2
Métodos de análise de recalque de grupos de estacas

2.1.
Introdução

Os métodos da avaliação de fundações em grupos de estacas podem ser divididos em seguintes categorias:

- métodos empíricos e semi-empíricos;
- métodos analíticos simplificados que envolvem a separação das cargas aplicadas ao fuste e à base da estaca;
- método de equação integral (método dos elementos de contorno) com a utilização das funções de transferência de carga para representar a interação solo-estaca ou da teoria da elasticidade para representar a resposta do maciço do solo;
- métodos dos elementos finitos nos quais uma variedade de modelos constitutivos do solo pode ser utilizada.

2.2.
Métodos empíricos

Os métodos empíricos são aqueles que não são estritamente baseados na mecânica de solos, com obtenção de parâmetros sendo feita através de simples ensaios de campo ou laboratório e fazendo uso de correlações.

TERZAGHI & PECK (1948) substituíram a estaca ou grupo por sapatas flexíveis situadas na profundidade da ponta das estacas ou, alternativamente, a 2/3 desta distância.

SKEMPTON (1953) propôs a seguinte relação para o calculo de recalque de grupos de estacas em areias:

$$\frac{\rho_G}{\rho_1} = \frac{(4B+9)^2}{(B+12)^2} \tag{0.1}$$

ρ_G - recalque de grupo de estacas;

ρ_1 - recalque de estaca isolada;

B – largura de grupo de estacas em pés.

Para um grupo quadrado de estacas cravadas em areia MEYERHOF (1959) desenvolveu a correlação:

$$\frac{\rho_G}{\rho_1} = \frac{s(5-\frac{s}{3})}{(1+\frac{1}{r})^2} \tag{0.2}$$

s – razão entre o espaçamento e o diâmetro das estacas;

r – número de filas do grupo de estacas quadrado.

Para areias homogêneas sem camada de material compressível subjacente MEYERHOF (1976) propôs:

$$\rho_G = \frac{0{,}96 p\sqrt{B} I}{N} \tag{0.3}$$

Para areias siltosas:

$$\rho_G = \frac{1{,}92 p\sqrt{B} I}{N} \tag{0.4}$$

p – a pressão transferida para a fundação, kPa;

B – largura do grupo de estacas, m;

N – número médio de golpes de SPT corrigido na profundidade B abaixo do nível das pontas das estacas;

I – fator da influência de embutimento da fundação.

$$I = 0,5(1 - \frac{D_e}{8B}) \geq 0,5 \tag{0.5}$$

D_e – profundidade de embutimento da fundação, m.

Utilizando os resultados de CPT:

$$\rho_G = \frac{42 pBI}{q_c} \tag{0.6}$$

q_c – a resistência média da ponta de cone na profundidade B abaixo do nível da base do grupo, kPa.

TERZAGHI & PECK (1967) sugeriram avaliar o recalque de grupos de estacas nos solos coesivos introduzindo uma fundação equivalente (Fig. 2.1) localizada na profundidade de 1/3D acima da base das estacas. A pressão é transferida ao solo através desta fundação. A carga é distribuida dentro de um tronco de uma pirâmide as faces da qual têm inclinação de 1:2 e causa a pressão adicional uniforme no solo subjacente. O cálculo do recalque de consolidação basea-se nos incrementos de pressão nas camadas subjacentes.

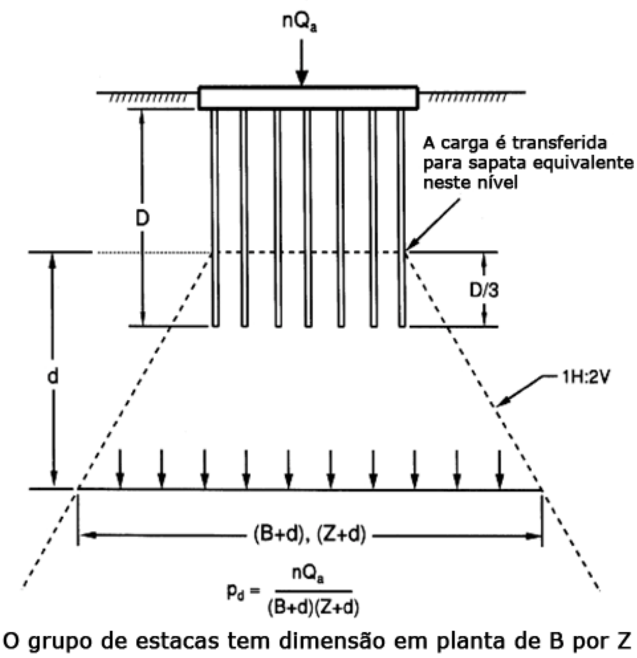

Figura 2.1 - O esquema da fundação equivalente. (TERZAGHI & PECK, 1967)

O recalque de consolidação pode ser calculado usando os resultados dos ensaios de adensamento de laboratório.

Para os solos pre-adensados, onde a pressão transferida à fundação é maior do que a pressão de pre-adensamento:

$$\rho = H\left[\frac{C_{cr}}{1+e_0}\log\frac{p_c}{p_o}\right] + H\left[\frac{C_c}{1+e_0}\log\frac{p_o+\Delta p}{p_c}\right] \tag{0.7}$$

Para os solos pre-adensados, onde a pressão transferida à fundação é menor do que a pressão de pre-adensamento:

$$\rho = H\left[\frac{C_{cr}}{1+e_0}\log\frac{p_o+\Delta p}{p_o}\right] \tag{0.8}$$

Para os solos normalmente adensados:

$$\rho = H\left[\frac{C_c}{1+e_0}\log\frac{p_o+\Delta p}{p_o}\right] \tag{0.9}$$

ρ - recalque total da camada, mm;

H – espessura inicial da camada, mm;

C_{cr} – coeficiente de recompressão;

e_0 – índice de vazios inicial;

p_o – tensão efetiva no meio da camada devido ao aumento da carga;

p_c – tensão de pre-adensamento estimada, kPa;

C_c – coeficiente de adensamento;

Δp – a variação média de tensão na camada, kPa.

CHANEY & CHASSEY (1993) recomendaram calcular a profundidade da fundação equivalente em função da estratigrafia e o mecanismo de transferência de carga no solo conforme a Fig. 2.2.

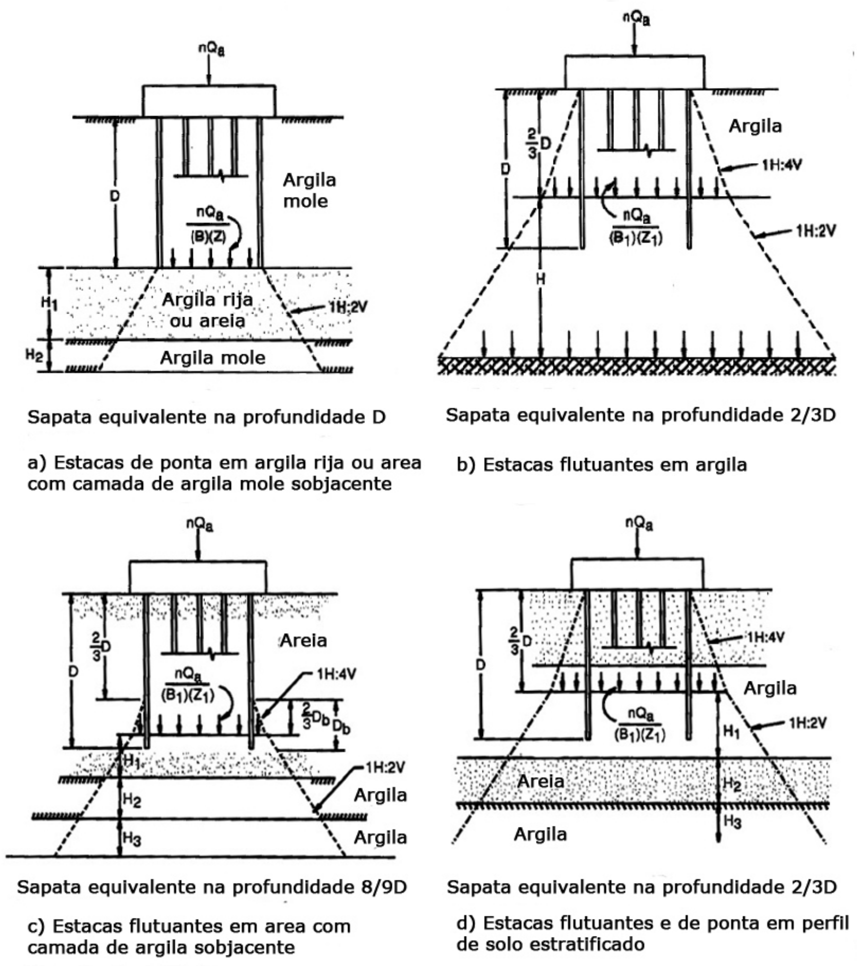

Figura 2.2 - A distribuição de pressão abaixo da sapata equivalente. (CHENEY & CHASSIE, 1993)

Os métodos citados são baseados na relação linear entre a tensão e deformação do solo. JANBU (1963, 1965) sugeriu utilizar o módulo tangencial. Neste método a relação tensão-deformação do solo é expressa através do modulo adimensional m e a exponente de tensão j. O valor do módulo m pode ser determinado num ensaio triaxial ou oedométrico, e o valor do j pode ser assumido 0,5 para solos não coesivos e 0 para coesivos.

VESIC et al. (1969, 1977) sugeriram calcular o recalque do grupo através do recalque da estaca isolada da seguinte maneira:

$$\rho_G = \rho_1 \sqrt{\frac{B}{d}} \tag{0.10}$$

ρ_G - recalque do grupo;

ρ_1 - recalque da estaca isolada;

B – a menor dimensão do grupo de estacas;

d – diâmetro da estaca.

Porém, dos ensaios de modelos de grande escala foi concluído que o método pode ser utilizado somente para os solos não coesivos e o erro pode atingir ±50%.

SCHULZE & SHERIF (1973) baseando-se nos históricos dos ensaios de campo, estabeleceram uma expressão para a obtenção de recalque para solos grossos granulares (areias grossas, pedregulho) através dos resultados de SPT:

$$\rho = \frac{s \cdot p}{N^{0.87}(1 + \frac{0.4D}{B})} \tag{0.11}$$

s – coeficiente de recalque;

p – a carga aplicada na fundação;

N – valor médio de N (SPT) na profundidade $2B$ abaixo do nível da fundação, ou na profundidade d_s se a espessura da camada do solo não coesivo é menor do que $2B$;

D – a profundidade da fundação;

B – largura da fundação.

Os valores dos coeficientes s e d_s podem ser obtidos utilizando a Fig. 2.3:

BOWLES (2002) sugeriu uma expressão para avaliação do recalque de um grupo de estacas utilizando os resultados do ensaio CPT:

$$\rho = \frac{k \cdot \Delta_q B}{2q_c} \tag{0.12}$$

B – largura do grupo;

q_c – resistência do cone na zona de influência que estende-se $2B$ abaixo e B acima da ponta da estaca;

Δ_q - a pressão vertical na ponta da estaca;

$$k = 1 - \frac{L}{8B} \geq 0,5 \tag{0.13}$$

L – comprimento da estaca.

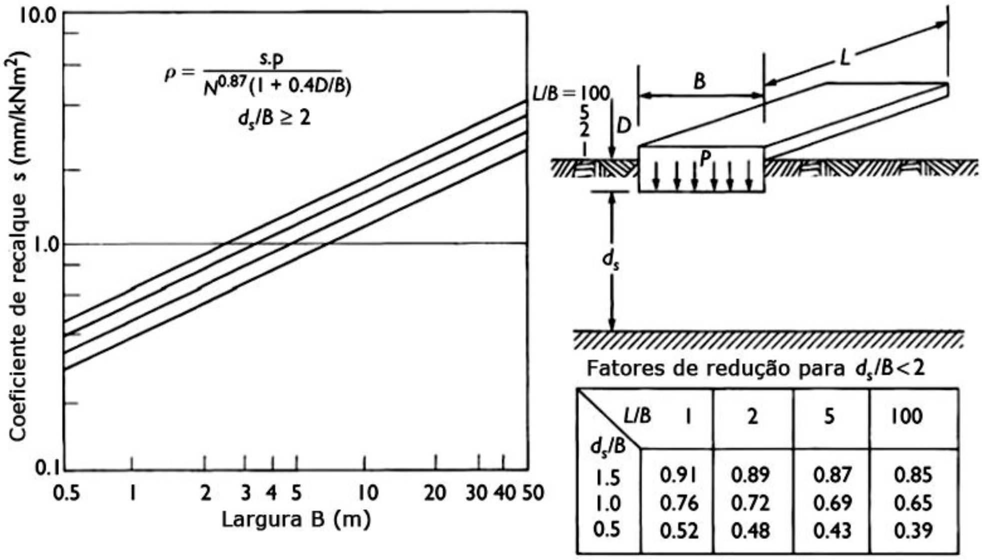

Figura 2.3 - Obtenção dos valores dos coeficientes s e d_s. (BOWLES, 2002)

2.3. Métodos teóricos

2.3.1. Método dos elementos de contorno

POULOS (1968) propôs um método teórico para calcular os recalques do grupo de estacas. Umas simplificações têm que ser feitas, o solo é considerado elástico e a aderência entre a estaca e o solo é perfeita.

