

COMPORTAMENTO DE GRUPOS DE ESTACAS COM BLOCO RÍGIDO EM MACIÇOS DE SOLO ESTRATIFICADOS

Analysis of the Behaviour of Vertically Loaded Pile Groups with a Rigid Cap in Layered Soils

Cleide Jeane Ribeiro Bacelar*

Pedricto Rocha Filho**

Celso Romanel***

RESUMO – O comportamento de grupos de estacas com bloco rígido em maciços de solo estratificados, sob carregamento vertical estático, é investigado através de um método de análise baseado em versão simplificada do método dos elementos de contorno, sugerida inicialmente para meios elásticos homogêneos por Poulos (1968). Com base em estimativas dos valores de recalque obtidas através de programa computacional, avalia-se a influência da estratificação do maciço de solo nos efeitos de grupo e nos valores dos recalques de topo das estacas componentes, considerando-se alguns grupos com configurações usuais típicas da engenharia de fundações. Resultados foram obtidos para dois perfis estratigráficos básicos: solo homogêneo e o formado por duas camadas distintas. Do ponto de vista prático, estes resultados indicaram que os fatores de redução de grupo não são significativamente influenciados pela estratigrafia, rigidez e comprimentos relativos das estacas, indicando ser possível efetuar-se um cálculo aproximado da estimativa do recalque de grupos de estaca em meio estratificado a partir da determinação do recalque de uma estaca isolada em um semi-espaco ou estrato de solo homogêneo.

SYNOPSIS – The behaviour of vertically loaded pile groups with a rigid cap in layered soils is investigated through an approach based on a simplified version of the boundary element method, as suggested by Poulos (1968) for the case of an homogeneous elastic half-space. Settlement estimates are obtained through a computer program. The influence of the soil layering on the group effects as well as on the settlement of individual piles in the same group are also investigated in this research. Groups with common geometrical configuration resting on some basic soil profiles (single and double layered systems) have been considered. Under the practical point of view, the results indicated that the reduction factors are not significantly influenced by the soil layering, pile-stiffness factors and length-to-diameter ratios. An approximate method for estimating the settlement of pile groups in layered soil profiles, based on the settlement of a single pile in an homogeneous soil profile, is proposed in this work.

1 – INTRODUÇÃO

As últimas décadas assistiram a uma gradual mudança nos critérios de dimensionamento de grupo de estacas, passando-se de procedimentos essencialmente empíricos para métodos racionais baseados em princípios da mecânica do contínuo, para mais fielmente representar o comportamento dos diversos materiais envolvidos em problemas de engenharia de fundações, como o solo, o aço e o concreto.

* Doutoranda, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: cleide@civ.puc-rio.br.

** Professor Doutor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: rocha@civ.puc-rio.br.

*** Professor Doutor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: romanel@civ.puc-rio.br.

Esta mudança foi consequência de vários fatores, como o uso extensivo de fundações em estacas, o reconhecimento de que estacas apresentam recalques e que estes devem ser controlados, a crescente disponibilidade de microcomputadores para automatização dos procedimentos de cálculo e, principalmente, o desenvolvimento de poderosas técnicas numéricas como o método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos é ainda a mais versátil das técnicas numéricas para simulação de problemas de engenharia. Pode representar um comportamento não linear do solo, considerar efeitos de interação estaca-solo, simular a completa história de carregamento da fundação englobando as fases de instalação da estaca, reconsolidação e reestruturação do solo adjacente e o subsequente carregamento da fundação, etc. Tais análises, ainda que valiosas por permitirem uma melhor compreensão dos detalhes de comportamento da fundação e da importância relativa dos diversos fatores intervenientes, não são facilmente incorporadas na prática corrente dos projetos de engenharia devido à complexidade da formulação matemática dos modelos computacionais bem como, e principalmente, pelas dificuldades na determinação em ensaios de campo ou de laboratório dos diversos parâmetros necessários ao modelo, alguns dos quais sem significado físico.

Um razoável compromisso entre a grande complexidade de sofisticados modelos numéricos e a inaceitável simplicidade dos métodos empíricos, foi sugerida por Poulos (1968) com a utilização de uma versão simplificada do método dos elementos de contorno, diretamente aplicada ao estudo do comportamento de estacas.

Em geral, soluções analíticas ou numéricas para estacas isoladas ou grupos admitem que o maciço de solo possa ser representado por um semi-espaço elástico linear, isotrópico e homogêneo (Poulos, 1968; Poulos e Mattes, 1969; Mattes e Poulos, 1969; Poulos e Davis, 1980, entre outros) ou por um semi-espaço linear, isotrópico, cujo módulo de elasticidade cresce linearmente com a profundidade (Poulos, 1979; Banerjee e Davies, 1978, entre outros).

Soluções para o comportamento de fundações profundas em maciços de solo estratificados não parecem ter sido sistematicamente estudadas na literatura, apesar da ocorrência freqüente deste tipo de depósito de solo na natureza. Torna-se assim de muito interesse para um projeto racional de fundações a disponibilidade de soluções específicas, obtidas através de análises paramétricas que contemplem a influência da estratigrafia do maciço, notadamente os aspectos relativos a profundidades e espessuras das camadas de solo e contrastes relativos dos valores dos parâmetros mecânicos entre camadas adjacentes.

Um método aproximado para cálculo do recalque de grupos de estacas em maciços de solo estratificados é apresentado neste trabalho. A partir de uma adaptação da solução de Mindlin (Mindlin, 1936), considerando-se módulos de elasticidade de um meio homogêneo equivalente, obtidos por diferentes critérios, foram feitas diversas análises paramétricas comparando-se os resultados do recalque de grupos de estaca obtidos em maciços de solo homogêneo e formado por dupla camada.

Para as situações investigadas, os resultados indicaram que os fatores de redução de grupo são pouco afetados pela estratigrafia, rigidez e comprimentos relativos das estacas, sugerindo que uma estimativa aproximada do recalque de grupo de estacas em solos estratificados possa ser realizada com base no valor do recalque de uma estaca isolada em um solo homogêneo e isotrópico. As próximas seções desenvolvem e exemplificam a aplicação desta técnica de cálculo de recalques, proposta neste trabalho.

2 – RECALQUE DE GRUPOS DE ESTACA EM SOLOS ESTRATIFICADOS

Valores do recalque de grupo de estacas são calculados através de programa computacional, que implementa uma versão simplificada do método dos elementos de

contorno, originalmente proposta por Poulos (1968) para estudo do comportamento de grupos de estaca em um semi-espço linearmente elástico, isotrópico e homogêneo.

Para os grupos de estacas analisados neste trabalho, considerou-se também que o bloco de coroamento é infinitamente rígido e transmite um carregamento vertical de resultante P_G cêntrica, o que permite considerar que os recalques de topo nas estacas componentes do grupo sejam iguais entre si.

O grupo é constituído por N estacas, subdividindo-se o fuste de cada estaca em n elementos cilíndricos, conforme Fig. 1, sobre cujas superfícies laterais atuam tensões cisalhantes uniformemente distribuídas, e um elemento adicional ($n+1$), correspondente à base circular da ponta da estaca, onde atua um carregamento normal uniformemente distribuído.

