

## Estimativa de recalques através do método de Aoki-Lopes

Heitor Venceslau Bezerra de Souza  
Engenheiro, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, heitorkfh@hotmail.com

Fábio Lopes Soares  
Professor, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, flseng@uol.com.br

Alexandre Duarte Gusmão  
Professor, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil

Allan Kleber Leite de Almeida  
Estudante, Universidade Católica do Pernambuco, Recife, Brasil

**RESUMO:** Este trabalho descreve a criação de um programa, utilizando método de Aoki & Lopes (1975), com as equações de Mindlin (1936) e a simplificação de Steinbrenner (1934) para cálculo de recalques em meios estratificados. O software desenvolvido permite o cálculo dos recalques nas estacas informadas considerando o perfil de sondagem SPT. A linguagem de programação utilizada foi o Visual Basic .NET. O cálculo de recalque foi feito através do método de Aoki-Lopes e leva em consideração o efeito de grupo de estacas. O método de cálculo divide as cargas atuantes entre o fuste e a ponta, obtidas através do método de Aoki-Velloso. Para validar os cálculos obtidos foram utilizados dados de medições de recalques do Edifício Residencial Maria Carolina Montenegro, situado em Recife – PE. Analisando os dados obtidos foi perceptível a discrepância entre as informações previstas e as obtidas *in loco*, chegando a uma diferença relativa de 139,67%. Mesmo com a carga atuante na estrutura sendo inferior à de projeto, o recalque medido foi superior ao obtido pela prova de carga. Dessa forma, fica evidente a difícil previsibilidade do comportamento do solo quando submetido a tensões.

**PALAVRAS-CHAVE:** Recalque, Aoki-Lopes, Estacas, Programação.

**ABSTRACT:** This work describes the creation of a program, using Aoki & Lopes (1975) method, with Mindlin's equations (1936) and Steinbrenner's simplification (1934) for calculating settlements in stratified soils. The developed software allows for the calculation of the reported piles in accordance with the SPT boring profile. The programming language used was Visual Basic .NET. The calculation of settlements was done by using the Aoki-Lopes method and takes into account the effect of pile groups. The calculation method separates the pile acting loads between the shaft and the tip, obtained through the Aoki-Velloso method. In order to validate the calculations, data were obtained from the measurements of settlements of the Residential Building Maria Carolina Montenegro located in Recife - PE. By analyzing the data, the discrepancy between the predicted and measured settlements was perceptible reaching a relative difference of 139.67%. Even though the real load acting on the structure was less than that of design, the measured settlement was higher than that from the load test. Therefore, the difficulty in predicting soil behavior when subject to stress is evident.

**KEYWORDS:** Settlement, Aoki-Lopes, Piles, Programming.

### 1 Introdução

O nível de densidade populacional cresce desenfreadamente e traz consigo o aumento do número de projetos de edifícios com elevado número de pavimentos. Edifícios cada vez mais esbeltos trazem para a engenharia desafios cada vez maiores, tanto do ponto de vista estrutural quanto do uso racional dos recursos (ARAÚJO, 2015).

A complexidade das variáveis que compõem os maciços de solo e a pouca praticidade dos métodos numéricos, que buscam representar o terreno e suas camadas, tem dificultado os avanços na área da geotecnia, fazendo com que os métodos simplificados e empíricos, embora imprecisos, sejam muitas vezes preferidos em determinadas situações em que não há um risco financeiro elevado.

Há inúmeros casos de construções que desenvolveram algum tipo de deformidade devido alterações não previstas na análise estrutural. Não se deve esquecer que o comportamento e a vida útil de uma construção dependem preponderantemente de sua fundação. O código computacional permite a avaliação meticulosa dos recalques de uma fundação para um número desejado de pontos, os campos de deslocamentos e de tensões que surgem no maciço de solos e no elemento estrutural de fundação, em virtude do carregamento aplicado pela estrutura, garantindo uma maior probabilidade de previsão desse comportamento (COLARES, 2006).

O objetivo deste trabalho foi a criação de um programa, utilizando método de Aoki & Lopes (1975), com as equações de Mindlin (1936) e a simplificação de Steinbrenner (1934) para cálculo de recalques em meios estratificados, buscando uma análise mais realista do comportamento do solo.