2.3.1.1. Análise para estacas flutuantes

O grupo de duas estacas idênticas é considerado. Cada estaca é dividida em n elementos cilíndricos e a base circular uniformemente carregada. Nas condições mencionadas, o deslocamento do centro de cada elemento vai ser igual ao deslocamento do solo. Assim, os deslocamentos do solo para uma estaca flutuante podem ser calculados de seguinte maneira:

$$\{{}_S\rho\} = \frac{d}{E_s}[{}_1I +{}_2 I]\{p\} \tag{0.14}$$

$\{_S\rho\}$ - vetor dos deslocamentos do solo;

$\{p\}$ - vetor das tensões cisalhantes;

$[_1I +_2 I]$ - matriz dos fatores de influência de (n+1) filas e (n+1) colunas, contendo os elementos $_1I_{ij} +_2 I_{ij}$;

$_1I_{ij}$, $_2I_{ij}$ - fatores de influência no elemento i da estaca 1 causados pela tensão cisalhante aplicada no elemento *j* da estaca 1 e estaca 2.

Os valores de $_1I_{ij}$ e $_2I_{ij}$ podem ser obtidos através da integração das equações de Mindlin para deslocamento vertical num espaço semi-homogêneo sob carregamento interno vertical.

Os deslocamentos do solo obtidos desta maneira podem ser igualados aos deslocamentos das estacas e a sistema das equações resultante resolvida para calcular os deslocamentos e as tensões cisalhantes ao longo das estacas. Assim, a análise do grupo de duas estacas é idêntica à de uma estaca, mas a matriz da influência de deslocamento do solo inclui a contribuição da segunda estaca.

Os resultados obtidos são representados através de fatores de interação:

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_j} \qquad (0.15)$$

α_{ij} - fator de interação;

ρ_j - recalque da estaca *j* sob carregamento próprio;

$\Delta\rho_{ij}$ - acrescimo do recalque na estaca *i* causado pela estaca *j*.

Os fatores de interação foram obtidos por POULOS & MATTES (1971) e são representados como a função do espaçamento adimensional *s/d* em forma de gráficos para diferentes valores da rigidez relativa *K* e índice de esbeltez *L/d*.

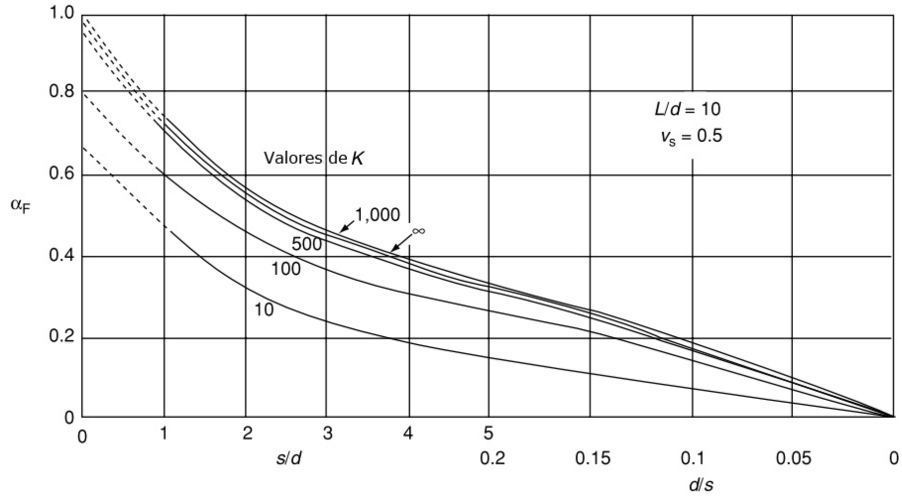

Figura 2.4 - Fator de interação vs. espaçamento relativo, *L/d* = 10, *v* = 0,5. (POULOS & DAVIS, 1980)

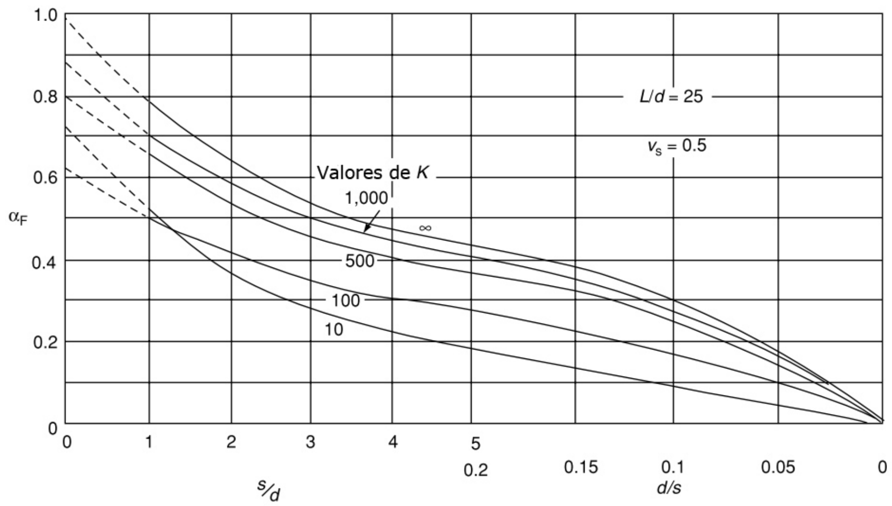

Figura 2.5 - Fator de interação vs. espaçamento relativo, *L/d* = 25, *v* = 0,5. (POULOS & DAVIS, 1980)

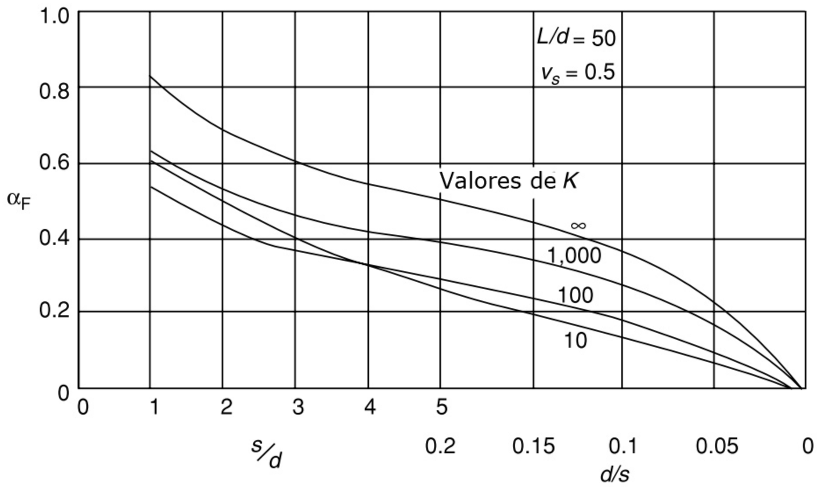

Figura 2.6 - Fator de interação vs. espaçamento relativo, *L/d* = 50, *v* = 0,5. (POULOS & DAVIS, 1980)

POULOS (2009) sugeriu a seguinte expressão aproximada para o cálculo dos fatores de interação:

$$\alpha = A \cdot \exp(-B \cdot (s / d)) \tag{0.16}$$

A, B – coeficientes.

Os estudos paramétricos feitos com utilização do programa DEFPIG possibilitaram achar as aproximações para os coeficientes *A* e *B* com uma precisão aceitável para fins gerais de engenharia:

$$A = A_1 \cdot A_b \cdot A_k \tag{0.17}$$

$$B = B_1 \cdot B_b \cdot B_k \tag{0.18}$$

A_1, B_1 – coeficientes dependentes da razão *L/d*;

A_b, B_b – coeficientes dependentes da razão entre os módulos de elasticidade do solo ao longo da fuste e abaixo da ponta da estaca;

A_k, B_k – coeficientes dependentes da razão entre a rigidez do solo e da estaca.

Através de ajuste de curvas foram obtidas as seguintes expressões para os coeficientes dados acima:

$$A_1 = 0.376 + 0.0014 \cdot (L / d) - 0.00002 \cdot (L / d)^2 \tag{0.19}$$

$$A_b = 1.254 - 0.326 \cdot \ln(E_b / E_s) \tag{0.20}$$

$$A_k = 0.099 + 0.126 \cdot \ln(K) \tag{0.21}$$

$$B_1 = 0.116 - 0.0164 \cdot \ln(L / d) \tag{0.22}$$

$$B_b = 0.865 + 0.164 \cdot \ln(E_b / E_s) \tag{0.23}$$

$$B_k = 1.409 - 0.055 \cdot \ln(k) \tag{0.24}$$

Alternativamente, foi desenvolvida outra expressão para a obtenção do fator de interação:

$$\alpha = C + D \cdot \ln(s / d) \tag{0.25}$$

Os coeficientes C e D podem ser aproximados da seguinte forma:

$$C = C_1 \cdot C_b \cdot C_k \quad (0.26)$$

$$D = D_1 \cdot D_b \cdot D_k \quad (0.27)$$

$$C_1 = 0,509 + (0,0007 \cdot (L/d) - 0,00002 \cdot (L/d)^2) \quad (0.28)$$

$$C_b = 1,145 - 0,2552 \cdot \ln(E_b / E_s) \quad (0.29)$$

$$C_k = 0,096 + 0,127 \cdot \ln(E_p / E_s) \quad (0.30)$$

$$D_1 = 0,0242 \cdot \ln(L/d) - 0,209 \quad (0.31)$$

$$D_b = 1,234 - 0,316 \cdot \ln(E_b / E_s) \quad (0.32)$$

$$D_k = 0,190 + 0,114 \cdot \ln(E_p / E_s) \quad (0.33)$$

2.3.1.1.1.
Efeito do estrato da espessura finita

Soluções para a obtenção do fator de interação α para um grupo de duas estacas incompressíveis em um estrato de solo de espessura h foram obtidas por POULOS (1968). Com base nestes resultados, fatores de correção N_h podem ser achados através do gráfico da Fig. 2.7.

Os fatores de interação para esse caso podem ser calculados da seguinte maneira:

$$\alpha = \alpha_F N_h \quad (0.34)$$

α_F - fator de interação para espaço semi-infinito.

Para o caso do grupo de duas estacas, o efeito de um estrato de solo é reduzir o valor do fator de interação α .

Os valores no gráfico são para o caso de L/d = 25 e $K = \infty$, mas ele pode ser aplicado para outros casos lembrando que com decremento de L/d o valor de N_h diminui com decréscimo de K o valor de N_h aumenta.

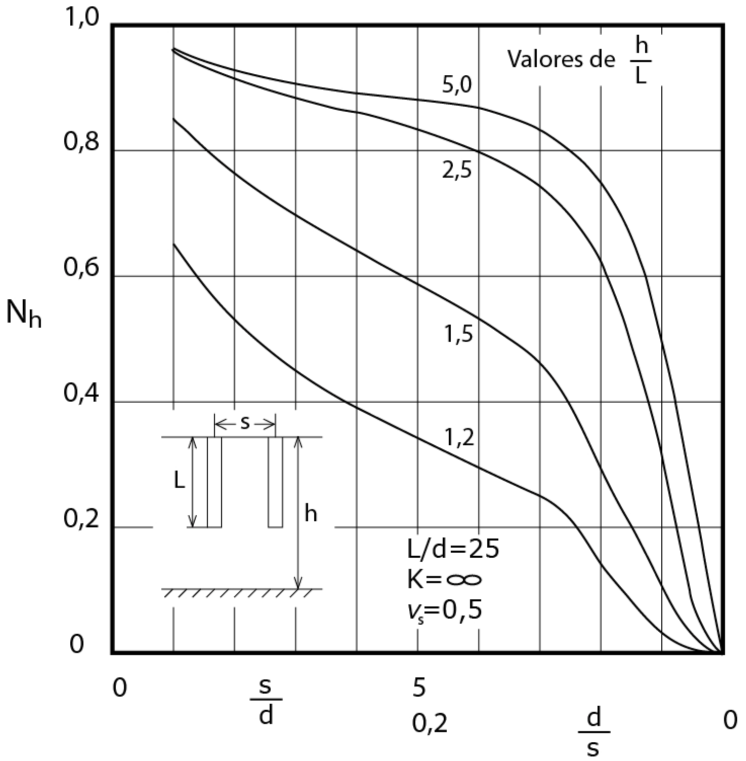

Figura 2.7 - Os fatores de correção devido à espessura finita da camada. (POULOS & DAVIS, 1980)

2.3.1.1.2. Efeito do alargamento da base da estaca

Fig. 2.8 mostra os fatores de correção devido a alargamento da base da estaca N_{db}. O fator de interação calcula-se:

$$\alpha = N_{db} \cdot \alpha_F \qquad (0.35)$$

α_F - fator de interação para $d_b/d = 1$.

