

4

Avaliação do comportamento de grupos de estacas

4.1.

Considerações sobre diversos fatores de interação

O grupo mais simples possível consiste de duas estacas. Diferente da situação com o carregamento de uma estaca isolada, neste caso o deslocamento de uma estaca contribui para o recalque da outra, assim acontece o fenômeno de interação entre as estacas. O grau desta interação depende de vários fatores como as características das estacas e o espaçamento entre as mesmas. O conceito de fator de interação foi proposto para quantificar a influência mútua das estacas dentro de um grupo. Inicialmente definido para duas estacas idênticas, o fator de interação é utilizado para avaliar o comportamento de grupos de estacas de qualquer configuração.

A formulação mais utilizada do fator de interação, denominado α_{ij} , é a razão entre o aumento no recalque de uma estaca devido à interação com estaca adjacente $\Delta\rho_{ij}$ e o recalque da estaca devido ao seu próprio carregamento ρ_i :

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_i} \quad (2.1)$$

Essa definição foi inicialmente proposta por POULOS (1968).

4.1.1.

Proposta baseada nos elementos de contorno - análise linear elástica.

Os fatores de interação, para estacas flutuantes em um semi-espaço homogêneo, obtidos por POULOS & MATTES (1971) são apresentados através de gráficos considerando a variação dos seguintes parâmetros: índice de esbeltez (L/d), rigidez relativa estaca-solo (K) e do espaçamento relativo (s/d).

Primeiramente, os fatores de interação para estacas flutuantes foram plotados fixando a rigidez da estaca e mudando o índice de esbeltez para vários espaçamentos relativos. Os gráficos são apresentados na Fig. 4.1. Notou-se uma tendência geral para o aumento do fator de interação com o aumento do índice de esbeltez, porém no caso da rigidez relativa igual a 1000, o mesmo diminui com $L/d > 25$. Também, com $L/d = 100$, os valores dos fatores de interação se aproximam, isso mostra que para $K = 1000$ o decréscimo do fator de interação é lento com o aumento do espaçamento para estacas muito esbeltas. Para estacas com rigidez maior que 100 os gráficos são praticamente lineares começando com o valor do $L/d = 25$, especialmente com o espaçamento relativo grande.

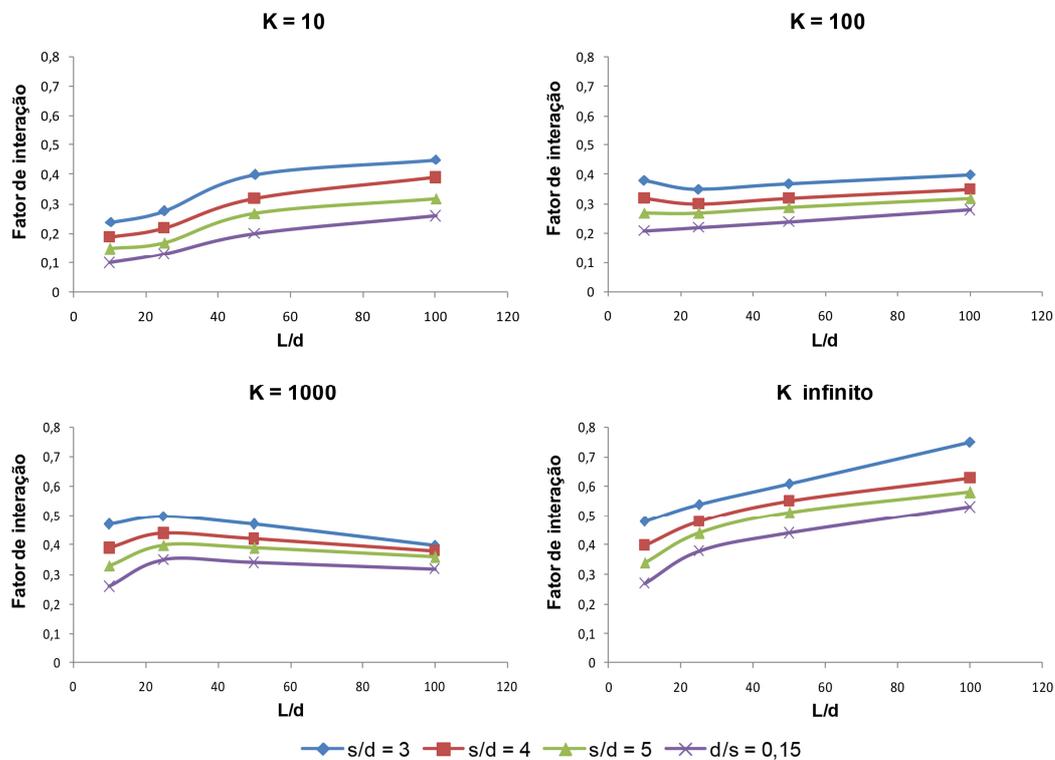


Figura 4.1 - Fator de interação contra o índice de esbeltez para diferentes valores da rigidez relativa e do espaçamento.

Em seguida, foram feitos os gráficos do fator de interação para vários espaçamentos relativos em dependência do índice de esbeltez (Fig. 4.2). Como foi esperado, os valores dos fatores de interação diminuem com o aumento do espaçamento relativo. Observou-se, que os fatores de interação tendem ao mesmo valor com aumento do índice de esbeltez, independentemente da rigidez relativa.

Entretanto, no caso da estaca rígida ($K = \text{infinito}$) essa tendência não é seguida, a interação aumenta com o aumento do índice de esbeltez. Esse fenômeno provavelmente pode ser explicado pelo fato que uma estaca absolutamente rígida possui o recalque igual na base e no topo, portanto neste caso a resistência da base é mobilizada. Porém, ressaltamos que os gráficos foram produzidos para estacas flutuantes.

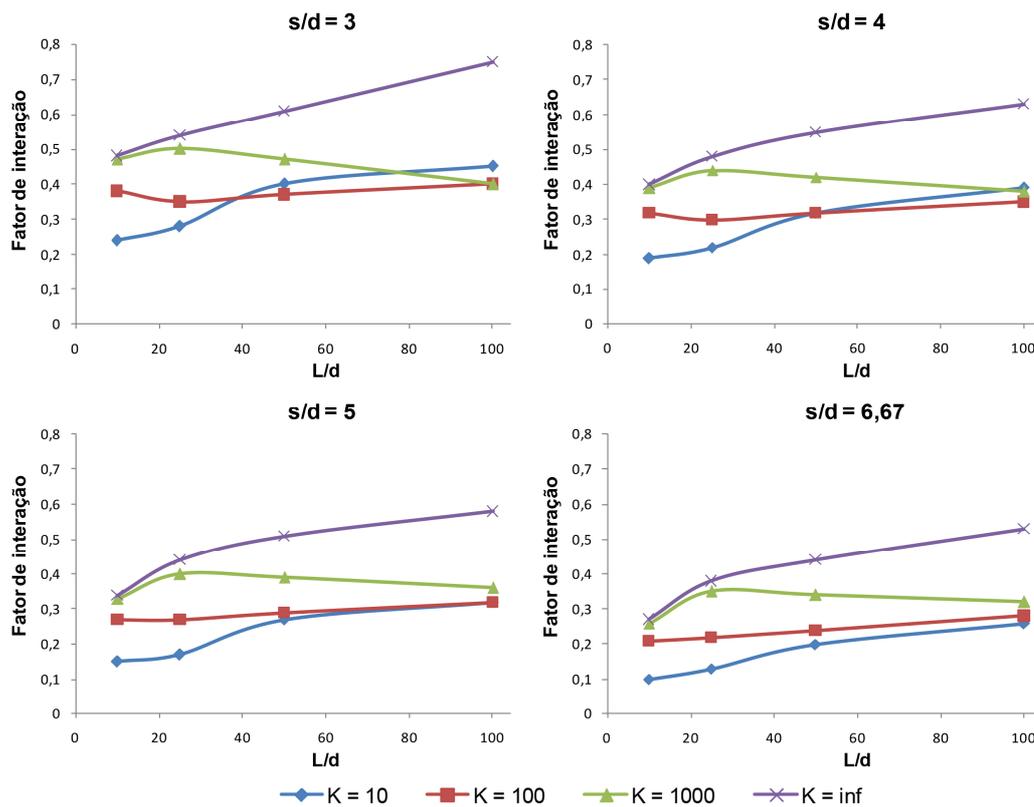


Figura 4.2 - Fator de interação contra o índice de esbeltez para diferentes valores do espaçamento e da rigidez relativa.

Finalmente, foi fixado o espaçamento relativo e o fator de interação plotado contra o índice de esbeltez para diferentes valores da rigidez relativa (Fig. 4.3). Observou-se que com espaçamentos pequenos (até $s/d = 5$) as estacas esbeltas ($L/d > 50$) têm um comportamento diferente, o fator de interação diminui com o aumento inicial da rigidez relativa, começando a crescer com K aproximadamente igual a 100. Essa tendência gradualmente muda com o aumento do espaçamento relativo, as curvas se tornando crescentes para todos os valores do K .

