

Análise numérica de recalque de grupos de estacas em maciços estratificados

Wandemyr Mata dos Santos Filho, Celso Romanel e Pedricto Rocha Filho.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil

RESUMO: Este trabalho visa apresentar um método para previsão de recalque de grupos de estacas, solicitadas axialmente em maciços de solo estratificados, através do emprego de técnicas numéricas. O método de análise utilizado é baseado em uma versão simplificada do método dos elementos de contorno, sugerida por Poulos & Davis (1968). Neste caso, a modificação proposta constou da substituição do meio estratificado por um meio homogêneo equivalente, através da utilização de procedimentos sugeridos por Poulos (1979) e Yamashita *et al* (1987).

1 - INTRODUÇÃO

Vários métodos, para estimativas de recalque de fundações profundas, foram apresentados, nas últimas décadas, fruto da necessidade de aperfeiçoamento dos projetos como também em decorrência de, cada vez maior, disponibilidade de poderosos microcomputadores que tornaram viáveis procedimentos de cálculo que, há apenas alguns anos, sequer seriam cogitados como práticos para projetos de fundação.

De acordo com Poulos & Davis (1989), os métodos de análise para previsão de recalque de estacas e grupos de estacas podem ser classificados em três categorias:

- a) Métodos aproximados (Bjerrum *et al*, 1957; Zeevaert, 1973)
- b) Métodos dos elementos de contorno
 - b.1) Funções de transferência de carga
 - b.2) Teoria da elasticidade
- c) Método dos elementos finitos

Dentre estes, os métodos das categorias b e c permitem incorporar análises não-lineares, inelásticas, com comportamento dependente da trajetória de tensões, condições de contorno altamente complexas com simulação dos processos de cravação ou escavação.

Um razoável compromisso entre a complexidade excessiva destes métodos numéricos e a simplicidade inaceitável de técnicas baseadas em correlações empíricas, são os métodos aproximados desenvolvidos a partir de soluções clássicas da teoria da elasticidade linear.

Neste trabalho, o comportamento de grupos de estacas sob carregamento vertical, com bloco rígido ou flexível, em meios elásticos estratificados, é analisado considerando-se adaptações da solução clássica de Mindlin (1936), rigorosamente válida apenas para o caso de um semi-espaço homogêneo. Com base nesta solução singular associada a uma versão simplificada do método dos elementos de contorno, sugerida por Poulos em 1968, foi elaborado um programa computacional para estudar o problema da estimativa de recalques de grupos de estacas em solos estratificados (semi-espaço ou estratos de espessura finita).

2 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DESENVOLVIDO

Foi desenvolvido um programa computacional, codificado em linguagem FORTRAN 77, para análise aproximada do recalque de grupos de estacas em solos estratificados (semi-espaço ou estratos de espessura finita), com bloco infinitamente rígido ou perfeitamente flexível.

O programa RGEMHE desenvolvido com base na solução apresentada por Poulos (1968, 1979), considera a discretização em forças pontuais das tensões cisalhantes originárias do carregamento da estaca, estabelecidas pela equação de equilíbrio, e que o processo de transferência dessas forças para o maciço ocorra de acordo com as equações básicas de Mindlin. O valor do módulo de elasticidade do meio homogêneo equivalente é dado pela média aritmética sugerida por Poulos (1979) (RGEMHE-1) ou alternativamente, pela média ponderada proposta por Yamashita *et al* (1987) (RGEMHE-2).

O estudo do comportamento de grupos de estacas, em geral, envolve um grande número de variáveis que afetam o problema, tais como: geometria das estacas e do grupo, estratigrafia do maciço, geometria e rigidez do bloco, parâmetros geotécnicos das várias camadas de solo e propriedades elásticas do material que constitui a fundação, entre outros.

Em relação ao bloco do grupo de estacas foram feitas as seguintes considerações:

- i) No caso do bloco perfeitamente flexível, sob carga vertical e centrada, a análise admite que a carga aplicada no topo de cada estaca é igual à carga média do grupo. Assim, a distribuição de cargas por estaca é a priori conhecida, necessitando-se apenas determinar os valores dos recalques das diferentes estacas que compõem o grupo;
- ii) No caso de um bloco infinitamente rígido, admite-se que o recalque do bloco sob carregamento vertical e centrado é igual ao recalque do topo de todas as estacas do grupo. Assim, além da determinação desta incógnita (deslocamento vertical do bloco), são também desconhecidas as cargas que, em virtude da rigidez do bloco, são diretamente distribuídas entre as estacas do grupo;

- iii) Em ambos os casos acima, considera-se que a base do bloco encontra-se acima da superfície do terreno, desconhecendo-se, portanto, a interação solo/bloco na formulação aproximada aqui utilizada.

2.1 - HIPÓTESE DAS SOLUÇÕES UTILIZADAS NO PROBLEMA DE GRUPO DE ESTACAS

Cada estaca é considerada como sendo cilíndrica, de comprimento L , diâmetro do fuste d igual ao diâmetro da base d_b , carregada com uma força P no topo.

Em ambas as soluções aqui utilizadas, consideram-se válidas as seguintes hipóteses no desenvolvimento da formulação deste problema:

- 1) O contato solo/estaca é admitido perfeitamente aderente;
- 2) Os parâmetros elásticos do solo (E_s, ν_s) não são influenciados pela presença das estacas, tão pouco existindo tensões residuais devido ao processo de cravação;
- 3) Apenas a compatibilidade dos deslocamentos verticais na interface solo/estaca são satisfeitas. A inclusão da compatibilidade de deslocamentos radiais não afeta significativamente as soluções (Butterfield & Banerjee, 1971; Mattes, 1971; 1972)
- 4) O bloco de estacas, perfeitamente flexível ou infinitamente rígido, não está em contato com a superfície do terreno;
- 5) Para o caso de um estrato de espessura finita formado por diferentes camadas as soluções podem ser empregadas com auxílio da aproximação de Steinbrenner ou do método das imagens.

2.2 - FORMULAÇÃO DO MÉTODO PARA GRUPOS DE ESTACAS

Um grupo de M estacas, cada estaca dividida em n elementos cilíndricos, é mostrado na figura (1).

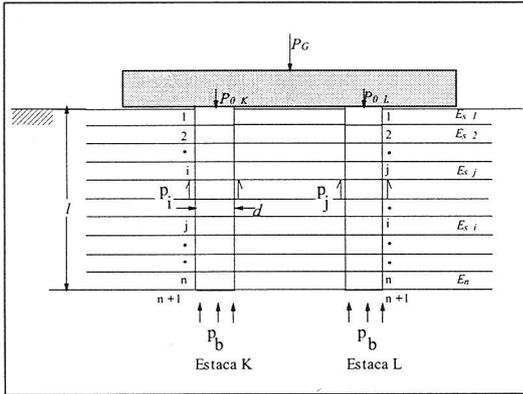


Figura 1 - Tensões atuantes no fuste e na base das estacas de um grupo.

Estendendo os resultados obtidos por Poulos (1979), para estaca isolada em meios estratificados, o recalque do *i-ésimo* elemento adjacente ao solo da *K-ésima* estaca pertencente a um grupo de *M* estacas, pode ser avaliado pela seguinte equação:

$$s\rho_{iK} = \sum_{L=1}^M \sum_{j=1}^{n+1} s\rho_{iKjL} \quad (1)$$

onde:

$s\rho_{iK}$ = recalque do solo adjacente ao *i-ésimo* elemento da *K-ésima* estaca

sendo:

$$s\rho_{iKjL} = \frac{d_L}{E_{sij}} I_{iKjL} p_{jL} \quad (2)$$

$s\rho_{iKjL}$ = recalque do solo adjacente ao *i-ésimo* elemento da *K-ésima* estaca devido a tensões cisalhantes atuantes no *j-ésimo* elemento da *L-ésima* estaca

d_L = diâmetro da estaca *L-ésima* estaca

p_{jL} = tensões cisalhantes atuando no *j-ésimo* elemento da *L-ésima* estaca

E_{sij} = módulo de elasticidade equivalente calculado pela média aritmética considerando os módulos da *i-ésima* e *j-ésima* camadas.