## 2 Fundamentação teórica

### 2.1 Método Aoki-Lopes

A estimativa de recalques proposta por Aoki & Lopes (1975) requer a discretização das forças atuantes no fuste e na ponta da estaca para realizar a integração numérica dos recalques devidos a estas cargas pontuais. O fuste e a ponta são divididos em áreas iguais com a aplicação das cargas concentradas nos seus centroides. Os recalques são calculados através da solução de Mindlin (1936) e os seus efeitos são superpostos no ponto de estudo.

O cálculo é dividido em duas etapas: cargas na ponta e cargas no fuste. Eles são divididos conforme três parâmetros: N1, divisões da circunferência; N2, divisões do raio da ponta e N3, divisões do fuste.

Por tanto, o recalque final em um ponto obtido pelo conjunto de cargas pontuais é dado por:

$$\delta_s = \sum_{n=1}^{N_{estacas}} \sum_{i=1}^{N1} \sum_{j=1}^{N2} \delta_{i,j} + \sum_{n=1}^{N_{estacas}} \sum_{i=1}^{N1} \sum_{j=1}^{N3} \delta_{i,k} \quad (1)$$

Onde  $\delta_{i,j}$  representa o recalque na ponta da estaca devido a carga pontual  $P_{i,j}$  e  $\delta_{i,k}$  é o recalque devido a uma carga  $P_{i,k}$  atuantes no fuste da estaca.

### 2.2 Solução de Mindlin

Esta solução permite calcular o recalque imediato e um meio elástico e semi-infinito. Ele leva em consideração hipóteses simplificadoras como a que o solo é um material perfeitamente elástico, homogêneo e isótropo.

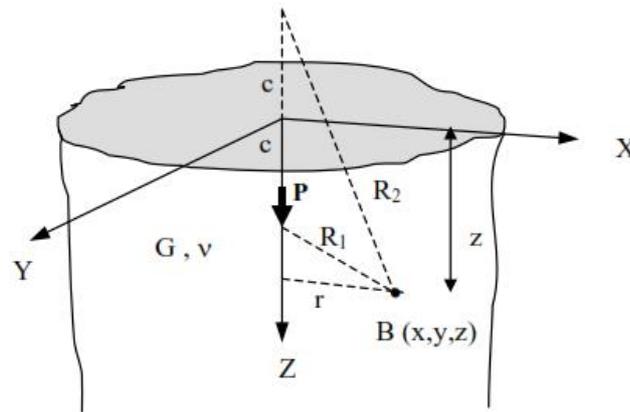


Figura 1 – Meio elástico semi-infinito

O recalque imediato é calculado conforme a seguinte expressão:

$$r_z = \frac{P}{16\pi G(1-v)} \left[ \frac{3-4v}{R_1} + \frac{8(1-v)^2 - (3-4v)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4v)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (2)$$

Onde:

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z-c)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z+c)^2}$$

$v$  = Coeficiente de Poisson

$G$  = Módulo de elasticidade transversal do solo

$P$  = Carga Aplicada dentro do meio contínuo

$B(x,y,z)$  é o ponto em estudo

### 3 Materiais e métodos

O software desenvolvido permitiu a previsão dos recalques nas estacas informadas considerando o perfil de sondagem SPT. Além disso, ele permitiu verificar o recalque em uma malha de pontos do terreno, de modo que ao final se obtenha a visualização gráfica do plano de recalques do solo.

A linguagem de programação utilizada foi o Visual Basic .NET devido a simplicidade de interpretação e escrita do código, a quantidade de programadores que a utilizam, a facilidade de localização da documentação das bibliotecas e a praticidade na criação de interface gráfica. Como a linguagem é orientada a objeto, a estruturação do código se deu através de classes e os cálculos foram realizados através de processamento paralelo, o que diminuiu consideravelmente o tempo necessário para realizar as operações.

A estimativa dos recalques foi feita através do método de Aoki-Lopes e leva em consideração o efeito do grupo de estacas. A distribuição das cargas do pilar para as estacas foi admitida como sendo constante e igualmente distribuída sem levar em consideração da rigidez do bloco de coroamento. Além disso, adotou-se o modelo de transferência de carga da estaca para o solo na qual a ponta da mesma só trabalhará caso a resistência do fuste atinja o seu limite.