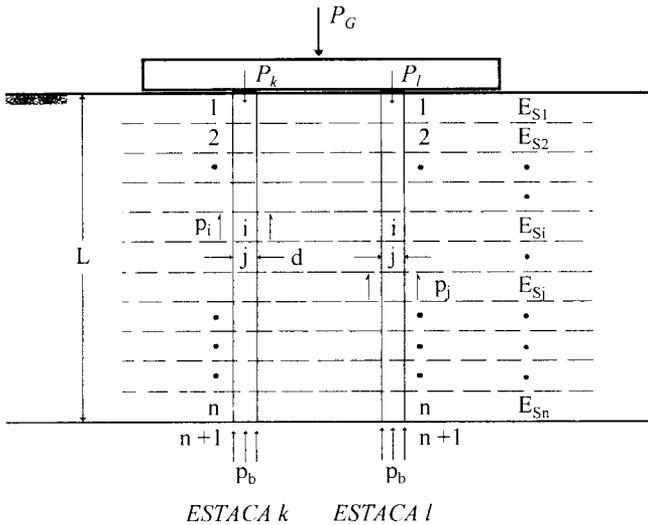


Fig. 1 – Distribuição de tensões no fuste (p_i e p_j) e na base (p_b) das estacas k e l de um grupo de N estacas.

Admitindo-se que não ocorram deslizamentos relativos na interface solo-estaca, o recalque do solo adjacente ao elemento i da estaca k ($s\rho_{ik}$) é determinado pela seguinte combinação linear:

$$s\rho_{ik} = \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^{n+1} s\rho_{ijkl} \quad (1)$$

com

$$s\rho_{ijkl} = \frac{d_l}{sE_{ij}} I_{ijkl} \cdot p_{jl} \quad (2)$$

onde $s\rho_{ijkl}$ é o recalque do solo adjacente ao elemento i da estaca k devido às tensões cisalhantes atuantes no elemento j da estaca l , d_l é o diâmetro da estaca l , p_{jl} representa as tensões cisalhantes no elemento j da estaca l , sE_{ij} é o módulo de elasticidade equivalente do solo com valor igual à média entre os módulos de elasticidade das camadas i e j e I_{ijkl} é o fator de

influência do recalque do solo adjacente ao elemento i da estaca k devido às tensões cisalhantes atuantes no elemento j da estaca l .

Valores do fator de influência I_{ijkl} podem ser obtidos através da integração das equações de Mindlin (Mindlin, 1936), listadas no apêndice. Uma integração analítica foi executada para o elemento $(n+1)$ da base da estaca, na direção radial, e para os n elementos do fuste das estacas, na direção do comprimento das mesmas. Uma integração numérica foi feita na direção circunferencial, em termos do ângulo θ , através de um algoritmo adaptativo baseado no esquema de quadratura de Gauss-Legendre com 8 e 12 pontos de integração, simultaneamente. Esta técnica de quadratura com diferentes números de pontos de integração permitiu melhor controlar o erro numérico no valor final do fator de influência I_{ijkl} .

As equações de Mindlin são rigorosamente válidas para o caso de um semi-espaço homogêneo, isotrópico e linearmente elástico. Para situações de solos estratificados, um valor aproximado do fator de influência I_{ijkl} foi estimado introduzindo-se nas equações de Mindlin valores de módulo de elasticidade equivalentes E_{Sij} , determinados pela seguinte média

$$E_{Sij} = \frac{E_{Si} + E_{Sj}}{2} \quad (3)$$

Poulos (1979) considera E_{Si} o módulo de elasticidade do solo adjacente ao elemento i , onde se calcula o recalque, e E_{Sj} o módulo de elasticidade do solo adjacente ao elemento j , onde se aplicam as tensões. Yamashita *et al.* (1987) sugerem que os valores de E_{Si} e E_{Sj} sejam determinados através de médias ponderadas (Eqs. (4) e (5)) que incorporam a influência dos módulos de elasticidade dos solos adjacentes aos elementos i e j , inclusive das m camadas situadas abaixo da ponta das estacas do grupo.

$$E_{Si} = \frac{\beta_{-(i-1)}E_{Si} + \dots + \beta_{-\ell}E_{S(i-\ell)} + \dots + \beta_{-1}E_{S(i-1)} + E_{Si} + \beta_1E_{S(i+1)} + \dots + \beta_\ell E_{S(i+\ell)} + \dots + \beta_{n+m-i}E_{S(n+m)}}{\beta_{-(i-1)} + \dots + \beta_{-\ell} + \dots + \beta_{-1} + 1 + \beta_1 + \dots + \beta_\ell + \dots + \beta_{n+m-i}} \quad (4)$$

$$E_{Sj} = \frac{\beta_{-(j-1)}E_{Sj} + \dots + \beta_{-\ell}E_{S(j-\ell)} + \dots + \beta_{-1}E_{S(j-1)} + E_{Sj} + \beta_1E_{S(j+1)} + \dots + \beta_\ell E_{S(j+\ell)} + \dots + \beta_{n+m-j}E_{S(n+m)}}{\beta_{-(j-1)} + \dots + \beta_{-\ell} + \dots + \beta_{-1} + 1 + \beta_1 + \dots + \beta_\ell + \dots + \beta_{n+m-j}} \quad (5)$$

Os valores dos fatores de ponderação β_k utilizados nas expressões acima foram os recomendados por Yamashita *et al* (1987)

$$\beta_k = \beta_{-k} \quad \text{e} \quad \beta_k = a^k \quad \text{com} \quad a = 0.5 \quad (6)$$

Para análise de grupos de estacas em estrato de solo de espessura finita, os efeitos da presença de um substrato rígido podem ser considerados nas análises através da aproximação de Steinbrenner (Steinbrenner, 1934) ou pelo método das imagens (d'Appolonia e Romualdi, 1963).

3 – CONSTANTES DE PROPORCIONALIDADE

De acordo com Poulos (1968), o parâmetro mais comumente empregado na análise do recalque de grupos de estaca é a razão de recalque R_S definida por

$$R_S = \frac{\text{recalque médio do grupo}}{\text{recalque de uma estaca isolada submetida à carga média } P_G/N} \quad (7)$$

Em muitos casos é mais conveniente expressar-se o recalque do grupo em termos do fator de redução de grupo R_G , expresso por

$$R_G = \frac{\text{recalque médio do grupo}}{\text{recalque de uma estaca isolada submetida à carga total } P_G} \quad (8)$$

O valor de R_G representa a redução observada no valor do recalque de um grupo de estacas em relação ao recalque de uma estaca isolada ρ_I submetida ao mesmo carregamento vertical P_G . Para um grupo de N estacas, a razão de recalque R_S é diretamente relacionada ao fator de redução de grupo R_G por

$$R_G = R_S/N \quad (9)$$

A determinação do recalque do topo de uma estaca isolada (ρ_I) de comprimento L e diâmetro d sob carregamento vertical P_G em um semi-espaço linearmente elástico, isotrópico e homogêneo pode ser feita por (Poulos e Davis, 1980):

$$\rho_I = \frac{P_G I_0 R_K R_h R_v}{E_S d} \quad (10)$$

onde I_0 é fator de influência determinado para uma estaca incompressível, sob carregamento vertical em um semi-espaço homogêneo também incompressível ($\nu_s = 0.5$), R_K , R_h , R_v são fatores de correção devido à compressibilidade da estaca, à espessura finita da camada de solo e ao coeficiente de Poisson do solo, respectivamente, e E_S é o módulo de elasticidade do maciço de solo homogêneo.