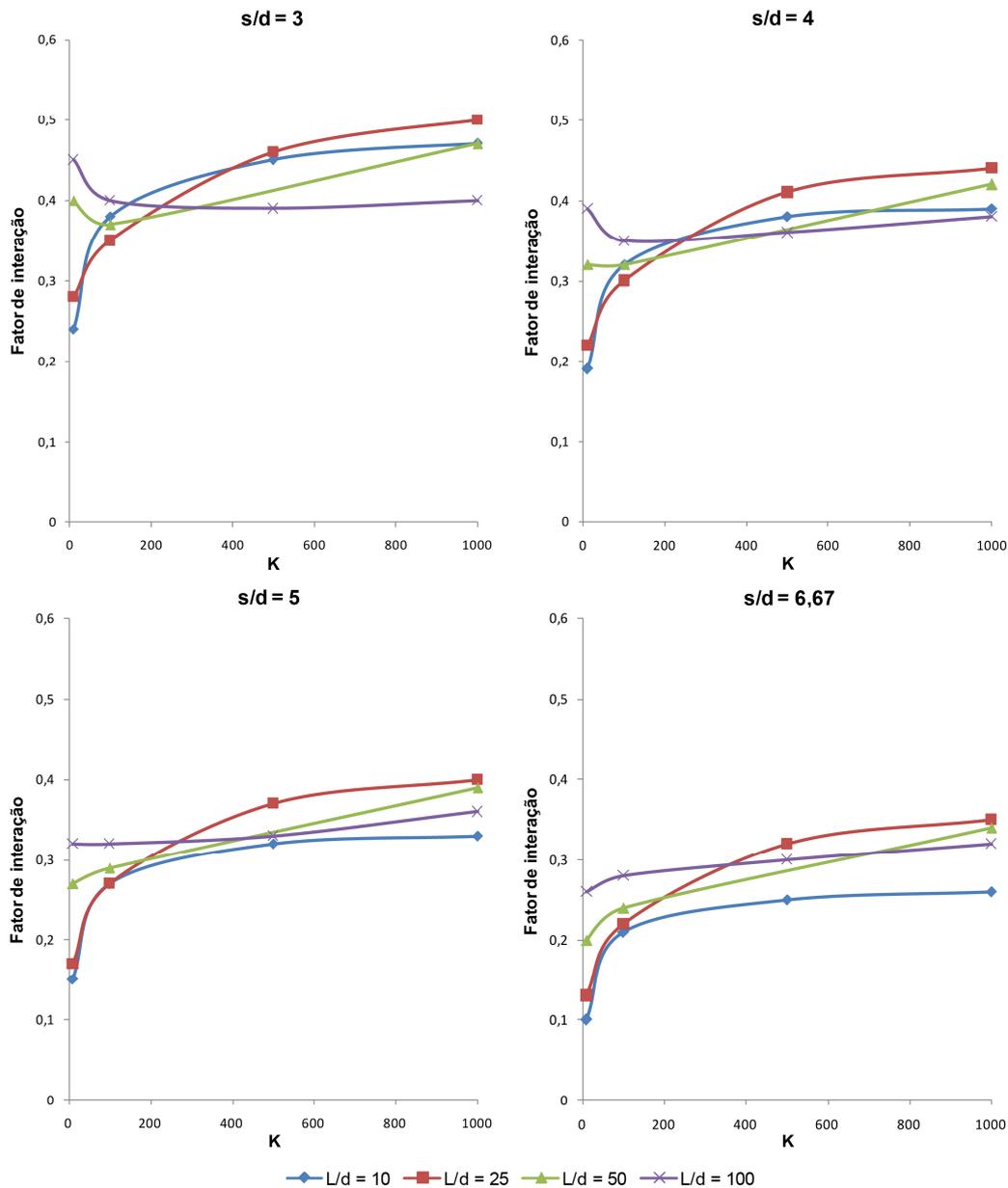


Figura 4.3 - Fator de interação contra rigidez relativa para diferentes valores do espaçamento e do índice de esbeltez.

Na Fig. 4.4 são representados os fatores de interação para as estacas com diferentes índices de esbeltez e a mesma rigidez relativa $K = 1000$. Nota-se uma tendência no comportamento das estacas com L/d igual a 25, 50 e 100. O fator de interação decresce conforme o aumento do espaçamento, inicialmente sendo maior para as estacas menos esbeltas. Passando o valor do s/d aproximadamente igual a nove, o fator de interação não depende mais do índice de esbeltez, as três curvas sendo praticamente iguais. Quanto à estaca com $L/d = 10$, a mesma inicialmente possui um valor do fator de interação maior de todas, o qual diminui

rapidamente, chegando finalmente ao valor muito menor do que das estacas mais esbeltas.

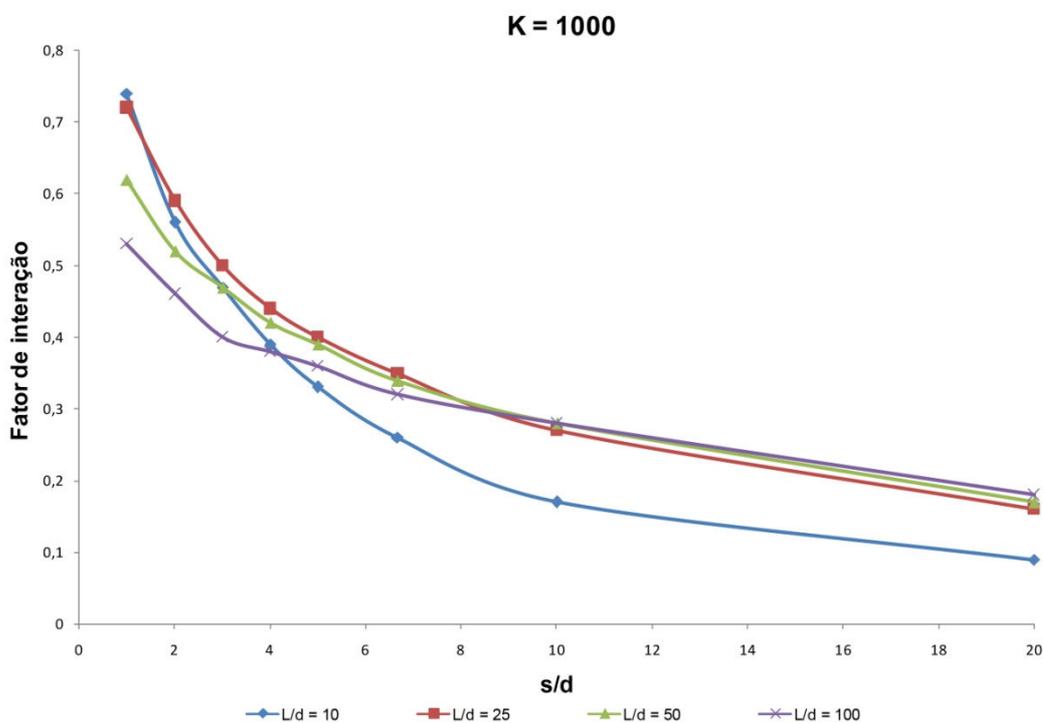


Figura 4.4 - Fator de interação contra espaçamento para diferentes valores do índice de esbeltez, $K = 1000$.

Existe uma possibilidade de ocorrência de erros na análise de uma fundação profunda com utilização dos gráficos de fatores de interação. Além das incertezas que podem ser causadas pela precisão das curvas, existe o problema de interpolação das mesmas. Por causa do comportamento complexo dos gráficos a interpolação linear pode trazer erros no valor do fator de interação. Os resultados melhores podem ser obtidos agrupando as estacas com comportamento parecido, apresentando, por exemplo, estacas curtas e esbeltas, rígidas e compressíveis nos gráficos separados. Além de aumentar a precisão da interpolação, isso facilitaria o entendimento da interação entre as estacas em geral. Entretanto, é necessário obter as curvas para valores intermediários da rigidez relativa e o índice de esbeltez. Por exemplo, na prática as estacas com $K > 1000$ são mais utilizadas, assim torna-se desejável ter as curvas para $K = 2000$, $K = 5000$, etc.

4.1.1.1.

A influência da aplicação do fator de interação somente à componente elástica do recalque

MANDOLINI & VIGGIANI (1997) e RANDOLPH (1994) propuseram que os fatores de interação devem ser aplicados somente a componente elástica do recalque das estacas adjacentes, pois a parcela plástica do mesmo pode ser considerada o fenômeno localizado que não afeta a interação entre as estacas. Neste caso o recalque da estaca i num grupo é dado por:

$$w_i = \sum_{j=1}^n (P_{av} S_{1e} \alpha_{ij}) \quad (2.2)$$

S_{1e} - flexibilidade elástica da estaca.

Em seguida, assumindo o comportamento hiperbólico da curva carga-recalque MANDOLINI & VIGGIANI (op. cit.) expressaram o fator de interação α_{ii} para a estaca i devido ao carregamento próprio:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{\left(1 - \frac{R_f P}{P_u}\right)^q} \quad (2.3)$$

R_f – fator hiperbólico (considerado igual a um);

P – carga na estaca i ;

P_u – a capacidade de carga última da estaca i ;

q – expoente da análise, $q = 2$ para análise não linear incremental e $q = 1$ para análise linear equivalente.

Fig. 4.5 mostra as curvas carga – recalque teóricas para um grupo de 16 estacas sob carregamento axial. No primeiro caso os fatores de interação foram aplicados ao recalque total de cada estaca, no segundo caso – somente à parcela elástica do recalque.

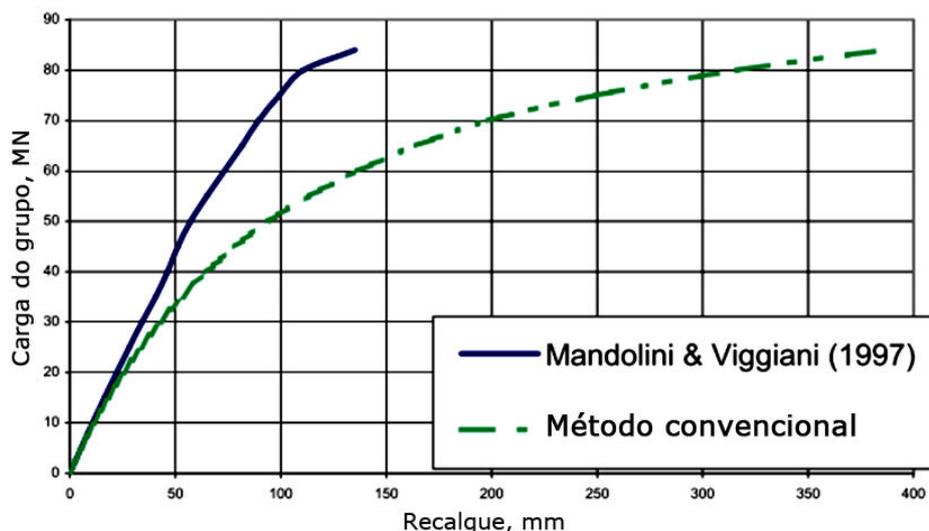


Figura 4.5 - O efeito do princípio utilizado para a previsão do comportamento de um grupo de estacas. (POULOS, 2005)

Observa-se que no primeiro caso o recalque é maior, a diferença aumentando com o acréscimo de carga. POULOS (2005) recomenda usar a abordagem proposta por MANDOLINI & VIGGIANI (1997) e MANDOLINI (2005) visto que os valores obtidos através deste método são mais próximos aos resultados experimentais.

4.1.1.2. Limitações do método

O método apresentado acima é baseado na teoria da elasticidade linear (equações de Mindlin), logo possui seguintes limitações:

- Admite que o solo é capaz de igualmente suportar as tensões de tração e compressão;
- Devido à linearidade da teoria, recalques são calculados através da superposição de fatores de interação (entre elementos de uma mesma estaca ou entre estacas de um mesmo grupo), apesar de solo normalmente exibirem reações tensão – deformações não lineares.

Na maioria dos casos as análises desconsideram o desenvolvimento de tensões residuais geradas no processo de escavação, admitindo o mesmo comportamento para estacas cravadas e escavadas.

