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/COBRAMSEG2026.5/77

Método para Previsão de Recalque em Estacas Isoladas

Henrique Dinis
Professor Pesquisador, Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil
henrique.dinis@mackenzie.br

RESUMO: A previsão de recalques verticais em estacas isoladas é efetuada, na prática, por métodos obtidos por aproximação numérica que abordam a teoria clássica das estruturas. Sendo semiempíricos, procede-se ao seu balizamento por meio de provas de carga ou outras fontes. Entre alguns métodos utilizados para a estimativa de recalques verticais em estacas, são comuns os de transferência de carga entre o fuste da estaca e o solo, que podem ter como base a propagação das tensões, ou a consideração de deformações por cisalhamento ao longo do fuste, que se compõe às de ponta, como o de Randolph & Wroth (1978), referência para este trabalho. A proposta apresentada tem como resolução o uso de modelos unidimensionais, com resolução numérica a partir do Método dos Elementos Finitos-MEF, admitindo como vínculos do solo com a estaca, elementos de mola axiais, cuja rigidez é obtida ou por compressibilidade do solo, para representar a resistência de ponta ou por deformações por cisalhamento puro, para efetuar a transferência da carga do fuste ao solo. Como resultado, são apresentados critérios para a definição do modelo estaca-solo pelo MEF unidimensional e de formulações para avaliação dos coeficientes de rigidez do solo, por meio de molas elásticas. Conclui com uma aplicação numérica demonstrando sua aplicação e comparando o resultado aos de métodos propostos por outros autores, de uso corrente, na prática.

PALAVRAS-CHAVE: Recalque em Estacas Isoladas; Previsão de Recalque em Estacas; Coeficientes de Rigidez do Solo; Interação Estaca x Solo.

ABSTRACT: The prediction of vertical settlements in isolated piles is carried out, in practice, by methods obtained by numerical approximation that approach the classical theory of structures. Being semi-empirical, they are demarcated by means of load tests or other sources. Among some methods used to estimate vertical settlements in piles, load transfer between the pile shaft and the ground are common, which may be based on the propagation of stresses, or the consideration of shear deformations along the shaft, which is composed of the tip deformations, such as that of Randolph & Wroth (1978). The proposal presented by this work has as its solution one-dimensional models, with numerical resolution from the FEM, admitting as bonds between the soil and the pile, axial spring elements, whose stiffness is obtained either by soil compressibility, to represent the tip resistance or by deformations by pure shear, to transfer the load from the shaft to the soil. As a result, criteria are presented for the definition of the pile-soil model by the one-dimensional FEM and formulations for the evaluation of the soil stiffness coefficients, by means of elastic springs. It concludes with a numerical application demonstrating its application and comparing the result to those methods proposed by other authors, in current use, in practice.

KEYWORDS: Settlement in Isolated Piles; Pile Settlement Forecast; Soil Stiffness Coefficients; Pile x Soil Interaction.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento das estacas isoladas ao efeito de recalque por carga axial é complexo e depende de diversos fatores e circunstâncias, como as propriedades do solo e sua estratificação, diâmetro e profundidade da estaca, método de execução, entre outros. A principal questão que se depara para a previsibilidade dos recalques é a hiperestaticidade que envolve o problema. A maioria dos métodos que abordam a questão baseiam-se na teoria clássica da elasticidade, assumindo simplificações para viabilizar o cálculo dos recalques, de forma prática. Em se tratando de estacas flexíveis, o problema ganha mais uma componente, a deformação elástica da própria estaca, que interage com as condicionantes anteriores no equilíbrio das deformações e

tensões do sistema estaca-solo. Para as cargas de serviço, as reações decorrentes da resistência de ponta são razoavelmente pequenas, muitas vezes desconsideradas na previsão dos recalques, no entanto, para uma análise plena do problema, avalia-se, neste trabalho, a interação entre as três componentes.