Fatores de redução de grupo R_G foram numericamente determinados para os grupos de estacas da Fig. 2 considerando-se valores de comprimento relativo $L/d = 10, 20, 30$ e 40 , rigidez relativa $K = 1000, 2000, 3000$ e 5000 e coeficiente de Poisson do solo $\nu_s = 0.40$. O fuste de cada estaca foi discretizado em 10 elementos e o maciço de solo estratificado caracterizado por três perfis estratigráficos típicos, mostrados na Fig. 3. No caso de solos estratificados, a rigidez relativa foi definida como

$$K = \frac{E_p R_A}{E_{eq}} \quad (11)$$

onde E_p é o módulo de elasticidade da estaca, E_{eq} é o módulo de elasticidade equivalente do solo ao longo do fuste da estaca e

$$R_A = \frac{A_p}{\pi d^2/4} = \frac{\text{área da seção transversal sólida da estaca}}{\text{área da seção transversal total da estaca}} = I \text{ (para estaca sólida).}$$

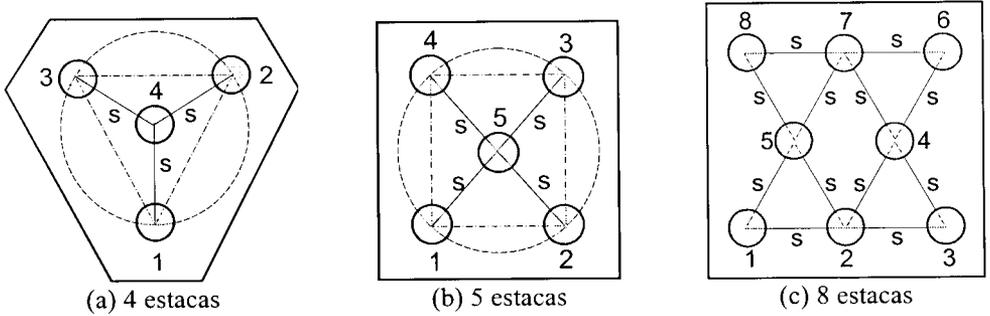


Fig. 2 – Geometria dos grupos de estacas analisados, com bloco de coroamento rígido.

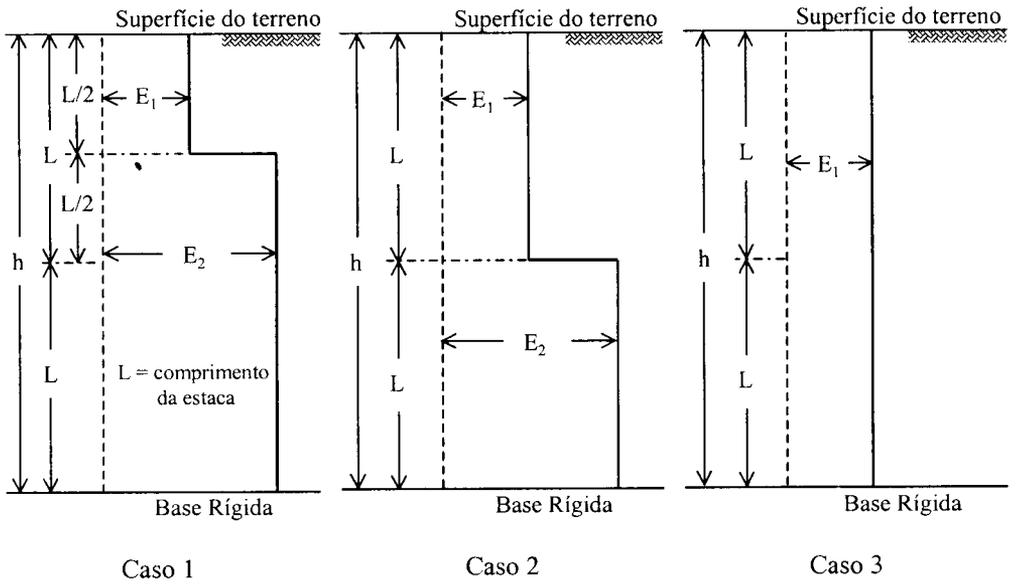


Fig. 3 – Perfis estratigráficos dos maciços de solo analisados.

O módulo de elasticidade equivalente ao longo do fuste das estacas de comprimento L pode ser aproximadamente determinado por (Poulos e Davis, 1980)

$$E_{eq} = \left(\frac{I}{L} \right) \sum_{i=1}^M E_i h_i \quad (12)$$

onde E_i e h_i representam o módulo de elasticidade e espessura da camada i , respectivamente, das M diferentes camadas de solo ao longo do fuste das estacas. De acordo com Poulos e Davis (1980), o valor do recalque calculado com o módulo equivalente da Eq. (12) concorda satisfatoriamente com aqueles determinados por processos de cálculo mais rigorosos, nos casos

em que o contraste dos módulos de elasticidade entre as camadas sucessivas não for muito grande. O contraste entre valores do coeficiente de Poisson ν_s não são considerados porque este parâmetro tem importância secundária na determinação do recalque de estacas carregadas verticalmente.

A distribuição do fator de redução de grupo R_G em função do espaçamento relativo entre estacas s/d é apresentada nas Figs. 4 a 7 para o grupo de 4 estacas da Fig. 2(a). Da análise destes gráficos, pode-se verificar que:

- a influência da rigidez relativa K no fator de redução do grupo R_G cresce com o comprimento relativo L/d ;
- curvas para iguais valores de L/d são razoavelmente paralelas nos três perfis estratigráficos estudados, como mostra a Fig. 7 para $L/d = 30$, sugerindo a seguinte relação:

$$\frac{\rho_G^1}{\rho_G^3} = \frac{R_G^1}{R_G^3} \times \frac{\rho_1^1}{\rho_1^3} = C_{13} \quad (\text{constante}) \quad (13)$$

ou

$$\frac{\rho_G^2}{\rho_G^3} = \frac{R_G^2}{R_G^3} \times \frac{\rho_1^2}{\rho_1^3} = C_{23} \quad (\text{constante}) \quad (14)$$

onde $\rho_G^1, \rho_G^2, \rho_G^3$ são os recalques do grupo de estacas, sob mesma carga P_G , nos perfis dos casos 1, 2 e 3, respectivamente, da Fig. 3, R_G^1, R_G^2, R_G^3 são os correspondentes fatores de redução de grupo, para iguais valores de $K, L/d$ e s/d e $\rho_1^1, \rho_1^2, \rho_1^3$ são os recalques de uma estaca isolada, sob mesma carga vertical P_G , nos perfis dos casos 1, 2 e 3, respectivamente.

Para analisar a variação destas constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} com a rigidez relativa K e com o comprimento relativo L/d nos diferentes perfis de solo da Fig. 3, foram apresentadas as curvas das Figs. 8, 9, 10 e 11, de onde se permite concluir que as razões entre os recalques do grupo ρ_G^1/ρ_G^3 (ou C_{13}) e ρ_G^2/ρ_G^3 (ou C_{23}):

- praticamente não variaram com a configuração do bloco, apresentando valores bastante semelhantes entre si nas análises paramétricas realizadas com os grupos de 4, 5 e 8 estacas da Fig. 2;
- praticamente não foram influenciadas pela rigidez relativa K das estacas, sendo muito pouco afetadas pelo valor do comprimento relativo L/d , principalmente nos casos em que $L/d > 20$;
- dependem da estratigrafia do maciço de solo, o que pode ser facilmente constatado ao se comparar os valores calculados para os diferentes perfis de solo, para o mesmo grupo de estacas e com iguais valores de L/d .

4 – EXEMPLO DO CÁLCULO DE RECALQUE DE GRUPO DE ESTACAS

Das conclusões obtidas na análise dos gráficos das Figs. 8, 9, 10 e 11, é possível então prever-se o valor aproximado do recalque de um grupo de estacas, ou de uma estaca isolada, em maciço de solo estratificado, com base no recalque de topo de uma estaca isolada de mesmas características em um semi-espaço homogêneo. O exemplo a seguir ilustra as etapas do processo de cálculo proposto neste trabalho.

