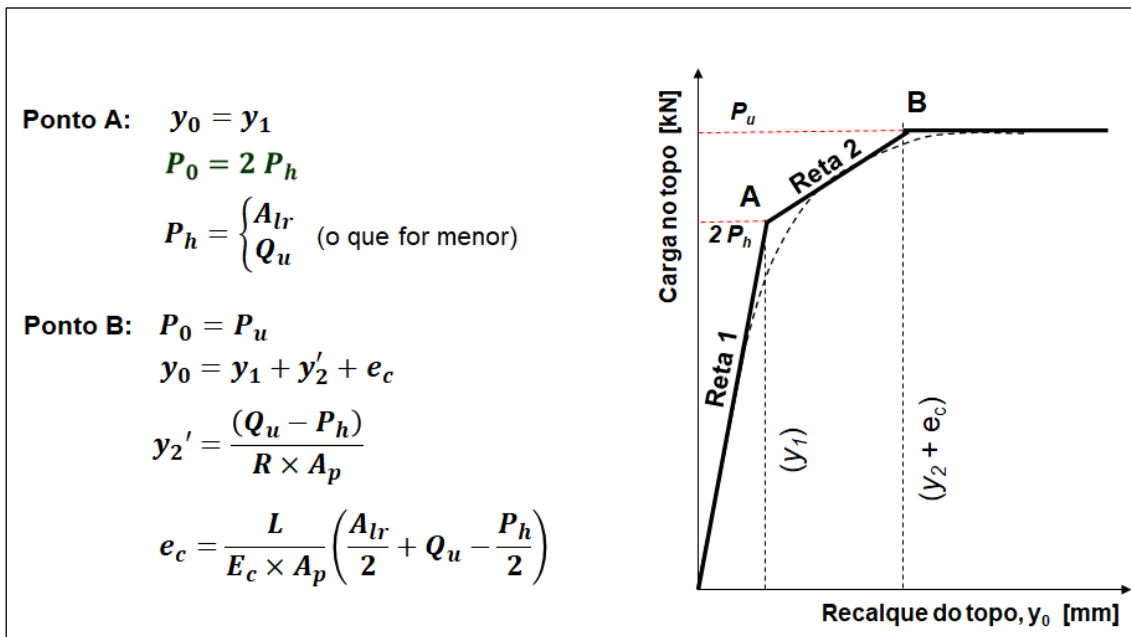


Figura 5: Estimativa da curva carga-recalque do topo de estacas cravadas.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



4 Algumas Aplicações da Metodologia Proposta

A seguir são apresentadas duas aplicações da metodologia proposta, ambas envolvendo estacas escavadas do tipo hélice contínua. A primeira é referente a um edifício de 12 pavimentos, estudado no trabalho acadêmico de Machado (2022), que foi construído na cidade de Niterói-RJ e cujo perfil do subsolo está apresentado na Figura 6. Como pode ser observado, as sondagens SP-02, SP-03 e SP-04 apresentam um perfil de resistência bem menor do que o apresentado pelas sondagens SP-01, SP-05 e SP-06. As fundações desse edifício contemplaram estacas hélice contínua de 50 cm de diâmetro e comprimentos perfurados variáveis entre cerca de 13 m e 17 m. As curvas carga-recalque do topo, estimadas considerando as seis sondagens disponíveis e os comprimentos predominantes das estacas em cada trecho, estão apresentadas na Figura 7, a qual também apresenta as curvas carga-recalque das quatro provas de carga estática executadas na obra. Embora, infelizmente, as informações disponíveis não tenham permitido associar, com segurança, a sondagem mais próxima a cada estaca ensaiada, pode-se observar que as curvas previstas exprimem a significativa heterogeneidade do subsolo, confirmada pelos resultados das provas de carga, que mostram existir um grupo de estacas com capacidade de carga e rigidez geotécnica mais elevadas que o outro, informação que pode ser relevante para a análise estrutural do edifício.