4.1.2. Método de superposição

O método de superposição surgiu na análise teórica para possibilitar a obtenção dos deslocamentos de um grupo de estacas em termos do deslocamento de uma estaca isolada.

Por causa da ausência da verificação experimental, foram efetuadas provas de carga em grupos de duas e três estacas, descritas por COOKE & PRICE (1973), COOKE et al. (1979), COOKE et al. (1980).

O princípio do método de superposição é ilustrado na Fig. 4.6. As estacas mostradas são iguais à ensaiada por COOKE & PRICE (op. cit.) e causam o mesmo perfil do deslocamento. Para achar o deslocamento do solo em certo ponto v_{tot} é necessário fazer um somatório dos deslocamentos causados pelas estacas A e B (v_A e v_B) neste ponto:

$$v_{tot} = v_A + v_B \quad (2.4)$$

O princípio de superposição pode ser aplicado quanto ao cálculo dos deslocamentos tanto ao cálculo das cargas nas estacas.

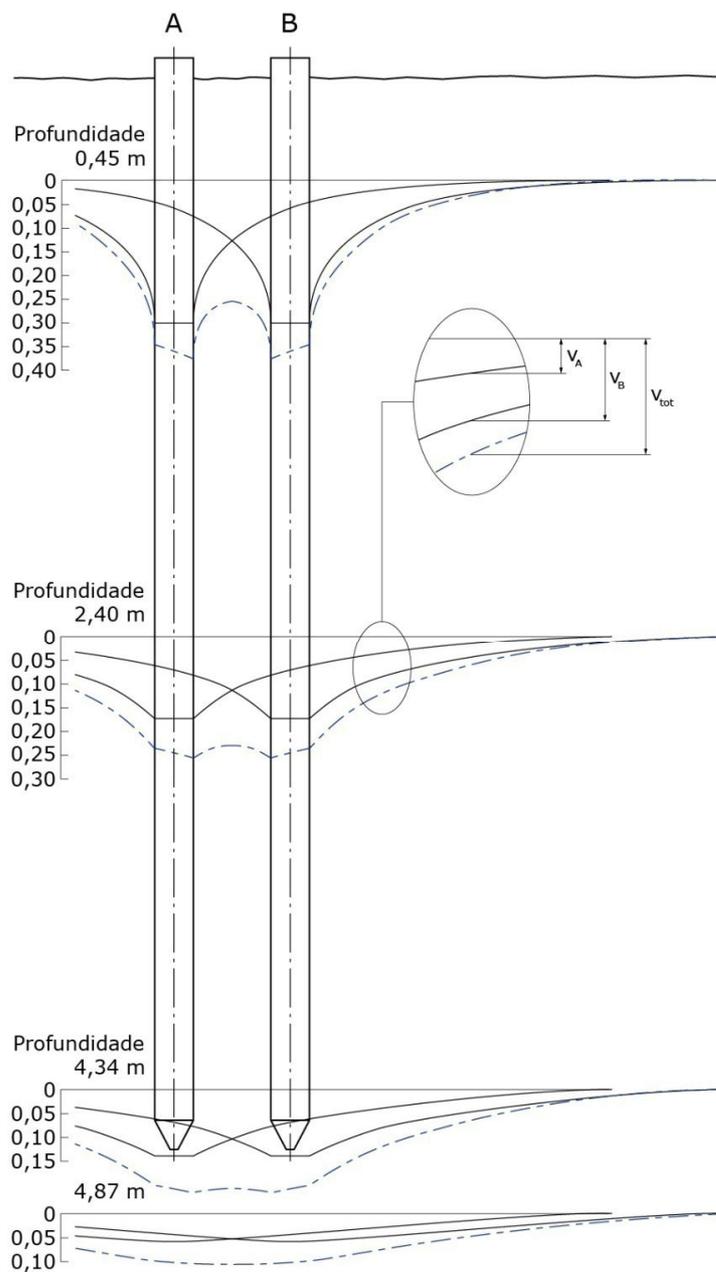


Figura 4.6 - O método de superposição aplicado a duas estacas idênticas. Os perfis dos deslocamentos são iguais aos observados por COOKE & PRICE (1973).

4.1.2.1. Provas de carga em grupos de estacas

Para analisar o comportamento de um grupo de estacas os experimentos foram feitos com três estacas instrumentadas de metal, 168 mm de diâmetro e 5 m de comprimento. As estacas foram instaladas com espaçamento de 0,5 m ($s/d = 3$).

Primeiramente foi executada a prova de carga com uma estaca (A) e os deslocamentos calculados através dos dados dos inclinômetros. A carga aplicada foi de 40 kN. Depois da cravação da segunda estaca instrumentada (B), os poços foram feitos e os eletrônives instalados no plano vertical entre as estacas A e B. O carregamento igual foi aplicado nas duas estacas, a carga total não excedendo 50% da capacidade do grupo estimada. Cada estaca também foi carregada separadamente para permitir a medição do carregamento induzido.

A aplicabilidade do método de superposição para a obtenção do recalque do grupo foi mostrada pelos experimentos, o deslocamento de duas estacas carregadas juntas foi calculado com a precisão razoável somando o deslocamento da primeira estaca sozinha sob a metade do carregamento do grupo (no caso do bloco flexível) e o deslocamento do solo no ponto onde a segunda estaca é para ser instalada.

Em seguida, a terceira estaca (C) foi instalada para criar uma fila simétrica em relação à estaca A. Ela não foi instrumentada para medição do carregamento interno, pois foi assumido o comportamento idêntico à estaca B.

Durante os ensaios foi investigada a interação das estacas sob duas formas de carregamento: a) recalque igual (carregamento através da viga rígida), b) carga igual (aplicação da mesma pressão de óleo nos macacos nas cabeças das estacas).

4.1.2.2.

Observações e previsões para grupos simples

Algumas curvas dos deslocamentos do solo observados no plano vertical contendo as estacas são mostradas na Fig. 4.7. O caso mais simples é da carga igual, os dados são representados para três níveis de carregamento. Os deslocamentos dos fustes das estacas foram obtidos através dos recalques das cabeças e compressão elástica, calculada utilizando as propriedades elásticas e as tensões internas medidas. Foi feita uma previsão dos deslocamentos do solo e das estacas sob o carregamento maior (43,7 kN por estaca) empregando o método de superposição, assumindo que as curvas observadas durante o carregamento da estaca C sozinha podem ser aplicadas às três estacas carregadas juntas.

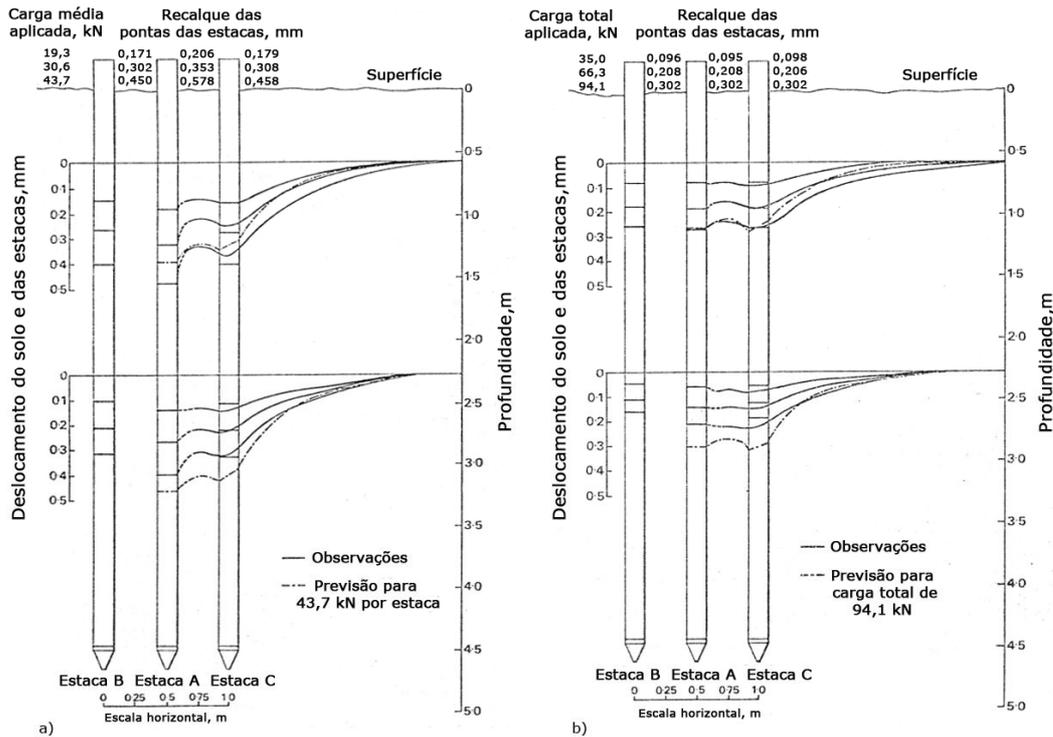


Figura 4.7 - Deformações do solo observadas e previstas para um grupo de três estacas sob condição de a) carga igual b) recalque igual. (COOKE et al., 1979)

Fig. 4.7 (b) mostra os resultados para três cargas totais diferentes aplicadas às estacas através de uma viga rígida. As cargas nas estacas foram diferentes e são representadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores das cargas e recalques nas estacas, condição do bloco rígido.

Carga total, kN	Recalque, mm			Carga por estaca, kN		
	Estaca B	Estaca A	Estaca C	Estaca B	Estaca A	Estaca C
35	0,096	0,095	0,098	13,82	9,62	11,56
66,3	0,208	0,208	0,206	26,4	18,18	21,72
94,1	0,302	0,302	0,302	38,3	24,59	31,2

Para prever os deslocamentos é necessário reduzir os valores do deslocamento da estaca A e aumentar os das estacas B e C assim que os recalques das três estacas obtidos somando os deslocamentos nas ordenadas das posições dos eixos das estacas sejam iguais.

4.1.2.3. Avaliação para o projeto de grupo de estacas

A semelhança entre as observações e as previsões para os recalques do grupo de três estacas supõe que o método de superposição pode ser estendido para ser aplicado aos grupos de qualquer número de estacas e de qualquer configuração. O método foi aplicado ao grupo de cinco estacas. No caso de carregamento igual, a superfície côncava é produzida pelos deslocamentos, ocorre recalque diferencial, especialmente nas extremidades do grupo.