O método de cálculo divide as cargas atuantes entre o fuste e a ponta, desta forma é necessário conhecer a carga que é transferida pelo fuste ao solo e a na sua ponta. Este valor foi obtido através do método de Aoki-Velloso.

A deformação elástica da estaca foi calculada considerando o módulo de elasticidade da mesma e o diagrama de transferência de cargas. O modelo de diagrama adotado admite que a transferência de carga na estaca acontece parcialmente à medida que a carga aplicada vai vencendo o atrito lateral da estaca.

O programa é dividido em 6 módulos, cada um com uma funcionalidade bem definida:

1. Entradas dos dados de sondagens, camadas de solo e estacas;
2. Validação dos dados informados;
3. Configuração do tipo de cálculo e das dimensões da malha;
4. Cálculo dos recalques no centro da estaca ou na malha do terreno, conforme configurações;
5. Geração das curvas carga-recalque para uma determinada estaca;
6. Exibição do perfil de recalques do solo, quando configurado.

### **3.1 Dados de entrada**

A inclusão dos dados necessários foram divididas em 3 abas: Sondagens, Solo e Fundações. O primeiro requer a localização do ensaio, a profundidade e o NSPT a cada metro até o limite de profundidade da sondagem. O solo deve ser informado camada a camada, sendo necessários a cota de início e fim, o tipo de solo e o coeficiente de Poisson. O módulo de deformabilidade e o NSPT médio da camada eram calculados conforme os dados das sondagens informados anteriormente.

A guia de fundações era dividida em duas partes, na primeira eram incluídas as informações do grupo de estacas, sendo informados o pilar que o grupo estava suportando, a posição e a carga do mesmo. Logo em seguida eram incluídas as informações paramétricas das estacas que compõe do grupo, sendo informadas a cota da ponta da estaca, o diâmetro, as coordenadas relativas em relação ao eixo do pilar, o tipo de estaca e o módulo de elasticidade.

Devido a consideração do solo como sendo elástico linear foram obtidos os valores do módulo de elasticidade de cada camada através da relação entre o tipo de solo e o valor do NSPT médio para a camada, proposta por Teixeira e Godoy (1996). O coeficiente de Poisson foi adotado como sendo igual para todas as camadas no valor de 0,30.

Após a inclusão dos dados o programa realiza a validação dos mesmos, para evitar que sejam gerados erros durante o cálculo dos recalques.

### 3.2 Dados para validação do programa

Para validar os cálculos obtidos pelo programa foram utilizados dados de medições de recalques do Edifício Residencial Maria Carolina Montenegro, situado em Recife – PE. Além de uma prova de carga estática na Estaca 5 do Pilar 1, o pilar mais carregado. O prédio possui 40 pavimentos e 118 estacas suportando 25 pilares principais.

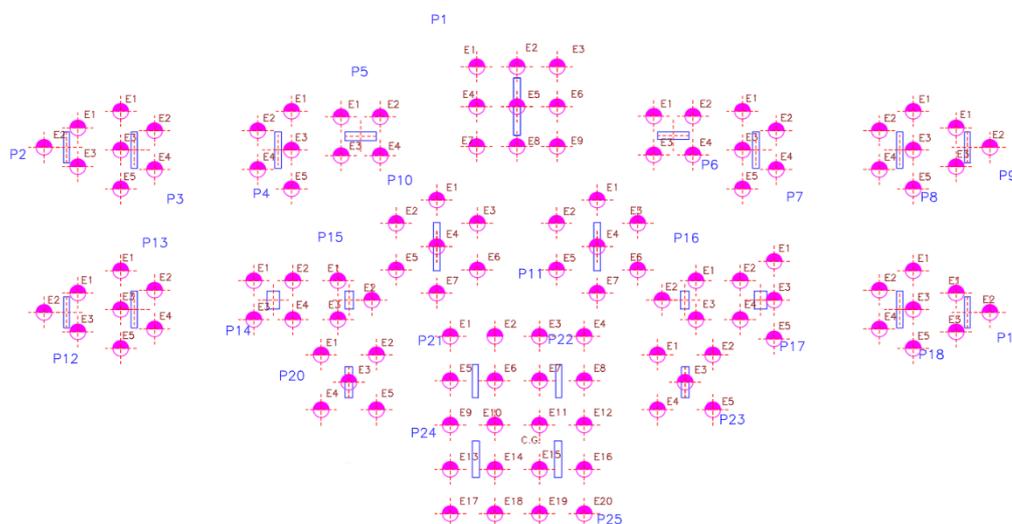


Figura 2 – Localização das estacas e pilares do edifício.