Existe uma infinidade de métodos propostos para a resolução da questão, alguns, inclusive, empíricos. As primeiras propostas mais consistentes tiveram como base a teoria da elasticidade e serviram como base para a evolução dos processos analíticos e numéricos que se seguiram. Cabe citar, neste contexto, métodos que tiveram como base a teoria da elasticidade para reproduzir o comportamento elástico linear do solo, como exemplo, o de Poulos & Davis (1980), que utiliza as equações de Mindlin para determinar parcelas de deformações causadas ao longo do fuste e ao nível da ponta, a atuar no solo de forma conjunta e acumulada, em compatibilidade ao deslocamento da estaca, mediante a transferência de carga. O método apresenta formulações e ábacos, fornecendo coeficientes de correção para uma série de circunstâncias e variáveis distintas, como deformabilidade da estaca, estratificação do solo, dentre outras.

Também, de relevância para referenciar a matéria, o método de Randolph & Wroth (1978), que ao contrário dos anteriores, tem como princípio de resolução, a consideração unicamente das deformações por cisalhamento puro do solo na profundidade do fuste, para efetuar a transferência da carga do fuste ao solo. A rigidez do solo à deformação da ponta, por sua vez, tem como base a deformabilidade à compressão. Subdivide, assim, o substrato em duas camadas distintas, uma relativa ao embutimento da estaca e uma segunda, aos solos abaixo da ponta. As parcelas do recalque assim obtidas, são então compatibilizadas em função da rigidez relativa de cada parcela. Prevê ainda, para o recalque total, a consideração da deformação axial elástica da estaca e existência de solos não homogêneos.

Para a proposta em questão, a metodologia empregada propõe a modelagem da estaca segundo o modelo de Whinkler (1867), por meio do Método dos Elementos Finitos – MEF, unidimensional, tratando o solo como meio elástico e considerando a flexibilidade estrutural da estaca. Para a rigidez das molas, representando o solo, propõe seu equacionamento com a consideração do comportamento elástico-linear do solo, sendo a transferência de carga da estaca para o solo efetuada, em parte pelo fuste, a partir da deformabilidade do solo ao cisalhamento e em parte, pela compressibilidade dos solos de ponta, ambos os efeitos considerados de forma independente. Não se previu, nas formulações propostas, ou na resolução, a perda gradativa ou abrupta da rigidez dos elementos solo, por considerar sua plastificação.

Este trabalho propõe, fundamentalmente, uma metodologia para prever uma curva linear carga-recalque, aplicada a estacas carregadas axialmente, agindo no intervalo de carregamento, da etapa inicial até a carga admissível determinada por métodos usualmente empregados para previsão de capacidade de carga em estacas. Exemplifica-se sua aplicação, por meio da retro análise de um caso real, comparando seu resultado à curva carga-recalque resultante da prova de carga estática, realizada na estaca exemplificada.

2 MÉTODO

A resolução do método proposto utiliza os conceitos e premissas de que as deformações no solo ocorrem em dois substratos distintos e sobrepostos, a camada de solo ao longo do fuste e a dos solos abaixo da ponta. Utilizando-se de simplificações quanto ao modelo físico e analítico de transferência de carga, assume que as deformações do solo ao longo do fuste ocorram exclusivamente por tensões de cisalhamento puro τ_0 e as do contato ponta-solo, pelo efeito de compressibilidade do solo por placa rígida, a partir da consideração do coeficiente de recalque vertical k_v. Pressupõe-se que não ocorram interações, entre as tensões ao longo do fuste por cisalhamento, com as do solo sob o efeito de compressibilidade na ponta, causadas na compatibilidade da propagação das deformações.

Compatibiliza-se, desta forma, as deformações obtidas para cada um dos casos, obtendo-se o recalque final da estaca ρ. A deformabilidade da estaca causa, notadamente, a hiperasticidade do sistema, por fazer com que as deformações ao cisalhamento, ao longo da estaca, não sejam constantes. Ver Figura 1.

