

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Em grande parte dos projetos de radiers estaqueados, a disposição das estacas é baseada em procedimentos de natureza empírica, embora alguns esquemas de configuração, baseados em formulações teóricas, tenham sido propostos para reduzir recalques diferenciais. Randolph (1994) mostrou, com base na análise de resultados obtidos anteriormente por Randolph & Clancy (1993) através do método dos elementos finitos, que os recalques diferenciais podem ser eficientemente reduzidos ao se distribuir várias estacas ao redor do centro do radier. Esse conceito foi experimentalmente comprovado por Horikoshi & Randolph (1996, 1998) através de ensaios de modelos em centrífuga e um extenso estudo paramétrico.

Esse trabalho tem como objetivo o estudo da influência do arranjo das estacas em radiers estaqueados com base nos resultados de um estudo paramétrico, no qual diversas características físicas e mecânicas tais como rigidez do radier, dimensões das estacas e parâmetros elásticos do solo foram consideradas. A filosofia de projeto tem como foco principal o uso de estacas dispostas de forma adequada na região central do radier, com o objetivo de minimizar os recalques diferenciais.

4.2. MODELAGEM DE RADIERS ESTAQUEADOS COM O PROGRAMA ABAQUS

A metodologia de análise adotada neste trabalho para obtenção dos valores de recalque em radiers e em radiers estaqueados foi desenvolvida com base na utilização do programa de simulação numérica ABAQUS, versão 6.2.

ABAQUS consiste de dois módulos principais de análise – ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit. Nesse trabalho foi utilizado o ABAQUS/Standard, um módulo de análise geral que pode resolver uma ampla gama de problemas lineares e não-lineares.

Uma análise completa no ABAQUS/Standard usualmente consiste de três estágios distintos: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Esses três estágios são conectados por meio de arquivos como mostra a Figura 4. 1.

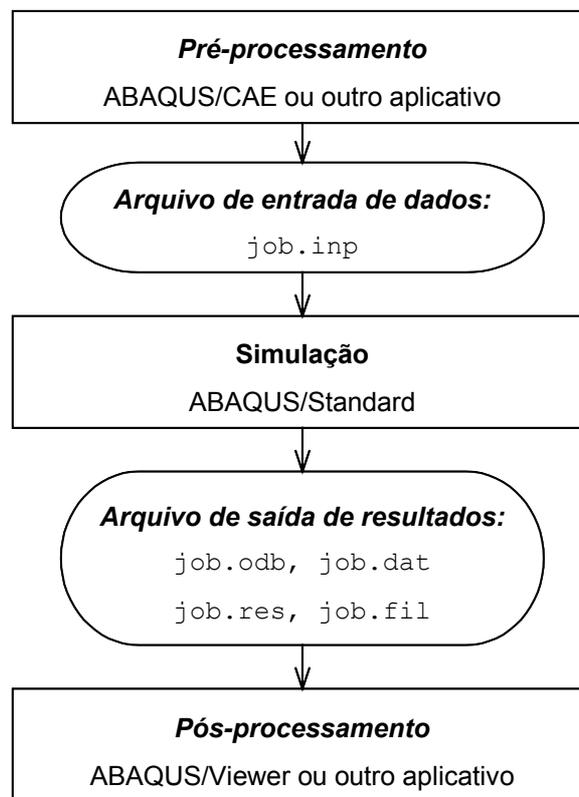


Figura 4. 1 – Estágios de análise do ABAQUS/Standard.

4.2.3. Características do modelo

Geometria

A geometria básica dos problemas analisados nesse trabalho é definida por três componentes distintos: o radier, as estacas (em número variável) e o solo. Para modelagem do radier foram utilizados elementos de placa de quatro nós (Figura 4. 2 (a)) com integração reduzida, enquanto que para modelagem do

conjunto estacas/solo foram utilizados elementos sólidos tridimensionais de 8 nós (Figura 4. 2 (b)) com integração completa.