A interação aumenta com o aumento do diâmetro da base das estacas, particularmente para estacas curtas. Os valores no gráfico são para estacas incompressíveis, a compressibilidade das estacas tende a reduzir o efeito.

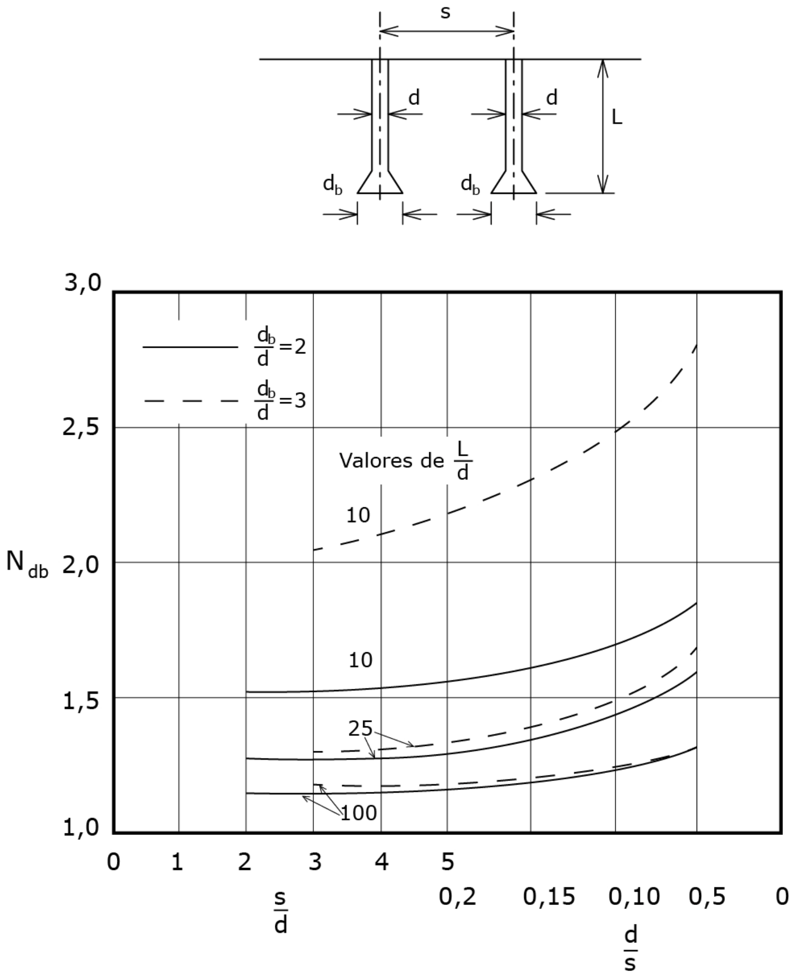

Figura 2.8 - O fator de correção devido a alargamento da base. (POULOS & DAVIS, 1980)

2.3.1.1.3. Efeito do coeficiente de Poisson

O efeito do coeficiente de Poisson pode ser levado em conta multiplicando o fator de interação pelo fator de correção N_ν, apresentado na Fig. 2.9:

$$\alpha = N_\nu \cdot \alpha_{0.5} \qquad (0.36)$$

$\alpha_{0.5}$ - fator de interação para $\nu = 0.5$.

O fator de correção aumenta com o decréscimo do coeficiente de Poisson, o que é mais notável no caso do espaçamento grande.

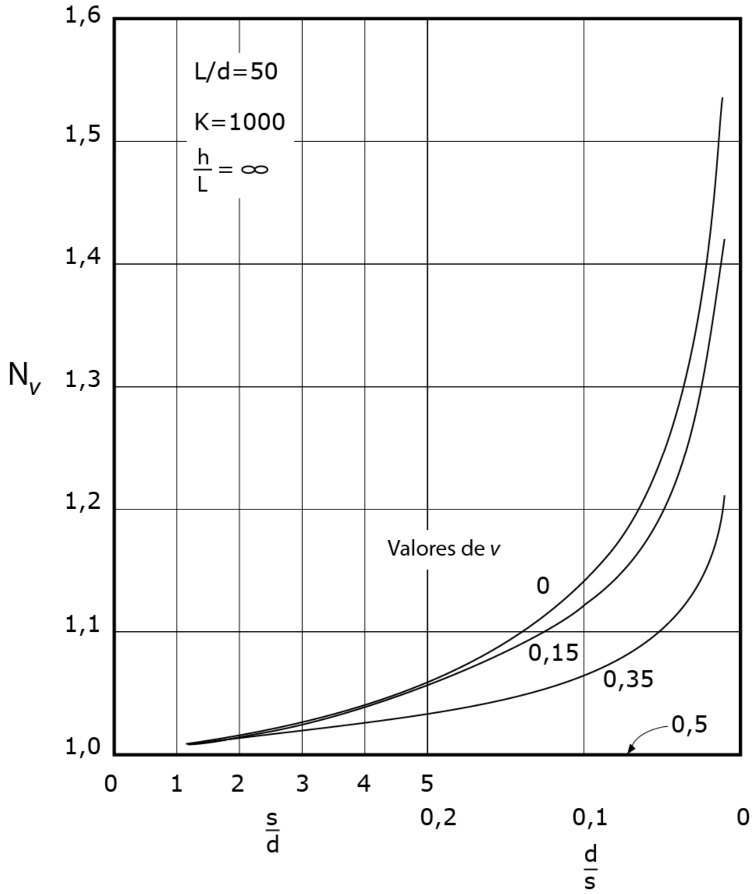

Figura 2.9 - Coeficiente de correção devido ao efeito do coeficiente de Poisson. (POULOS & DAVIS, 1980)

2.3.1.2.
Fator de interação para grupo de duas estacas idênticas de ponta

Para o caso de grupos de duas estacas de ponta, o fator de interação α pode ser relacionado com os fatores relativos a estacas flutuantes em um semi-espaço homogêneo, elástico, a_F, através de :

$$\alpha = \alpha_F \cdot F_E(\alpha_F - \alpha_E) \tag{0.37}$$

a_F - fator de interação para estacas flutuantes em um semi-espaço;

a_E - fator de interação para estacas de ponta;

F_E - fator dependente de K, L/d e E_b / E_s;

E_b - módulo de elasticidade do solo abaixo da ponta das estacas.

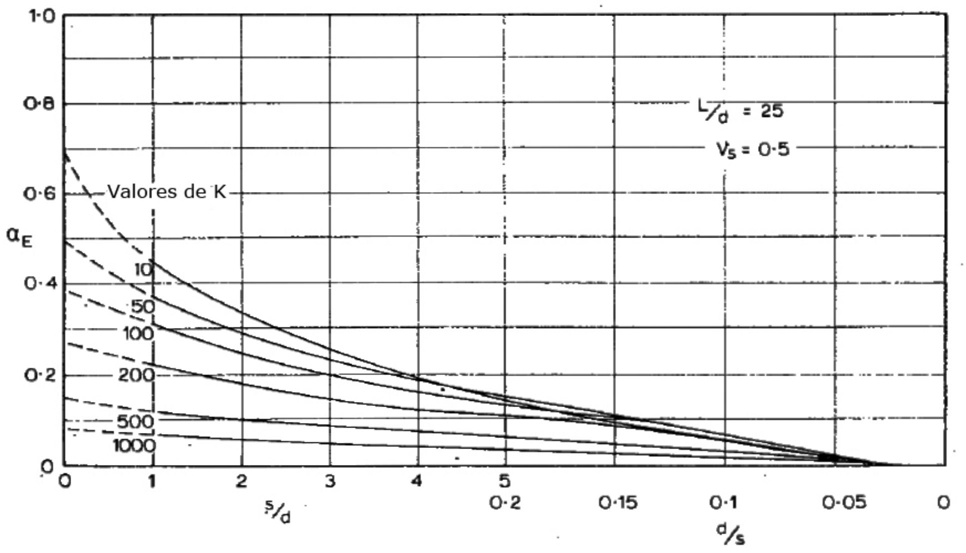

Figura 2.10 - Fator de interação para estacas de ponta para L/d = 25. (POULOS & DAVIS, 1980)

Os valores de F_E para o caso de L/d = 50 são mostrados na Fig. 2.11. Esses valores foram obtidos para espaçamentos relativos s/d = 5 e podem ser utilizados como aproximações para outras situações de s/d.

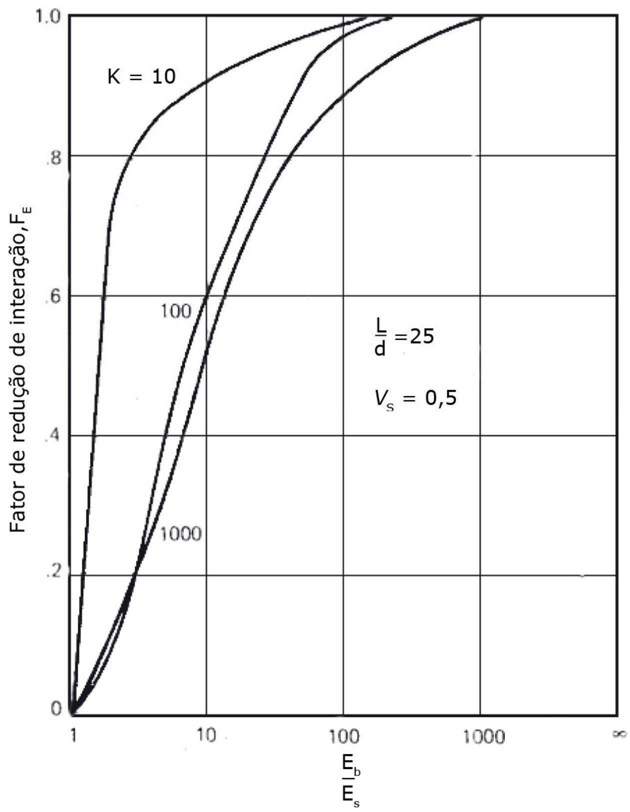

Figura 2.11 - Fator de redução de interação para estacas de ponta. (POULOS & DAVIS, 1980)

2.3.1.3. Análise para duas estacas de diâmetros diferentes

Para duas estacas *i* e *j*, conforme Fig. 2.12, com diâmetros diferentes, é razoável calcular o acréscimo no recalque da estaca *i*, em presença da estaca adjacente *j*, aproximadamente por:

$$\Delta\rho_{ij} = \rho_j \cdot \alpha_{ij} \tag{0.38}$$

$\Delta\rho_{ij}$ - acréscimo de recalque da estaca *i* ;

ρ_j - recalque da estaca *j* devido ao seu próprio carregamento;

α_{ij} - fator de interação dependente do espaçamento relativo *s/d* entre as estacas *i* e *j* e outros parâmetros geométricos (comprimento e diâmetro) da estaca *j*;

Similarmente, o aumento do recalque na estaca *j* causado pela estaca *i*, $\Delta\rho_{ji}$, é dado por:

$$\Delta\rho_{ji} = \rho_i \cdot \alpha_{ji} \tag{0.39}$$

$\Delta\rho_{ji}$ - acréscimo de recalque da estaca *j*;

ρ_i - recalque da estaca *i*, devido ao seu próprio carregamento;

α_{ji} - fator de interação dependente do espaçamento relativo *s/d* entre as estacas *i* e *j* e outros parâmetros geométricos (comprimento e diâmetro) da estaca *i*.

Em geral, para carregamentos iguais sobre as duas estacas *i* e *j*, $\Delta\rho_{ij}$ é diferente de $\Delta\rho_{ji}$.

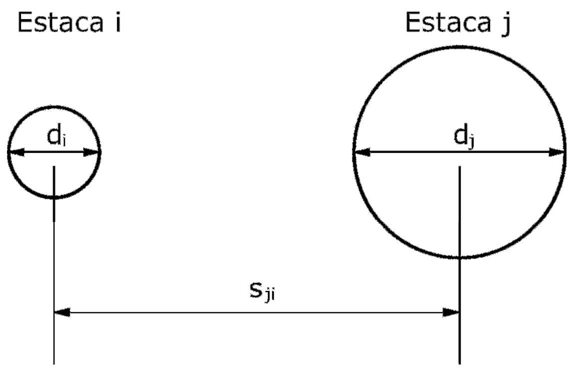

Figura 2.12 - Grupo de duas estacas de diâmetros diferentes.

2.3.1.4. Fator de interação modificado

Considerando o nível de deformação alto próximo às estacas e baixo no solo entre as mesmas, POULOS (1988) propôs a correção para o calculo dos fatores de interação. O nível da deformação influencia o valor do módulo da elasticidade, que é mais alto para baixa deformação.

Assim, para calcular o recalque da estaca isolada é usado o módulo de elasticidade do solo próximo a mesma (E_s). Para achar o acréscimo no recalque causado pelo carregamento das estacas vizinhas o valor médio do módulo de elasticidade (E_{sav}) é usado.