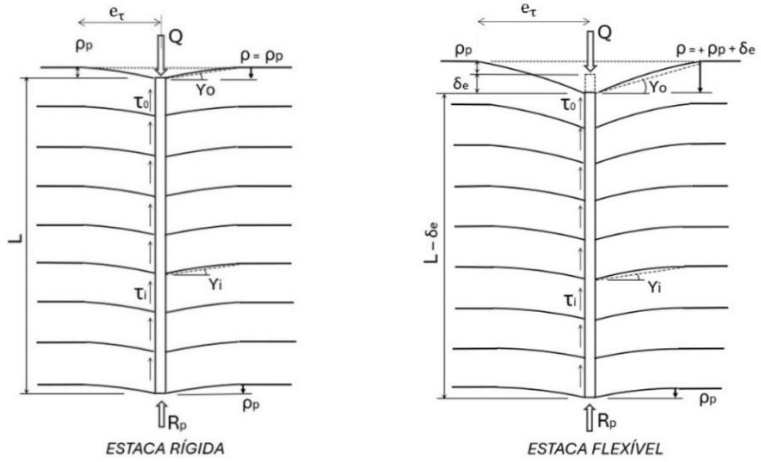


Figura 1. Modelo de comportamento de solo para recalques em estacas isoladas.
Fonte: Dinis (2024)

Adota-se, como proposta para o método em questão, um modelo numérico de resolução, assumindo-se simplificações quanto ao comportamento do solo, admitindo-se que a mobilização ao cisalhamento ocorra mediante um ângulo ao cisalhamento ϒ, secante à linha de recalque do solo, fazendo com que as deformações por cisalhamento ocorram de forma linear. Admite, por outro lado, que a deformação do solo da ponta ocorra em proporcionalidade direta ao coeficiente de recalque vertical k_v. O esquema das deformações está indicado na Figura 2, considerando uma estaca rígida, em solo elástico, homogêneo.

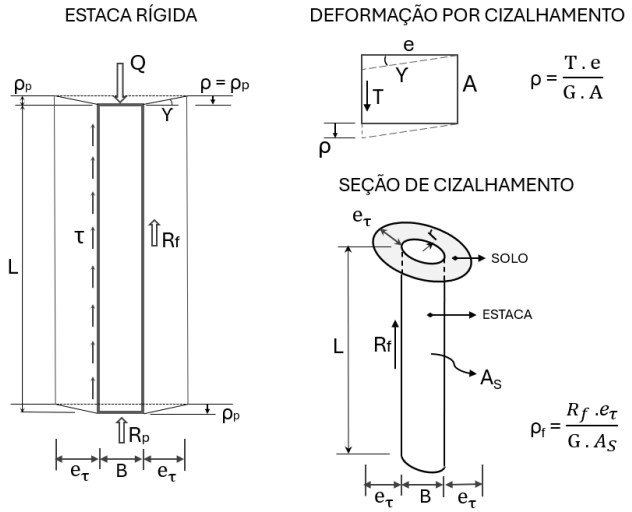


Figura 2. Comportamento admitido para a estaca-solo na determinação de recalques.
Fonte: Dinis (2024)

Para o recalque do solo ao longo do fuste, considerando uma estaca circular rígida, de comprimento L e diâmetro B, de acordo com os esquemas da Figura 2, admitindo-se que a força tangencial τ refere-se à tensão ao cisalhamento desenvolvida na superfície do fuste, tem-se a seguinte parcela de recalque por cisalhamento do solo ρ_f ao longo do fuste:

$$\rho_f = R_f . e_\tau / G . A_S \qquad (1)$$

Para o método em questão, tratando-se de estacas circulares, com área superficial do fuste: $A_S = \pi . B . L$; e fazendo $e_\tau = F1.B$, resulta a seguinte expressão para ρ_f:

$$\rho_f = R_f . F1 / \pi . G . L \qquad (2)$$

sendo:
F1 = Cs. Cc: Fator corretivo que compõe o valor da largura radial de cisalhamento e_τ. Na falta de dados experimentais, sugere-se adotar os valores indicados, a seguir.

Para o valor de Cs, admite-se que a largura radial de influência das deformações por cisalhamento em torno da estaca, para solos mais granulares, se propaga em menor distância (amortece). Ver Tabela 1.

Tabela 1. Valores de Cs.

Tipo de Solo	Cs
Areias	1.2
Siltes	1,4
Argilas	1,5

Para os valores do fator de correção Cc (método construtivo da estaca), são consideradas faixas de variação para os coeficientes corretivos da largura radial das deformações por cisalhamento. Admite-se que os efeitos do desconfinamento ou do aumento da pressão de confinamento natural do solo, que envolvem o fuste, interferem na largura radial da deformação por cisalhamento. Ver Figura 3.