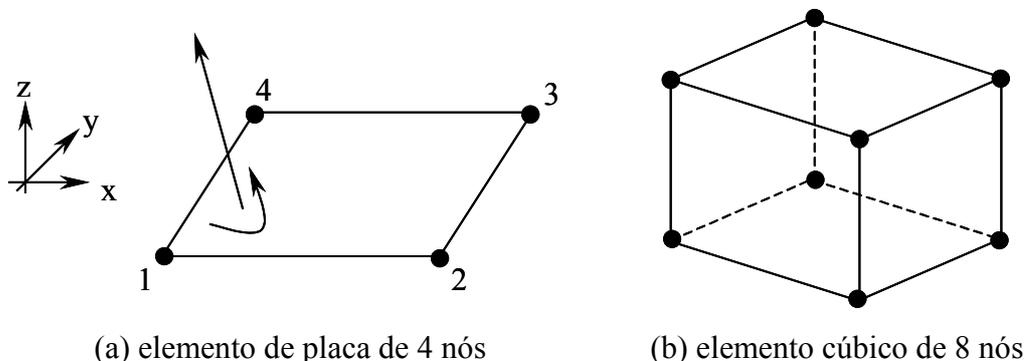


Figura 4. 2 – Elementos utilizados na modelagem do radier estaqueado.

As propriedades dos materiais que formam esses elementos foram definidas em termos dos respectivos módulos de Young e coeficientes de Poisson, admitindo-se como elástico linear e isotrópico o comportamento das estacas, do solo e do radier.

A distribuição do carregamento na superfície do radier, assim como as condições de contorno aplicadas à geometria do problema serão devidamente explicitadas para cada caso analisado a seguir.

4.2.4. Características especiais da modelagem

Os elementos de placa usados para modelagem do radier são elementos de placa que permitem consideração da deformação cisalhante transversa, utilizando a teoria de placa espessa ou delgada dependendo da espessura do radier em relação a sua área. A opção por integração reduzida deve-se ao fato de que normalmente fornece resultados precisos (desde que os elementos não sejam distorcidos e sejam carregados no plano de flexão) em menores tempos de processamento, especialmente em problemas tridimensionais. O método de integração usado com elementos de placa é a regra de Simpson com 5 pontos de integração.

A modelagem do contato entre a base do radier e a superfície do solo e o topo das estacas é feita através de restrições (“ties”) impostas entre os diferentes graus de liberdade do modelo, fazendo com que todos os graus de liberdade ativos sejam iguais em dois nós distintos. Se existirem graus de liberdade ativos diferentes nesses dois nós, somente aqueles de mesma natureza serão restringidos, ou seja, nesse caso apenas os deslocamentos. O contato entre corpos é então definido em termos de duas superfícies deformáveis que podem interagir, chamadas “par de contato”. Para cada nó da primeira superfície do par de contato (“superfície escrava”) o ABAQUS busca o nó mais próximo da segunda superfície (“superfície mestre”) onde a normal à essa superfície passa através do nó na “superfície escrava” (Figura 4. 3). A interação é então discretizada entre os nós da “superfície mestre” e da “superfície escrava”. No caso em questão, onde ambas as superfícies são deformáveis, o usuário deve definir qual delas será a “superfície mestre” e qual será a “superfície escrava”. Geralmente, a “superfície mestre” deve ser escolhida como a superfície do corpo mais rígido ou como a superfície que possui a malha mais grosseira se ambas as superfícies pertencerem a estruturas com rigidez comparáveis. Dessa forma, sendo o radier a estrutura mais rígida, a sua base foi definida como “superfície mestre”, enquanto que a outra superfície de contato (conjunto estacas/solo) foi definida como “superfície escrava”.

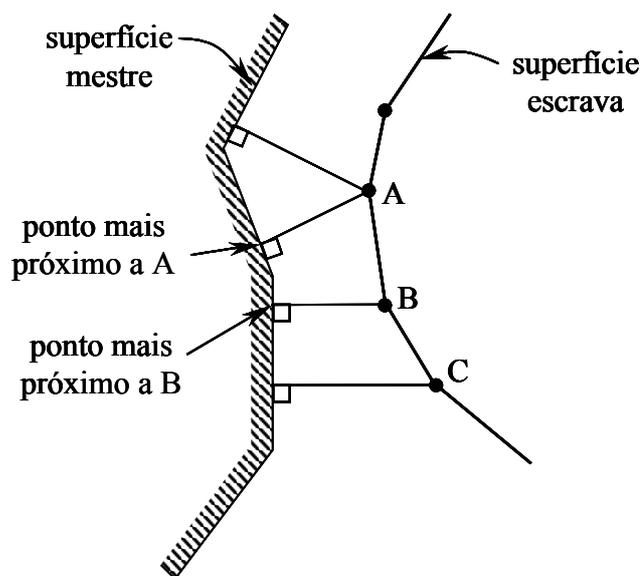


Figura 4. 3 – Discretização da interação e do contato entre as superfícies “mestre” (base do radier) e “escrava” (topo da superfície do conjunto estacas/solo).