Fig. 2.13 mostra a distribuição do módulo de elasticidade no maciço do solo adotada por Poulos, onde o módulo de elasticidade aumenta linearmente com a distância a partir de um valor E_s, na interface estaca-solo, até um valor E_{sm} a uma distância s_t da face da estaca. Acima de s_t, o módulo de elasticidade do solo permanece constante.

Com essa distribuição do módulo de elasticidade, o valor médio do mesmo calcula-se de seguinte maneira:

1. Para $s \leq 2s_t + d$,

$$\frac{E_{sav}}{E_s} = 1 + 0.25(\mu - 1)\frac{(s-d)}{s_t} \qquad (0.40)$$

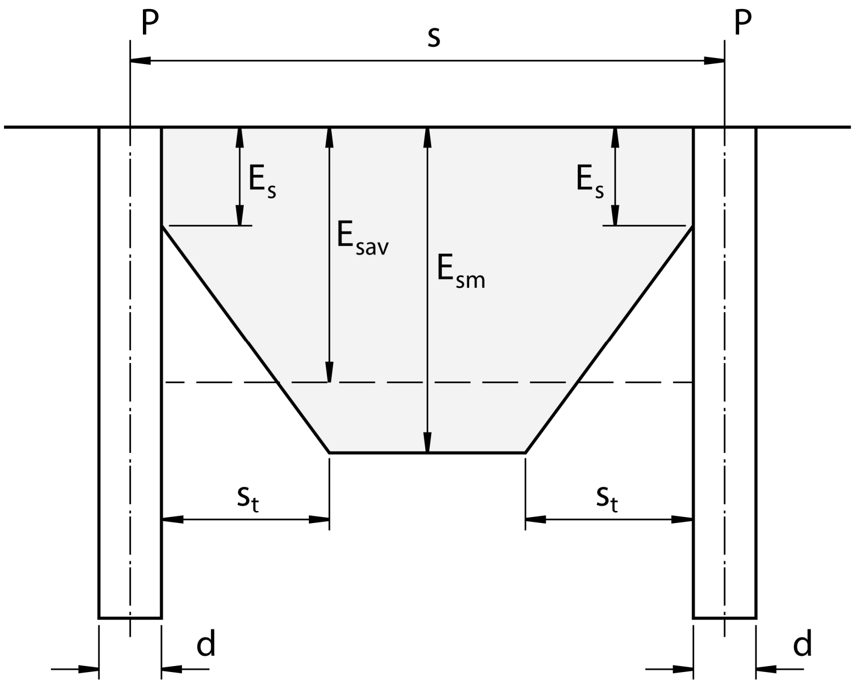

Figura 2.13 - A distribuição do módulo de elasticidade no maciço de solo proposta por POULOS (1988).

2. Para $s \geq 2s_t + d$,

$$\frac{E_{sav}}{E_s} = \mu + (1-\mu)\frac{s_t}{(s-d)} \tag{0.41}$$

$$\mu = \frac{E_{sm}}{E_s} \tag{0.42}$$

O valor do fator μ provavelmente se encontra na faixa entre 3 e 10, quando s_t na faixa de 3 - 6 diâmetros da estaca.

Através dos estudos paramétricos feitos por Poulos pode ser observado que com aumento de μ o fator de interação diminui e com aumento de *s/d* a redução relativa do mesmo aumenta. Também revelou-se que a consideração do efeito do módulo de elasticidade não uniforme causa a distribuição de carregamento no grupo mais homogênea.

2.3.1.5. Análise de grupo de estacas genérico

POULOS & DAVIS (1980) propõem que a análise para o grupo de duas estacas pode ser estendido para qualquer número de estacas no caso do comportamento idêntico das mesmas, ou seja, o grupo deve ser “simétrico”, do arranjo circular, as estacas devem ter a carga e o recalque iguais. A solução para esse tipo de grupo revelou que o recalque adicional de uma estaca causado pelas estacas vizinhas pode ser aproximadamente calculado através da superposição dos fatores de interação individuais. Porem, a superposição não pode ser considerada totalmente correta porque a adição de uma estaca muda o sistema elástico.

Deste modo o recalque ρ_i de uma estaca i em um grupo de n estacas, pode ser determinado como:

$$\rho_i = \rho_1 \sum_{j=1}^{n} P_j \cdot \alpha_{ji} \tag{0.43}$$

ρ_1 - recalque de uma estaca isolada sob carregamento unitário;

P_j - carga na estaca j ;

α_{ji} - fator de interação para o espaçamento s_{ij} (para $i = j$, $\alpha_{ji} = 1$).

A equação acima pode ser escrita para todas as estacas do grupo. Também, do equilíbrio das cargas verticais:

$$P_G = \sum_{j=1}^{n} P_j \tag{0.44}$$

P_G - carga total aplicada ao grupo de estacas.

Assim, $n + 1$ equações obtidas podem ser resolvidas para dois casos:

- Carregamento igual aplicado a todas as estacas, condição do bloco flexível.
- Recalque igual de todas as estacas, bloco rígido.

Para o primeiro caso, a equação (2.45) pode ser usada diretamente para o calculo dos recalques das estacas. Para o segundo caso as expressões para a obtenção dos recalques são igualados, que junto com a equação (2.45) vai resultar num sistema de $n + 1$ equações que pode ser resolvido para as cargas desconhecidas e os recalques. Na maioria dos casos o numero de equações pode ser reduzido devido à simetria do grupo de estacas.

Para simplificar o procedimento de cálculo no caso do bloco rígido é sugerido que seja escolhida uma estaca representativa (que não seja no centro ou na extremidade do grupo) e avaliado o seu recalque admitindo-se que todas as demais estacas do grupo suportem o mesmo carregamento.

A análise representada requer o conhecimento de valores dos fatores de interação e o recalque de uma estaca isolada. Os resultados podem ser representados de duas formas:

Em termos do índice de recalque:

$$R_s = \frac{\rho_{med}}{\rho_{1med}} \tag{0.45}$$

ρ_{med} - recalque médio do grupo;

ρ_{1med} - recalque de uma estaca isolada com a mesma carga média do grupo,

$$\rho_{1med} = \rho_1 P_{med} \tag{0.46}$$

P_{med} - carga média do grupo.

Em termos do fator de redução do recalque,

$$R_G = \frac{\rho_{med}}{\rho_{1tot}} \tag{0.47}$$

ρ_{1tot} - recalque de uma estaca isolada com a mesma carga total do grupo. Para um grupo de M estacas o índice de recalque R_s, relaciona-se com o fator de redução do grupo R_G :

$$R_G = \frac{R_s}{M} \tag{0.48}$$

O valor de R_G representa a redução no valor do recalque previsto, quando se utiliza um grupo de estacas ao invés de uma estaca isolada para suportar o mesmo carregamento.

O índice de recalque R_s é mais utilizado na prática, mas o fator de redução R_G tem vantagens quando usado para comparar o comportamento dos grupos com a mesma carga total e o número de estacas diferente.

Assim, o recalque do grupo de estacas pode ser calculado através das grandezas estabelecidas acima:

$$\rho_G = R_s P_{med} \rho_1 \qquad (0.49)$$

$$\rho_G = R_G P_G \rho_1 \qquad (0.50)$$

2.3.1.6. Efeito da compressibilidade da camada subjacente

Em casos onde o solo apresenta um perfil estratificado e se verifica a presença de uma camada de maior compressibilidade abaixo da ponta da estaca, a parcela de recalque correspondente a esta camada deve ser considerada no cálculo do recalque total do grupo de estacas.

POULOS & MATTES (1971) sugerem uma técnica para levar em consideração esta contribuição na determinação do recalque:

- Calcula-se o recalque do grupo de estacas, utilizando-se as soluções paramétricas de POULOS (1968), para estimativa do índice de recalque R_s;
- Substitui-se o grupo de estacas por um tubulão isolado equivalente (por exemplo, de mesma seção transversal em relação ao grupo de estacas e de comprimento equivalente L_{eq}), de tal maneira que os recalques do grupo e do tubulão sejam iguais;
- Calcula-se a contribuição de recalque devido às camadas subjacentes em função do tubulão equivalente e de fatores de influência de recalque determinados pela teoria da elasticidade.

Para um grupo de estacas situado em uma camada que está sobrejacente a n camadas compressíveis, o recalque ρ pode ser expresso como:

$$\rho = \rho_G + \frac{P_G}{L_{eq}} \sum_{k=1}^{n} \frac{I_k - I_{k+1}}{E_{sk}} \qquad (0.51)$$

ρ_G - recalque do grupo de estacas devido à compressibilidade das camadas ao longo do fuste;

P_G - carga total do grupo;

L_{eq} - comprimento do tubulão equivalente;

I_k - coeficiente de influência dos fatores de recalque em relação ao eixo do tubulão equivalente, no nível da camada k;

E_{sk} - módulo da elasticidade da camada k.

POULOS (1977) comenta que o efeito de h/L_{eq} no valor do fator de influência I é pequeno para o caso de $v_s = 0.5$, sendo esta influência praticamente insignificante para $h/L_{eq} > 1.75$.

2.3.1.7.
Método teórico de obtenção do índice de recalque para o cálculo do recalque de grupos de estacas

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, torna-se praticamente impossível apresentar soluções paramétricas para todos os casos de interesse prático. POULOS (1977) apresentou resultados paramétricos relacionando valores dos índices de recalque R_s para grupo de estacas flutuantes em um semi-espaço homogêneo e grupo de estacas de ponta em um estrato de espessura h.

Em geral, o índice de recalque R_s aumenta com o decréscimo do espaçamento entre as estacas e o aumento do número das mesmas. Para grupos de estacas flutuantes, um aumento da rigidez relativa K causa um aumento do índice de recalque R_s, enquanto para um grupo de estacas de ponta isso tende a reduzir R_s.

A configuração das estacas dentro de um grupo não influencia significativamente o valor de R_s. Para os grupos que contém mais de 16 estacas observa-se que o valor de R_s varia aproximadamente linearmente com a raiz quadrada do número de estacas do grupo.

Assim, POULOS (1968), utilizando determinados valores de *K* e *L/d*, estabelece uma formulação para o índice de recalque R_s, obtida a partir da extrapolação de valores de grupos de 16 e 25 estacas:

$$R_s = (R_{25} \cdot R_{16})(\sqrt{n} \cdot 5) + R_{25} \quad (0.52)$$

R_{25} - valor do índice de recalque R_s para um grupo de 25 estacas;

R_{16} - valor do índice de recalque R_s para um grupo de 16 estacas;

n – número de estacas do grupo.

POULOS (1968) observou que o recalque do grupo de estacas em um meio relativamente uniforme depende inicialmente da forma geométrica do bloco e do número de estacas. Porém verifica-se que para uma determinada geometria de grupo, a eficiência deste tipo de fundação tende a ser pouco significativa na redução do recalque, a menos que o espaçamento relativo entre as estacas seja mantido em $s/d \geq 6$. Diversos fatores podem também influenciar na determinação do valor do índice de recalque R_s, tais como: a espessura do estrato de solo *h*, a compressibilidade da camada de solo subjacente ao grupo de estacas de ponta, o coeficiente de Poisson, o contato do bloco com a superfície do terreno e a distribuição do módulo de elasticidade do solo no maciço de solo.

2.3.1.7.1.
Efeito da espessura do estrato do solo

O efeito da espessura do estrato *h* tende a reduzir o valor do índice de recalque R_s no caso de grupos de estacas flutuantes. O coeficiente de redução é definido como:

$$\xi_h = \frac{R^h{}_s}{R_s} \quad (0.53)$$

$R^h{}_s$ - o índice de recalque para um estrato de espessura h;

R_s - o índice de recalque para semi-espaço infinito.

O coeficiente de redução diminui com decréscimo de *h/L* e aumento de *L/d*. O efeito da espessura do estrato de solo *h* cresce com o aumento do tamanho e redução de rigidez relativa do grupo de estacas.