A segunda aplicação da metodologia proposta contempla o caso de um edifício construído na baixada fluminense em um terreno cujo subsolo é representado pelas sondagens a percussão reproduzidas na Figura 8. As fundações desse edifício envolveram estacas escavadas tipo hélice contínua de 40 cm a 70 cm de diâmetro e comprimento perfurado previsto de 12 m. Em alguns blocos, devido ao comprimento perfurado insuficiente das estacas hélice contínua, foram executadas estacas tipo raiz. Após a construção e ocupação do edifício, período em que houve monitoramento de recalque em vários pilares, Vaz (2023) realizou um estudo acadêmico que consistiu na análise estrutural do edifício levando em conta a deslocabilidade das fundações, a qual foi representada pelas rigidezes obtidas a partir da curva carga-recalque das estacas estimadas com base na aplicação da metodologia proposta. A Figura 9 apresenta a comparação de recalques previstos e medidos de vários pilares do prédio. Como pode ser observado, os valores medidos são bem próximos dos estimados.

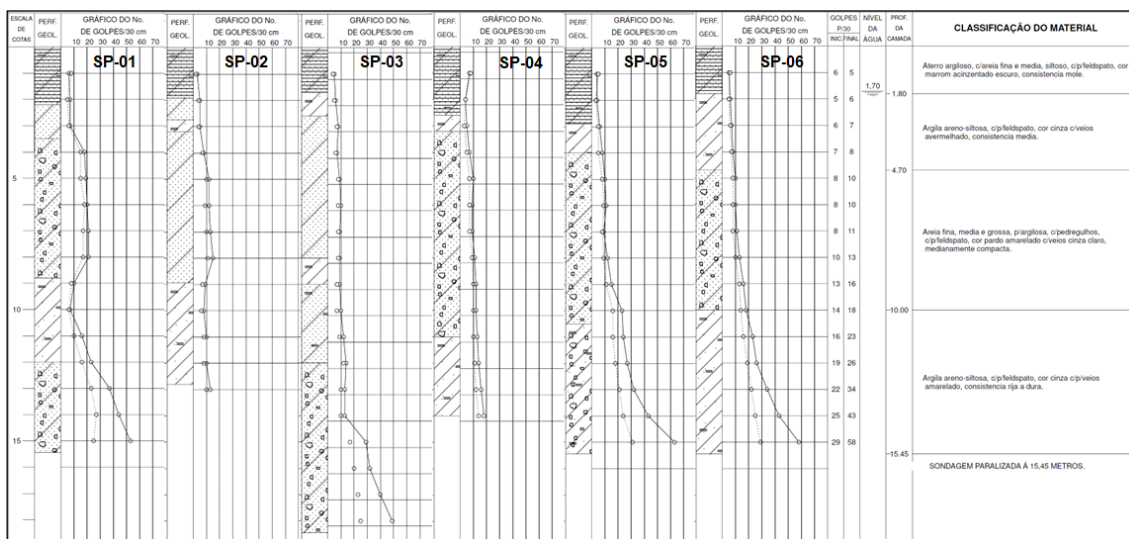


Figura 6: Edifício em Niterói-RJ. Sondagens a percussão executadas no terreno. Machado (2022)