4.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PRINCIPAIS

Cada caso estudado é definido pela carga, o tipo de fundação e o tipo de solo considerado. Cada um desses fatores é caracterizado por um certo número de parâmetros que serão definidos a seguir.

4.3.3. Parâmetros que definem o carregamento aplicado

Nos problemas estudados o carregamento pode ser definido através da intensidade q de uma carga uniformemente distribuída sobre uma fundação circular de raio R , como pode ser observado na Figura 4. 4.

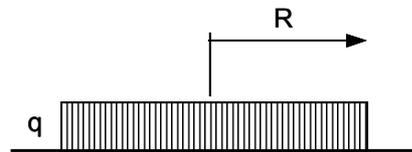


Figura 4. 4 – Parâmetros que definem o carregamento aplicado.

4.3.4. Parâmetros que definem a fundação

A fundação é constituída por dois elementos: o radier e as estacas (Figura 4. 5). O radier é definido pelo raio R , espessura t , módulo de Young E_r e coeficiente de Poisson ν_r enquanto as estacas são definidas pelo diâmetro d , comprimento L , módulo de Young E_p e coeficiente de Poisson ν_p . O radier e as estacas são construídos em concreto armado.

4.3.5. Parâmetros que definem o solo

O solo estudado consiste de uma camada elástica linear, isotrópica, de espessura h (Figura 4. 6). Os parâmetros elásticos (módulo de Young E_s e coeficiente de Poisson ν_s) são considerados constantes para toda a massa, o que pode caracterizar um meio homogêneo ou um meio estratificado representado por um meio homogêneo equivalente (Poulos, 1979; Yamashita *et al.*, 1987).

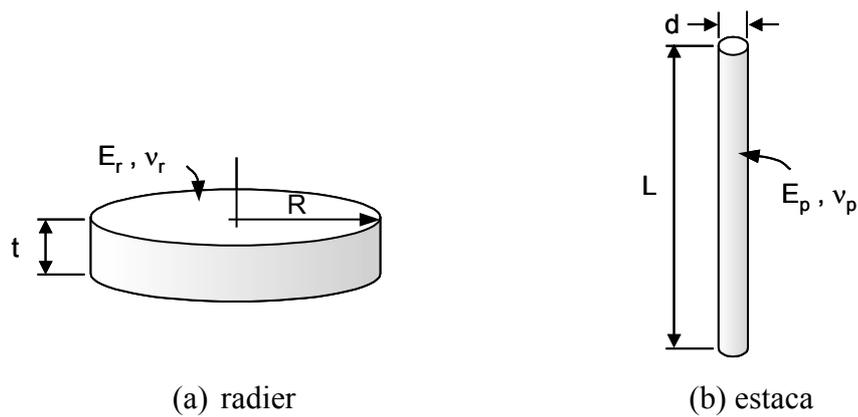


Figura 4. 5 – Parâmetros que definem a fundação.

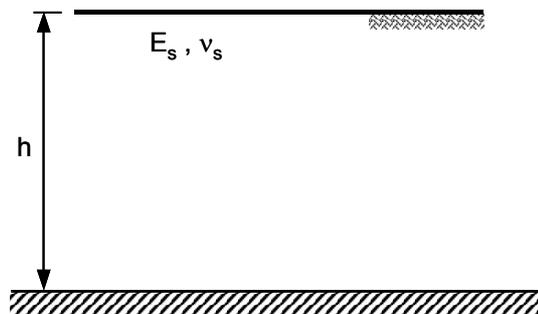


Figura 4. 6 – Parâmetros que definem o solo.

4.4. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ RELATIVA DO RADIER NA DISTRIBUIÇÃO DE RECALQUE

Inicialmente, estudou-se a influência da rigidez relativa do radier na distribuição dos recalques. A rigidez de um radier circular K_r pode ser determinada através da seguinte formulação (Brown, 1969):

$$K_r = \frac{E_r (1 - \nu_s^2)}{E_s} \left(\frac{t}{R} \right)^3 \quad (4.1)$$

A partir da eq.(4.1) obteve-se a variação da espessura t do radier em função da rigidez relativa K_r do mesmo e do coeficiente de Poisson do solo ν_s

$$t = \left(\frac{K_r E_s R^3}{E_r (1 - \nu_s^2)} \right)^{1/3} \quad (4.2)$$

Esse estudo foi realizado para valores de raio R , coeficiente de Poisson ν_r e módulo de elasticidade E_r do radier iguais a 10m, 0,16 e 35GPa, respectivamente. Considerando valores para o coeficiente de Poisson do solo ν_s iguais a 0, 0,3 e 0,5 e de rigidez relativa do radier K_r iguais a 0,01, 0,1, 1, 10, 100 e 1000, foram obtidos para espessura do radier os resultados apresentados na Tabela 4. 1.