I_{iKjL} = fator de influência do recalque no *i-ésimo* elemento da *K-ésima* estaca devido a tensões cisalhantes atuantes no *j-ésimo* elemento da *L-ésima* estaca,

Os valores de I_{iKjL} podem ser obtidos através da integração das equações de Mindlin, referentes ao deslocamento vertical causado em qualquer ponto de um semi-espaco devido à aplicação de forças pontuais em sua superfície ou em seu interior.

Impondo a compatibilidade de deslocamentos verticais na interface solo - estaca *L* ($s\rho_L = p\rho_L$), o vetor de tensões $\{p\}$ pode ser finalmente obtido por:

$$\{p\}_L = \left\{ [I] - \frac{n^2}{4(L_L/d_L)^2} (K_L [I_p]_L)([I_s]_L) \right\}^{-1} \cdot \{Y\}_L \quad (3)$$

$\{p\}_L$ = vetor (*n + 1*) das tensões na estaca *L*

$[I]$ = matriz de identidade da ordem (*n + 1*)

$[I_p]_L$ = matriz (*n+1 x n+1*) dos coeficientes da estaca *L*

$[I_s]_L$ = matriz (*n+1 x n+1*) dos fatores de influência do deslocamento vertical do solo adjacente a estaca *L*

L_L = comprimento da estaca *L*

d_L = diâmetro da estaca *L*

n = número de elementos da estaca

$\{Y\}_L$ = vetor (*n + 1*) dos carregamentos externos através da estaca *L*

K_L = fator de rigidez da estaca *L*

2.3 - EFEITO DA RIGIDEZ DO BLOCO

A análise de um grupo de estacas com o bloco perfeitamente flexível implica em duas condições fundamentais:

a) O valor da carga aplicada no topo de cada estacas *i* do grupo sob carregamento vertical P_G , é dado por:

$$P_j = P_G / n \quad (4)$$

onde:

P_j = carga média aplicada em uma estaca j pertencente ao grupo

P_G = carga total aplicada no grupo de estacas

n = número de estacas do grupo

b) As estacas do grupo têm o mesmo carregamento, ocorrendo a existência de recalques diferenciais entre as mesmas. O valor do recalque do grupo, é então considerado igual ao recalque médio do grupo.

No caso de um grupo de estacas com o bloco infinitamente rígido, duas restrições devem ser observadas:

a) O recalque do topo de todas as estacas são iguais entre si e equivalente ao recalque do bloco;

b) A somatória de todas as cargas atuando no topo de cada estaca é igual a carga total P_G aplicada no bloco (vertical e cêntrica).

Impondo-se que os deslocamentos verticais devem ser iguais, obtém-se assim um sistema de n equações.

Em seguida, utilizando-se a equação (1) com a aplicação de uma carga unitária em cada estaca, calculam-se os valores de recalque correspondentes. Uma vez que a análise é desenvolvida com base na teoria da elasticidade, um sistema de equações é montado, obtendo-se a partir da sua solução a distribuição de cargas em cada estaca pertencente ao grupo, e conseqüentemente o recalque do grupo de estacas.

2.4 - MÓDULOS DE ELASTICIDADE DO MEIO HOMOGÊNEO EQUIVALENTE

Uma análise aproximada do comportamento de estacas em maciços de solo

estratificado pode também ser feita através de adaptações da solução de Mindlin (rigorosamente válida apenas para o semi-espaço homogêneo) empregando-se valores do módulo de elasticidade E_s variáveis conforme as localizações dos elementos i, j .

Nestes métodos, considera-se que o elemento i corresponde ao elemento no qual se deseja determinar o deslocamento vertical e j o elemento onde a tensão cisalhante esta sendo aplicada.

O módulo de elasticidade do meio homogêneo equivalente foi obtido através dos seguintes métodos:

a) Poulos (1979)

O valor do módulo E_s sugerido por Poulos (1979), após uma série de comparações com outras condições, é baseado na média aritmética simples:

$$E_s = 0.5.(E_{si} + E_{sj}) \quad (5)$$

onde:

E_{si} = módulo de elasticidade no elemento i ;

E_{sj} = módulo de elasticidade no elemento j .

De acordo com Poulos (op.cit.) a equação (5) não deve ser empregada em estratigrafias em que o módulo de elasticidade de determinada camada for superior aos valores das camadas subjacentes (solo rijo sobre camada se solo mole).

b) Yamashita, Tomono & Kakurai. (1987)

Estes autores, sugerem que os valores de E_{si} e E_{sj} da equação (5), podem ser substituídos por uma média ponderada dos módulos de elasticidade das diversas camadas que compõem o perfil do solo, incluindo-se também no cálculo os efeitos das camadas situadas abaixo da base da estaca.

$$E_{s_i} = \frac{\beta_{-(i-1)} E_{s_i} + \dots + \beta_{-k} E_{s_{(i-k)}} + \dots + \beta_{-1} E_{s_{(i-1)}} + E_{s_i} + \beta_1 E_{s_{(i+1)}} + \dots + \beta_k E_{s_{(i+k)}} + \dots + \beta_{n+m-i} E_{s_{(n+m)}}}{\beta_{-(i-1)} + \dots + \beta_{-k} + \dots + \beta_{-1} + 1 + \beta_1 + \dots + \beta_k + \dots + \beta_{n+m-j}} \quad (6)$$

$$E_{s_j} = \frac{\beta_{-(j-1)} E_{s_j} + \dots + \beta_{-k} E_{s_{(j-k)}} + \dots + \beta_{-1} E_{s_{(j-1)}} + E_{s_j} + \beta_1 E_{s_{(j+1)}} + \dots + \beta_k E_{s_{(j+k)}} + \dots + \beta_{n+m-j} E_{s_{(n+m)}}}{\beta_{-(j-1)} + \dots + \beta_{-k} + \dots + \beta_{-1} + 1 + \beta_1 + \dots + \beta_k + \dots + \beta_{n+m-j}} \quad (7)$$

Embora o fator de ponderação β_k seja dependente de E_{s_i} , E_{s_j} e das profundidades dos elementos i e j , Yamashita *et al.* (op. cit.) adotam que:

$$\beta_{-k} = \beta_k \quad (8)$$

$$\beta_k = ak \quad \text{com} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (9)$$

O valor de $a = 0.5$ é sugerido nesta aproximação; para $a = 0$ a formulação anterior de Poulos (1979) é recuperada.

3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 - Grupo de duas estacas com bloco rígido.

Randolph & Wroth (1979) apresentaram os resultados dos valores de recalque para grupos de até 4 estacas rígidas em um semi-espaço homogêneo e incompressível ($n_s = 0.5$), com um espaçamento $s = 5 r$.

As estacas têm seção circular de raio $r = 0.75$ m, comprimento de 46.6 m e módulo de elasticidade igual a 2.75×10^6 tf/m², enquanto que o módulo de elasticidade do solo $E_s = 3077$ tf/m², sendo $G = 1025.67$ tf/m². A carga total aplicada no topo do bloco do grupo de estacas é de $P_G = 1000$ tf.

Randolph & Wroth (1979) compararam os resultados de recalque p_t obtidos em suas análises (figura 2) com as respostas fornecidas através do método de elementos de contorno proposto por Banerjee (1970).

Na tabela 1.07 são apresentados os valores de recalque do topo de um grupo de duas estacas com o bloco rígido, considerando-se novamente um meio homogêneo. Os valores foram obtidos através dos métodos de Randolph & Wroth (1979), de Yamashita *et al* (1987) - programa YTKG - e de Poulos (1968) - programa RGEMHE.