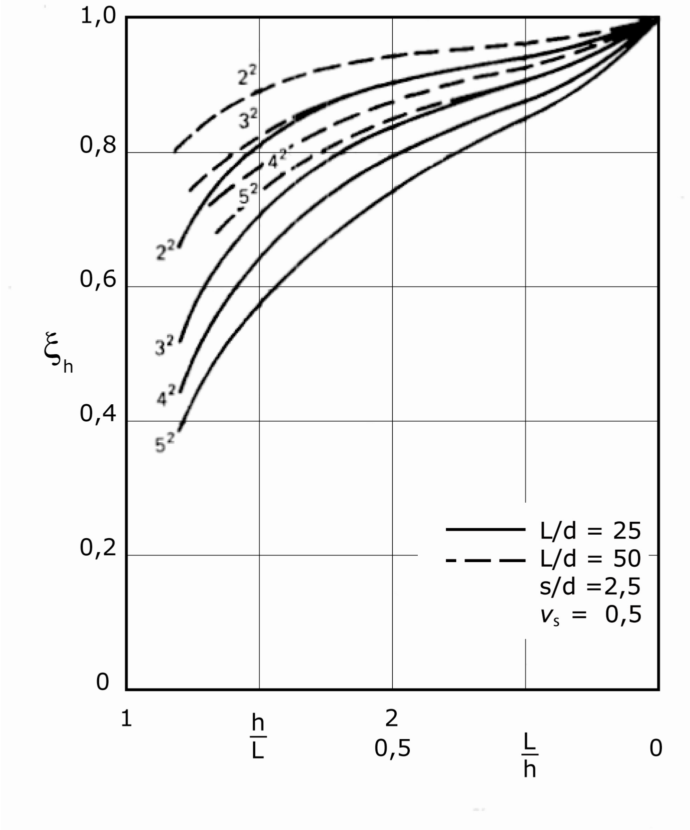

Figura 2.14 - Coeficiente de redução devido ao efeito da espessura do estrato do solo. (POULOS & DAVIS, 1980)

2.3.1.7.2.
Efeito da compressibilidade da camada subjacente

POULOS (1977) define um coeficiente de redução ξ_b, variável com o índice E_b/E_s, (módulo da camada abaixo da base do grupo de estacas em relação ao módulo de elasticidade do solo ao longo do fuste das estacas), através de:

$$\xi_b = \frac{R^b{}_s}{R_s} \tag{0.54}$$

$R^b{}_s$ - o índice de recalque de um grupo de estacas de ponta;

R_s - o índice de recalque de um grupo de estacas flutuantes.

O valor do coeficiente ξ_b tende a diminuir com o aumento da rigidez relativa da base E_b/E_s, sendo este efeito mais evidente para grupos de estacas curtas ($L/d \leq 25$). Para grupos de estacas esbeltas ($L/d \geq 100$), com elevados valores de rigidez relativa K, o efeito da espessura do estrato de solo h é praticamente insignificante no valor do recalque de grupos de estacas.

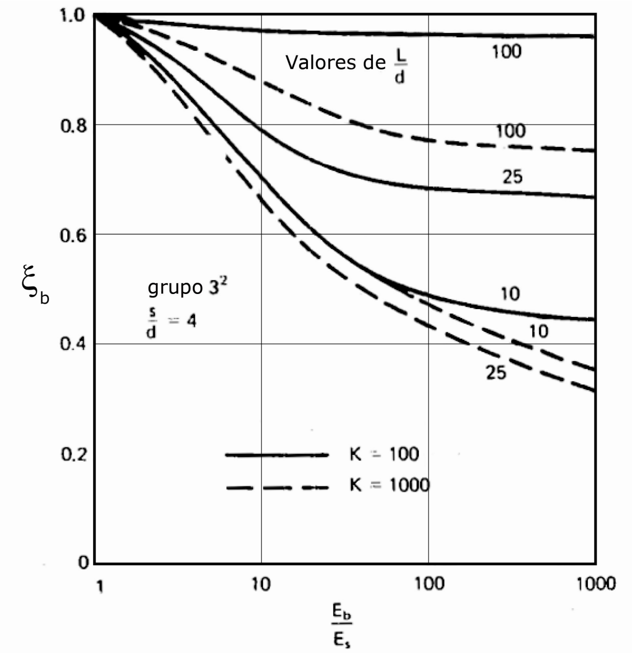

Figura 2.15 - Coeficiente de redução para o efeito da camada carregada. (POULOS & DAVIS, 1980)

Conforme a razão E_b/E_s aproxima-se ao infinito, o índice de recalque para um grupo de estacas de ponta tende ao índice de um grupo de estacas flutuantes.

2.3.1.7.3. Efeito do coeficiente de Poisson

O valor do coeficiente de redução é definido como sendo:

$$\xi_v = \frac{R^v{}_s}{R_s} \tag{0.55}$$

ξ_v aumenta com decréscimo do coeficiente de Poisson. Quando ocorre a drenagem, o valor de ν_s diminui de 0.5 para o coeficiente drenado, assim o valor do índice de recalque aumenta, o efeito sendo mais notável para grupos com maiores números de estacas.

2.3.2.
Análise através do método de camadas finitas

No método de camadas finitas, desenvolvido por SOUTHCOTT & SMALL (1995), o solo é dividido em camadas de extensão horizontal infinita. O deslocamento tem que ser obtido na interface de cada camada. Para modelar a aplicação de carga ao longo do fuste da estaca, o anel uniformemente carregado é usado. O carregamento da base é representado pela carga pontual da magnitude igual à tração normal na ponta da estaca.

A estaca é idealizada como uma série de elementos lineares que possuem nós correspondentes às interfaces das camadas.

Na representação do sistema estaca - solo os poços feitos pelas estacas não são modelados. Esse fato é considerado desprezível porque o solo é substituído pelas estacas que são muito mais rígidas.

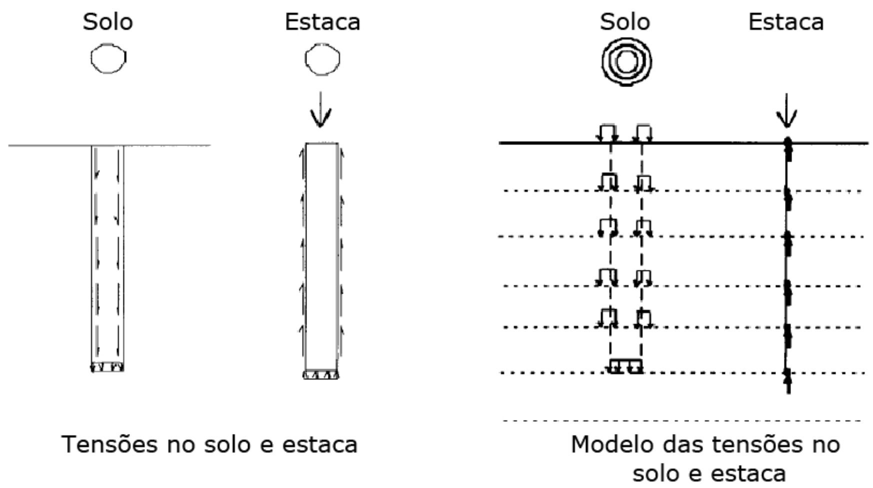

Figura 2.16 - Modelo do sistema solo-estaca usado no método de camadas finitas. (SOUTHCOTT & SMALL, 1995)

Para simplificar as equações que constituem a matriz de rigidez do solo a transformada de Henkel foi usada. Assim o problema se reduz a uma dimensão.

Assumindo que os deslocamentos do solo $\{\delta_s\}$ e da estaca $\{\delta_p\}$ são iguais nos nós e na base e as forças são iguais e opostas obtém-se:

$$[[K_p]+[K_s]]\{\delta\}=\{P\} \tag{0.56}$$

$$[K]\{\delta\}=\{P\} \tag{0.57}$$

$\{\delta\}$ - vetor de deslocamentos dos nós;

$[K]=[K_p]+[K_s]$ - matriz de rigidez combinada solo-estaca;

$\{P\}=\{P_p\}+\{P_s\}=\{p_1, 0, ..., 0, p_n, ..., 0\}^T$ - o vetor dos carregamentos aplicados;

p_n - carregamento aplicado à cabeça da estaca *n*.

O método de camadas finitas foi usado para obter o fator de interação α entre duas estacas idênticas, uma das quais foi sujeita ao carregamento unitário.

$$\alpha=\frac{s_i}{s_j} \tag{0.58}$$

s_i - o recalque da estaca não carregada *i* causado pela estaca carregada *j*;

s_j - o recalque da estaca *j* sob o carregamento próprio.

Os fatores de interação obtidos são apresentados nas Figs. 2.17, 2.18 e 2.19.

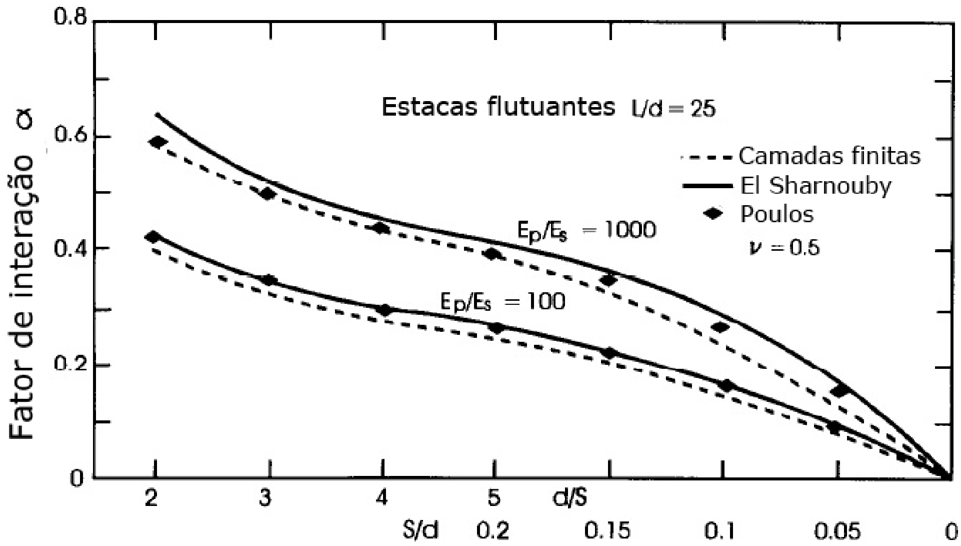

Figura 2.17 - O fator de interação vs. espaçamento relativo, L/d = 25. Comparação com os resultados de EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e de POULOS (1968). (SOUTHCOTT & SMALL, 1995)

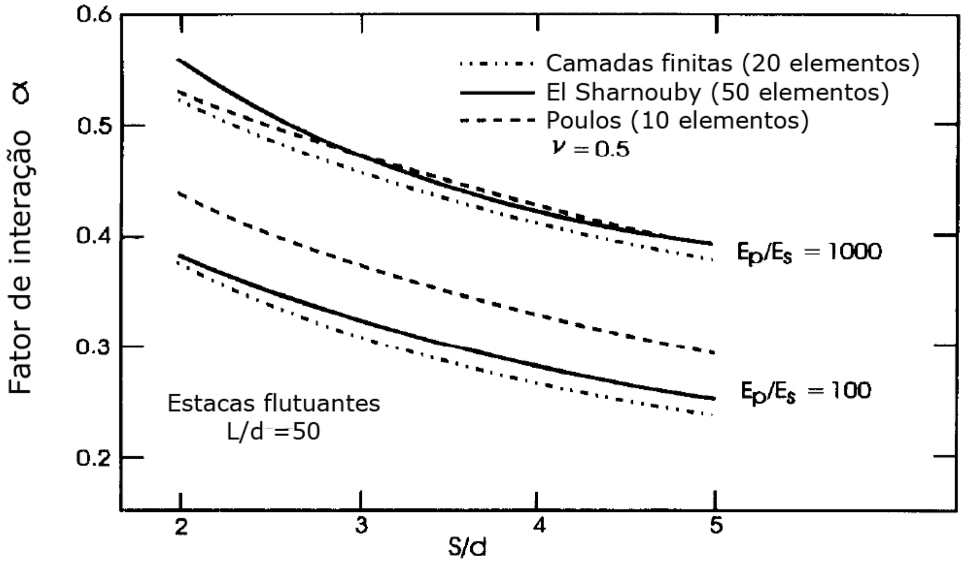

Figura 2.18 - O fator de interação vs. espaçamento relativo, L/d = 50. Comparação com os resultados de EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e de POULOS (1968). (SOUTHCOTT & SMALL, 1995)

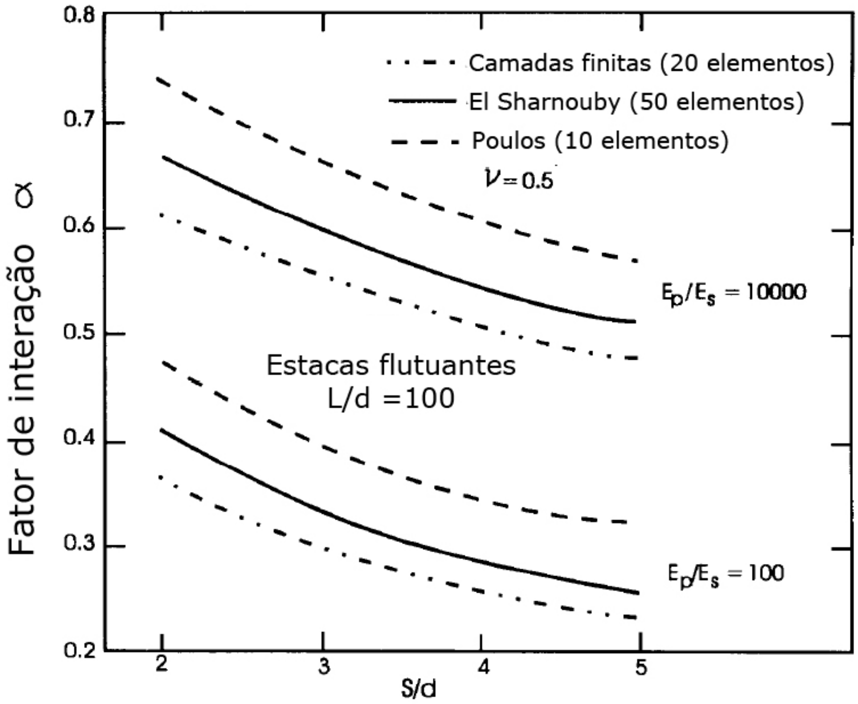

Figura 2.199 - O fator de interação vs. espaçamento relativo, L/d = 100. Comparação com os resultados de EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e de POULOS (1968). (SOUTHCOTT & SMALL, 1995)

Os gráficos mostram a boa concordância entre os valores dos fatores de interação para *L/d* = 25 e 50 obtidos por EL SHARNOUBY & NOVAK (1990) e pelo método de camadas finitas (SOUTHCOTT & SMALL, 1995).