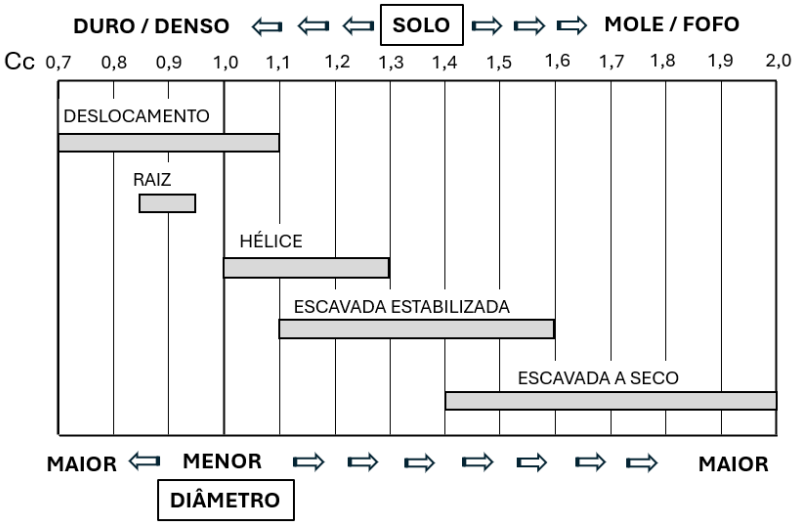


Figura 3. Fator de correção Cc – efeito do método construtivo no recalque da estaca.
Fonte: Adaptado de Dinis (2025)

Para o recalque na ponta da estaca, é considerado, simplistamente, que a deformação vertical do solo na ponta possa ser obtida a partir do coeficiente de recalque vertical do solo, relativamente à ponta da estaca, no caso, $k_{v,\lambda}$ e que a reação de ponta seja obtida pelo produto entre o recalque ρ_p, pelo coeficiente $k_{v,\lambda}$, atuando diretamente sobre a área da seção A_p da ponta da estaca.

$$\rho_p = R_p / F2.\ k_{v,\lambda}\ .\ A_p \qquad (3)$$

sendo:
$k_{v,\lambda} = K_v / \lambda$: Coeficiente de recalque vertical corrigido pelo fator λ, que considera o efeito de propagação das deformações no solo em função do efeito da largura de placa (ponta da estaca).
$\lambda = \sqrt{\pi.\frac{B^2}{4}}\ .0{,}83$: Largura do lado de uma placa quadrada com efeito equivalente (DINIS, 2024).
F2 = 1 + 2ν: Fator para a consideração da profundidade da ponta. Adaptado de Janbu et al. (1956).
A_p: área da ponta da estaca.

Se a estaca for considerada rígida, relativamente à deformabilidade do solo, têm-se que: ($\rho_e = \rho_f = \rho_p$) e ($Q = R_f + R_p$), resultando na equação de recalque para a estaca:

$$\rho_e = \frac{Q}{A_p . k_{v,\lambda} . F2 + \pi . \sum (l_i . G_i / F1_i)} \quad (4)$$

sendo:
l_i: Espessura de uma camada de estratificação do solo.

Tratando-se de estacas flexíveis, tendo em vista o alto grau de hiperasticidade, para a resolução, propõe-se aplicar o modelo de molas baseado na simplificação de Winkler (1867), em que a rigidez do solo é representada por um conjunto de molas, cuja resolução pode ser efetuada pelo MEF unidimensional.

A configuração geral do modelo refere-se a uma composição de barras e nós, com vínculos elásticos (molas) simulando a rigidez do solo, como representado na Figura 4.

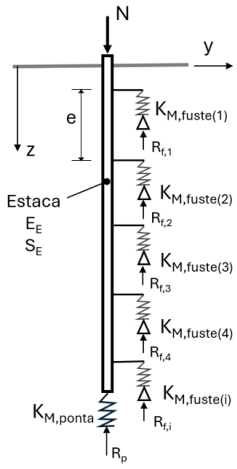


Figura 4. Modelo de Winkler para determinação de recalques em estacas isoladas flexíveis.
Fonte: Dinis (2024)

Relativamente à rigidez do solo a considerar, axial à estaca, adota-se para os coeficientes de mola, a rigidez do solo ao cisalhamento na profundidade do fuste, e por compressibilidade, os solos abaixo da ponta.