O módulo de elasticidade do solo foi calculado de acordo com a seguinte formulação

$$E'_s = \frac{2}{3} E_u (1 + \nu'_s) \quad (4.3)$$

onde E_u é o módulo de Young não-drenado do solo e E'_s , ν'_s são o módulo de Young e coeficiente de Poisson drenados do solo, respectivamente.

Admitindo $E_u = 40\text{MPa}$, os valores aproximados para o módulo de elasticidade drenado do solo E'_s , de acordo com a eq. (4.3), são apresentados na Tabela 4. 2.

Tabela 4. 1 – Espessura t (m) do radier em função do coeficiente de Poisson do solo ν_s e da rigidez relativa do radier K_r .

ν_s	K_r	0.01	0.1	1	10	100	1000
0		0,197	0,425	0,916	1,974	4,253	9,163
0,3		0,222	0,479	1,032	2,223	4,79	10,319
0,5		0,249	0,536	1,154	2,487	5,358	11,544

Tabela 4. 2 – Valores do módulo de Young do solo.

ν_s	Condição	E_s (MPa)
0	Drenada	27
0,3	Drenada	35
0,5	Não-drenada	40

Em seguida, procedeu-se a aferição do modelo numérico a ser utilizado nas análises paramétricas posteriores.

4.5. AFERIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Com o objetivo de validar a modelagem numérica, considerou-se um radier circular ($R = 10\text{m}$, $E_r = 35\text{GPa}$, $\nu_r = 0,16$) assente sobre uma camada de solo homogêneo ($h = 40\text{m}$, $E_s = 35\text{MPa}$, $\nu_s = 0,3$) como mostra a Figura 4. 7. O radier foi submetido a uma carga uniformemente distribuída $q = 0,5\text{MPa}$. Foram analisados 2 casos correspondentes a valores de rigidez relativa do radier K_r iguais a 0,001 (radier flexível) e 1000 (radier rígido).

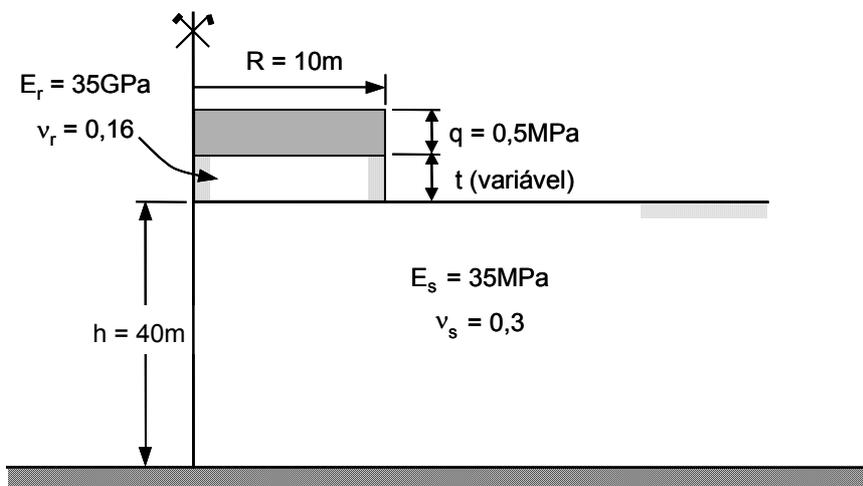


Figura 4. 7 – Geometria do problema para aferição da modelagem numérica.

Os contornos laterais das malhas de elementos finitos para cada uma das análises foram estabelecidos a uma distância equivalente a quatro vezes o raio do radier, a partir do centro do mesmo. Devido à simetria do problema, apenas um quarto da malha de elementos finitos foi utilizado nas análises numéricas, conforme ilustra a Figura 4. 8.

Os resultados obtidos para os recalques no centro e na borda dos radiers estudados (Tabela 4. 4) foram comparados com aqueles determinados por meio de soluções analíticas baseadas na teoria da elasticidade linear (Tabela 4. 3).

Tabela 4. 3 – Soluções analíticas para cálculo de recalque de radiers circulares em camadas de espessura finita.