Adotando como padrão de comparação os valores calculados através do método de Randolph & Wroth (1979), é possível constatar-se uma satisfatória concordância nos resultados obtidos com os programas computacionais desenvolvidos no presente trabalho. Percentualmente, as diferenças entre os valores calculados pelo método de Randolph & Wroth (1979) e de Yamashita *et al* (1987) é de apenas 0.7%, enquanto que em relação ao método de Poulos (1968) a diferença cresce para 12%.

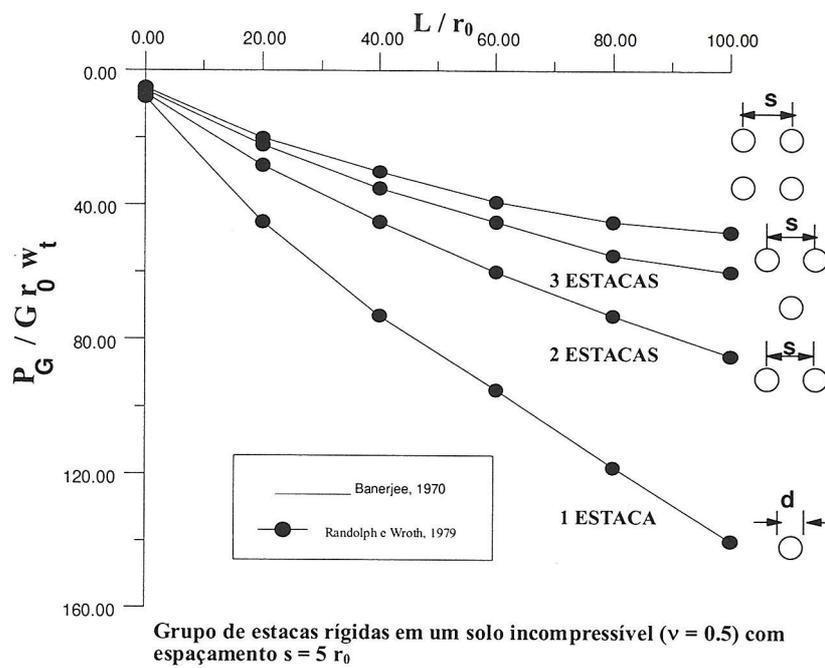


Figura 2 - Valores dos índices de recalque para vários grupos de estacas (Apud Randolph & Wroth, 1979)

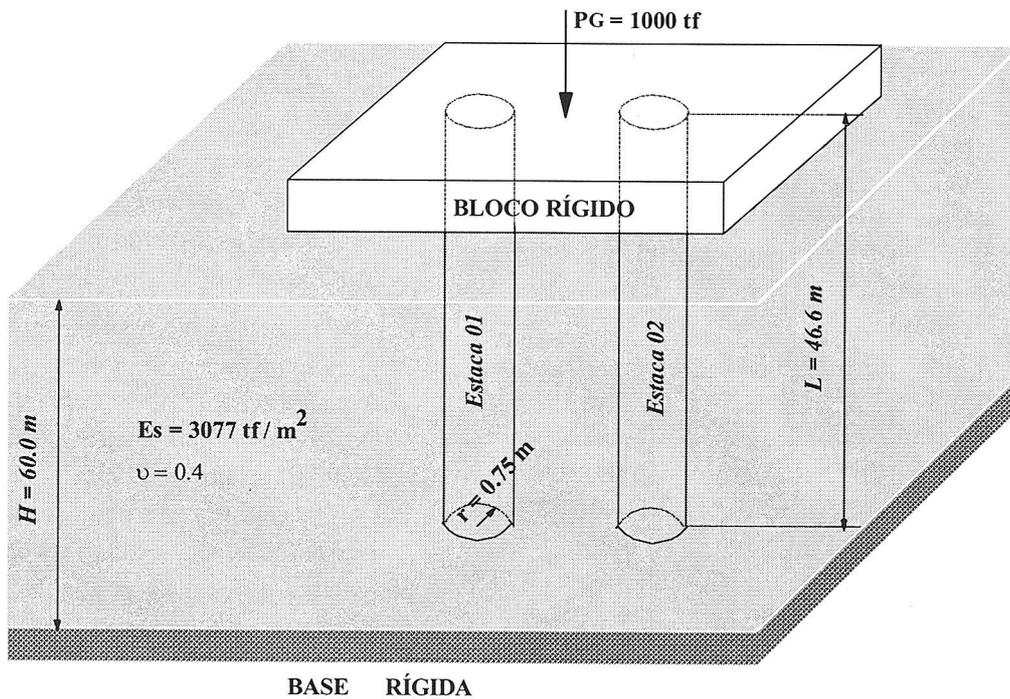


Figura 3 - Esquema de grupo de duas estacas com bloco rígido.

PROGRAMA UTILIZADO		RECALQUE (mm)	
		ESTACA 01	ESTACA 02
YTKG	TOPO	11.15	11.15
		100.72 %	100.72 %
RGEMHE-1 Poulos (1979)	TOPO	9.89	9.89
		89.34 %	89.34 %
RGEMHE-2 Yamashita (1987)	TOPO	9.89	9.89
		89.34 %	89.34 %
RANDOLPH & WROTH (1979)	TOPO	11.07	11.07
		100 %	100 %

Tabela 1 - Resultados dos valores de recalque de um grupo de duas estacas idênticas com bloco rígido.

Apesar deste exemplo envolver apenas a análise de um grupo de estacas em um meio homogêneo, a comparação dos resultados numéricos obtidos é importante para uma avaliação geral da confiabilidade do programa no estudo do comportamento de grupos de estacas com bloco rígido.

3.2 - Grupos de três estacas com bloco rígido

Poulos & Davis (1980) comentam que em um grupo de estacas simetricamente localizadas, a distribuição da carga (suposta concêntrica em relação ao bloco) é feita de maneira proporcional à configuração do grupo. Por exemplo, no caso de um grupo de 2 ou 4 estacas, todas as estacas receberiam cargas iguais, equivalente à metade ou à quarta parte da carga suportada pelo bloco, respectivamente, com o mesmo tipo de distribuição.

Assim, considerando-se um grupo de 3 estacas não equidistantes, com diâmetro de 1.5 m, módulo de elasticidade de $2.75 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$, comprimento 46.6 m e embutidas em um semi-espaco infinito homogêneo ($\nu_s = 0.5$, $E_s = 3077 \text{ tf/m}^2$), foram obtidos os valores de recalque no topo do grupo, para uma carga total aplicada no bloco igual a 1000 tf, visando também comprovar a eficiência dos programas computacionais RGEMHE e YTKG na obtenção do valor da carga aplicada em cada estaca.

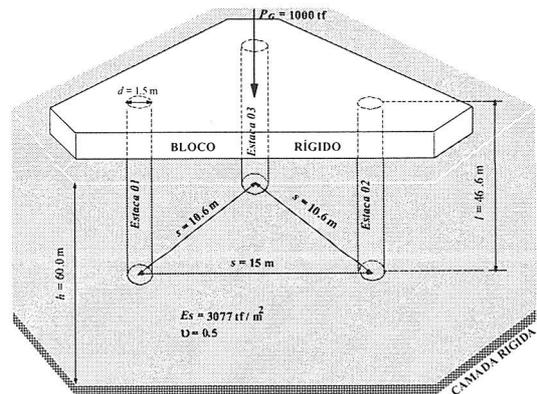


Figura 4 - Grupo de três estacas com o bloco rígido.

As tabelas 2 e 3 apresentam as comparações dos valores de recalque e distribuição de carga por estaca, obtidos através de soluções paramétricas publicadas por Poulos (1968) e pelos programas RGEMHE e YTKG.