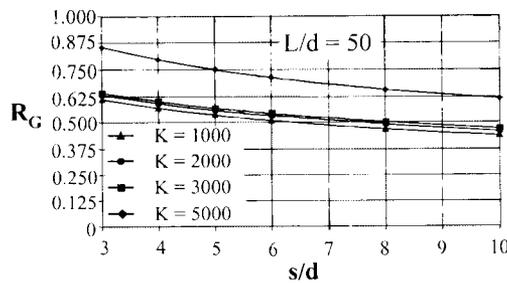
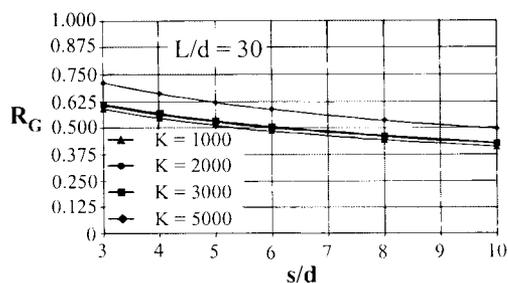
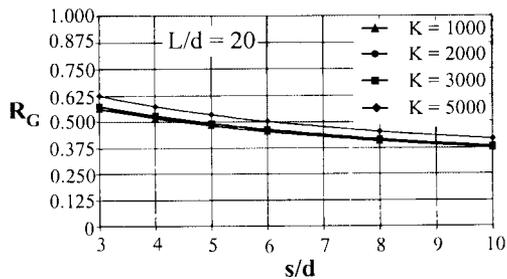
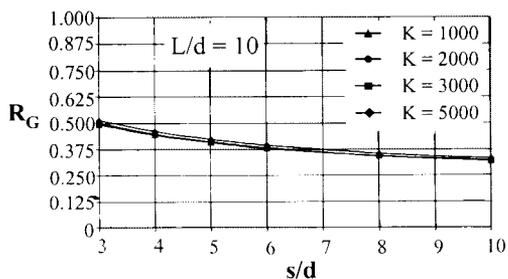


Fig. 4 – Fator de redução do grupo R_G vs. espaçamento relativo das estacas s/d para grupo de quatro estacas com bloco rígido. Perfil do solo: caso 1.

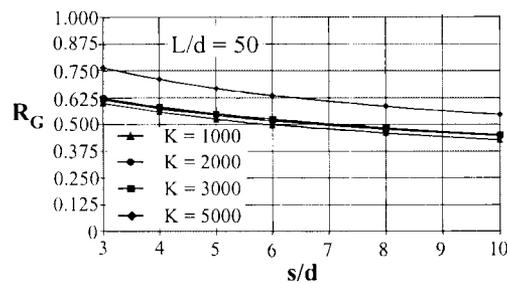
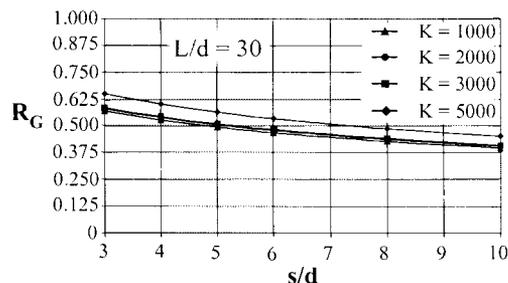
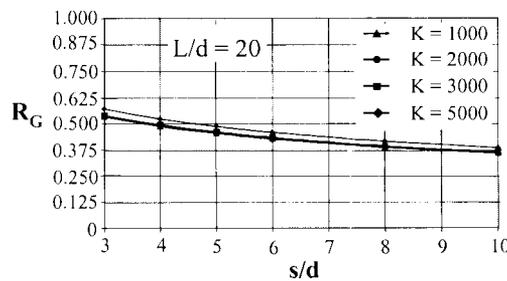
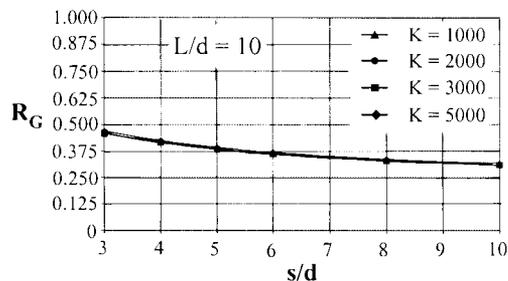


Fig. 5 – Fator de redução do grupo R_G vs. espaçamento relativo das estacas s/d para grupo de quatro estacas com bloco rígido. Perfil do solo: caso 2.

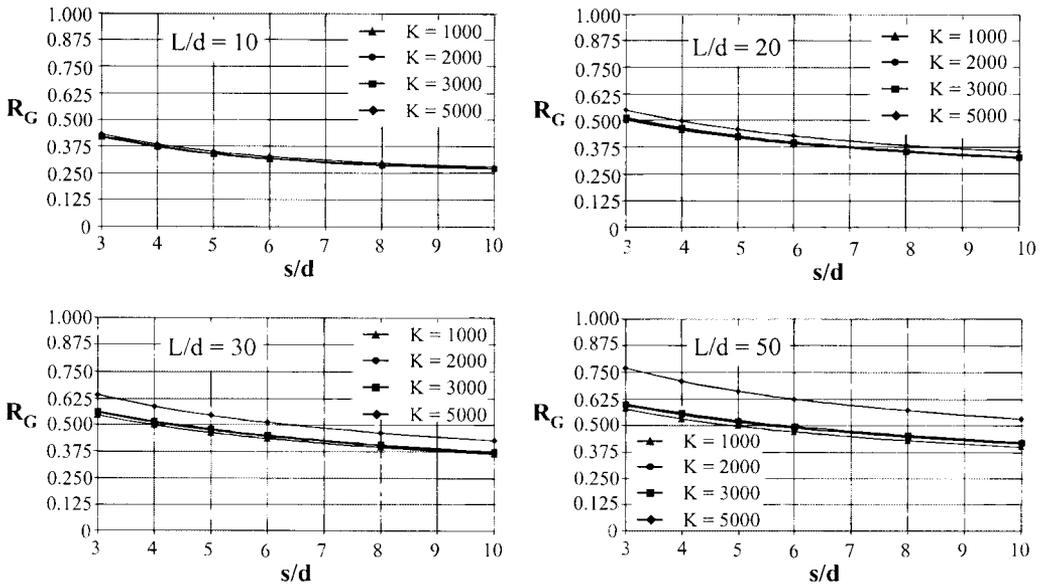


Fig. 6 – Fator de redução do grupo R_G vs. espaçamento relativo das estacas s/d para grupo de quatro estacas com bloco rígido. Perfil do solo: caso 3.