Todas as estacas do projeto eram do tipo Hélice-contínua, possuíam diâmetro de 70 cm e um comprimento médio de 20 m. O solo possui em média 6 camadas definidas e a camada resistente tem seu início por volta dos 15 m de profundidade. Um resumo dos dados do solo obtidos através das sondagens está descrito abaixo.

Tabela 1 – Dados das camadas que compõe o solo.

Índice	Cota Início (m)	Cota Fim (m)	NSPT	E (MPa)	Coef. Poisson	Tipo Solo
1	0,00	2,70	7,00	9,80	0,30	Argila Siltosa

2	2,70	6,87	8,50	17,85	0,30	Areia Siltosa
3	6,87	8,87	9,50	13,30	0,30	Argila Siltosa
4	8,87	11,88	8,67	19,50	0,30	Silte Arenoso
5	11,88	12,80	21,00	44,10	0,30	Areia Siltosa
6	12,80	23,00	41,40	86,94	0,30	Areia Siltosa

A validação dos dados calculados pelo programa se deu através da comparação direta com as medições observadas. Além disso, a prova de carga estática permite verificar se o comportamento real da estaca foi similar ao previsto pelo software.

## 4 Resultados

### 4.1 Comparação com os recalques medidos

Os dados de recalques medidos e utilizados para esta comparação foram obtidos durante a construção do edifício, logo a carga a que a estrutura está submetida é inferior a de projeto.

Os valores de recalques encontrados para as estacas de cada grupo são diferentes entre si devido a descon sideração da rigidez do bloco de coroamento das estacas. Dessa forma, o recalque nas estacas centrais é maior. A Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores médios de recalques previstos para cada pilar e os valores das medições e da prova de carga estática.

Tabela 2 – Comparação entre os valores previstos pelo programa e os obtidos através da medição de recalques e da prova de carga estática.

Pilar	Recalque Previsto Médio (mm)	Recalque medido (mm)	Recalque Prova de Carga (mm)
P1	7,554	4,000	2,050
P2	5,255	4,000	2,100
P3	5,273	7,000	2,000
P4	8,043	6,000	2,300
P5	9,496	5,000	3,600
P6	8,902	8,000	3,550
P7	7,912	9,000	2,800
P8	4,900	7,000	2,000
P9	4,257	6,000	2,150
P10	8,374	12,000	2,300
P11	8,546	9,000	2,350
P12	4,959	6,000	2,100

P13	4,976	5,000	1,900
P14	9,189	8,000	3,400
P15	8,837	4,000	2,900
P16	8,242	7,000	3,000
P17	6,808	9,000	2,500
P18	4,158	11,000	2,000
P19	4,026	5,000	2,200
P20	5,655	9,000	2,000
P21	5,363	9,000	1,300
P22	5,425	4,000	1,350
P23	5,804	6,000	2,000
P24	5,268	4,000	2,000
P25	5,304	8,000	2,000

#### 4.2 Comparação com a prova de carga estática

A prova de carga estática na Estaca 5 do Pilar 1 foi realizada até uma carga máxima de 4.800 KN e obteve um recalque elástico de 8,15mm e um recalque residual de 3,51mm, resultando em um recalque total de 11,66mm. A capacidade de carga calculada para esta estaca foi de 5.337,74 KN, sendo 2.278,22 KN devido ao fuste e o restante devido a ponta da estaca. A comparação dos dados obtidos pelo programa e os disponíveis na prova de carga estão representados na Tabela 3 e na Figura 3.

Tabela 3 – Valores obtidos através da curva Carga-Recalque para a Estaca 5 do Pilar 1.