Dos resultados da tabela 2 observa-se que os valores de recalque obtidos pelos programas YTKG, RGEMHE -1 e -2 são bastante próximos dos valores encontrados através das soluções paramétricas de Poulos (1968). Entretanto, a aplicação do programa YTKG superestimou, neste caso, o valor do recalque em 27% na comparação com os resultados das soluções paramétricas desenvolvidas por Poulos (1968).

Verificou-se também que as estacas 02 e 03 (figura 4) recebem a mesma parcela de carregamento, sendo este no entanto diferente da estaca 01. Os valores das cargas aplicadas nas estacas do grupo é definido pelo índice $P/P_{\text{média}}$, que relaciona a parcela real da carga aplicada nula estaca em relação a carga média aplicada no grupo (carga aplicada no bloco dividida pelo número de estacas).

Devido à rigidez do bloco, observa-se a igualdade dos valores de recalque do topo das estacas com o recalque do bloco do grupo.

PROGRAMA UTILIZADO		RECALQUE (mm)		
		ESTACA 01	ESTACA 02	ESTACA 03
YTKG	TOPO	7.32 127.30 %	7.32 127.30 %	7.32 127.30 %
	BASE	4.22	4.22	4.22
RGMHE-1 Poulos (1979)	TOPO	5.83 101.39 %	5.83 101.39 %	5.83 101.39 %
	BASE	3.20	3.20	3.20
RGMHE-2 Yamashita (1987)	TOPO	5.83 101.39 %	5.83 101.39 %	5.83 101.39 %
	BASE	3.20	3.20	3.20
POULOS (1968) SOLUÇÕES PARAMÉTRICAS	TOPO	5.75 100 %	5.75 100 %	5.75 100 %

Tabela 2 - Resultados dos valores de recalque de um grupo de três estacas idênticas com bloco rígido.

PROGRAMA UTILIZADO	CARGA EM CADA ESTACA ($P/P_{média}$)		
	ESTACA 01	ESTACA 02	ESTACA 03
YTKG	1.01577	1.01577	0.96849
RGMHE-1 Poulos (1979)	1.02195	1.02195	0.9561
RGMHE-2 Yamashita (1987)	1.02195	1.02195	0.9561
POULOS (1968) SOLUÇÕES PARAMÉTRICAS	1.0134	1.0134	0.97294

Tabela 3 - Resultados dos valores de distribuição de carga por estaca num grupo de três estacas idênticas com bloco rígido.

Os resultados deste exemplo indicam uma concordância satisfatória na avaliação do comportamento de um grupo de estacas com o bloco rígido, apesar do maciço de solo ainda ser representado como um meio elástico homogêneo.

3.3 - Grupo de quatro estacas com bloco rígido, em meio estratificado

Devido à escassez de resultados publicados sobre o comportamento de grupos de estacas em solos estratificados, decidiu-se nesta etapa analisar-se através de um programa de elementos finitos (SAP-90), o comportamento de um grupo de 2^2 , através de uma análise tridimensional.

Em função da simetria do grupo de estacas, dos carregamentos e das propriedades geométricas do maciço de solo, a discretização da figura 8 refere-se apenas à quarta parte do problema real.

A malha de elementos finitos, de dimensões $z/L = 2$ e $r/d = 40$, é composta de 3.318 elementos isoparamétricos de 8 nós. A mesma malha foi utilizada na análise do comportamento do grupo considerando-se os três seguintes perfis de solo (figura 7 a-b-c):

a) Solo estratificado, com módulo de elasticidade crescente com a profundidade;

b) Solo homogêneo ($E_s = 816.32 \text{ tf/m}^2$) igual ao utilizado nas análises de Poulos & Presley (1986);

c) Solo estratificado, com módulo de elasticidade decrescente com a profundidade Conforme indicação de Poulos (1979), para o caso de estaca isolada, as soluções baseadas em adaptações das equações de Mindlin (1936) não produzem bons resultados para este tipo de estratigrafia.

Em todos os exemplos analisados pelo programa SAP-90, considerando um grupo de estacas carregado pela força P_G , o “semi-espaço” linear elástico foi simulado através de um estrato de espessura $H = 2.L$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0.4$.

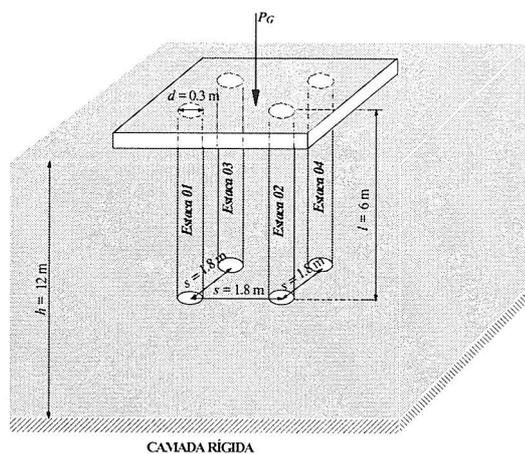


Figura 5 - Grupo de quatro estacas analisado pelo SAP-90

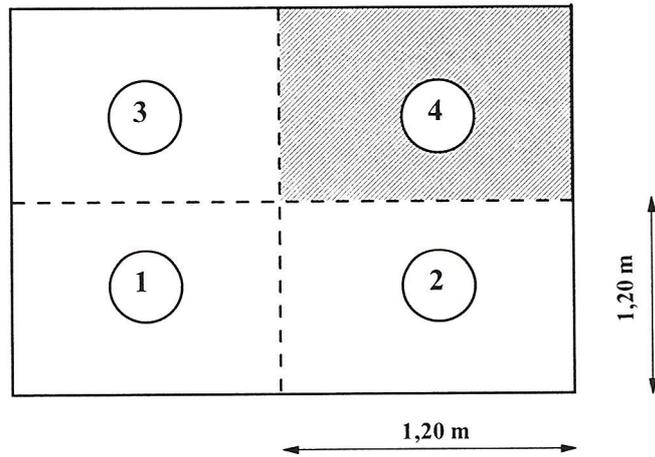


Figura 6 - Um quarto do bloco do grupo de quatro estacas analisado pelo SAP-90

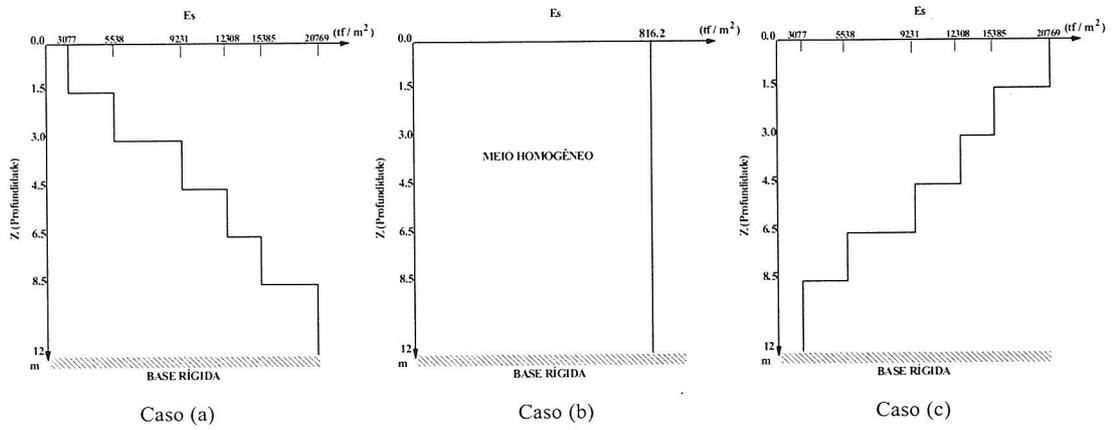


Figura 7 - Perfis dos casos (a), (b) e (c) analisados nesta pesquisa, por elementos finitos