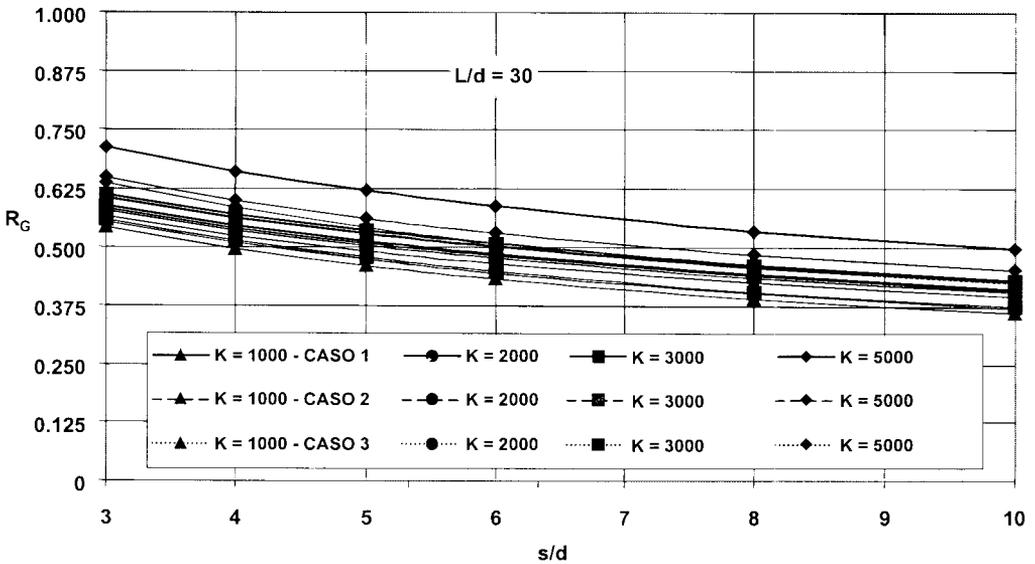


Fig. 7 – Similaridade entre as curvas da variação do fator de redução de grupo R_G com o espaçamento relativo das estacas s/d para o caso $L/d = 30$.

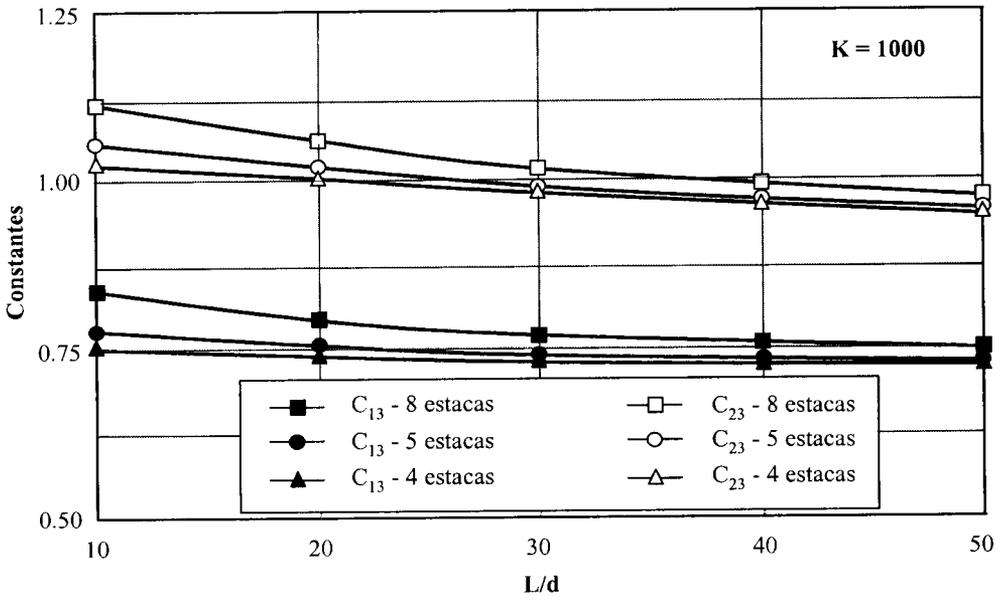


Fig. 8 – Constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} para grupos de 4, 5 e 8 estacas com bloco rígido no perfil do caso 1 ($K = 1000$).

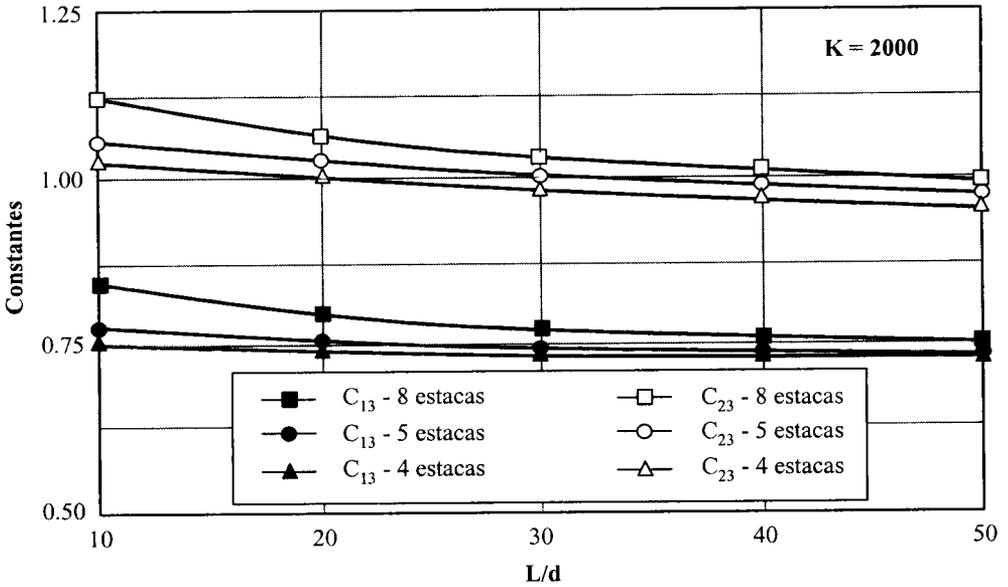


Fig. 9 – Constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} para grupos de 4, 5 e 8 estacas com bloco rígido no perfil do caso 2 ($K = 2000$).

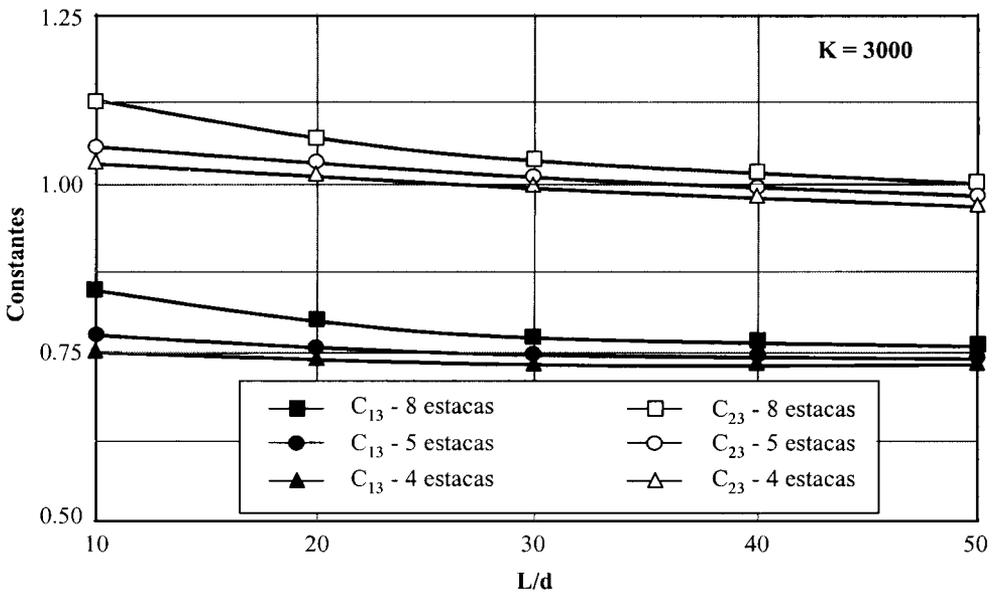


Fig. 10 – Constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} para grupos de 4, 5 e 8 estacas com bloco rígido no perfil do caso 1 ($K = 3000$).