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



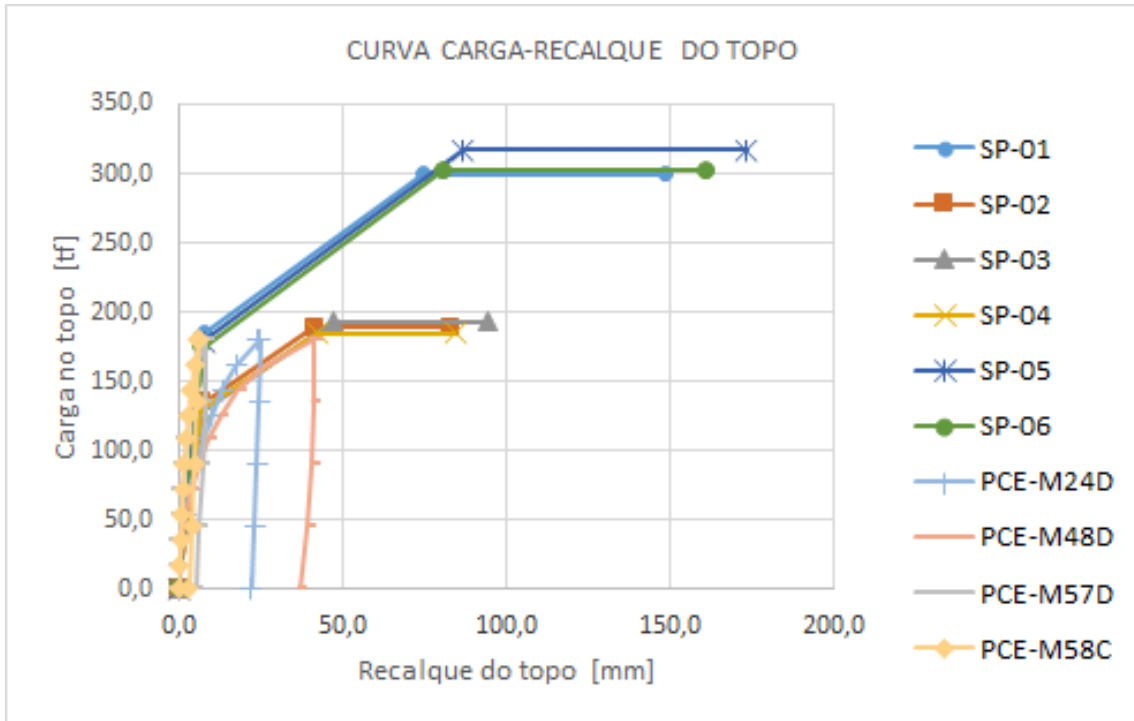


Figura 7: Edifício em Niterói-RJ. Curvas carga-recalque do topo estimadas considerando as sondagens disponíveis e curvas medidas em 4 provas de carga estática em estacas tipo hélice contínua de 50 cm de diâmetro e cerca de 13 m a 17 m perfurados.