A previsão dos deslocamentos do solo é mais difícil no caso de um bloco rígido porque as cargas nas estacas não são iguais. O problema pode ser resolvido escrevendo equações para o recalque total de cada estaca em termos do recalque próprio e devido a todas as estacas vizinhas, cada componente do deslocamento sendo proporcional à carga desconhecida que causa o mesmo. Como os recalques totais são iguais, há suficientes equações para achar as parcelas da carga em cada estaca. Assim os perfis dos deslocamentos com as ordenadas reduzidas em proporção às cargas podem ser traçados. A superposição dos deslocamentos das estacas no grupo com bloco rígido produz uma superfície plana.

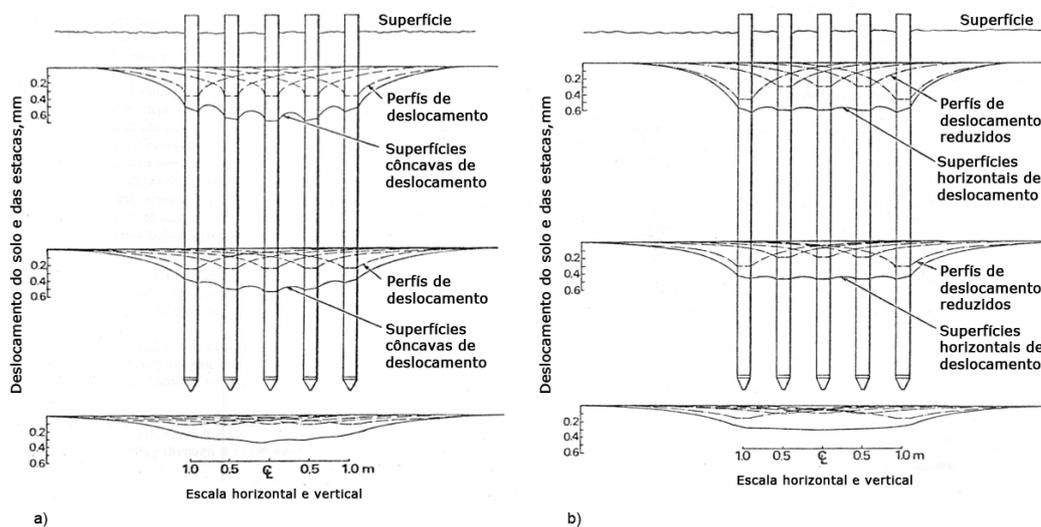


Figura 4.8 - Desenvolvimento das superfícies dos deslocamentos para uma fila de cinco estacas carregadas através de um a) bloco flexível b) bloco rígido. (COOKE et al., 1979)

O seguinte fenômeno pode ser observado. O número de estacas contidas dentro de um raio de dez diâmetros da estaca (ou seja, um raio de influência, a

partir do qual o deslocamento do solo se torna insignificante) é fixo para cada padrão de posicionamento das mesmas no grupo. Conhecido o perfil do deslocamento do solo causado por uma estaca, o recalque adicional causado pelas estacas vizinhas pode ser calculado. O recalque total obtido desta forma vai ser o recalque de qualquer estaca dentro de um grupo grande, suficientemente afastada da extremidade da fundação. No caso de um grupo bastante extenso, o número de estacas no interior do mesmo vai ser muito maior do que nas extremidades, assim os índices de recalque calculados empregando o método de superposição representam o limite superior para as fundações de grandes dimensões.

4.1.2.4. Fator de interação e o índice de recalque

Para melhor interpretação de dados foi proposta a seguinte maneira de expressar o fator de interação:

$$\Omega = \frac{\Delta\rho_1}{\rho_2} \quad (2.5)$$

$\Delta\rho_1$ - o recalque causado na estaca 1 pelo carregamento da estaca 2;

ρ_2 - o recalque causado na estaca 2 pelo carregamento próprio.

Essa definição do fator de interação não se refere somente às estacas igualmente carregadas.

No caso de duas estacas idênticas igualmente carregadas, os deslocamentos causados pelas estacas são iguais, logo:

$$R_s = 1 - \Omega_s \quad (2.6)$$

Ω_s - fator de interação para o espaçamento s ;

R_s - índice de recalque (foi definido anteriormente).

Tabela 4.2 - Os valores das cargas e recalques nas estacas e o fator de interação, condição do bloco rígido.

Estaca carregada	Recalque, mm			Fator de interação	
	Estaca A	Estaca B	Estaca C		
Estaca A	0,153		0,033	0,22	
Estaca B	0,033	0,151	0,015	0,22	0,1
Estaca C	0,035		0,158	0,22	
Soma dos componentes do deslocamento	0,221		0,206		
Deslocamentos observados, estacas carregada juntas	0,23	0,182	0,195		

Assumindo a validade do método de superposição e sabendo os valores dos fatores de interação, o recalque imediato de um grupo de estacas pode ser calculado através dos deslocamentos de uma estaca isolada. Entretanto, os valores dos fatores de interação têm que ser disponíveis para o raio dentro do qual as estacas têm a influência mútua. Os fatores de interação Ω_2 e Ω_3 , observados durante os ensaios, foram comparados com duas curvas teóricas que representam a variação do fator de interação α na distancia até doze diâmetros da estaca da superfície do fuste.

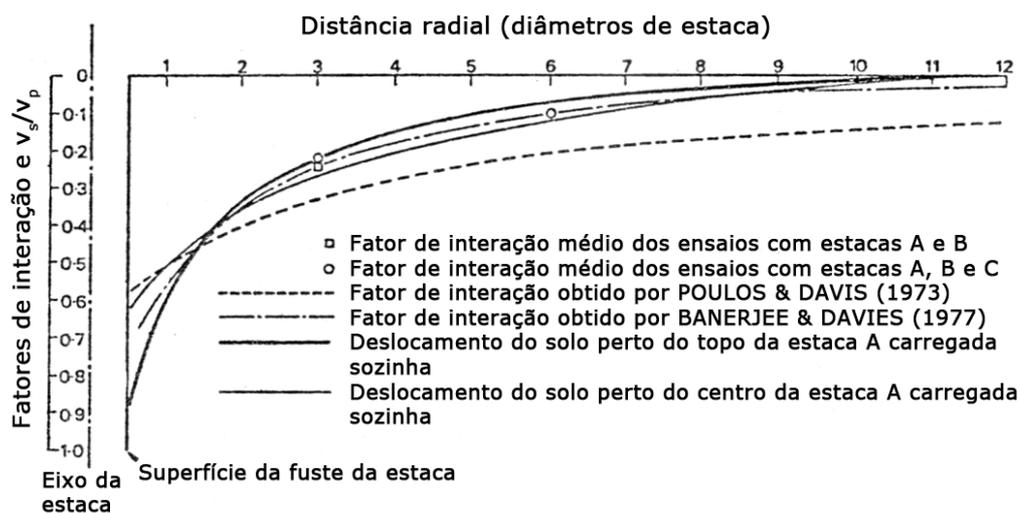


Figura 4.9 - Valores observados dos fatores de interação Ω_2 e Ω_3 em comparação com as curvas teóricas publicadas. (COOKE et al., 1979).

A curva proposta por POULOS & DAVIS (1973) para as estacas com $L/d = 25$ e a compressibilidade aproximadamente igual a das estacas ensaiadas superestima os valores dos fatores de interação para argila de Londres. A melhor concordância pode ser observada com a análise de BANERJEE & DAVIES (1977) feita para um solo com o módulo de elasticidade que aumenta com a profundidade.

$$E(z) = E(0) + mz \quad (2.7)$$

z – profundidade;

$E(0)$ - módulo de elasticidade do solo na superfície;

$E(z)$ - módulo de elasticidade do solo na profundidade z ;

m - coeficiente de aumento do módulo elástico com a profundidade.

Esse modelo teórico representa melhor as propriedades in situ calculadas por COOKE et al. (1979).

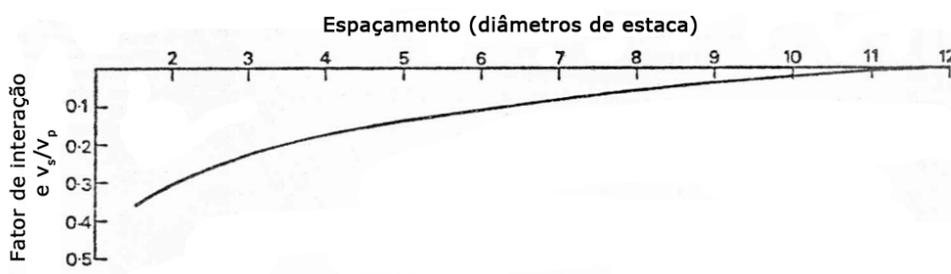


Figura 4.10 - Proposta da curva de fator de interação vs. espaçamento. (COOKE et al., 1979)

Os fatores de interação obtidos através da teoria da elasticidade vão inevitavelmente ter valores finitos com espaçamentos grandes. Entretanto, foi mencionado anteriormente que com o espaçamento mais que doze diâmetros a interação entre as estacas é desprezível. Para incluir esse efeito na análise foi proposta uma curva simplificada, que inclui os valores de Ω_2 e Ω_3 observados e $\Omega_{12} = 0$.

4.1.2.5. Limitações do método

O método de previsão dos deslocamentos em grupos de estacas flutuantes descrito foi verificado experimentalmente somente para as filas de duas e três estacas. Logo, o comportamento observado pode não ser típico para grupos bidimensionais maiores. Nestes casos mais carregamento é transferido diretamente para a base do grupo, assim as características do bloco do solo reforçado pelas estacas podem ser mais relevantes do que o comportamento de uma estaca isolada.

4.1.3. Método analítico baseado na aproximação de Winkler

MYLONAKIS & GAZETAS (1998) propuseram um método analítico baseado na aproximação de Winkler onde os valores da tensão cisalhante e da reação da base são proporcionais aos deslocamentos locais e o solo ao redor da estaca é representado pelo conjunto de molas. No entanto, as camadas de solo são modeladas como material linear elástico tendo os parâmetros elásticos E_s e ν_s . São introduzidos os termos da estaca fonte, a estaca carregada que influencia no deslocamento da estaca vizinha, e da estaca receptora, o deslocamento da qual é provocado pela estaca fonte.

O fator de interação é representado através das grandezas como:

- índice de esbeltez da estaca:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{E_p A_p}} \quad (2.8)$$

- rigidez adimensional da base da estaca:

$$\Omega = \frac{P_b}{w_b E_p A_p \lambda} \quad (2.9)$$

- a função do decréscimo radial logarítmico do deslocamento $\psi(s)$,
- o fator de difração ζ .