A partir das expressões (1) e (2), fazendo: (ρ_f e ρ_p) = 1,0, têm-se, a seguir, respectivamente, as expressões das rigidezes das molas a serem utilizadas no modelo de Winkler.

Rigidez de mola às deformações ao cisalhamento dos solos do fuste:

$$KMf = \pi . G . e / F1 \quad (5)$$

sendo:
e: Comprimento da barra entre vínculos elásticos.

Rigidez de mola das deformações normais dos solos na ponta da estaca:

$$KMp = F2 . k_{v,\lambda} . A_p \quad (6)$$

Para as cargas de serviço, é possível já ocorrer o rompimento da ligação solo-concreto na mobilização da resistência ao atrito lateral entre o fuste e o solo. No entanto, para eficácia do modelo, admite-se que no intervalo de carregamento, entre as cargas iniciais e a carga admissível da estaca, os recalques ocorrerão de forma elástico-linear. A partir desta consideração, supõe-se que após ter ocorrido as deformações, após

descarregamento, haverá recuperação volumétrica do solo, como também, a manutenção do valor do módulo de deformabilidade.

Para se considerar o efeito da plastificação do solo, deve-se efetuar uma ponderação na escolha dos critérios a serem adotados para sua consideração. Sugere-se, como simplificação, adotar uma curva carga-recalque linear, com patamar horizontal constante para a plastificação, que pode ser assumido a partir de parâmetros utilizados nos métodos de previsão de capacidade de carga em estacas, em prática, como o de Aoki & Velloso (1976), a exemplo. Uma vez atingido o patamar de plastificação, substitui-se a mola rompida pelo valor limite da força correspondente, reprocessando-se então o modelo, podendo ocorrer algumas iterações.

Para simulação numérica do método proposto, propõe-se o exemplo a seguir, em que se demonstra a operacionalidade na aplicação do método, utilização dos parâmetros e formulações apresentadas. Utilizou-se, como exemplo de aplicação do método, uma estaca tipo Hélice Contínua, Φ 400 mm, com comprimento de 17,0 m, cujo ensaio de prova de carga foi extraído, a título de exemplo, de Barros (2012). A carga de ruptura no ensaio foi de 1200 kN. O subsolo é homogêneo, constituído por silte arenoso.

O módulo de elasticidade dos solos foi estimado a partir de correlações, em função do N_{SPT}, como sugerido por Teixeira e Godoy (1996), ver Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes para estimativa do módulo de elasticidade do solo: α e K.

α	K		
	Areias	Siltes	Argilas
Areia: 3	Areia: 0,90	Silte: 0,35	Argila: 0,20
Silte: 5	Siltosa: 0,70	Arenoso: 0,45	Siltosa: 0,22
Argila: 7	Argilosa: 0,55	Argiloso: 0,25	Arenosa: 0,30
$Es = \alpha . K . N_{SPT}$ (MPa)			

Fonte: Adaptado de Teixeira e Godoy (1996)

Para o perfil da sondagem e determinação dos coeficientes de rigidez do solo, ver Figura 5.