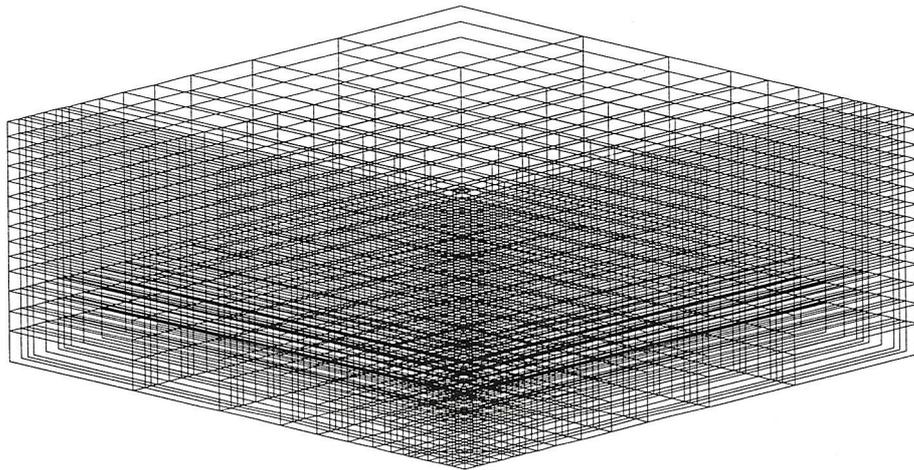


Figura 8 - Malha 3-D para um grupo de quatro estacas (apenas ¼ do bloco considerado, devido à simetria do grupo 22)

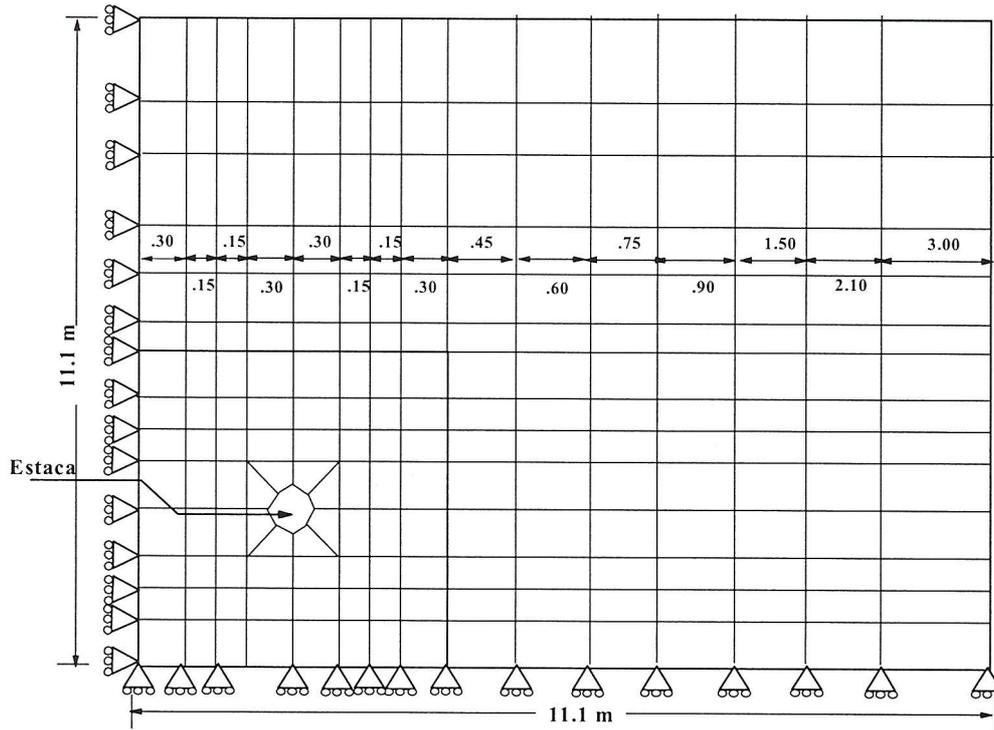


Figura 9 - Projeção horizontal da malha de elementos finitos adotada

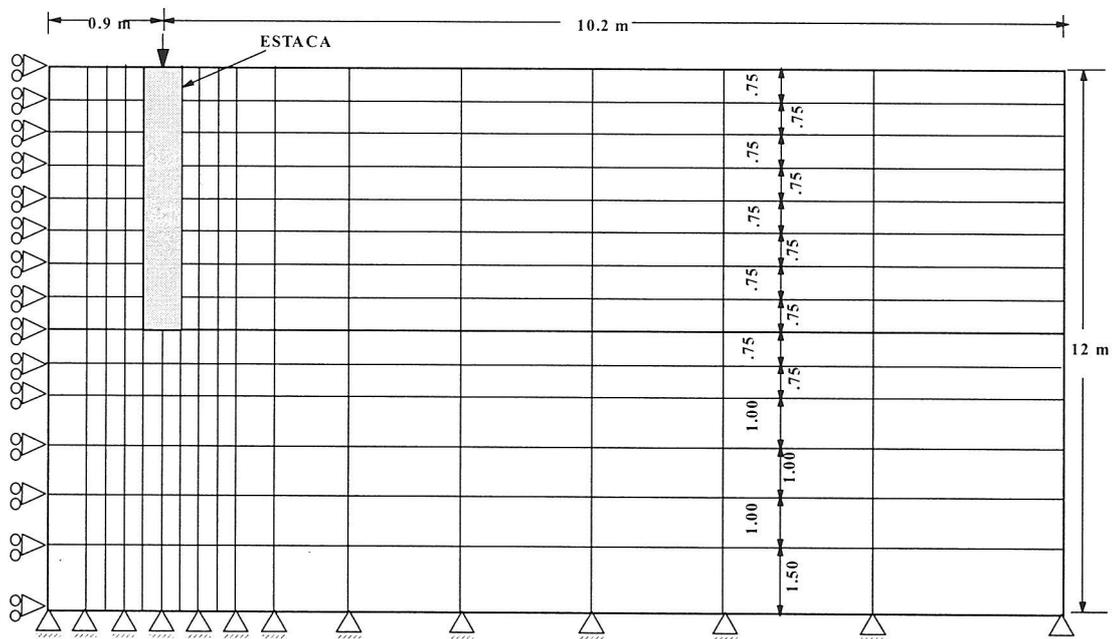


Figura 10 - Projeção transversal da malha de elementos finitos adotada

As estacas consideradas são cilíndricas, de diâmetro 0.3 m, módulo de elasticidade $E_p = 2.75 \times 10^6$ tf/m², comprimento de 6 m, coeficiente de Poisson $\nu = 0.17$ e espaçamento relativo $s/d = 6$. Os valores de recalque para os casos (a) e (b) foram calculados para uma carga aplicada no bloco $P_G = 1000$ tf e para o caso (c) considerou-se $P_G = 500$ tf.

Nas tabelas 4 a 6, são apresentados os valores de recalque determinados pelos programas SAP - 90 (elementos finitos), RGEMHE (nas 2 versões, com proposições de Poulos (1979) e Yamashita *et al* (1987) e YTKG, para os 3 casos de perfis de solo da figura 7.

Conforme pode ser finalmente percebido, existe uma boa concordância entre os resultados obtidos pelos diversos programas para os casos (a) e (b), principalmente neste último em que se considera a situação de homogeneidade do meio elástico. De um modo geral, apesar de poucos resultados analisados até esta etapa da pesquisa, as soluções aproximadas baseadas no programa RGEMHE (distribuição das tensões de cisalhamento é integrada ao longo do fuste da estaca) tendem a fornecer melhores resultados do que o programa YTKG (resultantes das tensões cisalhantes concentradas no centro de cada elemento da estaca), já que este superestima em até 29.37% o valor de recalque obtido por elementos finitos, através do conhecido programa SAP-90.