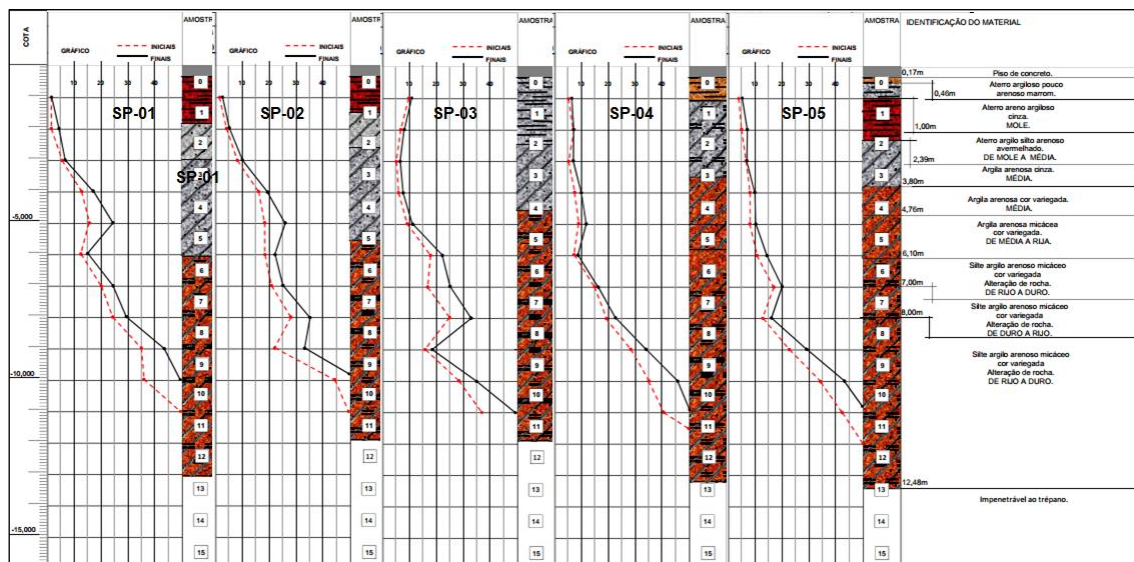


Figura 8: Edifício na baixada fluminense. Sondagens a percussão executadas no terreno. Vaz (2023).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



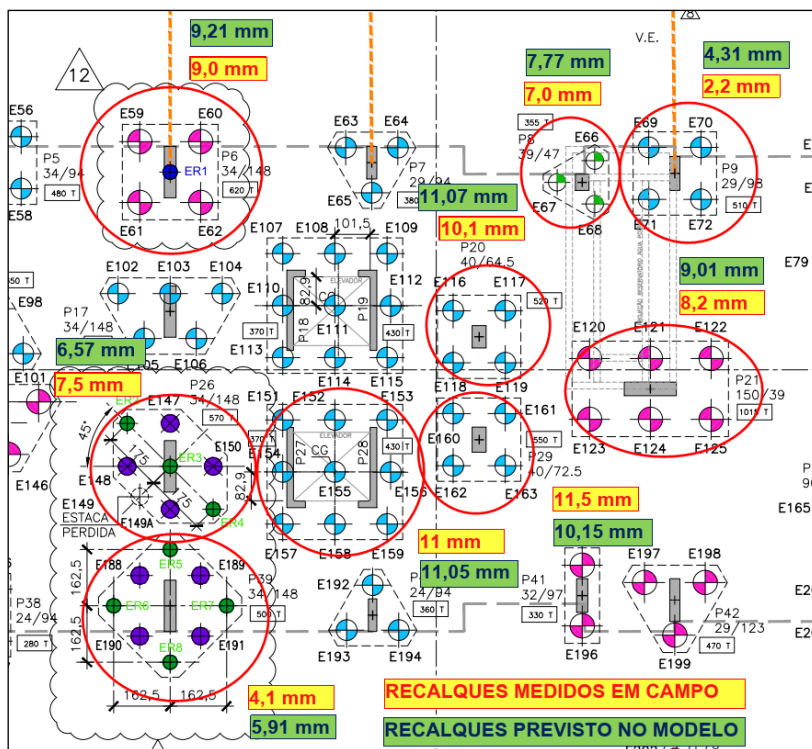


Figura 9: Edifício na baixada fluminense. Comparação entre recalques de pilares estimados e medidos, Vaz (2023).

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia simples de se obter uma curva carga-recalque do topo aproximada de estacas em geral, baseada no Método das Duas Retas, que leva em conta funções de transferência de carga do tipo elasto-plástico, tanto para o atrito quanto para a ponta da estaca. Conforme se demonstrou, a metodologia pode ser aplicada para estimar a rigidez geotécnica das fundações estacadas visando subsidiar as análises estruturais de edifícios que levam em conta a deslocabilidade das fundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cambefort, M. (1964). *Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux*. Annales de l'Institut du Batiment et des Travaux Public, n.204.
- Machado, M.L.H. (2022). *Dimensionamento geotécnico de fundações mistas*. Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense.
- Massad, F. (1992). *Sobre a interpretação de provas de carga em estacas, considerando as cargas residuais na ponta e a reversão do atrito lateral. Parte 1: solos relativamente homogêneos*. Revista Solos e Rochas, 15 (2), p. 103-115.
- Vaz, M.J.A. (2023). *Impacto da interação solo-estrutura nas cargas e recalques das fundações – Estudo de caso*. Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