Uma das principais ideias do método é que a estaca receptora não segue exatamente o deslocamento (que diminui logaritmicamente com a distância radial) induzido pela estaca fonte como considerado por RANDOLPH & WROTH (1979) e COOKE (1974), mas que o fator de interação para grupos de estacas α (na definição de POULOS, 1968) deve refletir também o efeito do reforço do solo pela estaca vizinha. Isso resulta na redução do fator de interação. Assim, para duas estacas idênticas o fator de interação pode ser expresso como o produto de dois termos que representam a atenuação logarítmica e o fator de difração ζ :

$$\alpha = \psi(s)\zeta(h\lambda, \Omega) = \left(\frac{\ln\left(\frac{r_m}{s}\right)}{\ln\left(\frac{2r_m}{d}\right)} \right) \zeta \quad (2.10)$$

A Fig. 4.11 representa o gráfico da rigidez normalizada plotada contra o comprimento adimensional da estaca.

Para um caso limite de $\Omega = 0$, quando não há reação do solo abaixo da ponta, a rigidez de uma estaca totalmente flutuante aumenta linearmente com o comprimento adimensional $h\lambda$ até o valor de 0,5. Isso implica que na faixa de $0 < h\lambda < 0,5$ a estaca flutuante seja essencialmente rígida. Para $h\lambda > 0,5$ a estaca gradualmente torna-se mais compressível e a rigidez da mesma cresce com velocidade muito menor, atingindo 90% da rigidez da estaca infinitamente longa com $h\lambda \approx 1,5$. Esse valor define o comprimento ativo, depois do qual a rigidez da estaca não cresce mais. Em termos do índice de esbeltez:

$$\left(\frac{L}{d} \right)_{ativo} \approx 1,75 \sqrt{\frac{E_P}{E_S}} \quad (2.11)$$

A tendência similar é observada para as estacas flutuantes com $\Omega = 0,1$ e $0,2$, a rigidez normalizada aumenta quase linearmente até $h\lambda \approx 0,5$ e atinge um valor assintótico com $h\lambda \approx 1,75$ independente do valor de Ω .

As estacas de ponta são caracterizadas por um comportamento diferente, a rigidez delas é uma função que decresce monotonicamente com o aumento do comprimento adimensional.

Do gráfico observa-se que a curva de $\Omega = 1$ é a curva média entre as curvas $\Omega = 0$ e $\Omega = \infty$.

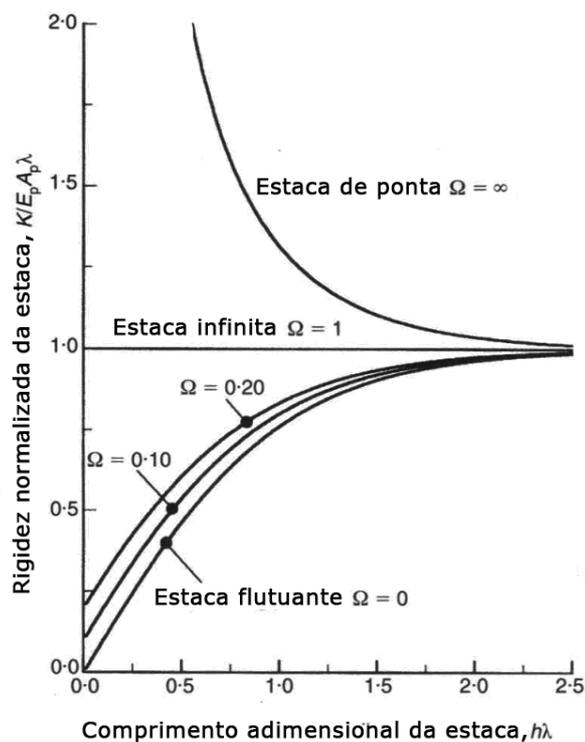


Figura 4.11 - Rigidez normalizada da estaca compressível em uma camada de solo para diferentes valores da rigidez da base adimensional Ω . (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

O comportamento do fator de difração ζ em dependência do comprimento adimensional $h\lambda$ é mostrado para vários valores de Ω na Fig. 4.12.

Para os valores da rigidez adimensional da base Ω entre 0 e 1, indicando respectivamente, estacas flutuantes e estacas de ponta, várias tendências foram notadas.

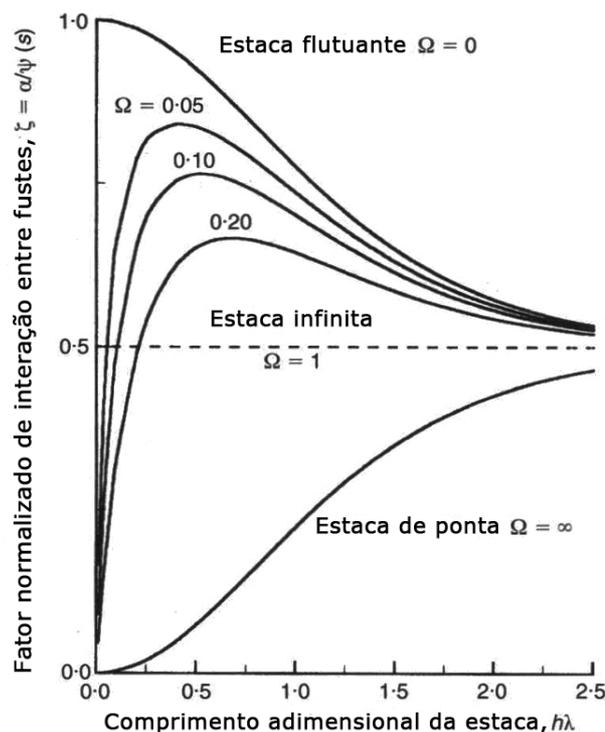


Figura 4.12 - Fator normalizado de interação entre fustes para estacas em uma camada de solo para diferentes valores da rigidez adimensional da base Ω . (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

Na faixa de $h\lambda$ entre 0 e 0,5 nota-se um aumento rápido na função ζ para as estacas com o valor de Ω entre 0 e 1. Essa tendência pode ser o resultado do comportamento rígido das estacas curtas. Nesse caso o aumento do comprimento da estaca leva a maior interação entre os fustes, o deslocamento da estaca sendo constante com a profundidade.

Quando o comprimento adimensional ultrapassa o valor de 0,5 - 0,75 as estacas podem ser consideradas compridas e compressíveis. Porém, o deslocamento da estaca fonte tem atenuação notável com a profundidade e somente a parte superior da estaca sofre deslocamentos significativos que vão contribuir para a interação com a estaca receptora. Entretanto, a parte restante da estaca que se encontra abaixo da certa profundidade atua impedindo a interação. Logo, com o aumento do comprimento da estaca a parte da estaca que contribui para a interação continua a mesma e a parte que impede a interação aumenta, assim o fator de difração e, conseqüentemente, o fator de interação gradualmente diminui.

A Fig. 2.26 representa os fatores de interação propostos por MYLONAKIS & GAZETAS (1998) para as estacas compressíveis em termos do espaçamento relativo. A comparação com os resultados correspondentes obtidos por POULOS & DAVIS (1980) mostra uma concordância razoável para todos os valores da rigidez relativa das estacas e para o índice de esbeltez maior que dez. Para $L/d = 10$, a equação apresentada por Mylonakis tende a subestimar os valores dos fatores de interação particularmente para o espaçamento relativo maior que cinco. Como a função de atenuação logarítmico do deslocamento radial $\psi(s)$ é baseada na hipótese da deformação plana, para as estacas de comprimento pequeno ela se torna menos efetiva na previsão da interação. O mesmo efeito foi observado por RANDOLPH & WROTH (1979).

As limitações do método são devidos às hipóteses adotadas para simplificar o modelo do solo tais como a linearidade e a aderência perfeita entre o fuste da estaca e o solo, e a adoção do princípio de superposição para grupos de estacas, que pode causar erros na previsão do recalque no caso de grupos de grandes dimensões, camada subjacente muito rígida e quando predomina o comportamento não linear.

4.1.4. Método de estacas fictícias

No método numérico proposto por MING & LONG-ZHU (2008) o sistema solo - estacas é representado através do maciço do solo estendido num semi-espaço e duas estacas fictícias introduzidas no lugar das estacas instaladas. O módulo elástico das estacas fictícias é considerado igual à diferença entre os módulos da estaca e do solo:

$$E_* = E_p - E_s \quad (2.12)$$

O solo é tratado como um meio elástico tridimensional caracterizado pelos constantes E_s e ν_s e as estacas fictícias como um meio elástico unidimensional.

Os fatores de interação para duas estacas idênticas carregadas axialmente são expressos utilizando a definição de POULOS (1968):

$$\alpha = \frac{\bar{w}(0) - \bar{w}'(0)}{\bar{w}(0)} \quad (2.13)$$

$\bar{w}(0)$ - recalque adimensional para duas estacas igualmente carregadas;

$\bar{w}'(0)$ - recalque adimensional de uma estaca sob o carregamento próprio;

$$\bar{w}(\bar{z}) = \frac{w(\bar{z}) E_s d}{P_0} \quad (2.14)$$

$$\bar{z} = \frac{z}{d} \quad (2.15)$$

z - profundidade;

P_0 - a carga axial aplicada à cabeça da estaca.

Os gráficos dos fatores de interação obtidos por MING & LONG-ZHU (op. cit.) são mostrados na Fig. 4.13 em comparação com os resultados de outros autores.