A importância destes resultados é tanto maior quanto se comparam também os tempos de processamento dos programas considerados, em um microcomputador PC 486 DX2, 66 Mhz: 5 horas para o programa de elementos finitos, mais preciso, e apenas 2 minutos para as análises simplificadas desenvolvidas nesta pesquisa.

PROGRAMA UTILIZADO		RECALQUE (mm)			
		EST.01	EST.02	EST.03	EST.04
RGEMHE-1 Poulos (1979)	TOPO	10.22 102.33 %	10.22 102.33 %	10.22 102.33 %	10.22 102.33 %
	BASE	7.97 85.01 %	7.97 85.01 %	7.97 85.01 %	7.97 85.01 %
RGEMHE-2 Yamashita (1987)	TOPO	10.98 109.77 %	10.98 109.77 %	10.98 109.77 %	10.98 109.77 %
	BASE	8.15 86.93 %	8.15 86.93 %	8.15 86.93 %	8.15 86.93 %
YTKG	TOPO	12.92 129.37 %	12.92 129.37 %	12.92 129.37 %	12.92 129.37 %
	BASE	9.25 98.7 %	9.25 98.7 %	9.25 98.7 %	9.25 98.7 %
SAP - 90	TOPO	9.987 100 %	9.987 100 %	9.987 100 %	9.987 100 %
	BASE	9.375 100 %	9.375 100 %	9.375 100 %	9.375 100 %

Tabela 4 - Resultados dos valores de recalque para o perfil (a) da figura 6 (a).

PROGRAMA UTILIZADO		RECALQUE			
		EST.01	EST.02	EST.03	EST.04
RGEMHE-1 Poulos (1979)	TOPO	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %
	BASE	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %
RGEMHE-2 Yamashita (1987)	TOPO	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %	74.54 111.07 %
	BASE	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %	73.38 109.77 %
YTKG	TOPO	72.13 107.48 %	72.13 107.48 %	72.13 107.48 %	72.13 107.48 %
	BASE	70.86 105.99 %	70.86 105.99 %	70.86 105.99 %	70.86 105.99 %
SAP - 90	TOPO	67.11 100 %	67.11 100 %	67.11 100 %	67.11 100 %
	BASE	66.85 100 %	66.85 100 %	66.85 100 %	66.85 100 %

Tabela 5 - Resultados dos valores de recalque para o perfil (b) figura 6 (b).

PROGRAMA UTILIZADO		RECALQUE (mm)			
		EST.01	EST.02	EST.03	EST.04
RGEMHE-1 Poulos (1979)	TOPO	8.40 60.69 %	8.40 60.69 %	8.40 60.69 %	8.40 60.69 %
	BASE	7.46 55.67 %	7.46 55.67 %	7.46 55.67 %	7.46 55.67 %
YTKG	TOPO	9.14 66.04 %	9.14 66.04 %	9.14 66.04 %	9.14 66.04 %
	BASE	8.34 62.24 %	8.34 62.24 %	8.34 62.24 %	8.34 62.24 %
SAP - 90	TOPO	13.84 100 %	13.84 100 %	13.84 100 %	13.84 100 %
	BASE	13.40 100 %	13.40 100 %	13.40 100 %	13.40 100 %

Tabela 6 - Resultados dos valores de recalque para o perfil (c) da figura 6 (c).

A análise do caso (c) da figura 7, entretanto, confirma que este programa de elementos de contorno (RGEMHE) não é recomendado para análises de fundações profundas em meios estratificados onde os módulos de elasticidade das camadas de solo

decrecem com a profundidade. Consideráveis discrepâncias com os resultados calculados por elementos finitos podem ser observados na tabela 6.

3.4 - Estudo paramétrico da variação dos fatores de influência com o espaçamento relativo das estacas

Com o objetivo de estudar o comportamento de grupos de estacas carregadas verticalmente em meios linear elásticos, porém estratificados, foi também realizado, com auxílio do programa RGEMHE-2 desenvolvido nesta pesquisa, um amplo estudo da variação dos fatores de influência I_r , definido abaixo, com o espaçamento relativo s/d entre as estacas do grupo.

$$I_r = \frac{\rho E_s \cdot d}{P} \quad (10)$$

onde:

I_r = fator de influência do deslocamento do solo no topo da estaca;

E_s = módulo de elasticidade do solo;

d = diâmetro das estacas pertencentes ao grupo;

P = carga unitária aplicada em cada estaca do bloco;

r = recalque do topo da estaca

Foram considerados apenas dois perfis de solo, encontrados na figura 11, porém representativos de muitas situações encontradas na prática da engenharia de fundações. É evidente a inviabilidade de realizar-se estudos paramétricos para diversas estratigrafias, com diferentes contrastes relativos entre os parâmetros elásticos, muitas configurações de estacas ($L/d, E_p/E_s, h_1/L$), etc. Adotou-se o valor de $n = 0,5$.

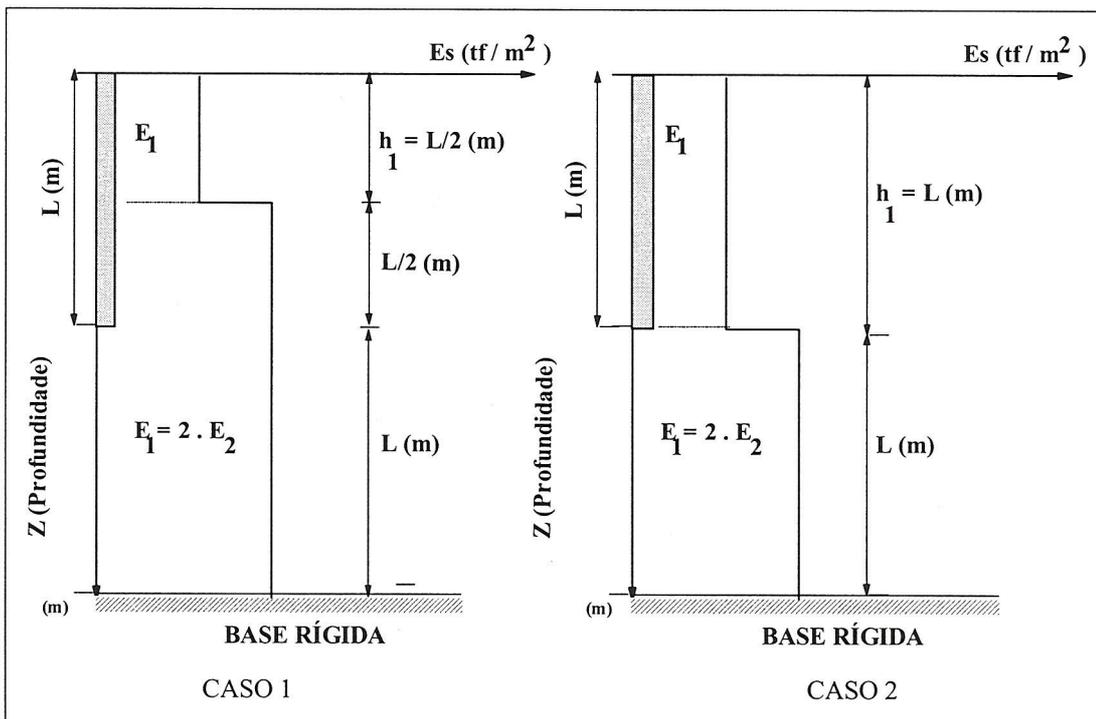


Figura 11 - Perfis de solos estratificados analisados.

No caso de grupo de 2 estacas apresenta-se a variação dos fatores de influência I_r com o espaçamento relativo nas figuras 12 a 17.