Tipo de radier	Solução analítica	Fator de Influência <i>I</i>
Flexível	$\rho = \frac{2qR}{E_s} I$ (Milovic, 1970)	0,75 (no centro) 0,44 (na borda)
Rígido	$\rho = \frac{qR}{E_s} I$ (Poulos, 1968)	1,1

Tabela 4. 4 – Comparação entre valores de recalque no centro e na borda dos radiers obtidos neste trabalho e aqueles propostos por soluções analíticas.

K_r	Posição	Recalque (mm)		Diferença (%)
		Solução analítica	Presente análise	
0,01 (radier flexível)	Centro	214	221	3,1
	Borda	126	130	3,4
1000 (radier rígido)	-	157	158	0,6

Como pode ser observado a máxima diferença encontrada nos resultados é igual a 3,4%. Essa comparação permite então concluir que o modelo numérico utilizado fornece resultados satisfatórios do ponto de vista de distribuição de recalque no radier.

A validação da modelagem numérica também foi avaliada com relação à distribuição das pressões de contato. Rowe (1982) mostra que o deslocamento de radier rígido pode ser considerado igual ao deslocamento médio de um radier que provoca na interface solo-radier um aumento de tensão vertical dado pela seguinte expressão:

$$\sigma_z(x) = \frac{P_t}{2\pi R [(R)^2 - x^2]^{1/2}}, \quad 0 < x < R \quad (4.4)$$

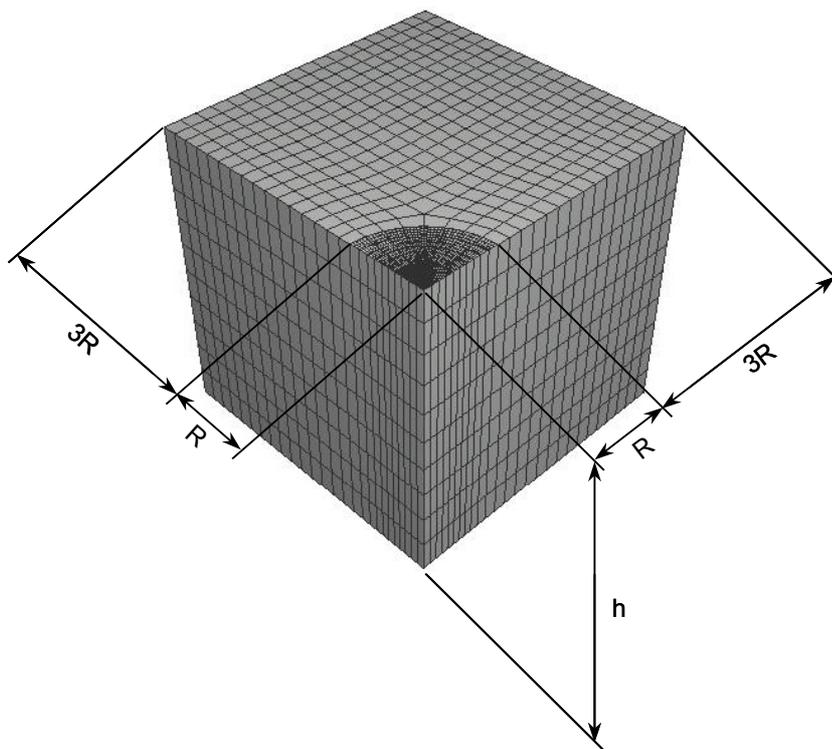
onde:

P_t é a resultante da carga aplicada ao radier;

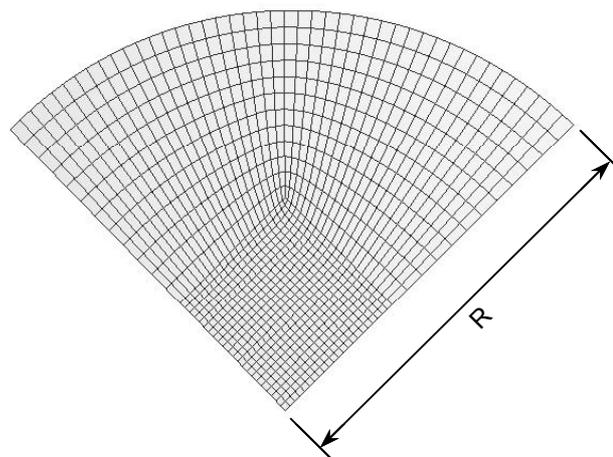
R é o raio do radier;

x é a distância do centro do radier ao ponto considerado.

