

## PROPOSTA DE PREVISÃO DA CURVA CARGA-RECALQUE DE ESTACAS CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA

*Data de aceite: 01/08/2024*

**Sabrina Aguiar da Silva**

**Mariana Natale Fiorelli Fabiche**

**João Henrique de Freitas**

**Jeselay Hemetério Cordeiro dos reis**

**RESUMO:** A previsão da curva carga-recalque de estacas carregadas axialmente no topo tem sido um dos problemas fundamentais em engenharia de fundações, principalmente, devido ao alto grau de hiperestaticidade presente nesses casos e a necessidade de se determinar as relações que comanda a transferência de carga ao longo da estaca. Assim, a identificação do mecanismo de transferência de carga em estacas permite se determine o recalque do topo de estaca que influência na mobilização da reação lateral ao longo do fuste e, em alguns casos, da carga mobilizada na ponta. Desse modo, este estudo mostra uma abordagem para previsão da curva carga-recalque do topo de uma estaca considerando a interação entre o solo e a estrutura. Nessa abordagem, a estaca é considerada como uma estrutura reticulada unidimensional, apoia sobre apoios elásticos onde o coeficiente de reação vertical do solo

(k) é considerado como constante ao longo do comprimento. O processo de cálculo foi automatizado em uma planilha Microsoft Excel estruturada em três janelas: dados de entrada, procedimentos de cálculo e resultados. Os dados de entrada incluem os parâmetros comprimento e diâmetro da estaca, capacidade de carga da ponta e lateral da estaca, módulo de elasticidade do solo, coeficiente de Poisson, resistência característica do concreto.

**PALAVRAS-CHAVE:** interação solo-estrutura, coeficiente de reação vertical, estacas, curva carga-recalque.

### INTRODUÇÃO

Interação solo-estrutura corresponde ao mecanismo de transferência de cargas da estrutura para o maciço de solos no qual a distribuição de esforços depende dos deslocamentos na interface estrutura-solo (MEYERHOF, 1953).

Vários autores, como Rocha (1954), Chamecki (1954) e Gusmão (1994), tem implementado diversos modelos e técnicas para consideração da interação solo

estrutura em edifícios. Quando se trata de iteração solo-estrutura em estacas carregadas axialmente no topo, a previsão da curva carga-recalque necessita que se tenha um modelo de diagrama de distribuição de carga.

Assim, a interação solo-estrutura busca determinar redistribuição de esforços e sua correlação com os deslocamentos e, conseqüentemente, com os parâmetros de compressibilidade do solo e a rigidez do elemento estrutural de fundações (KIRAN *et al.*, 2017).

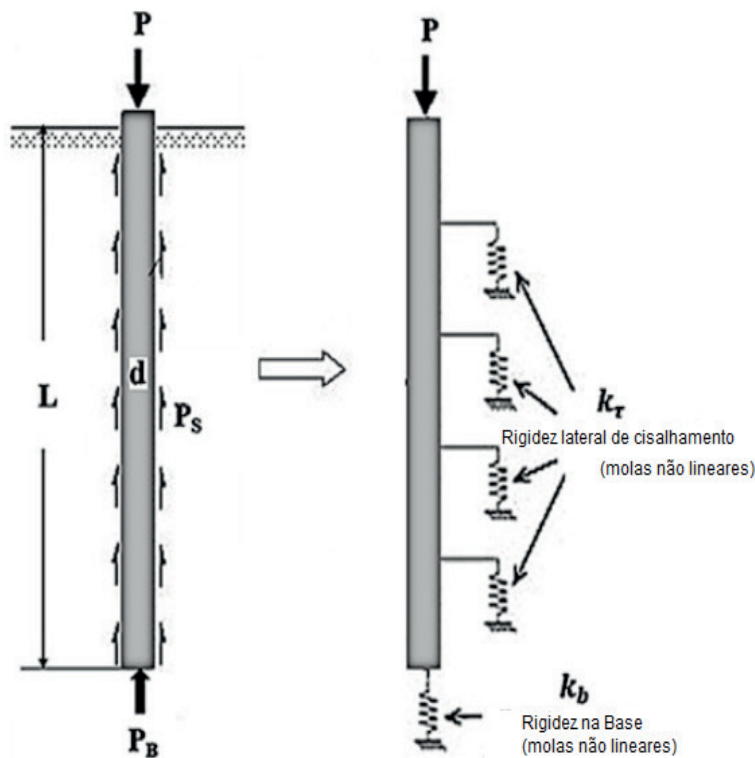


Figura 1 – Modelo estaca-solo usando molas de Winkler

Fonte: Madhira, M.; Sakleshpur, V. A. (2018)

A relação entre os parâmetros de compressibilidade do solo e as características de rigidez do elemento estrutural pode ser definida usando o coeficiente de reação vertical do solo ( $k$ ) que descreve o comportamento da estaca como um Modelo de Winkler (Barra sobre apoios elásticos) como mostra a Figura 01 considerando a estaca como sendo isolada, rígida, com diâmetro ( $d$ ) e comprimento ( $L$ ) submetida a uma carga compressiva axial ( $P$ ). O sistema estaca-solo é considerado como modelo tipo Winkler podendo ter diferentes rigidez ao longo do comprimento e na ponta. A curva carga-recalque é modelada seguindo uma função exponencial inversa (Equação de Van der Veen).