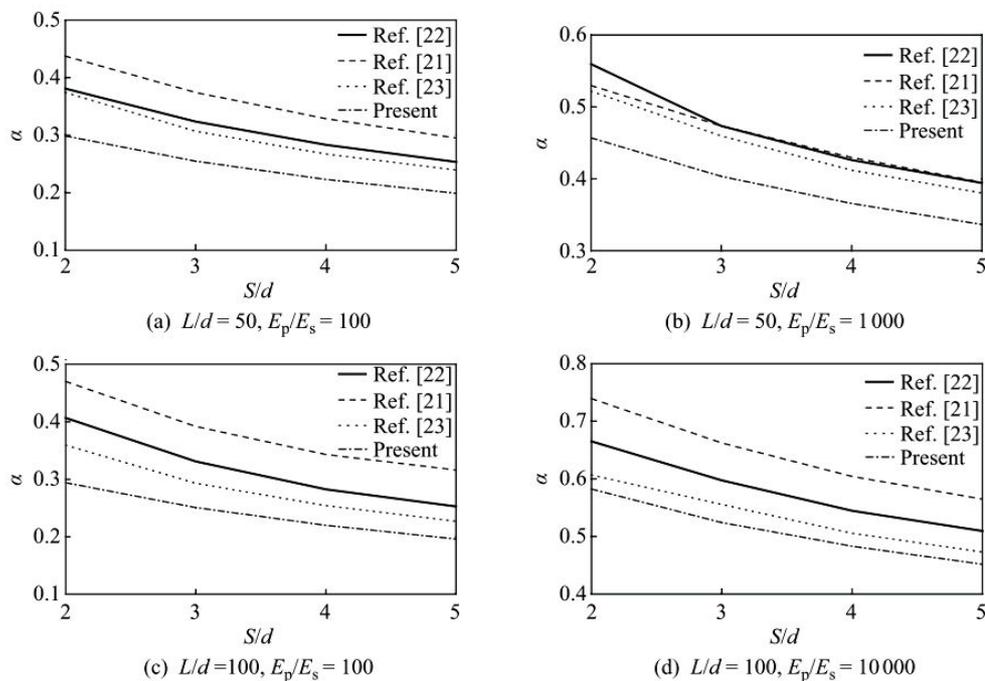


Figura 4.13 - Os fatores de interação obtidos através do método de estacas fictícias em comparação com os obtidos por [22] EL SHARNOUBY & NOVAK (1990); [21] POULOS & MATTES (1971); [23] SOUTHCOOT & SMALL (1996). (MING & LONG-ZHU, 2008)

Observa-se que na faixa de s/d até 5 a solução fornecida pelo método de estacas fictícias leva aos fatores de interação menores do que obtidos por outros autores. Entretanto, os valores dos fatores de interação com espaçamentos grandes são muito grandes, por exemplo, para $E_p/E_s = 1000$, $L/d = 40$ e $s/d = 30$ o fator de interação é aproximadamente igual a 0,13.

Nota-se também que os fatores de interação são influenciados pela razão entre os módulos elásticos do solo e da estaca, os valores aumentando bruscamente com o aumento de E_p/E_s .

4.1.5. Método de camadas finitas

A proposta da análise de estacas através do método baseado na discretização do solo em camadas de espessura finita e comprimento infinito foi desenvolvida por SOUTHCOTT & SMALL (1995). Esse modelo representa melhor o solo estratificado. Os deslocamentos do solo são obtidos através da matriz de rigidez do sistema solo - estacas. Para facilitar os cálculos a programa PILEGRP foi desenvolvido pelos autores.

Os fatores de interação possuem a definição igual aos de Poulos e Davis e são apresentados em dependência do índice de esbeltez L/d , espaçamento relativo s/d e a razão entre os módulos elásticos da estaca e do solo E_p/E_s . Os gráficos dos mesmos em comparação com os resultados obtidos por EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e POULOS & MATTES (1971) são mostrados nas Figs. 2.16, 2.17 e 2.18. Em geral, os resultados fornecidos pelo método de camadas finitas são menos conservativos, a diferença sendo mais notável com o aumento do índice de esbeltez.

4.1.6. Comparação entre os fatores de interação obtidos por diversos autores

Os fatores de interação obtidos através dos diversos métodos descritos anteriormente foram plotados nas Figuras 4.14 e 4.15 para os valores de $K = 1000$ e 100 e $L/d = 50$.

No caso das estacas com a rigidez relativa igual a 1000 nota-se uma concordância razoável entre de todas as propostas do fator de interação. Para $K = 100$, existe uma discrepância considerável entre os valores dos fatores de interação, os maiores são fornecidos pela solução de POULOS (1968), os menores - por MING & LONG-ZHU (2008). Pode ser concluído que os fatores de interação do Poulos tendem a superestimar a interação para estacas compridas flexíveis.

Os fatores de interação obtidos através dos métodos baseados na teoria da elasticidade têm valor nulo somente com o espaçamento infinito, assim todas as estacas de qualquer grupo têm influência mútua. Essa hipótese não é coerente com os resultados de algumas provas de carga (COOKE & PRICE, 1973; COOKE, 1974) e considerações feitas por outros pesquisadores (RANDOLPH & WROTH, 1979; MYLONAKIS & GAZETAS, 1998).

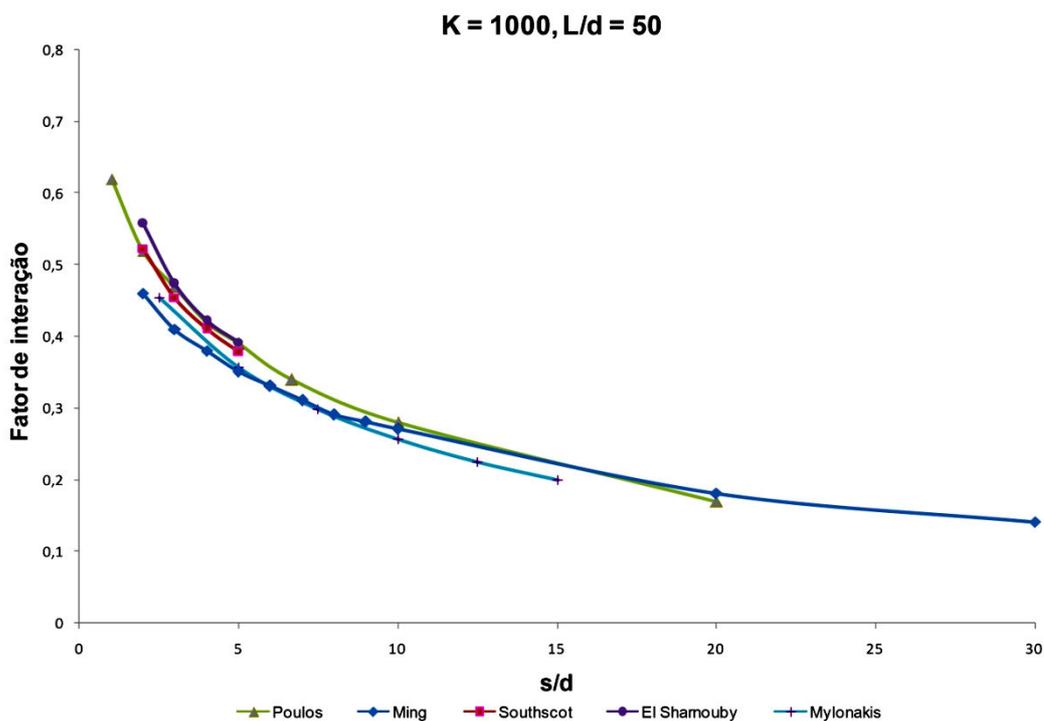


Figura 4.14 - Os fatores de interação obtidos por diferentes autores, $K = 1000$, $L/d = 50$.

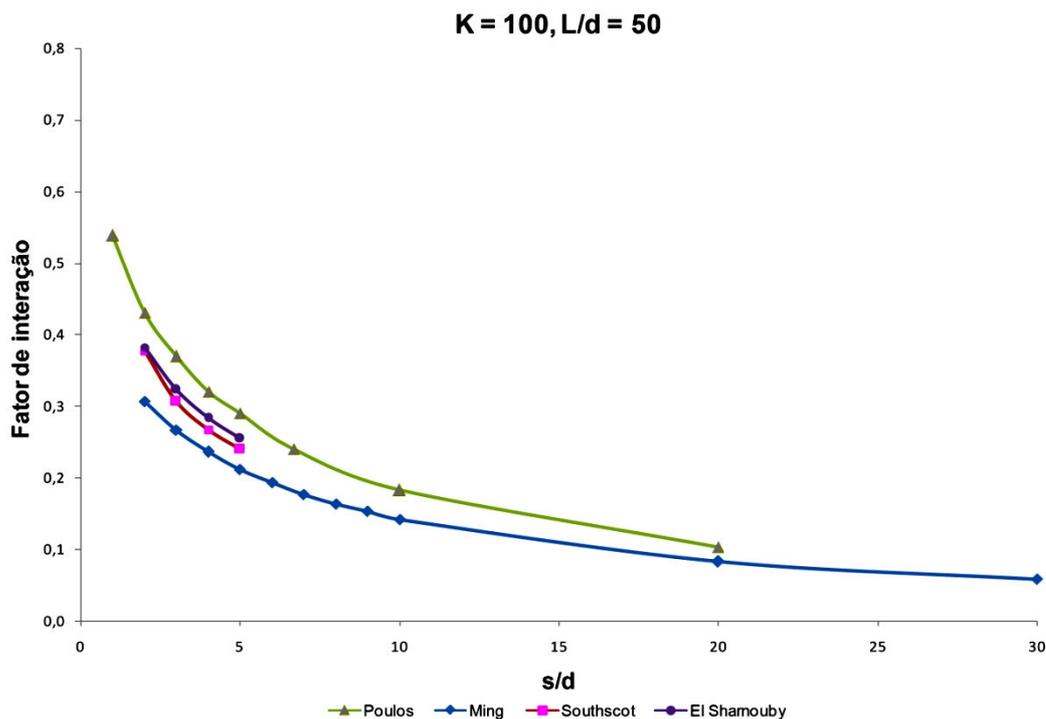


Figura 4.15 - Os fatores de interação obtidos por diferentes autores, $K = 100$, $L/d = 50$.

A diferença entre os métodos é devida ao padrão do carregamento do maciço do solo e ao número de elementos usado para discretizar a estaca. EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) usaram a carga pontual no semi-espço elástico, POULOS & DAVIS (1980) – o método dos elementos de contorno, SOUTHCOTT & SMALL (1995) – a tração anular nas superfícies das camadas finitas.

Vários autores comentam que o número de elementos usado para a discretização da estaca influencia no valor do fator de interação (EL SHARNOUBY & NOVAK, op. cit.; SOUTHCOTT & SMALL, op. cit.; MING & LONG-ZHU, 2008). POULOS (1968) usa 10 elementos, EL SHARNOUBY & NOVAK (op. cit.) 50 elementos, SOUTHCOTT & SMALL (op. cit.) 20 elementos, MING & LONG-ZHU (op. cit.) utilizam o número de elementos que depende das características da estaca. RIBEIRO BACELAR (1999) fez uma comparação (Fig. 4.16) entre as diversas propostas que discretizam a estaca em diferentes números de elementos e o programa AGRE (RIBEIRO BACELAR, op. cit.).