Essa solução é apresentada graficamente na Figura 4. 9 juntamente com os valores das pressões de contato no radier obtidos através do ABAQUS para o caso de um radier rígido ($K_r = 100$), comprovando novamente a eficiência da modelagem numérica.



(a) malha de elementos finitos 3D



(b) detalhe da discretização da facesuperior do radier

Figura 4. 8 – Malha de elementos finitos usada nas análises para aferição do modelo.

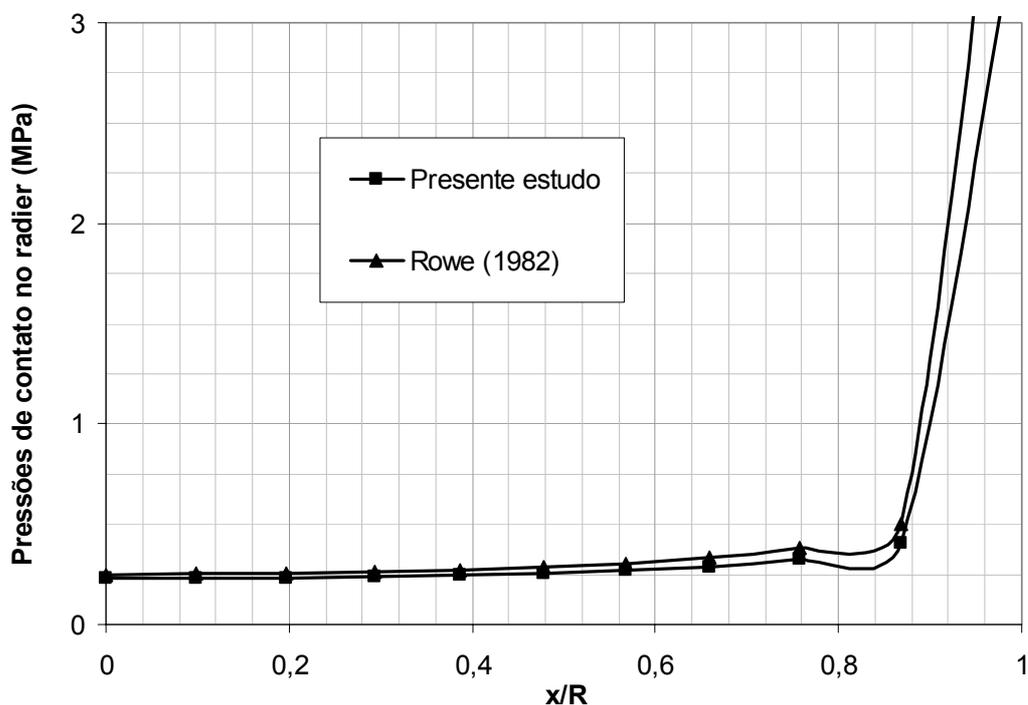


Figura 4. 9 – Comparação entre valores de pressões de contato no radier rígido ($K_r = 100$) obtidos no presente estudo e aqueles propostos por Rowe (1982).

Em seguida, foram realizadas outras análises comparativas considerando-se para coeficiente de Poisson da camada de solo os valores $\nu_s = 0$ e $\nu_s = 0,5$. Os resultados correspondentes estão listados nas Tabelas 4.4 e 4.5 e graficamente representados nas Figuras 4.11 e 4.12.

Tabela 4. 5 – Valores de recalque (mm) no centro (ρ_{centro}) e na borda (ρ_{borda}) de radiers circulares obtidos no presente estudo para $\nu_s = 0$.

K_r	t (m)	ρ_{centro}	ρ_{borda}	$\rho_{borda} / \rho_{centro}$ (%)
0,01	0,197	311,32	183,17	58,84
0,1	0,425	304,57	192,17	63,10
1	0,916	254,50	211,11	82,95
10	1,974	226,59	220,36	97,25
100	4,253	222,49	221,72	99,65
1000	9,163	222,01	221,81	99,91

Tabela 4. 6 – Valores de recalque (mm) no centro (ρ_{centro}) e na borda (ρ_{borda}) de radiers circulares obtidos no presente estudo para $v_s = 0,5$.