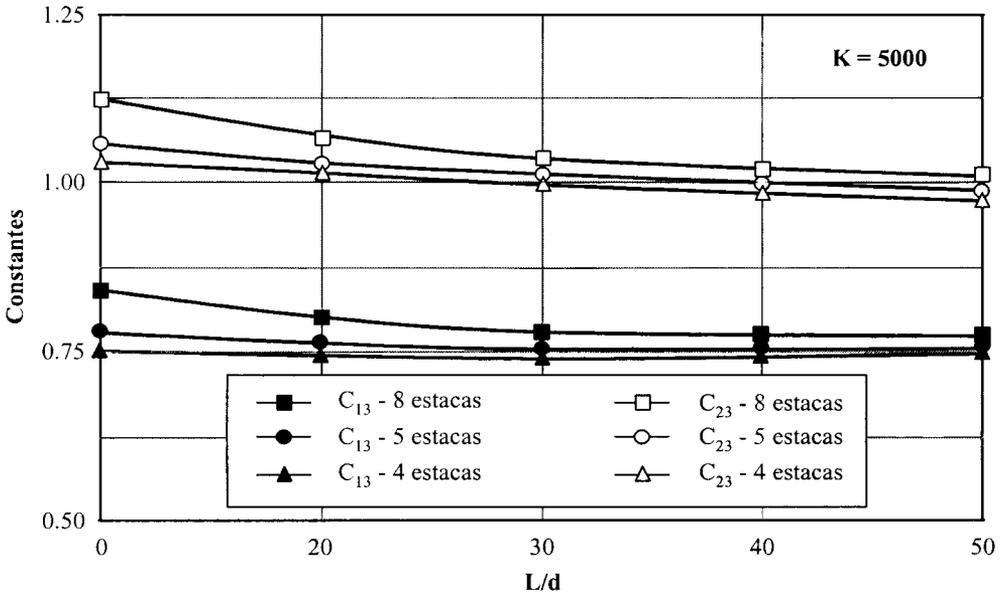
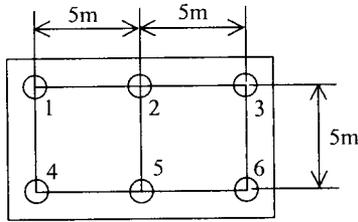
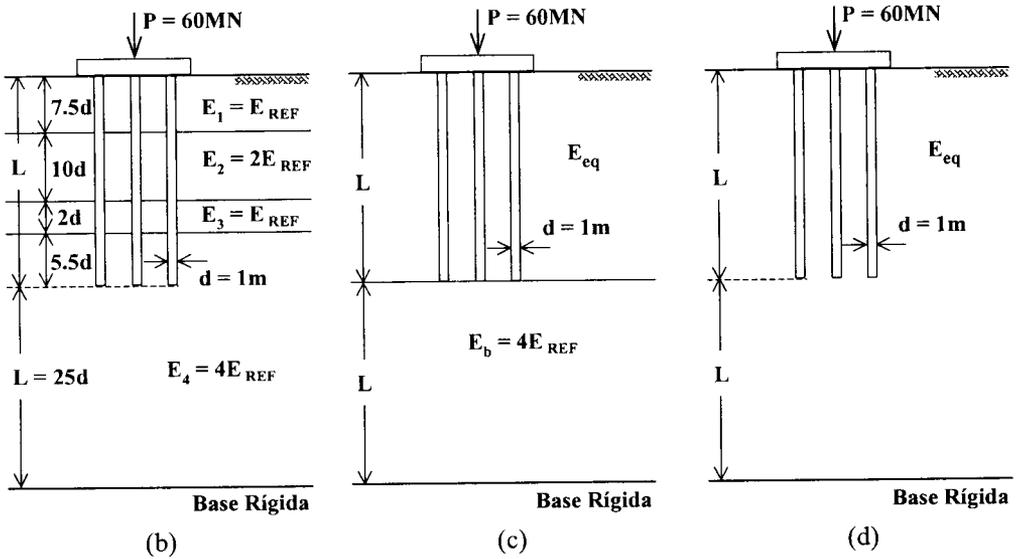


Fig. 11 – Constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} para grupos de 4, 5 e 8 estacas com bloco rígido no perfil do caso 2 ($K = 5000$).

Considere o grupo de seis iguais estacas de concreto (diâmetro $d = 1$ m e comprimento $L = 30$ m), conforme mostra a Fig. 12a), submetido ao carregamento vertical $P_G = 60$ MN em um maciço formado por quatro diferentes camadas de solo (Fig. 12b)). As estacas 1, 3, 4 e 6 são chamadas do tipo A enquanto que as estacas 2 e 5 de tipo B. As cargas no topo das estacas tipo A e B são também designadas como P_A e P_B , respectivamente.



(a)



Para todos os casos, $v_s = 0.30$ para todas as camadas, $E_{REF} = 10$ MPa e $K=2000$.

Fig. 12 – Geometria do grupo de seis estacas sob carregamento vertical em diferentes perfis de solo.

a) O perfil real de solo é idealizado como um perfil simplificado de dupla camada (Fig. 12c)) similar ao caso 2 da Fig. 3, anteriormente estudado através de análises paramétricas, e para o qual as constantes de proporcionalidade C_{13} e C_{23} foram determinadas nas Figs. 8, 9, 10 e 11.

Para o perfil de solo analisado neste exemplo, o módulo de elasticidade equivalente, calculado pela Eq. (12), resulta em $E_{eq} = 20.6$ MPa (Fig. 12c) e $E_b = E_4 = 40$ MPa.

b) O recalque de uma estaca isolada (ρ_l) sob carregamento unitário em um semi-espaço homogêneo com módulo de elasticidade $E_{eq} = 20.6$ MPa pode ser determinado pela Eq.(10), com os valores de I_0 , R_K , R_h , R_v obtidos de ábacos específicos publicados por Poulos e Davis (1980).

$$\rho_l = \frac{1 \times 0.075 \times 1.05 \times 0.85 \times 0.925}{20.6 \times 1.0} = 0.003006m \quad (15)$$

O recalque do grupo de estacas no semi-espaço homogêneo da Fig. 12d), sob carregamento vertical P_G , pode então ser calculado através da seguinte combinação linear (Poulos, 1968):

$$\rho_k = \rho_l \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N P_l \alpha_{kl} + \rho_l P_k \quad (16)$$

onde ρ_l é o recalque do topo de uma estaca isolada sob carga unitária (Eq. (10)), P_l é a carga no topo da estaca l e α_{kl} é o fator de interação entre as estacas k e l do grupo, definido por:

$$\alpha_{kl} = \frac{\text{recalque adicional na estaca } k \text{ devido à carga aplicada na estaca } l}{\text{recalque da estaca } k \text{ sob sua própria carga}} \quad (17)$$

O Quadro 1 mostra os valores do fator de interação α_{kl} considerando-se $L/d = 25$ e $K = 2000$ (Poulos e Davis, 1980).

Quadro 1 – Fator de interação α_{kl} para o grupo de seis estacas da Fig. 12a).