O recalque elástico do topo  $s$  da estaca é calculado como a soma do encurtamento elástico do elemento estrutural e o recalque da base, na forma:

$$s = s_{base} + s_{encurtamento} \quad \text{Eq. 01}$$

Onde:

$s_{encurtamento}$  é o encurtamento do elemento estrutural provocado pela ação do esforço normal na estaca

e calculado como:

$$s_{encurtamento} = \frac{P * l}{A_c * E_c} * IN \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

$P$  é a carga aplicada no topo da estaca;

$l$  é o comprimento da estaca;

$A_c$  é a área da seção transversal do fuste;

$E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto;

$IN$  é o fator forma do diagrama de esforço normal da estaca, o qual considera a relação entre esforço normal na estaca e o esforço normal atuante em uma barra livre.

O recalque da Base é definido com a soma da contribuição do recalque que ocorre na base devido a carga transferida pela ponta e o recalque que ocorre na base devido a carga transferida pela lateral:

$$s_{base} = s_{base}(P_p) + s_{base}(P_L) \quad \text{Eq. 03}$$

Onde:

$s_{base}$  é o recalque da base

$s_{base}(P_p)$  é o recalque da base provocado pela carga atuante na ponta

$s_{base}(P_L)$  é o recalque na base provocado pela carga atuante na lateral

De modo que:

$$s_{base}(PP) = P_p * D_p * \frac{1 - \nu^2}{A_p * E_s} \quad \text{Eq. 04}$$

e

$$s_{base}(PL) = \frac{P_L}{D_L * E_s} * I_s \quad \text{Eq. 05}$$

Onde:

$A_p$  é a área da ponta da estaca

$D_L$  é o diâmetro do fuste da estaca

$E_c$  é o módulo de elasticidade da estaca

$\nu$  é o coeficiente de Poisson da estaca

$I_s$  é o fator de influência da distribuição de carga lateral no recalque da base

A forma da curva carga recalque pode ser obtida a partir de uma função matemática que represente seu formato tanto para ruptura nítida quanto para ruptura não nítida. Neste trabalho, utilizou o a equação de Van Der Veen na forma:

$$P = R(1 - e^{-b \cdot s}) \quad \text{Eq. 06}$$

Onde:

$s$  é o recalque elástico no topo da estaca (Eq. 01);

$P$  é carga vertical aplicada no topo em determinado estágio de carregamento;

$b$  é o coeficiente que define a forma da curva carga recalque dado por:

$$b = \frac{\ln\left(1 - \frac{P}{R}\right)}{s} \quad \text{Eq. 07}$$

$R$  é a carga de ruptura da estaca dado pela soma da resistência de ponta ( $R_p$ ) e da Resistência Lateral total ( $R_L$ ) na forma:

$$R = R_p + R_L \quad \text{Eq. 08}$$

O processo para determinação da curva carga-recalque é, portanto, um processo iterativo no qual se atribui um valor para ( $P$ ) aplicada no topo da estaca e calcula-se o recalque elástico correspondente. A partir desses valores, calcula-se o coeficiente de rigidez ao longo do comprimento, na forma:

$$K_{base} = \frac{P_p}{S_{base}(PP)} \quad \text{Eq. 09}$$

e

$$K_{Lateral} = \frac{P_L}{S_{base}(PL)} \quad \text{Eq. 10}$$

O processo é repetido até que haja convergência.

## METODOLOGIA

O processo de cálculo da curva carga-recalque foi automatizado para o cálculo do coeficiente de reação vertical do solo por meio do *software Microsoft Excel* é estruturada em três janelas:

- Dados de entrada
- Procedimentos de cálculo
- Resultados

### Dados de entrada

Os dados de entrada necessários são os parâmetros de área da ponta da estaca, diâmetro do fuste da estaca, módulo de elasticidade da estaca, coeficiente de Poisson da estaca e os fatores de influência  $I_s$  e  $I_N$ .

A planilha funciona quando os valores da capacidade de carga e suas parcelas de Resistência de ponta e Resistência lateral são atribuídos como dados de entrada. Esses valores podem ser calculados usando o Método Aoki-Velloso ou Decourt-Quaresma.