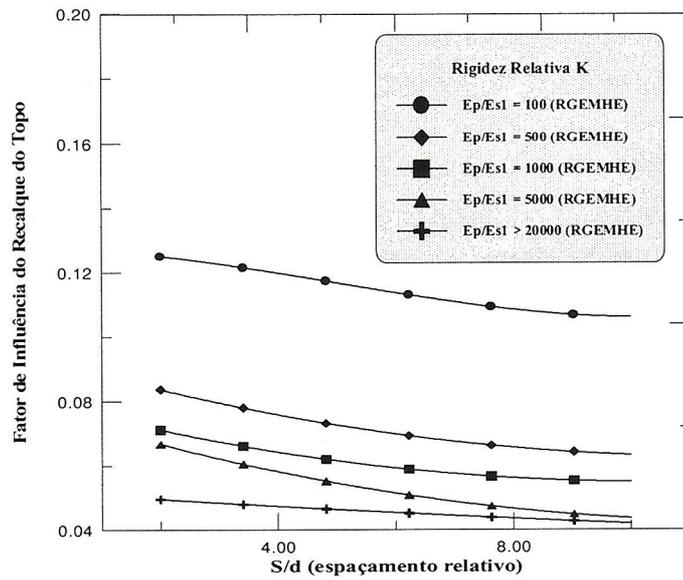


Figura 12 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=25$. Perfil do solo: caso 1 figura 11

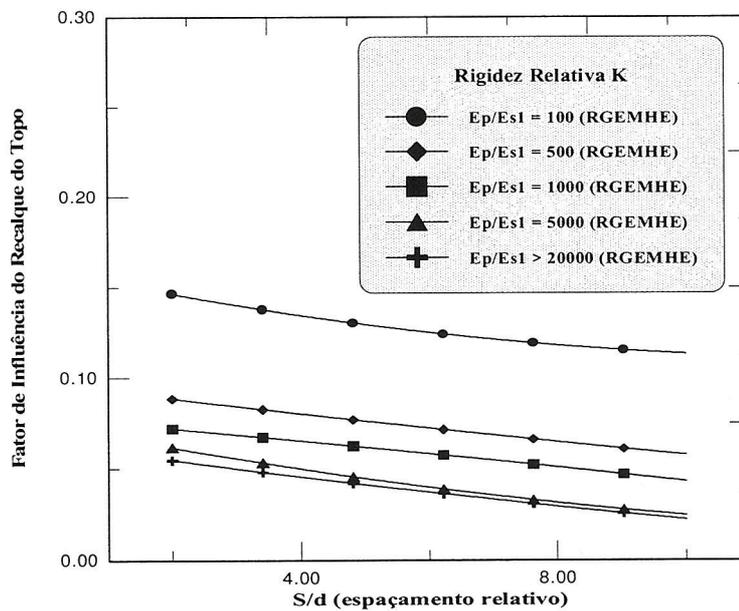


Figura 13 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=50$. Perfil do solo: caso 1 figura 11.

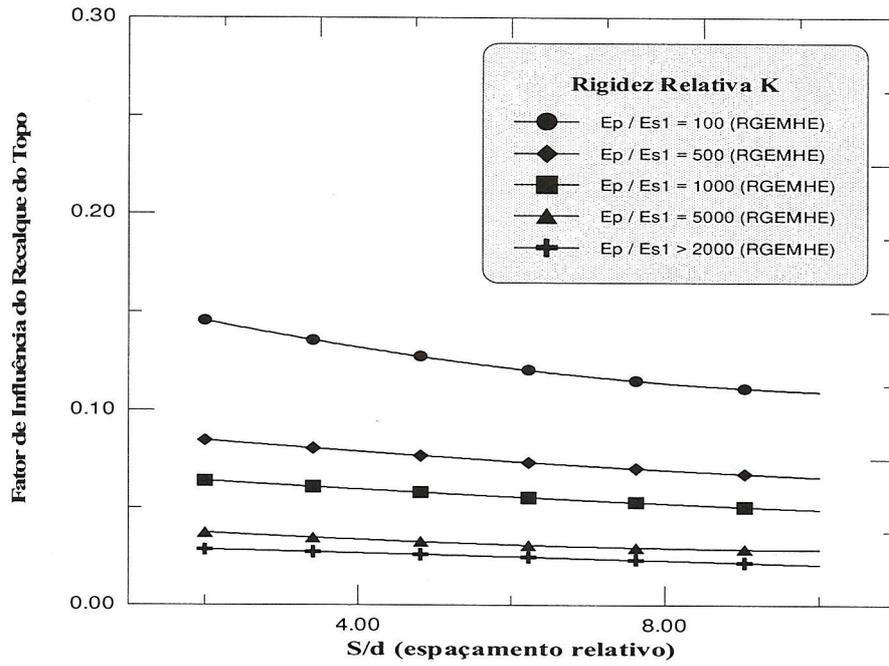


Figura 14 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=100$. Perfil do solo: caso 1 figura 11

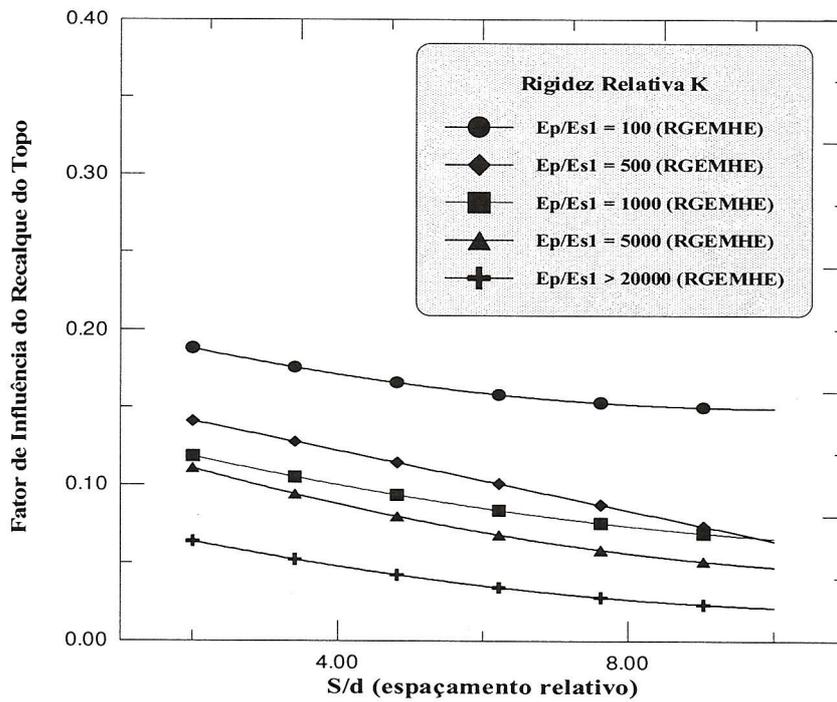


Figura 15 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=25$. Perfil do solo: caso 2 figura 11

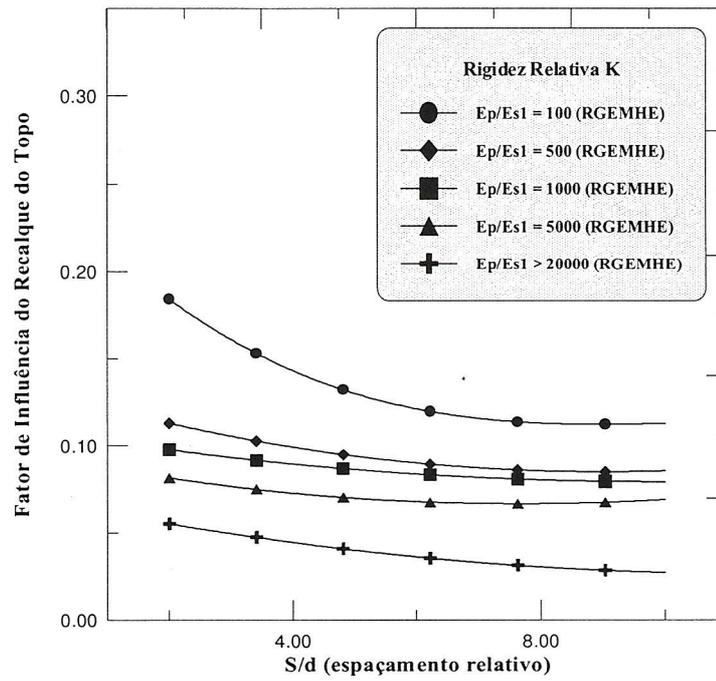


Figura 16 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=50$. Perfil do solo: caso 2 figura 11