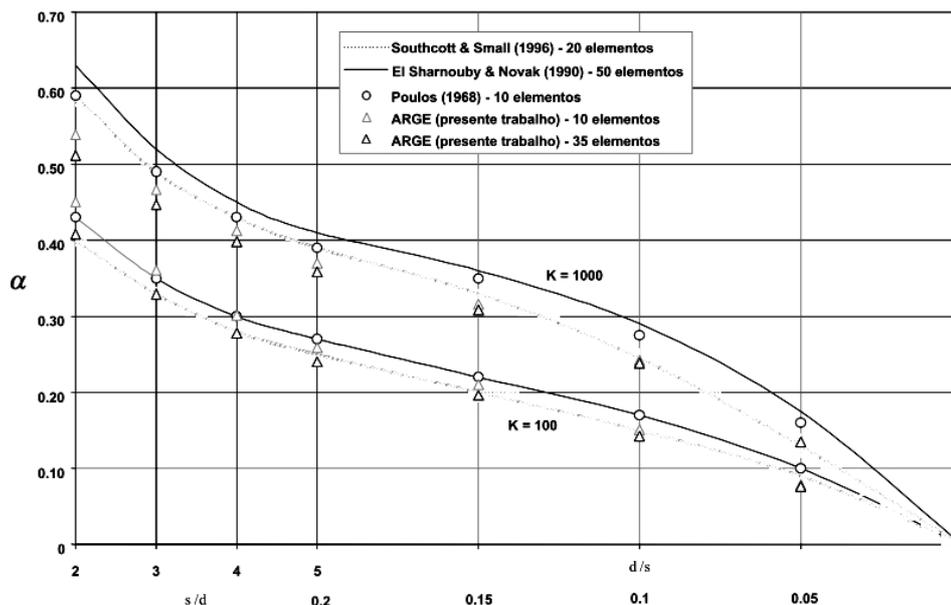


Figura 4.16 - Comparação dos fatores de interação obtidos pelo programa computacional AGRE e resultados publicados por POULOS (1968), EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e SOUTHCOTT & SMALL (1995). (RIBEIRO BACELAR, 1999).

4.2.

Considerações sobre o cálculo do recalque de grupo através do índice de recalque

Como foi mencionado, o cálculo do recalque de um grupo de estacas utilizando soluções paramétricas que relacionam o índice de recalque com o recalque do grupo é mais prático devido à redução do número de variáveis envolvidas no problema. Entretanto, a abordagem utilizada na modelagem do comportamento do grupo tem bastante influência no resultado obtido. Para ilustrar esse efeito é possível se referir a um estudo de caso analisado por POULOS (1998).

GOOSENS & VAN IMPE (1991) descreveram um caso de construção de um bloco constituído de quarenta silos de concreto reforçado que ocupa uma área de 34 m por 84 m. A laje da fundação teve a espessura de 1,2 m e era suportada por 697 estacas cravadas de concreto reforçado. O comprimento das estacas era 13,4 m e o diâmetro – 0,52 m. A base das estacas era alargada e tinha um diâmetro médio 0,8 m. A carga média de trabalho era 1,3 MN por uma estaca.

A análise deste caso foi feita com o auxílio do programa baseado no método dos elementos de contorno DEFPIG (POULOS & DAVIS, 1980). Foi adotado o

valor de três para a razão entre os módulos perto das estacas e entre as estacas. Os índices de recalque foram calculados para grupos de 16 e 25 estacas e extrapolados para obter o valor para 697 estacas, que foi aproximadamente igual a 130. Sob a carga média de 1,3 MN o recalque de uma estaca isolada foi igual a 5 mm segundo aos cálculos, porém o valor médio observado durante as provas de carga de duas estacas foi 2,8 mm. Assim, o recalque médio do grupo previsto foi igual a 650 mm. Considerando a fundação um grupo de estacas com bloco flexível, o recalque no centro da extremidade da mesma foi calculado a ser 440 mm. A comparação entre os valores medidos e previstos é representada na Fig. 4.17.

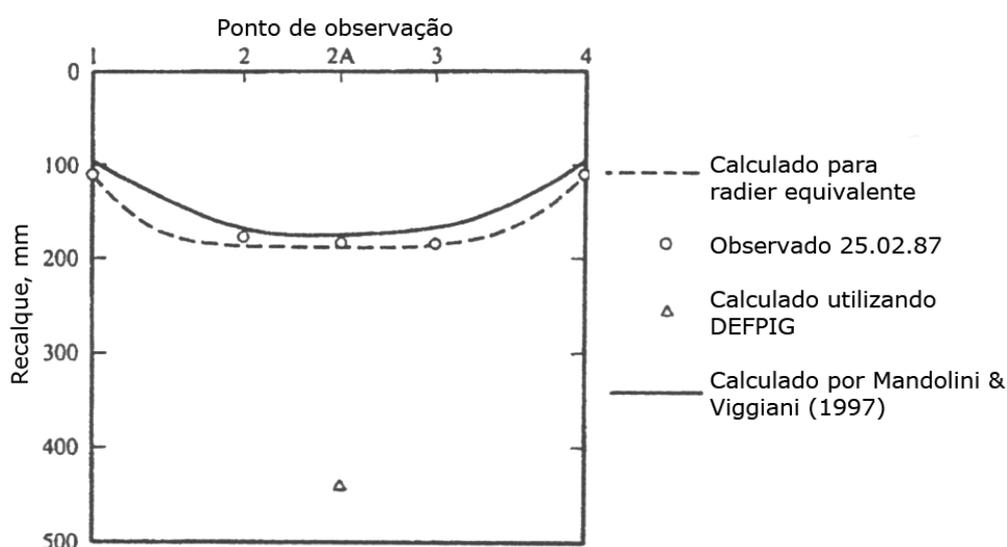


Figura 4.17 - Os recalques previstos e medidos o longo da extremidade do silo. (POULOS, 1998)

Evidentemente, a análise feita no programa DEFPIG superestima o recalque. Se o valor medido do recalque da estaca isolada fosse usado no calculo, o recalque previsto no meio da extremidade do silo seria igual a 246 mm, que é mais próximo ao valor observado de 185 mm.

Esse caso foi também analisado por MANDOLINI & VIGGIANI (1997) através de uma análise similar à do DEFPIG, mas que possui umas diferenças como a utilização da análise hiperbólica não linear baseada no módulo de pequenas deformações para uma estaca isolada, outra abordagem no calculo dos fatores de interação e o uso do espaçamento máximo no qual não ocorre a

interação (raio de influência da estaca). O perfil de deslocamento obtido por Mandolini e Viggiani corresponde bem com o perfil medido.

COOKE (1974) na sua análise de grupos de estacas faz considerações sobre o índice de recalque, a mais importante das quais é que o fato de adotar um raio de influência determina o índice de recalque máximo para grupos de estacas extensos. A Fig. 4.18 mostra os gráficos obtidos para os valores de R_s calculados através do método de superposição utilizando o perfil de deslocamento observado durante os ensaios de prova de carga de uma estaca instrumentada em argila de Londres.

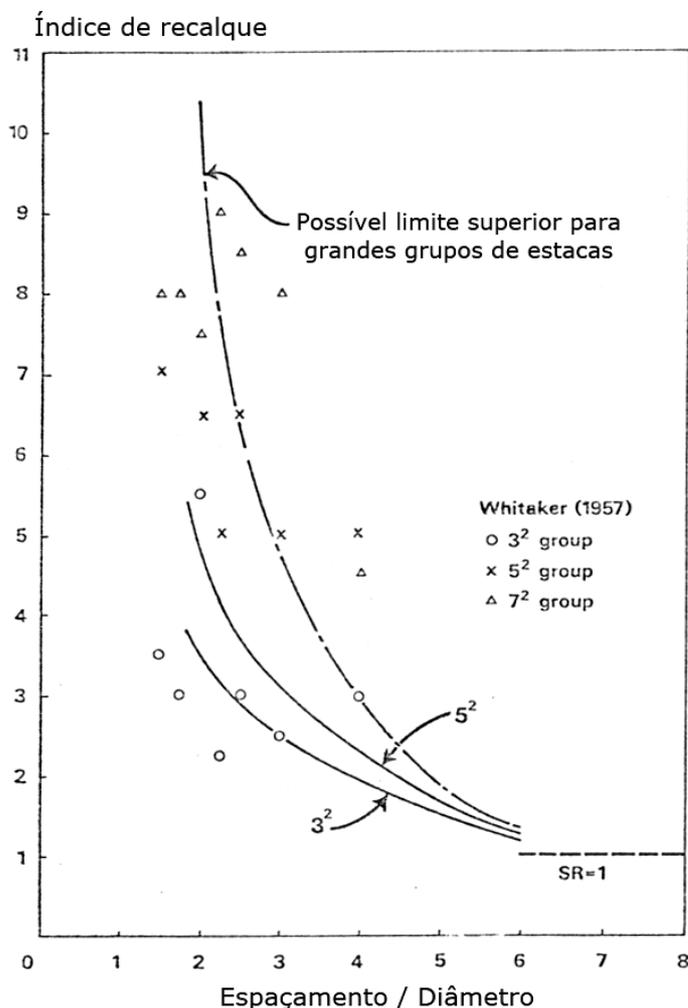


Figura 4.18 - Índice de recalque vs. o espaçamento entre as estacas para grupos de estacas quadrados pequenos e de grupos de dimensões grandes de qualquer configuração. (COOKE, 1974)

Na proposta de POULOS & DAVIS (1980) o índice de recalque cresce com o aumento de número de estacas n :

$$R_s = (R_{25} \cdot R_{16})(\sqrt{n} \cdot 5) + R_{25} \quad (2.16)$$

Através desta formulação o valor do índice de recalque de um grupo de estacas R_s pode ser obtido extrapolando os valores de grupos de 16 e 25 estacas (R_{16} e R_{25} respectivamente).

4.3.

A importância da avaliação dos parâmetros geotécnicos

POULOS (1998) afirma que para uma análise de recalque de fundações a seleção dos parâmetros geotécnicos do solo adequados é essencial, reforçando ainda que a previsão de recalque é mais sensível à caracterização geotécnica do campo do que ao método de análise em si. Seguintes considerações podem ser feitas:

- Todos os métodos práticos de análise envolvem uma simplificação do comportamento do solo, logo os parâmetros que descrevem o comportamento idealizado não devem ser considerados constantes.
- O comportamento do solo é geralmente não linear e depende do estado de tensões efetivas e a história de tensões.
- Na obtenção dos parâmetros geotécnicos através dos ensaios *in situ* é desejável que a trajetória de tensão do ensaio seja similar a da fundação sob a consideração. Por exemplo, os resultados do ensaio de placa são mais relevantes para uma fundação rasa do que para um grupo de estacas.
- Diferentes valores do módulo elástico podem ser relevantes para diferentes componentes de recalque. Para um grupo de estacas podem ser diferenciados quatro valores distintos do módulo elástico. O comportamento de uma estaca isolada é mais afetado pelo módulo do solo ao redor e logo em baixo da estaca, enquanto o recalque de um grupo é influenciado pelo módulo do solo entre as estacas e na certa profundidade abaixo da fundação.