K_r	t (m)	ρ_{centro}	ρ_{borda}	$\rho_{borda} / \rho_{centro}$ (%)
0,01	0,249	159,78	93,77	58,69
0,1	0,536	155,99	99,35	63,69
1	1,154	130,26	109,74	84,25
10	2,487	117,28	114,36	97,51
100	5,358	115,42	115,02	99,65
1000	11,544	115,19	115,10	99,92

Analisando esses resultados numéricos, observou-se que os valores dos recalques no centro e na borda tendem a se aproximar de um mesmo valor à medida que aumenta a rigidez relativa K_r do radier, sendo essa diferença inferior a 4% para valores de K_r superiores a 10.

Dessa forma, nesse trabalho serão estudados radiers circulares com rigidez relativa K_r variando de 0,01 a 1 caracterizando os radiers flexíveis que podem apresentar recalques diferenciais.

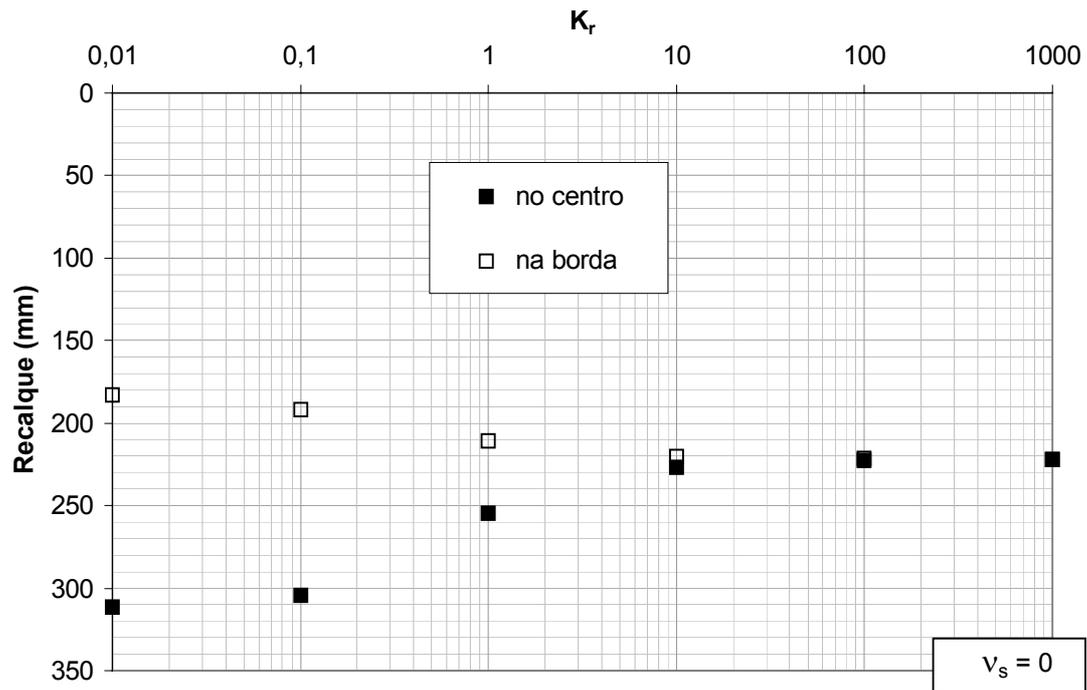


Figura 4. 10 – Variação nos valores de recalque na borda e no centro do radier em função da rigidez relativa K_r para $\nu_s = 0$.