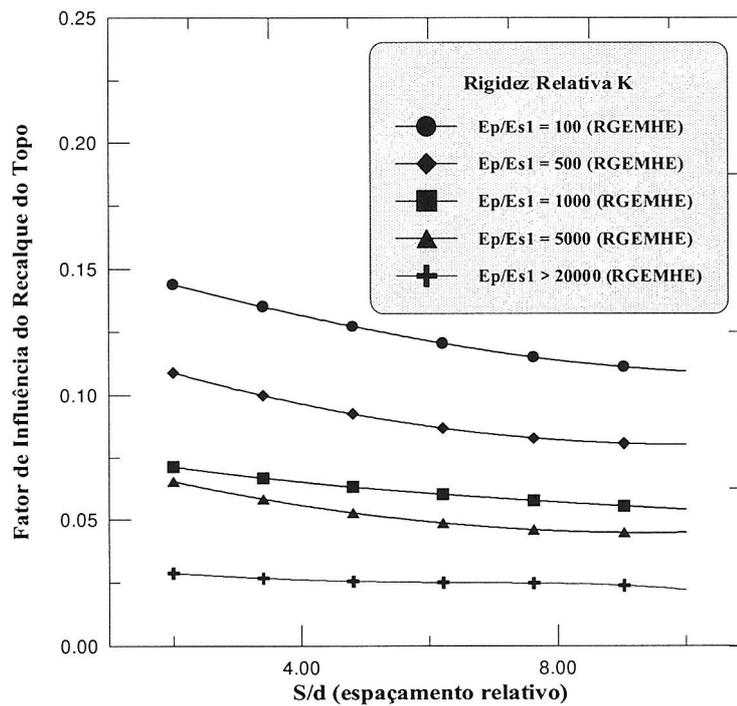


Figura 17 - Fator de influência vs. espaçamento relativo para grupo de duas estacas com bloco rígido e $L/d=100$. Perfil do solo: caso 2 figura 11.

Devido ao fato do programa YTKG não ter produzido resultados tão satisfatórios quanto o RGEMHE, a análise do comportamento do grupo de estacas aqui apresentada, foi desenvolvida apenas com base nos resultados fornecidos por este último programa. Sendo assim as seguintes conclusões podem ser observadas:

Como era de se esperar, a medida que o valor da rigidez relativa K aumenta, o fator de influência do recalque do topo I_r tende a diminuir, para os dois perfis de solo e grupos de estacas analisados nesta pesquisa. O aumento deste fator de influência é evidente à medida que o comprimento relativo L/d aumenta, para uma baixa rigidez relativa K .

4 - CONCLUSÃO

Uma investigação a respeito do comportamento de grupo de estacas em um semi-espaço linear elástico, isotrópico, porém estratificado, foi realizada utilizando-se uma versão simplificada do método dos elementos de contorno com base em adaptações das equações de Mindlin (1936).

O programa computacional RGEMHE foi desenvolvido, em linguagem FORTRAN77, a partir das soluções aproximadas publicadas na literatura por Poulos (1979) e Yamashita *et al* (1987).

A grande vantagem da utilização destes métodos aproximados é que resultados bastante satisfatórios sob ponto de vista de engenharia, podem ser obtidos com pouco espaço computacional, medido em segundos de processamento, comparados com horas de execução no mesmo tipo de computador (PC 486 DX2, 66 Mhz) de simulações numéricas mais precisas, como o método dos elementos finitos em malhas tridimensionais. A diferença entre estes tempos tende ainda a aumentar se também forem contabilizados os tempos para preparação dos dados de entrada,

bastante maior no método dos elementos finitos, devido à necessidade de se definir e construir uma malha adequada ao problema analisado.

Os valores de recalque e distribuição de carga por estaca do grupo, obtidos através do programa RGEMHE, comparam-se razoavelmente bem com aqueles determinados pelo método dos elementos finitos através do programa SAP-90, Randolph & Wroth, 1979; Poulos & Davis, 1980. Apesar do pequeno número de casos estudados neste trabalho, é possível concluir que no estudo do comportamento de grupos de estaca em solos estratificados, rápidas estimativas de recalque e distribuição de carga por estaca do grupo podem ser feitas através de métodos simples baseados em adaptações da solução de Mindlin (1936) para semi-espaços homogêneos. No caso de estratos de solo sobre camada rígida, tais resultados podem ser facilmente estendidos através dos métodos de Steinbrenner (1934) ou das imagens, ambos incorporados nos mesmos programas desenvolvidos no decorrer desta pesquisa.

Finalmente, um limitado estudo paramétrico foi realizado com 2 perfis estratificados típicos, variando-se os espaçamentos relativos entre as estacas, de vários comprimentos e rigidez relativa, de grupos de 2¹, com bloco rígido. Conforme pode ser observado dos resultados apresentados, a medida que o valor da rigidez relativa K aumenta, o fator de influência do recalque do topo I_r tende a diminuir, para os dois perfis de solo analisados nesta pesquisa. O aumento deste fator é evidente à medida que o comprimento relativo L/d aumenta, para uma baixa rigidez relativa K . O efeito do aumento da relação da espessura do estrato h_1/L tende a aumentar o valor do fator de influência I_r para a configuração de grupo de estacas aqui analisada.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banerjee, P. K., *A contribution to the study of pile foundations*, Tese de Doutorado, University of Southampton, Inglaterra, 1969.
- Cangussú, M. A. Q., *Comportamento de Estacas Carregadas Axialmente em Maciços de Solo Estratificado*, Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, PUC - RIO, Abril, 1992.
- Santos Filho, W.M., *Análise Numérica do Comportamento de Grupos de Estacas em Maciços Estratificados*, Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, PUC - RIO, Junho, 1996.
- Poulos, H. G. and Davis, E. H., *The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers*, *Géotechnique*, Vol. 18, N - 03, 1968, pp. 351 - 371.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 1980.
- Poulos, H. G., *Settlement of single piles in nonhomogeneous soil*, *Journal Soil Mechanics Foundation Div.*, ASCE, Vol. 105, N - GT5, Maio 1979, pp. 627 - 641.
- Poulos, H. G. and Davis, E. H., *The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers*, *Géotechnique*, Vol. 18, N - 03, 1968, pp. 351 - 371.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H., *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, 1974.
- Poulos, H. G., *Estimation of pile group settlements*, *Ground Engineering*, Vol.10, N - 02, Março 1977, pp. 40 - 50.
- Poulos, H. G. & Mattes, N. S., *Settlement of pile groups bearing on stiffer strata*, *J. Geomech. Engrg. Div. ASCE*, Vol. 100, 1974, N - 02, pp. 185 - 190.
- Randolph, M. F. and Wroth, C. P., *A theoretical study of the performance of piles*, PhD Thesis, 1977, University of Cambridge.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P., *An analysis of the deformation of vertically loaded piles*, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 104, 1978a, N - 12, pp. 1465 - 1488.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P., *A single approach to pile design and the analysis of pile tests*. Proc. ASTM Symp. on Behavior of Deep Foundations, 1978b, Boston, Massachusetts.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P., *Analysis of deformation of Vertically Loaded Piles*, *Journal Geot. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 104, 1979a, N - GT12, pp. 1465 - 1488.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P., *An Analysis of the vertical deformation of piles groups*, *Géotechnique*, Vol. 29, N - 02, 1979b, pp. 423 - 439.