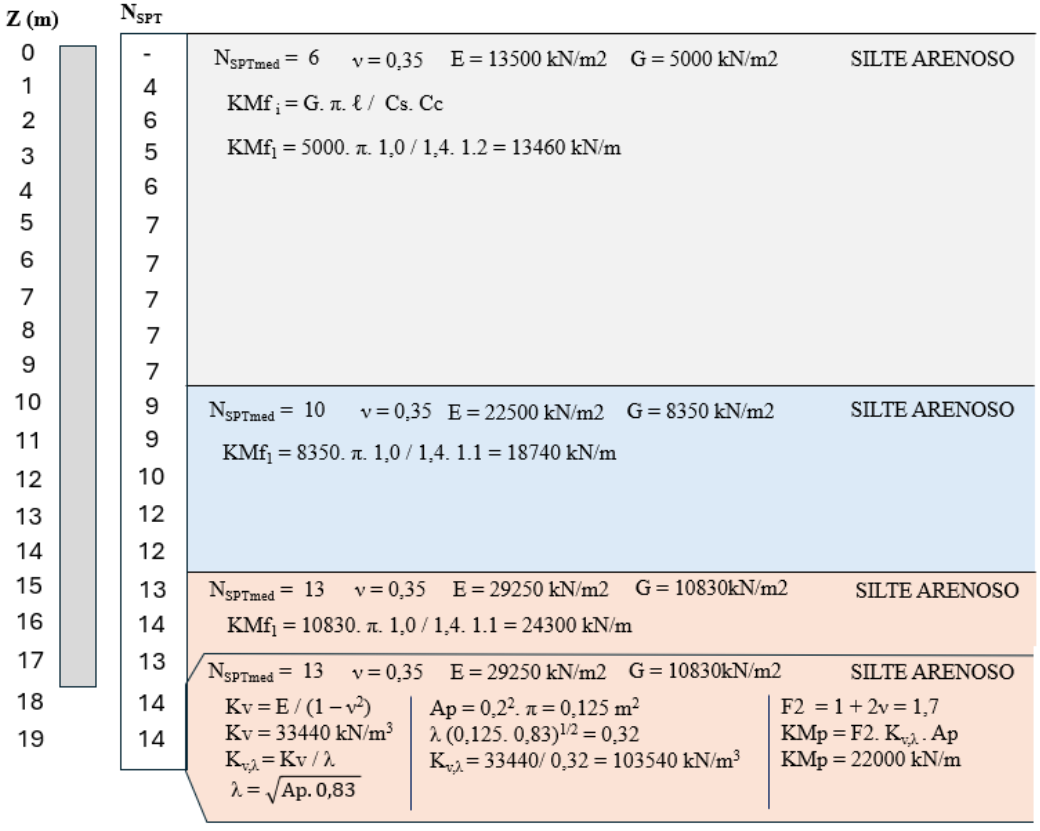
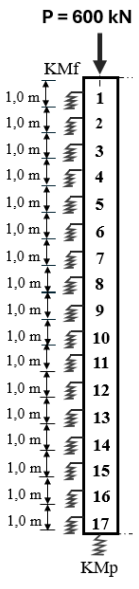


Figura 5. Determinação dos coeficientes de rigidez do solo, segundo método proposto.

Para o valor da carga aplicada, admitiu-se como carga admissível, metade da carga máxima aplicada no ensaio de prova de carga da estaca em estudo, obtendo-se o valor de 600 kN, a partir do qual, se determinou o recalque máximo em serviço. Efetuou-se o processamento pelo MEF unidimensional, a partir do modelo representado na Figura 4. Os resultados estão apresentados na Figura 6, a seguir.



Carga		600 kN	
Nó	K_{Mola} kN/m	ρ mm	R_M kN
1	13460	2,24	30,1
2	13460	2,20	29,6
3	13460	2,16	29,0
4	13460	2,12	28,5
5	13460	2,08	28,0
6	13460	2,05	27,5
7	13460	2,00	27,0
8	13460	1,95	26,6
9	13460	1,92	26,2
10	18740	1,89	36,0
11	18740	1,87	35,5
12	18740	1,85	35,1
13	18740	1,83	34,7
14	18740	1,82	34,4
15	24300	1,81	44,3
16	24300	1,81	44,0
17	24300	1,80	43,9
P	22000	1,80	39,7
ρ_0 (mm)		2,24	

Figura 6. Determinação das reações nos nós e determinação dos recalques.

O resultado plotado em gráfico está representado na Figura 7, a seguir, sobreposto ao ensaio da prova de carga utilizada para a situação exposta.