Carga (KN)	Recalque (mm)	Recalque prova de carga (mm)
480,00	0,25	0,41
960,00	0,85	0,95
1.440,00	1,76	1,84
1.920,00	3,20	2,80
2.400,00	5,03	3,95
2.880,00	9,57	5,25
3.360,00	14,11	6,84
3.840,00	18,66	8,37
4.320,00	23,20	9,68
4.800,00	27,74	11,66

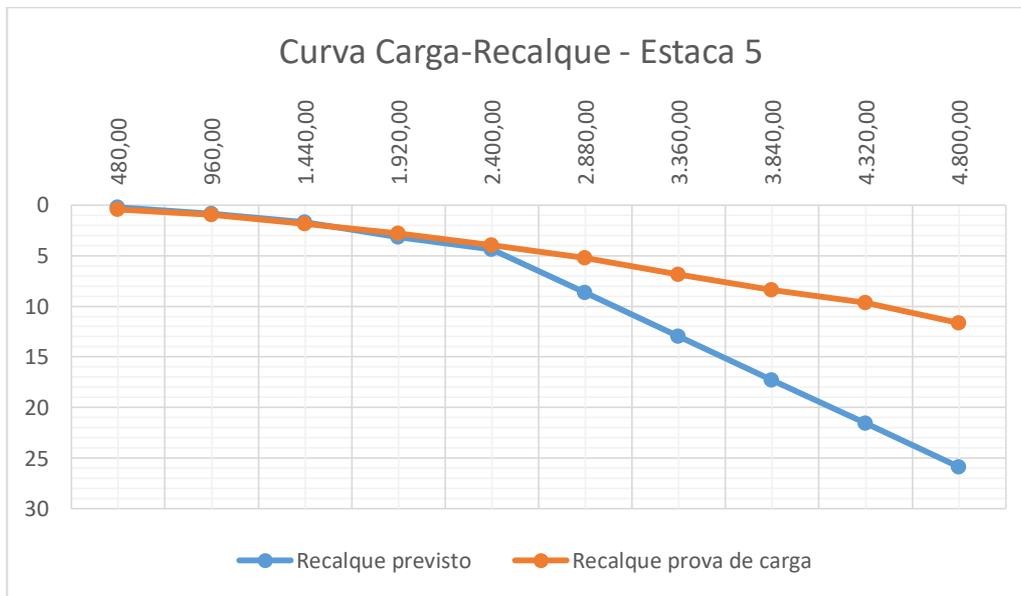


Figura 3 – Curva Carga-Recalque da Estaca 5, Pilar 1.

Observa-se que há uma discordância acentuada nos pontos finais da curva. Quando a resistência do fuste chega ao seu limite a curva sofre uma alteração em sua trajetória.

Analisando os dados obtidos é perceptível a discrepância entre as informações calculadas e os obtidos *in loco*, chegando a uma diferença relativa de até 139,67% quando se compara com a curva carga-recalque.

## 5 Conclusões

Após verificar os dados gerados pelo programa e compara-los com os reais, é possível perceber que há diferenças relevantes entre os recalques previsto e medido. Logo, para avaliar o solo como um meio elástico é necessário ser bastante cauteloso com os dados inseridos.

A previsão de recalques forneceu resultados coerentes, porém com uma diferença relativa de até 139,67% em relação ao recalque da prova de carga. É perceptível que a forma da curva de carga-recalque da estaca é bastante similar a curva calculada pelo software, a diferença se torna perceptível após o momento em que a resistência lateral da estaca chega ao seu limite.

Vale ressaltar a diferença observada entre o recalque obtido através das medições e o obtido pela prova de carga, pois mesmo com a carga atuante na estrutura sendo inferior a de projeto, o recalque medido foi superior ao obtido pela prova de carga.

## 6 Referências Bibliográficas

- AOKI, N.; LOPES, F. R. (1975). *Estimating stress and settlements due to deep foundation*. In: V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.1, p.377-386, Buenos Aires.
- ARAÚJO, R. F. *Cálculo de recalque de fundações superficiais considerando a interação solo estrutura*. 2015. 45p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2015.
- COLARES, G. M. *Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios*. 2006. 83p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- MINDLIN, R. D. (1936). *Force at a point in the interior of a semi-infinite solid*. Physics. v.7.
- STEINBRENNER, W. *Tafeln sur Setzungsberechnung*. Die Strasse, v.1, p.121, 1934.
- TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: HACHICH et al. (eds.). *Fundações: Teoria e Prática*. São Paulo: Pini. Cap 7, p.227-264, 1996.