A Fig. 2.20 representa os fatores de interação obtidos para as estacas de ponta pelo método de camadas finitas e por EL SHARNOUBY & NOVAK (op. cit.) plotados contra a razão entre os módulos de elasticidade do solo E_s e da base rígida. O sistema analisado inclui a fila de cinco estacas com espaçamento *s/d* = 2.5, *L/d* = 25.

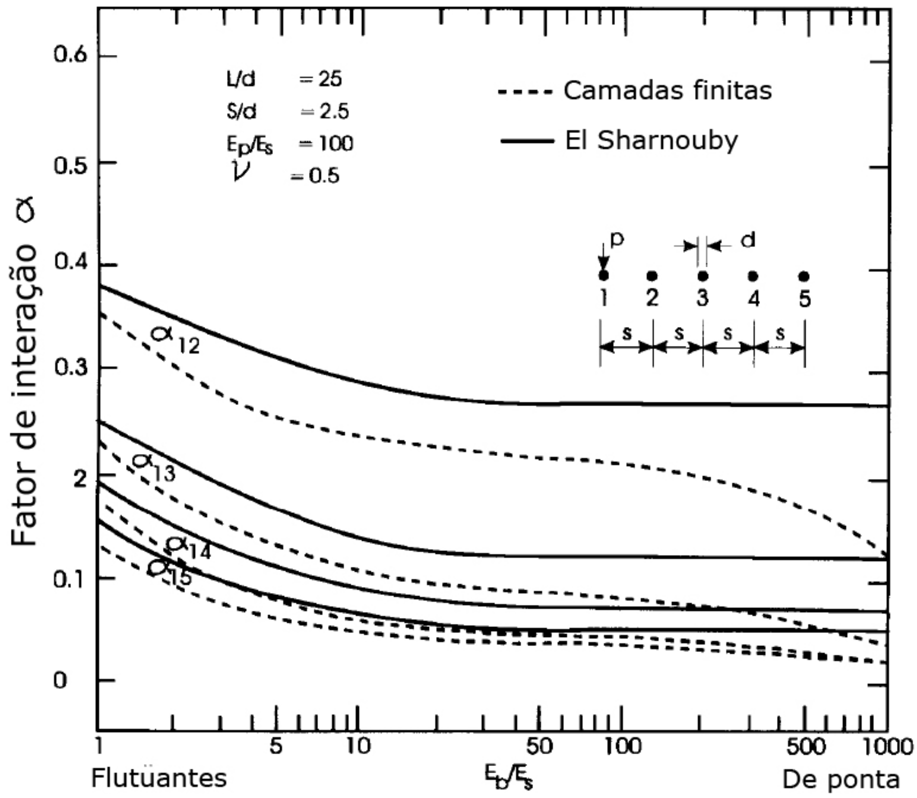

Figura 2.20 - Os fatores de interação para cinco estacas de ponta comparação entre os resultados do método de camadas finitas e de EL SHARNOUBY & NOVAK (1990). (SOUTHCOTT & SMALL, 1995)

2.3.3. Método de estacas fictícias

Geralmente, nos métodos de análise de recalque o efeito do aumento de rigidez devido à instalação de estacas é desprezado. MING & LONG-ZHU (2008) fizeram uma proposta para incluir esse efeito na análise de um grupo de estacas usando o método de estacas fictícias.

O problema é modelado através da decomposição do sistema solo – estacas em maciço de solo estendido e duas estacas fictícias. A equação integral de Fredholm de segunda ordem determina a distribuição das deformações axiais causadas pelas forças interativas do solo estendido ao longo dos eixos centroidais das localizações originais das estacas. Determinadas as forças axiais nas estacas fictícias, podem ser obtidas as distribuições de forças nas estacas reais e os recalques do grupo de duas estacas sob cargas verticais idênticas.

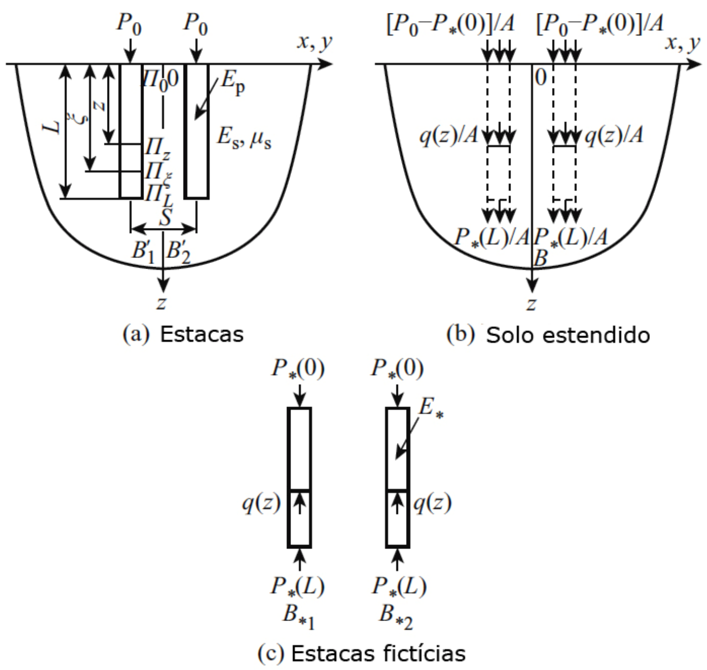

Figura 2.21 - Modelo de grupo de duas estacas. (MING & LONG-ZHU, 2008)

Para resolver as equações necessárias, as estacas têm que ser divididas em n elementos. Os autores Cao Ming e Chen Long-zhu estudaram a influência do número dos elementos no valor do fator de interação obtido através do parâmetro δ:

$$\delta = \frac{nd}{L} \tag{0.59}$$

Foi concluído que o valor de $\delta \geq 4$ é suficiente para obter os resultados satisfatórios.

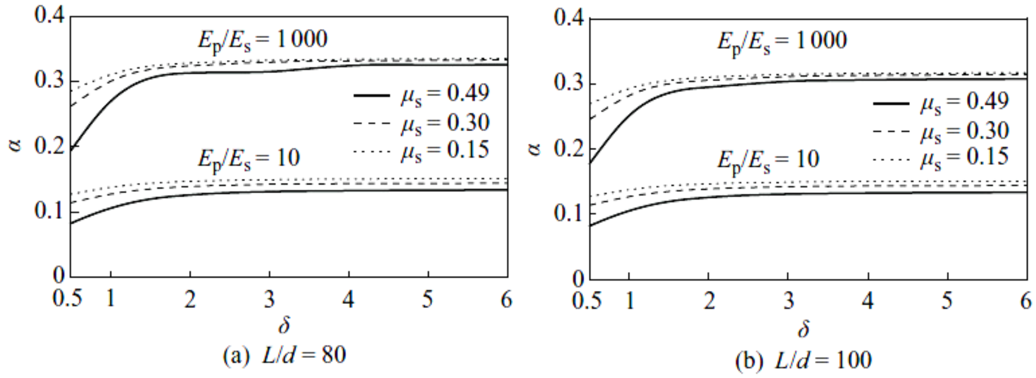

Figura 2.22 - A influência do número de elementos no valor do fator de interação. (MING & LONG-ZHU, 2008)

Os fatores de interação obtidos pelos autores são representados em dependência do espaçamento relativo para diferentes razões de E_p/E_s e índice de esbeltez na Fig. 2.23.

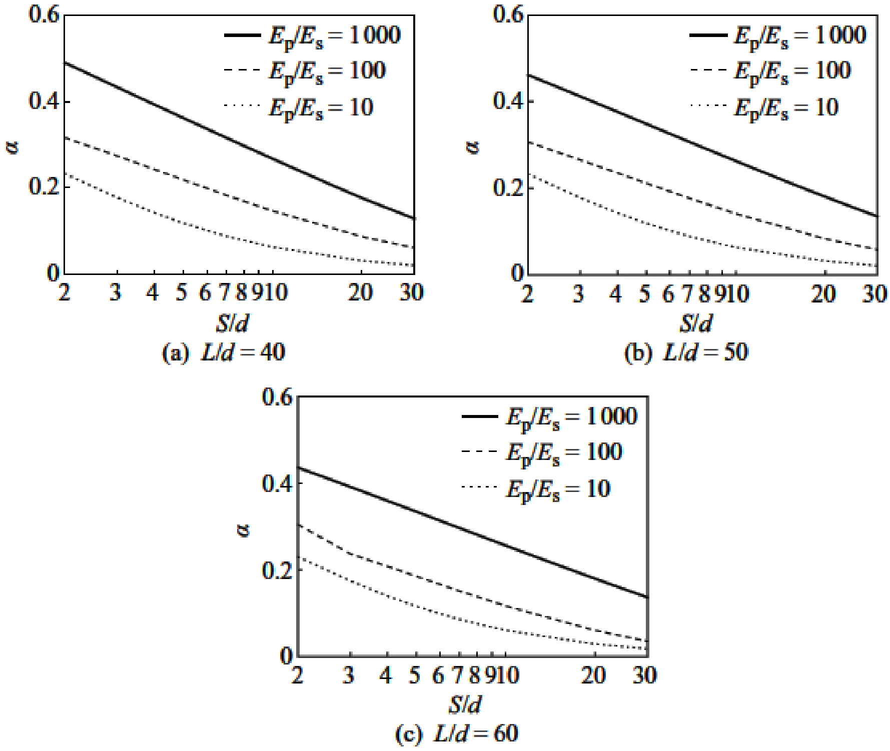

Figura 2.23 - Os fatores de interação vs. espaçamento relativo para L/d = 40, 50 e 60. (MING & LONG-ZHU, 2008)

2.3.4. Método baseado na aproximação de Winkler

Um método simplificado para obter a solução analítica para o calculo dos recalques da fundação profunda foi proposto por MYLONAKIS & GAZETAS (1998). O método é baseado na aproximação de Winkler, onde o solo é representado por um conjunto de molas. Os valores da tensão cisalhante e a pressão na base são considerados como proporcionais ao recalque local. Esse método mostrou uma correlação boa com os resultados das análises numéricas mais rigorosas. Além disso, os estudos de Mylonakis (2001) revelaram uma expressão de forma fechada que descreve a relação entre a constante da mola e do módulo elástico cisalhante.

Na solução original de RANDOLPH & WROTH (1978) os deslocamentos verticais foram representados através de uma função logarítmica decrescente com o aumento da distância entre a estaca e o ponto de interesse. Assim a tensão cisalhante no fuste da estaca pode ser representada em termos do deslocamento local como sendo:

$$\tau = \frac{2G\rho}{\ln\left(\frac{2r_m}{d}\right)d} \tag{0.60}$$

r_m - raio de influência, fora do qual o recalque pode ser desprezado. No caso geral do solo não homogêneo:

$$r_m \approx \chi_1 \chi_2 L(1-\nu) \tag{0.61}$$

χ_1, χ_2 - fatores empíricos dependentes de não homogeneidade do solo.

Os valores numéricos dos fatores χ_1 e χ_2 são discutidos por RANDOLPH & WROTH (1978). É recomendado usar χ_1= 2.5 para estacas em hemisfério homogêneo e χ_1= 2 para solo com a base rígida na profundidade de 2,5*L*, para solo homogêneo $\chi_2 \approx$ 1 e para o solo de Gibson $\chi_2 \approx$ 0.5. Entretanto, a rigidez da estaca isolada não é bastante insensível ao valor exato do raio r_m.

O coeficiente de Winkler *k*, que relaciona a força transferida ao solo pela estaca por comprimento unitário e o deslocamento local, é dado por:

$$k = \frac{\pi d \tau}{w} = \frac{2\pi G}{\ln\left(\frac{2r_m}{d}\right)} = \delta G \tag{0.62}$$

O coeficiente k não é a propriedade do solo, mas depende de caraterísticas do solo e da estaca e muda com profundidade, inclusive numa camada homogênea. Para fins práticos a seguinte aproximação é adotada. A razão *k(z)/G* é considerada a ser constante ao longo da profundidade.