Estaca 1	Estaca 1 (tipo A)		Estaca 2 (tipo B)	
	Distância entre as estacas 1 e l (m)	α_{1l}	Distância entre as estacas 2 e l (m)	α_{2l}
1	0	-	5	0.42
2	5	0.42	0	-
3	10	0.27	5	0.42
4	5	0.42	7.07	0.35
5	7.07	0.35	5	0.42
6	11.2	0.25	7.07	0.35

Os recalques no topo das estacas tipo A e tipo B, calculados pela expressão (15), resultam então em

$$\rho_A = \rho_l (1.94 P_A + 0.77 P_B) = 0.003006 (1.94 P_A + 0.77 P_B) \quad (18a)$$

$$\rho_B = \rho_l (1.54 P_A + 1.42 P_B) = 0.003006 (1.54 P_A + 1.42 P_B) \quad (18b)$$

Como para um grupo de estacas com bloco rígido o recalque é o mesmo no topo de todas as estacas ($\rho_A = \rho_B$), as cargas aplicadas P_A e P_B podem ser determinadas das equações acima e da condição que $P_G = 4P_A + 2P_B$

$$P_A = 11.47 MN \quad (19a)$$

$$P_B = 7.06 MN \quad (19b)$$

Permitindo então que o recalque do grupo de estacas no semi-espaço homogêneo possa ser estimado pelas Eqs. (18a) ou (18b) como

$$\rho_A = \rho_B = 0.08323m \quad (20)$$

c) Com base nos valores da razão entre recalques C_{23} obtidos por análise paramétrica (Fig. 9), a estimativa do recalque do grupo de estacas no perfil estratigráfico real (Fig. 12b) pode ser feita pela Eq. (14), considerando-se $\rho_G^3 = \rho_A = \rho_B$

$$\rho_G^2 = C_{23} \times \rho_G^3 \cong 1.00 \times 0.08323 = 0.08323m \quad (21)$$

O Quadro 2 mostra a excelente concordância verificada entre os valores obtidos através deste simples procedimento de cálculo indireto e de uma análise direta do comportamento do grupo de estacas no perfil de solo com 4 camadas através do programa computacional.

Quadro 2 – Comparação entre os valores de recalque (em metros) obtidos para o grupo de 6 estacas pelo método de cálculo indireto e pelo programa computacional.

Cálculo Indireto (estrato $h = 2L$)	Programa Computacional (estrato $h = 2L$)
0.08323	0.08298

5 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado o comportamento do recalque de grupos de estacas (4, 5 e 8 estacas) com bloco rígido em alguns meios estratificados. A variação do fator de redução de grupo R_G com o espaçamento relativo s/d , a rigidez relativa das estacas ($1000 < K < 5000$), comprimento relativo ($10 < L/d < 50$) e estratigrafia foi estudada através de análises paramétricas com um programa computacional baseado em versão simplificada do método dos elementos de contorno. Constantes de proporcionalidade foram então determinadas, possibilitando uma estimativa do recalque do grupo no meio estratificado a partir do valor do recalque de uma estaca isolada em um meio homogêneo equivalente, através de um método de cálculo indireto, aqui proposto e exemplificado. Os resultados de recalque obtidos pelo cálculo indireto, simples e rápido, concordam satisfatoriamente com aqueles determinados através de uma análise direta pelo programa computacional, no exemplo apresentado e em diversas outras situações já analisadas pelos autores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento da dissertação de mestrado do primeiro autor (Bacelar, 1999), associada com o presente trabalho.

APÊNDICE

São apresentados os fatores de influência para cálculo dos deslocamentos verticais causados pela aplicação de uma força axial estática no topo de uma estaca.

a.1) Fatores de influência do deslocamento vertical de um ponto i devido às tensões cisalhantes atuantes no elemento j (I_{ij})

A geometria de um elemento cilíndrico, típico do fuste de uma estaca, é mostrada na Fig. A. 1. Para um ponto genérico i na massa de solo, o valor de I_{ij} é dado por

$$I_{ij} = 2 \int_{(j-1)\delta}^{j\delta} \int_0^{\pi/2} \rho I \cdot d\theta \cdot dc \quad (\text{A.1})$$

onde ρI é o fator de influência do deslocamento vertical devido à aplicação de uma carga axial e δ é o comprimento do elemento = L/n .

Da formulação de Mindlin (Mindlin, 1936), o fator de influência ρI é expresso por:

$$\rho I = \frac{(l+v)}{8\pi(l-v)} \left\{ \frac{z_1^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)}{R_1} + \frac{(5-12\nu+8\nu^2)}{R_2} + \frac{[(3-4\nu)z^2 - 2cz + 2c^2]}{R_2^3} + \frac{[6cz^2(z-c)]}{R_2^5} \right\} \quad (\text{A.2})$$

onde $z = h+c$, $z_1 = h-c$, $R_1^2 = \frac{d^2}{4} + x^2 - xd \cos\theta + z_1^2$ e $R_2^2 = \frac{d^2}{4} + x^2 - xd \cos\theta + z^2$.

A integral com relação ao parâmetro c (Eq. (A.1)) pode ser avaliada analiticamente, resultando em:

$$\rho I = \frac{(l+v)}{8\pi(l-v)} \left\{ \frac{z_1}{D_1} - 4(l-\nu)\ln(z_1 + D_1) + 8(l-2\nu+\nu^2)\ln(z + D) + \frac{[2h^2z/r^2 - 4h - (3-4\nu)z]}{D} + \frac{2(hr^2 - h^2z^3/r^2)}{D^3} \right\} \quad (\text{A.3})$$

onde h e r são definidos na Fig. A. 1, $D_1 = (r^2 + z_1^2)^{1/2}$ e $D = (r^2 + z^2)^{1/2}$ e os limites de integração na Eq. (A.3) são z_1 para $h - (j-1)\delta$ a $h - j\delta$ e z para $h + (j-1)\delta$ a $h + j\delta$.

A integral com relação a θ é convenientemente avaliada através de quadratura (integração numérica).

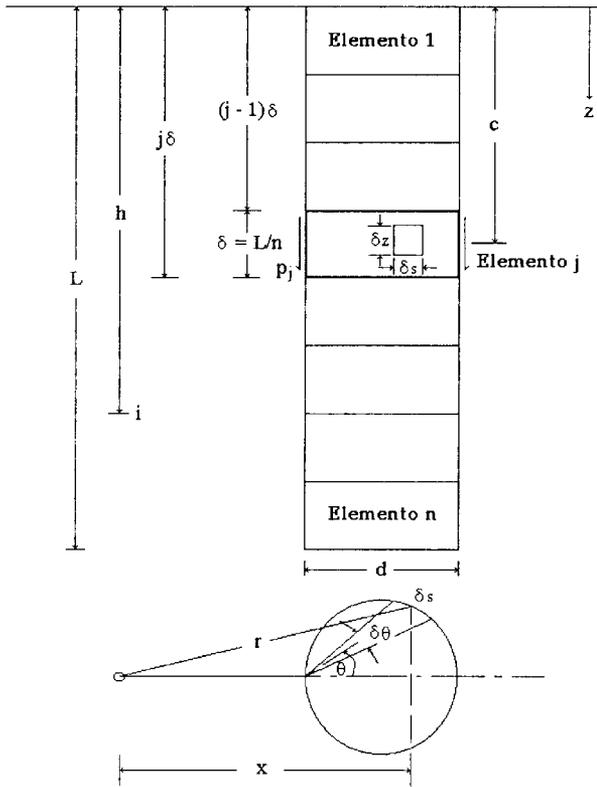


Fig. A. 1 – Geometria básica de uma estaca isolada.

a.2) Fatores de influência do deslocamento vertical de um ponto i devido à tensão normal atuante na base da estaca (I_{ib})

A geometria da base da estaca é mostrada na Fig. A. 2. Considerando-se um alargamento da base da estaca, o raio da base $r_b (= d_b/2)$ é admitido diferente do raio do fuste da estaca.

O fator de influência do deslocamento de um ponto i genérico da massa de solo devido à tensão normal atuante na base da estaca é dado por:

$$I_{ib} = \frac{l}{d} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_b} I \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (A.4)$$

onde ${}_b I$ é determinado pela Eq. (A.2) considerando-se $c = n\delta = L$, $R_2^2 = z^2 + x^2 + r^2 - 2rx\cos\theta$, $R_1^2 = z_1^2 + x^2 + r^2 - 2rx\cos\theta$ e $z = z_1 + 2c$.