- Correlações empíricas entre ensaios in situ tais como SPT e CPT, e os parâmetros de deformabilidade do solo são, muitas vezes, úteis para as estimativas preliminares. Ao mesmo tempo, essas correlações podem trazer incertezas na previsão do recalque porque os ensaios do campo não seguem a trajetória de tensões correta. A maioria das equações empíricas depende quanto do tipo do solo tanto do tipo da fundação.

No entanto, os parâmetros geotécnicos conhecidos e o perfil geológico detalhado não garantem a certeza dos resultados da avaliação do recalque. A confirmação disso pode ser encontrada, por exemplo, no estudo de caso da construção do Projeto Emirados feito por POULOS (2005) descrito abaixo.

O Projeto Emirados inclui a construção de duas torres gêmeas que se encontram em Dubai, Emirados Árabes. A planta de cada torre é um triângulo com lados aproximadamente iguais a 50 - 54 m. A torre Office possui altura de 355 m, a torre Hotel de 305 m. A fundação das torres é um radier estaqueado com estacas de grande diâmetro.

O modelo geotécnico foi baseado nos dados dos ensaios in-situ e de laboratório (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Modelo geotécnico para as torres de Emirados.

Tipo de solo	Espessura, m	<i>E</i> não drenado, MPa	<i>E</i> drenado, MPa	Resistência do fuste, kPa	Resistência da base, MPa
Areia siltosa	5	40	30	18	0,1
Areia siltosa	5	125	100	73	1,5
Arenito calcáreo	14	700	500	200	2,3
Areia siltosa	10	125	100	150	1,9
Calcsiltito	20	500	400	450	2,7
Calcsiltito	16	90	80	200	2
Calcsiltito	10	600	600	450	2,7

As provas de carga em estacas foram feitos para obter o comportamento carga-recalque, antes disso, para fornecer algumas orientações para os ensaios de campo uma análise foi feita através do programa PIES (POULOS, 1990) baseado no método dos elementos de contorno simplificado, que foi capaz de incorporar a

resposta não linear do solo e levar em consideração os efeitos das estacas de reação. Os parâmetros de entrada do programa foram iguais aos usados no projeto da fundação. Comparações feitas entre os resultados das provas de carga e das previsões mostraram uma concordância razoável. Os recalques previstos levemente excederam os valores medidos e a carga máxima atingida de 30 MN ultrapassou o limite previsto de 23 MN.

No projeto final foi adotado o diâmetro das estacas de 1,2 m e o comprimento 40 e 45 m. Em geral, as estacas foram instaladas diretamente embaixo das paredes de 4,5 m de profundidade, que se encontram entre o radier e a laje do primeiro andar. A espessura de radier foi de 1,5 m.

Na análise da fundação foi usado o programa GARP (POULOS, 1994), que utiliza o método dos elementos de contorno simplificado para prever o comportamento do radier retangular sujeito às tensões verticais, momentos, campo livre de deslocamentos do solo.

O radier foi modelado como uma placa elástica, o solo - como meio elástico estratificado, as estacas foram representadas por molas hiperbólicas que podem interagir uma com a outra e com o radier. Além do GARP, o programa DEFPIG (POULOS & DAVIS, 1980) foi usado para encontrar os valores da rigidez das estacas e dos fatores de interação entre as estacas.

As medidas foram feitas durante um período limitado no tempo de construção e foram comparadas com as previsões da relação tempo-recalque, os resultados são representados na Fig. 4.19. Os valores previstos são significativamente menores dos observados, sendo apenas por volta de 25% das medições depois de 10 - 12 meses desde o início de construção.

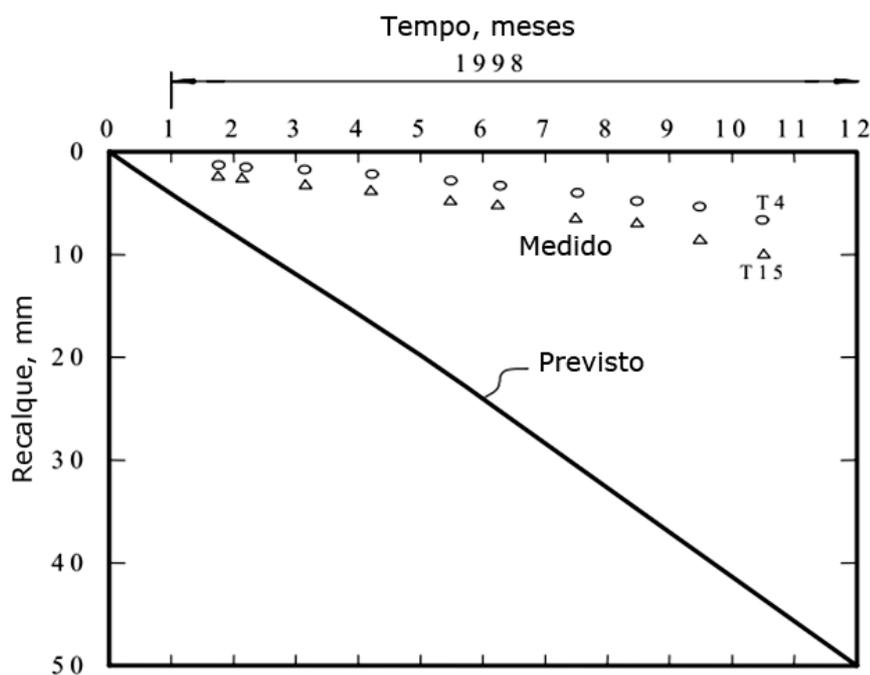


Figura 4.19 - Comportamento tempo-recalque previsto e observado da torre Hotel. (POULOS, 2005)

POULOS (2005) cita as razões por quais os resultados das previsões podem ter sido insatisfatórios, a mais importante das quais é possível superestimação dos efeitos de interação entre as estacas da fundação.

A análise foi feita para avaliar a sensibilidade dos recalques previstos aos parâmetros do solo usados para derivar os fatores de interação. Foram verificadas combinações de parâmetros alternativas, ou seja, diferentes distribuições do módulo elástico tanto radialmente quanto com a profundidade. O programa DEFPIG foi usado para calcular os fatores de interação para cada caso. Na solução original foi adotado que o solo perto das estacas e entre as estacas tinha o mesmo módulo elástico ($E_{sm}/E_s = 1$) e a rocha embaixo da base do grupo tinha rigidez constante até profundidade considerável. Todos os casos considerados são resumidos na Tabela 4.4.

Fig. 4.20 mostra os fatores de interação calculados para a variedade de parâmetros adotados em dependência do espaçamento relativo. Observa-se que a solução original usada para a previsão inicial fornece os valores consideravelmente maiores. Como o grupo é constituído de aproximadamente 100 estacas, pequenas incertezas nos valores dos fatores de interação trazem erros consideráveis na previsão do recalque.

Tabela 4.4 - Os casos considerados na análise de sensibilidade dos fatores de interação.

Curva Nº	Módulo elástico da camada subjacente, MPa	E_{sm}/E_s
1	90	1
2	90	5
3	200	5
4	700	5
5	700	1

Os recalques recalculados de acordo com diferentes fatores de interação são apresentados na Tabela 4.5. Nota-se uma influência considerável dos parâmetros adotados nos resultados dos cálculos. Os recalques mais próximos aos medidos foram obtidos no Caso 4, o recalque máximo é reduzido aos 29% do original e o mínimo aos 25%. Se esse caso fosse usado na previsão, o recalque do ponto T15, por exemplo, depois de 10,5 meses seria 12 mm que é razoavelmente próximo ao valor medido de 10 mm.

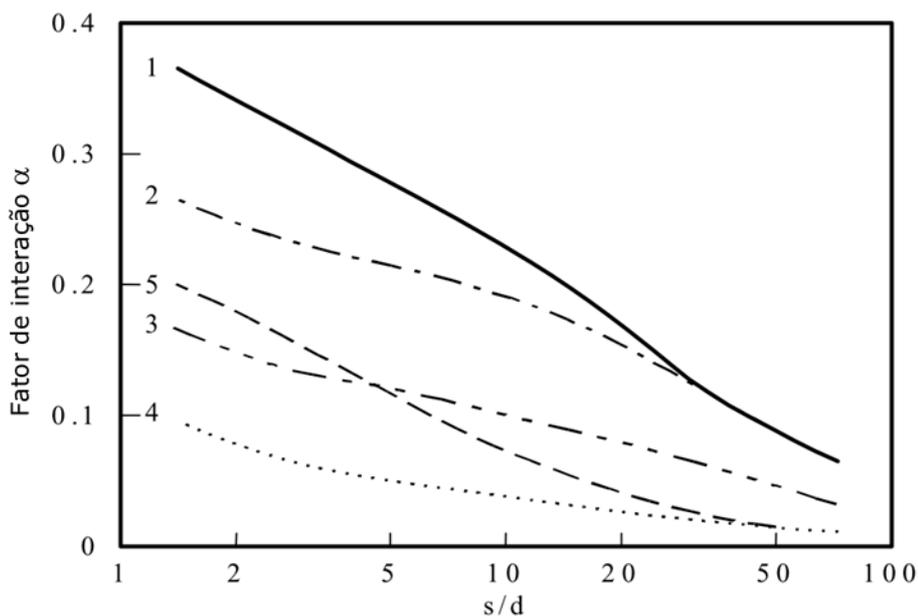


Figura 4.20 - Fatores de interação em dependência do espaçamento relativo para diferentes casos analisados. (POULOS, 2005)

Tabela 4.5 - Resultados da análise de sensibilidade.

Caso	Módulo elástico abaixo de 53 m, Mpa	E_{sm}/E_s	Recalque máximo, mm	Recalque mínimo, mm	% de carga nas estacas
Cálculos originais	80	1	138	91	93
Caso 2	80	5	122	85	93
Caso 3	200	5	74	50	92
Caso 4	600	5	40	23	92
Caso 5	600	1	58	32	92

Os parâmetros usados na análise de sensibilidade não poderiam ser previstos através dos ensaios, nem existe alguma base teórica para avaliação dos valores a serem adotados na previsão do recalque. Isso questiona a afirmação que os parâmetros geotécnicos têm a maior influência nos resultados da análise de uma fundação do que o método em si. Não é possível subestimar a função da avaliação geotécnica do local de qualquer obra, mas para cada caso o método de análise apropriado tem que ser adotado.