Empregando a regressão linear baseada no método de Levenberg - Marquardt for derivada a equação a seguir:

$$\delta = \frac{k}{G} \approx 1.3\left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{-0.025}\left(1+7\left(\frac{L}{d}\right)^{-0.6}\right) \tag{0.63}$$

A rigidez resultante da estaca, $K = P/w_t$, onde P é a carga na cabeça da estaca e w_t é o deslocamento da superfície, pode ser expressa:

$$K = E_p A_p \lambda \frac{\Omega + \tanh(\lambda L)}{1 + \Omega \tanh(\lambda L)} \tag{0.64}$$

O termo $E_p A_p \lambda$ é igual à rigidez da estaca de comprimento infinito. Os parâmetros Ω e λ representam a rigidez adimensional da base da estaca e o índice de esbeltez da estaca respeitivamente:

$$\Omega = \frac{P_b}{w_b E_p A_p \lambda} \tag{0.65}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{E_p A_p}} \tag{0.66}$$

Adotando os argumentos de RANDOLPH & WROTH (1978), é suficiente considerar que a base da estaca atua como um disco rígido na superfície da camada elástica homogênea. A relação força – deslocamento correspondente é expressa do seguinte modo:

$$K_b = \frac{P_b}{W_b} \approx \frac{dE_b}{1-\nu_b^2}\left(1+0.65\frac{d}{h_b}\right) \qquad (0.67)$$

O termo entre parênteses leva em consideração a presença da base rígida que se encontra na profundidade h_b abaixo da ponta da estaca.

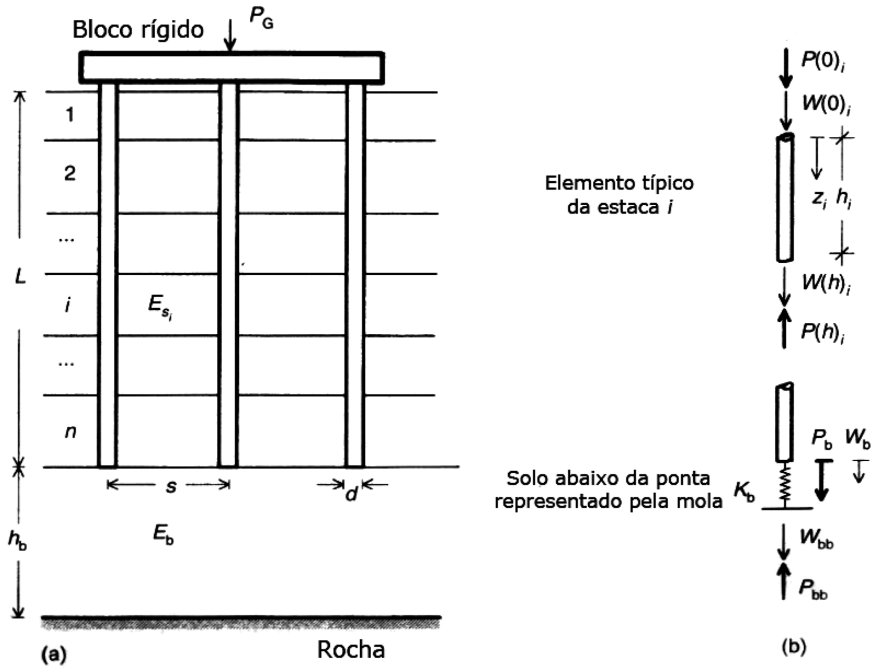

Figura 2.244 - Modelo de a) um grupo de estacas no solo estratificado b) transferência de carga ao longo da estaca. (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

2.3.4.1. Interação entre duas estacas

Para achar o fator de interação entre duas estacas é preciso primeiro determinar o campo de deslocamento ao redor de uma estaca carregada. Assumindo como a aproximação o estado de deformação plana, obtém-se a variação logarítmica do deslocamento vertical do solo U_s com a distância radial s. A função de atenuação se expressa como:

$$\psi(s) = \frac{U_s(s,z)}{U_s(d/2,z)} \tag{0.68}$$

$$\psi(s) = \begin{cases} \dfrac{\ln(r_m) - \ln(s)}{\ln(2r_m) - \ln(d)} & \dfrac{d}{2} < s < r_m \\ \\ 0 & s \geq r_m \end{cases} \tag{0.69}$$

A função $\psi(s)$ não depende da profundidade.

Considerando que as estacas são muito mais rígidas do que o solo e que a estaca não carregada segue exatamente o campo de deslocamentos gerado pela estaca carregada, o fator de interação será igual a $\psi(s)$, o seja, a solução obtida por RANDOLPH & WROTH (1979).

MYLONAKIS & GAZETAS (1998) apontam várias incertezas que essa solução implica como o fato que as estacas por serem rígidas e por causa da reação da ponta não recalcam assim como impõe o campo de deslocamentos gerado pelas estacas vizinhas. Eles propuseram um método alternativo, que envolve três estágios (Fig. 2.25):

1. A estaca fonte é sujeita a uma carga axial na ponta. Aplicando qualquer método analítico, o perfil de deslocamento $W_{11}(z)$ ao longo da estaca é obtido.

2. É aceito que a atenuação de deslocamento com a distância radial acontece conforme descrito pela função $\psi(s)$. Assim, se a estaca “receptora” não existisse, o deslocamento no lugar dela seria:

$$U_s(s,z) \approx W_{11}(z)\psi(s) \tag{0.70}$$

3. A presença da estaca receptora modifica, geralmente reduz o deslocamento. Para representar esse efeito, a estaca receptora é modelada em forma de uma viga suportada pelas molas de Winkler. O mecanismo de transferência de carga aqui é invertido, ou seja, o solo impõe o deslocamento à

estaca. A resposta $W_{21}(z)$ da estaca receptora predefine um fator de interação que pode ser expresso como:

$$\alpha = \frac{W_{21}(z=0)}{W_{21}(z=1)} \tag{0.71}$$

No caso particular de uma camada homogênea o fator de interação obtém-se através de uma expressão explícita:

$$\alpha = \psi(s)\zeta(h\lambda, \Omega) \tag{0.72}$$

$$\alpha = \left(\frac{\ln(r_m / s)}{\ln(2r_m / d)} \right) \zeta \tag{0.73}$$

$$\zeta = \frac{2\lambda L + \sinh(2\lambda L) + \Omega^2[\sinh(2\lambda L) - 2\lambda L] + \Omega[\cosh(2\lambda L) - 1]}{2\sinh(2\lambda L) + 2\Omega^2 \sinh(2\lambda L) + 4\Omega \cosh(2\lambda L)} \tag{0.74}$$

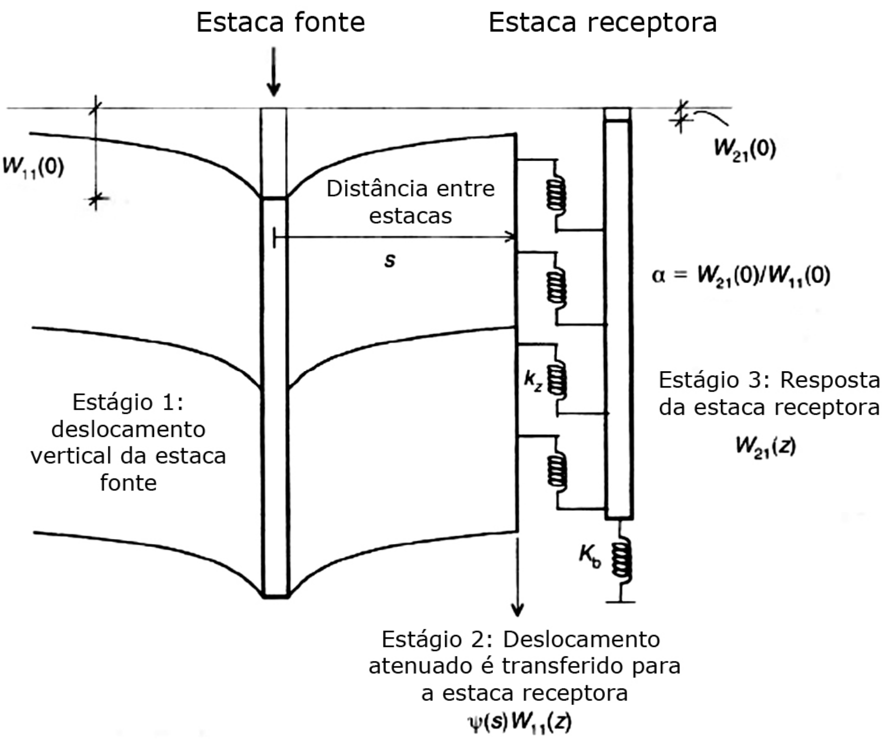

Figura 2.255 - Modelo proposto para o cálculo da influência de uma estaca carregada na estaca vizinha. (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

A função ψ define o campo de deslocamento induzido, quando a função ζ (também chamada de fator de difração) representa o efeito de rigidez da estaca e a interação da mesma com o solo. É interessante observar o comportamento assintótico da função ζ. Para uma estaca de ponta o parâmetro da rigidez da base Ω se torna infinito e a função se simplifica a:

$$\zeta = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{2h\lambda}{\sinh(2h\lambda)}\right) \tag{0.75}$$

No caso de uma estaca flutuante o parâmetro Ω desaparece e:

$$\zeta = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2h\lambda}{\sinh(2h\lambda)}\right) \tag{0.76}$$

Para uma estaca de comprimento infinito a função ζ passa ser igual a 0,5, ou seja o fator de interação se reduz à metade.

2.3.4.2.
Interação entre as bases das estacas

Fora do caso de estacas flutuantes, o campo de deslocamentos é gerado pelas pontas das estacas também, a função de atenuação do qual é dada como:

$$\psi_b(s) = \frac{U_s(s,L)}{U_s(d/2,L)} \approx \frac{d}{\pi s} \tag{0.77}$$

A interação entre as estacas pode ser incluída assumindo que o deslocamento gerado pela estaca fonte arrasta para baixo a base da "receptora". Criando essa condição de contorno adicional, o fator de interação complementar α_b pode ser obtido. No caso de uma camada homogênea:

$$\alpha_b = \psi_b(s)\zeta_b(h\lambda, \Omega) \tag{0.78}$$

$$\zeta_b = \frac{2\Omega}{2\Omega\cosh(2h\lambda) + \sinh(2h\lambda)(\Omega^2 + 1)} \tag{0.79}$$

Como a função $\psi_b(s)$ decresce inversamente à distância radial s quando a função $\psi(s)$ decresce logaritmicamente, o deslocamento da base da estaca afeta a região consideravelmente menor. Além disso, a interação solo-base reduz o fator de interação α_b. Para casos práticos, o valor de α_b é de ordem de 10^{-3}, consequentemente, a interação entre as bases pode ser desprezada.

Nas Figs. 2.26 e 2.27 o fator de interação para solo homogêneo é plotado em termos de espaçamento relativo e comparado com os resultados correspondentes de POULOS & DAVIS (1980).