Recomenda-se que a carta atuante no topo da estaca na primeira iteração seja o menor valor entre a carga de serviço ( $0,5R$ ) ou a resistência lateral acumulada ( $R_L$ )

DADOS	
I (m)	
Dp (m)	
Pp (kN)	
Es (kPa)	
v	
PI (kN)	
Is	
P (PI + Pp) (kN)	
fck	
$I_N$	

Quadro 1 - Parâmetros necessários ao cálculo do coeficiente k

## RESULTADOS

Os resultados do processamento da rotina descrita na Planilha Excel elaborada é mostrado em termos de curva carga-recalque (Quadro 2 e Figura 2)

Previsão da curva carga recalque		
Van der Veen		
s (mm)	F (kN)	K (kN) / mm
0	0,0	
1	12,2	12,22
2	24,3	12,15
4	48,0	12,00
8	93,7	11,71
16	178,6	11,16
32	325,3	10,17
64	544,8	8,51

Quadro 2 - Previsão da curva carga recalque de Van der Veen

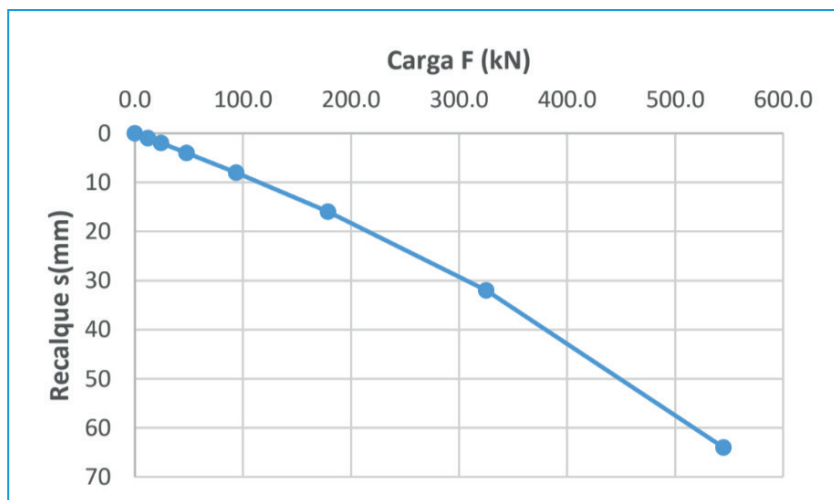


Figura2 - Previsão da curva carga recalque de Van Der Veen

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O processo para previsão da curva-recalque depende fundamentalmente das características físicas e geométricas do elemento estrutural e da rigidez da camada do maciço de solos sobre a qual se assenta à estaca, de tal forma, que o processo de determinação de desses parâmetros são fundamentais para o sucesso do processo aqui descrito.

Vale salientar que, no processo de atribuição dos valores de entrada, os parâmetros de compressibilidade do solo podem ser definidos a partir de correlações com resultados de ensaios de campo ou de sondagens o que pode introduzir erros de na interpretação do formato da curva carga recalque.

A abordagem aqui apresentada possui uma série de simplificações principalmente no tocante ao cálculo do recalque elástico, no processo de previsão da capacidade de carga e na determinação do coeficiente de rigidez de cada trecho que depende do tamanho e do diâmetro da estaca, da profundidade ponta, do comprimento total da estaca, da variabilidade do solo, das condições de compressibilidade do maciço de solos e do tipo de estaca e do embutimento da ponta na camada resistente.

## CONCLUSÕES

A previsão da curva carga-recalque é um problema complexo e que necessita levar em consideração a interação solo-estrutura na distribuição de esforços ao longo da estaca.

Um dos processos mais simples se utiliza do modelo de Winkler para simular o comportamento de estacas carregadas axialmente no topo.

A ferramenta desenvolvida neste estudo é capaz de obter o coeficiente de reação vertical ao longo do comprimento da estaca e utilizada em conjunto com um método de previsão da capacidade de carga e da equação de Van Der Veen obter a curva carga-recalque.

## REFERÊNCIAS

Meyerhof, GG (1953). Pesquisas da fundação e suas aplicações. Engenharia de Estruturas, 31: 151-167.

Rocha, AM (1954). Cálculo de estrutura hiperestática considerando recalques de fundações. Primeiro Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Porto Alegre, págs 162-165.

Chamecki, S (1954). Consideração da rigidez da estrutura em cálculo de recalque de fundações Primeiro Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Porto Alegre, págs 35-80.

Gusmão, AD (1994). Aspectos interessantes na interação solo-estrutura e sua influência no desenvolvimento dos recalques. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE – UFRJ), 165 páginas.

Kiran, K. V., Madhav, M. R., & Vidyaranya, B. (2017). **Estimation of shaft and base responses from pile load test**. In Proceedings of 7th Conference on Deep Foundation Technologies for Infrastructure Development in India (DFI-India 2017). Chennai, India (in press).