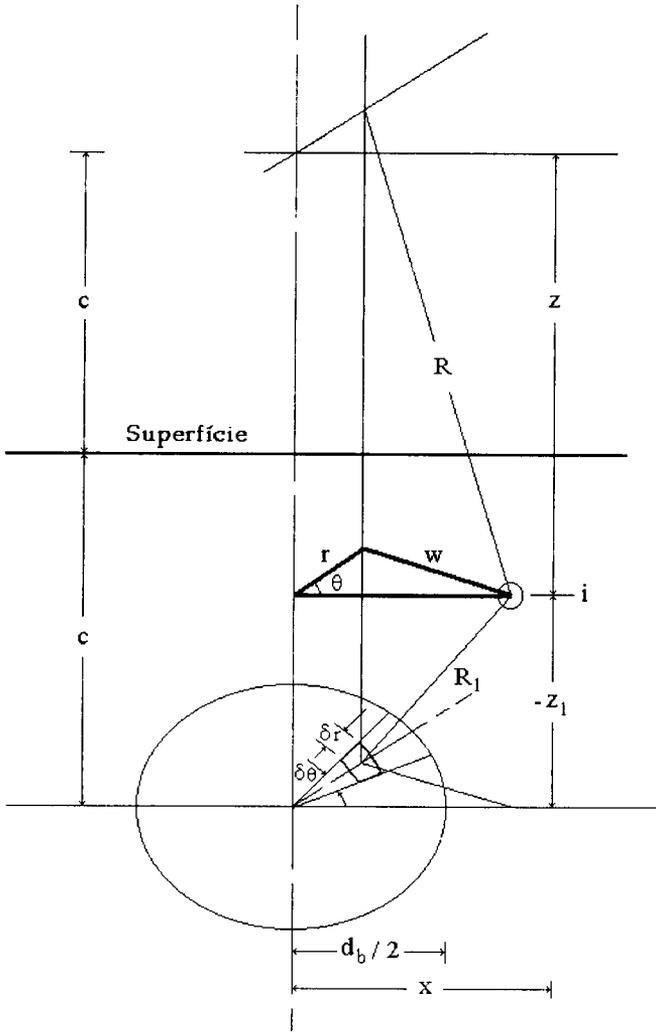


Fig. A. 2 – Geometria da base circular da estaca.

A integração em relação à coordenada r pode ser resolvida analiticamente, resultando em:

$$\int_{\rho} I \cdot r \cdot dr = \frac{(1+\nu)}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{z_1^2 (rA - R_0^2)}{(R_0^2 - A^2) \sqrt{X_0}} + (3-4\nu) \left[\sqrt{X_0} + A \ln(2\sqrt{X_0} + 2r) - 2A \right] + \right. \\ \left. + (5-12\nu+8\nu^2) \left[\sqrt{X_1} + A \ln(2\sqrt{X_1} + 2r - 2A) \right] + \left[(3-4\nu)z^2 - 2cz + 2c^2 \right] \frac{(Ar-B)}{(B-A^2) \sqrt{X_1}} + \right.$$

$$+ 6cz^2(z-c) \left\{ \frac{-1}{3\sqrt{X_1^3}} + A \left[\frac{r-A}{3(B-A^2)\sqrt{X_1}} \times \left(\frac{1}{X_1} + \frac{2}{B-A^2} \right) \right] \right\} \quad (A.5)$$

onde $R_0^2 = z_1^2 + x^2$, $A = x \cos \theta$, $X_0 = r^2 - 2Ar + R_0^2$, $X_1 = r^2 - 2Ar + B$, $B = R_0^2 + 4c^2 + 4cz_1$ e $z = z_1 + 2c$.

A integração com relação a θ deve ser avaliada numericamente.

a.3) Fatores de influência do deslocamento vertical do centro da base da estaca devido às tensões cisalhantes atuantes no elemento j (I_{bj})

Para o deslocamento do centro da base devido às tensões cisalhantes atuantes no elemento j , temos que:

$$I_{bj} = \pi \int_{(j-1)\delta}^{j\delta} \rho I \cdot dc \quad (A.6)$$

O integrando da Eq. (A.6) é fornecido pela Eq. (A.3) considerando-se $h = L$, $D^2 = z^2 + d^2/4$ e $D_1^2 = z_1^2 + d^2/4$.

a.4) Fatores de influência do deslocamento vertical do centro da base da estaca devido à tensão normal atuante na própria base (I_{bb})

Para o deslocamento vertical da base como resultado das tensões normais atuantes na própria base, é desejável fazer-se uma aproximação para incorporar o efeito da rigidez da base, multiplicando-se o deslocamento do seu centro pelo fator $\pi/4$. Este fator representa a razão entre o deslocamento de uma placa circular infinitamente rígida na superfície de um semi-espaço linearmente elástico, isotrópico, homogêneo e o deslocamento no centro de uma placa circular perfeitamente flexível e uniformemente carregada.

$$I_{bb} = \frac{\pi}{4} \cdot 2 \frac{\pi}{d} \int_0^{r_b} \rho I \cdot r \cdot dr \quad (A.7)$$

onde ${}_bI$ é fornecido pela Eq. (A.2) considerando-se $c = n\delta = L$, $R_2^2 = 4c^2 + r^2$, $R_1 = r$ e $z_1 = 0$.

A integral da Eq. (A.7) pode ser avaliada analiticamente, resultando em:

$$I_{bb} = \frac{\pi(I+\nu)}{16(I-\nu)d} \left[(3-4\nu) \frac{d_b}{2} + (5-12\nu+8\nu^2)(R-z) + \frac{(5-8\nu)}{2} z^2 \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{R} \right) + \frac{z}{2} - \frac{z^4}{2R^3} \right] \quad (A.8)$$

onde $R = \left(z^2 + \frac{d_b^2}{4} \right)^{1/2}$ e $z = z_1 + 2c = 2L$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bacelar, C. J. R. *Implementação Numérica para Análise do Comportamento de Grupos de Estacas em Maciços Estratificados*. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- Banerjee, P. K. and Davies, T. G. *The Behaviour of Axially and Laterally Loaded Single Piles Embedded in Non-homogeneous Soils*. *Géotechnique*, v.28, n.3, pp.309-326, 1978.
- D'Appolonia, E. and Romualdi, J. P. *Load Transfer in a Step-taper Pile*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v.89, SM2, pp.1-25, 1963.
- Mattes, N. S. and Poulos, H. G. *Settlement of Single Compressible Pile*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v.95, SM1, pp.189-207, 1969.
- Mindlin, R. D. *Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid*. *Physics*, v.7, pp.195-202, 1936.
- Poulos, H. G. *Analysis of the Settlement of Pile Groups*. *Géotechnique*, v.18, pp.449-471, 1968.
- Poulos, H. G. *Settlement of Single Piles in Non-homogeneous Soil*. *Journal Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 105, n.GT5, pp.627-641, 1979.
- Poulos, H. G., Davis, E. H. *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley and Sons, 397p., 1980.
- Poulos, H. G. and Mattes, N. S. *The Behaviour of Axially-Loaded End-Bearing Piles*. *Géotechnique*, v.19, n.2, pp. 285-300, 1969.
- Steinbrenner, W. *Tafeln zur Setzungberechnung*. *Die Strasse*, v.1, n.221, 1934.
- Yamashita, K.; Tomono, M. and Kakurai, M. *A Method for Estimating Immediate Settlement of Piles and Pile Groups*. *Soils and Foundations*, v.27, n.1, pp.61-76, 1987.