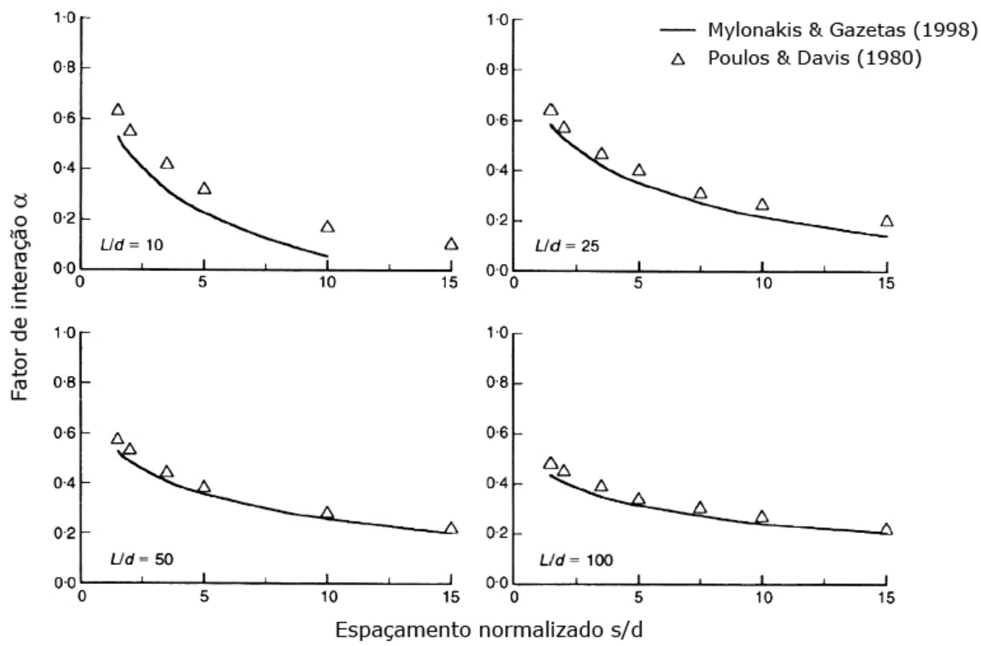

Figura 2.26 - Os fatores de interação para estacas flutuantes para diferentes índices de esbeltez, E_p/E_s = 1000, v_s = 0.5. Comparação com os resultados de POULOS & DAVIS (1980). (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

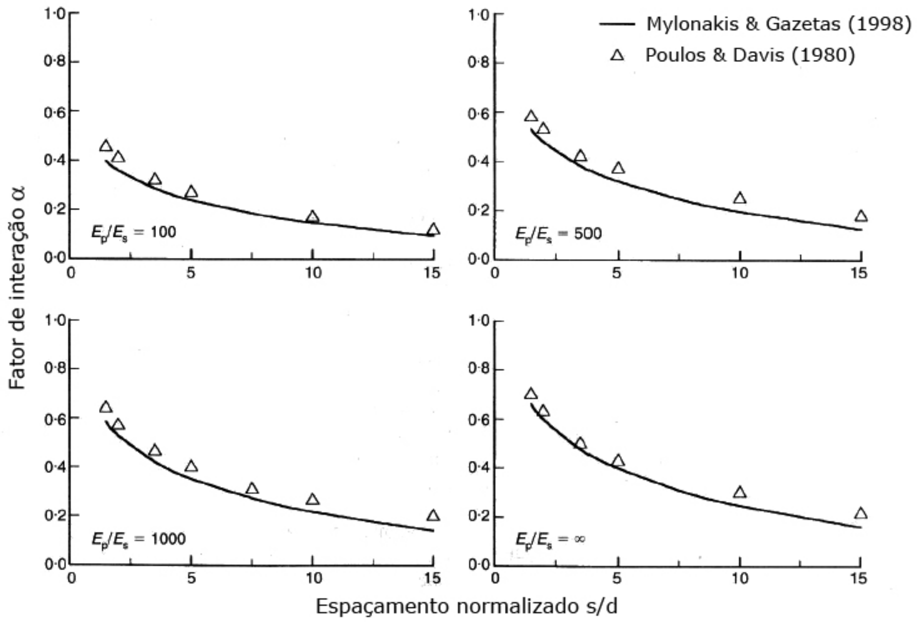

Figura 2.27 - Os fatores de interação para estacas flutuantes para diferentes razões de E_p/E_s, L/d = 25, ν_s = 0.5. Comparação com os resultados de POULOS & DAVIS (1980). (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

2.3.4.3. Fator de interação para solo estratificado

Para levar em consideração o caso do solo estratificado a seguinte equação matricial pode ser introduzida:

$$\begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{W_{11}(h)}{P_{11}(h)} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \dfrac{W_{21}(h)}{P_{21}(h)} \end{Bmatrix} \end{Bmatrix}_i = \begin{bmatrix} [L] & [0] \\ [LI] & [L] \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{W_{11}(0)}{P_{11}(0)} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \dfrac{W_{21}(0)}{P_{21}(0)} \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \quad (0.80)$$

$[L]$ e $[LI]$ são matrizes de transferência que são referentes à resposta da estaca isolada e à interação entre as estacas respeitivamente.

No caso de n camadas do solo é necessário aplicar a equação anterior camada por camada, impondo a condição de continuidade em cada interface:

$$\begin{Bmatrix} W_{21} \\ P_{21} \end{Bmatrix}_{bb} = \begin{bmatrix} FI_{\alpha\alpha} & FI_{\alpha\beta} \\ FI_{\beta\alpha} & FI_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_{11}(0) \\ P_{11}(0) \end{Bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} FI_{\alpha\alpha} & FI_{\alpha\beta} \\ FI_{\beta\alpha} & FI_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_{21}(0) \\ P_{21}(0) \end{Bmatrix}_1 \quad (0.81)$$

O símbolo *bb* denomina a base da “mola” na ponta da estaca receptora. O primeiro produto matricial na parte direita da equação é a quantidade conhecida correspondente ao “termo de forças” produzido pela estaca fonte. Desprezando a interação entre as bases das estacas, o deslocamento na base da “mola” que suporta a base da estaca receptora é nulo ($W_{21bb} = 0$). Além disso, o deslocamento unitário na cabeça da estaca fonte ($W_{11}(0)_1 = 1$) requer a força igual à rigidez da estaca isolada K ($P_{11}(0)_1 = K$). Caso essa força seja aplicada, o deslocamento resultante da estaca não carregada ($P_{21}(0)_1 = 0$) será igual ao fator de interação α ($W_{21}(0)_1 = \alpha$). Substituindo essas condições de contorno na equação matricial anterior, obtém-se o fator de interação.

2.3.4.4.
Análise para grupo de estacas

Para um caso geral de um grupo de *m* estacas idênticas com bloco rígido, o recalque pode ser obtido através da força resultante:

$$P_G = \sum_{i=1}^{m} P_i = [\{1\}^T [A]^{-1} \{1\}] D_G = K_G D_G \qquad (0.82)$$

[A] – matriz de fatores de interação de tamanho *m* x *m* ;

[1] – vetor unitário de tamanho *m* x 1;

P_G – força resultante;

D_G – recalque do grupo.

2.3.4.5.
Forças adicionais internas no grupo de estacas

Os métodos de cálculo de recalque do grupo de estacas baseados nos fatores de interação geralmente assumem que cada estaca do grupo é submetida somente a uma parcela de carga aplicada no bloco. MYLONAKIS & GAZETAS (1998) apontaram que a interação entre as estacas não só causa um recalque adicional mas também induz uma tração cisalhante ao longo do fuste (Fig. 2.28).

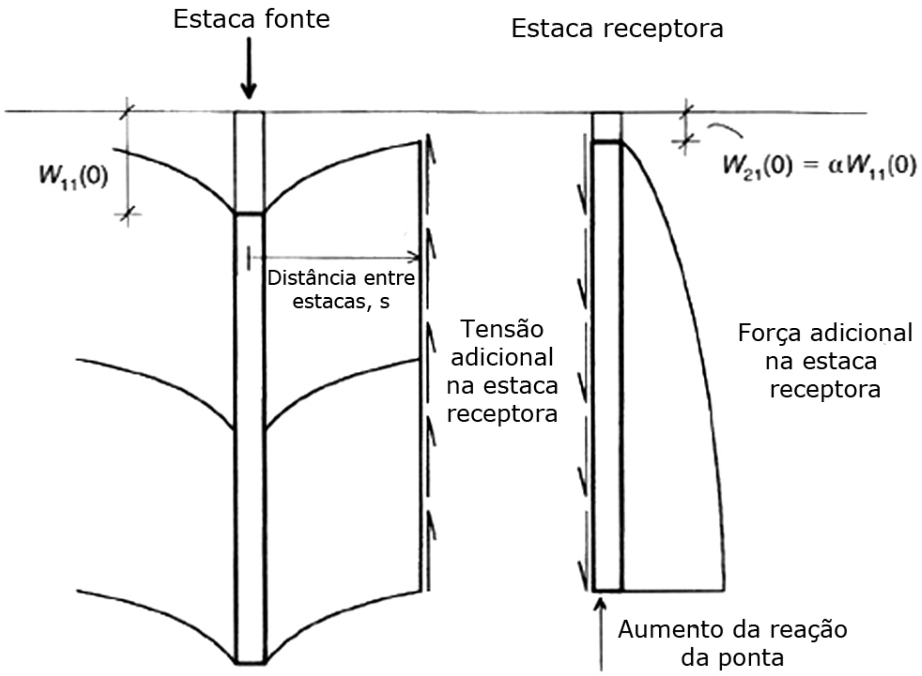

Figura 2.28 - Esquema do mecanismo que impõe as forças adicionais na estaca receptora. (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)

O campo de deslocamento gerado arrasta para baixo a estaca receptora analogamente à ação da fricção negativa. A força axial adicional criada pela tração tende a aumentar com a profundidade e, junto com a carga na cabeça da estaca, resulta na distribuição de força axial mais uniforme ao longo do fuste. O fato que a parcela de carga transmitida para a ponta da estaca isolada é menor do que em um grupo pode ser explicado através de maior interação entre os fustes das estacas do que entre as bases. Assim, certa parte de carga fica redistribuída dentro de um grupo.

No caso de uma camada de solo a força axial adicional ao longo da estaca receptora pode ser obtida da seguinte maneira:

$$P_{21}(z) = \frac{P_{11}(0)E_pA_p\lambda}{K}\left[\left(\frac{\psi}{4} - \frac{\psi K}{4E_pA_p\lambda}\right)(1+\lambda z)e^{\lambda z} - \left(\frac{\psi}{4} + \frac{\psi K}{4E_pA_p\lambda}\right)\cdot\right.$$
$$\left.\cdot(1-\lambda z)e^{-\lambda z} - \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\psi K}{4E_pA_p\lambda}\right)e^{\lambda z} + \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\psi K}{4E_pA_p\lambda}\right)e^{-\lambda z}\right] \quad (0.83)$$

As forças adicionais são sensíveis à condição de contorno na ponta da estaca. A rigidez da mola que representa o solo abaixo da estaca parece ser o fator determinante de desenvolvimento da tensão adicional. Assim, para as estacas flutuantes que não têm reação na base, as forças adicionais são insignificantes. Entretanto, no caso das estacas de ponta a base rígida permite somente a interação pequena assim que a força adicional passa a ser 25% da força na cabeça da estaca.

A influência da rigidez da base é ilustrada na Fig. 2.29. A força adicional calculada depois da redução da rigidez a 80% diminuiu em 10% apesar de aumento do fator de interação.

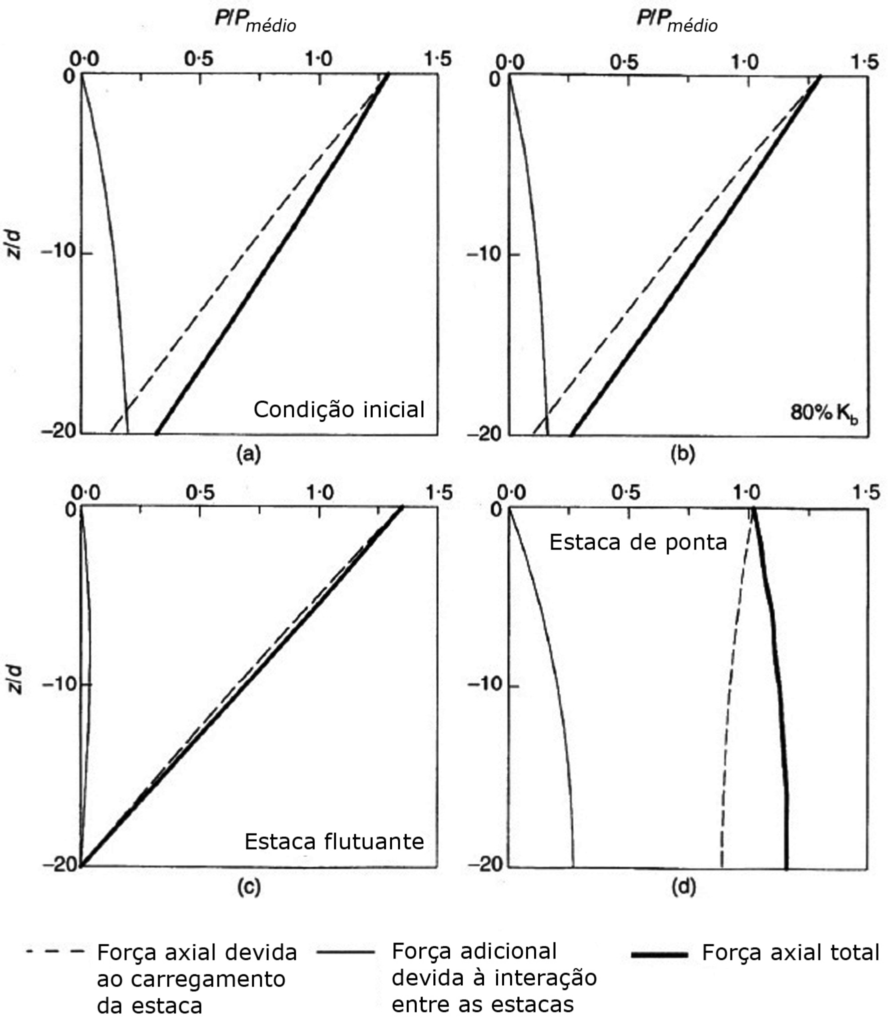

Figura 2.29 - A distribuição da força axial ao longo das estacas do centro e do canto de um grupo 3 x 3 no solo homogêneo para várias condições de contorno, E_p/E_s = 1000, L/d = 20, v_s = 0,5, s/d = 5. (MYLONAKIS & GAZETAS, 1998)