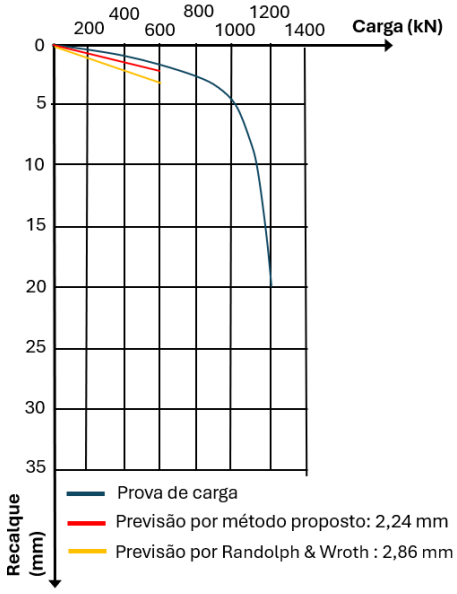


Figura 7. Resultado para a proposta da curva carga-recalque linear.

Verifica-se pelos gráficos, que a curva obtida pelo método proposto resultou mais acentuada que a do ensaio, apresentando valor do recalque pouco superior. Foi também determinado, como referência, o recalque pelo método de Randolph & Wroth (1978), que resultou pouco maior.

CONCLUSÃO

Constata-se que a previsão de recalques em estacas trata-se de um problema complexo, tendo em vista as imponderações que cercam as variáveis do problema, como também, o alto grau de hiperasticidade do modelo. Diante deste contexto, por este trabalho, propôs-se um modelo de cálculo, com base no Método dos Elementos Finitos – MEF, unidimensional, que possibilita introduzir parâmetros, como os da deformabilidade da estaca e variações nas propriedades do solo ao longo da profundidade. A maior dificuldade, no entanto, reside em determinar o módulo de deformação por compressão (Young), o mais relevante para a previsão do comportamento estaca-solo, por condicionar a deformabilidade do solo mediante a transferência de carga da estaca. De difícil determinação, na prática, para este trabalho, adotou-se correlações com o N_{SPT}, apesar dos desvios que este critério pode apresentar, podendo incorrer em distorções nos resultados.

Outro aspecto importante a se considerar na previsão de recalques, ocorre com a alteração das propriedades do solo durante a instalação da estaca, que podem causar distorções nas análises. Para considerar este efeito, no método proposto, a depender do sistema construtivo de cada estaca, previu fatores corretivos, considerando, a exemplo, os efeitos do desconfinamento do solo, da injeção de argamassa sob pressão, ou de forma positiva, o acréscimo às pressões de confinamento, no caso de estacas por deslocamento. Estes fatores corretivos, como os demais propostos, podem ser ajustados, não alterando a base do método.

O resultado do estudo de caso apresentado mostrou uma razoável proximidade com a referência utilizada, de uma prova de carga realizada em estaca. No entanto, há que salientar, que para outras situações de estudo, podem ocorrer divergências nos resultados, tendo em vista todas as circunstâncias já mencionadas que envolvem o problema. Sugere-se, como continuidade à pesquisa, ajustes nos coeficientes corretivos utilizados, a partir de dados de repertório de obras realizadas, eventualmente disponíveis.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Emenda 1, 2022. Rio de Janeiro.

Aoki, N., Velloso, D. A. (1976) *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. In: Proc., 5th Pan-American Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. p. 367-376.

Barros, N.B.F. (2012) *Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 252 p.

Dinis, H. (2024) *Interação solo-estrutura: Uma abordagem metodológica ao projeto de fundações*. Blücher, São Paulo. Disponível em: https://openaccess.blucher.com.br/article-list/9786555503173/list/#undefined. Acesso em: 05 fev. 2006.

Dinis, H. (2025) Estacas Isoladas: Proposta de Método para Previsão de Recalques Axiais. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas – XVI CBPE. Rio de Janeiro. Anais...

Janbu, N.; Bjerrum, L.; Kjaernsli, B. (1956) *Soil mechanics applied to some engineering problems*. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1980) *Pile fondation in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York.

Randolph, M. F.; Wroth, C.P. (1978) *Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles*. In: Journal of Geotechnical Engineering Division, v. 104.

Teixeira, A. H., Godoy, N. S. (1996) *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: Hachich, W. et al. (ed). Fundações: teoria e prática. Pini, São Paulo.

Winkler, E. (1867) *Die lehre von der elastizität und festigkeit.* Dominicus, Prague.