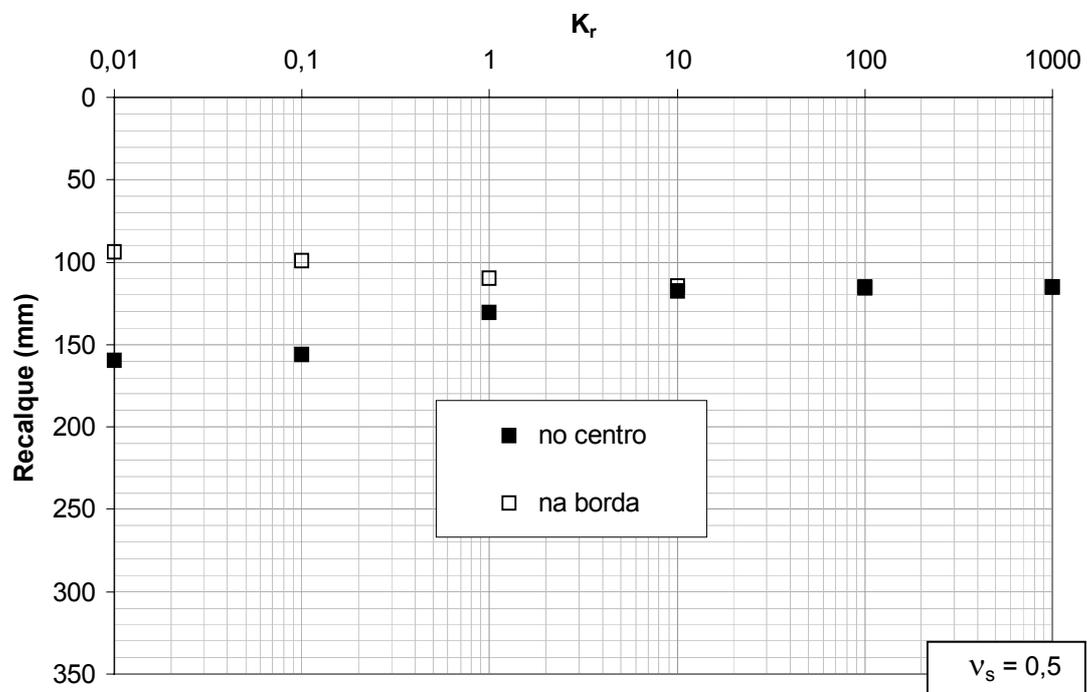


Figura 4. 11 – Variação nos valores de recalque na borda e no centro do radier em função da rigidez K_r para $\nu_s = 0,5$.

4.6. ANÁLISE PARAMÉTRICA

De modo a avaliar a influência do arranjo geométrico das estacas na minimização dos recalques diferenciais, foram procedidas análises considerando as influências das características geométricas e mecânicas mais determinantes na distribuição de recalques de radiers estaqueados. Foram considerados valores de comprimento relativo das estacas L/d iguais a 10, 25 e 50, coeficiente de Poisson do solo ν_s iguais a 0,1, 0,3 e 0,5 e espessuras do radier correspondentes a valores de rigidez relativa K_r iguais a 0,01, 0,1 e 1.

4.6.1. Geometria do problema

A geometria do problema é mostrada na Figura 4. 12. O radier circular tem raio $R = 10\text{m}$ e espessura t variável, submetido a uma carga uniformemente distribuída $q = 0,5\text{MPa}$. O solo consiste de uma camada elástica linear, isotrópica, homogênea de espessura $h = 40\text{m}$. As estacas têm seção transversal circular com diâmetro $d = 0,5\text{m}$ e valores de comprimento relativo $L/d = 10, 25$ e 50 , considerando-se as configurações mostradas na Figura 4. 13.

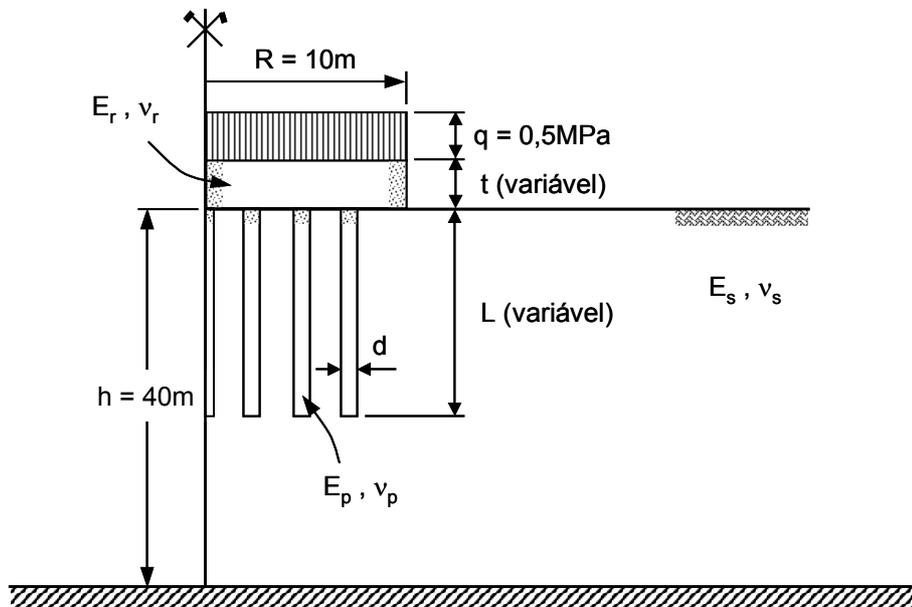


Figura 4. 12 – Geometria do problema com detalhes.

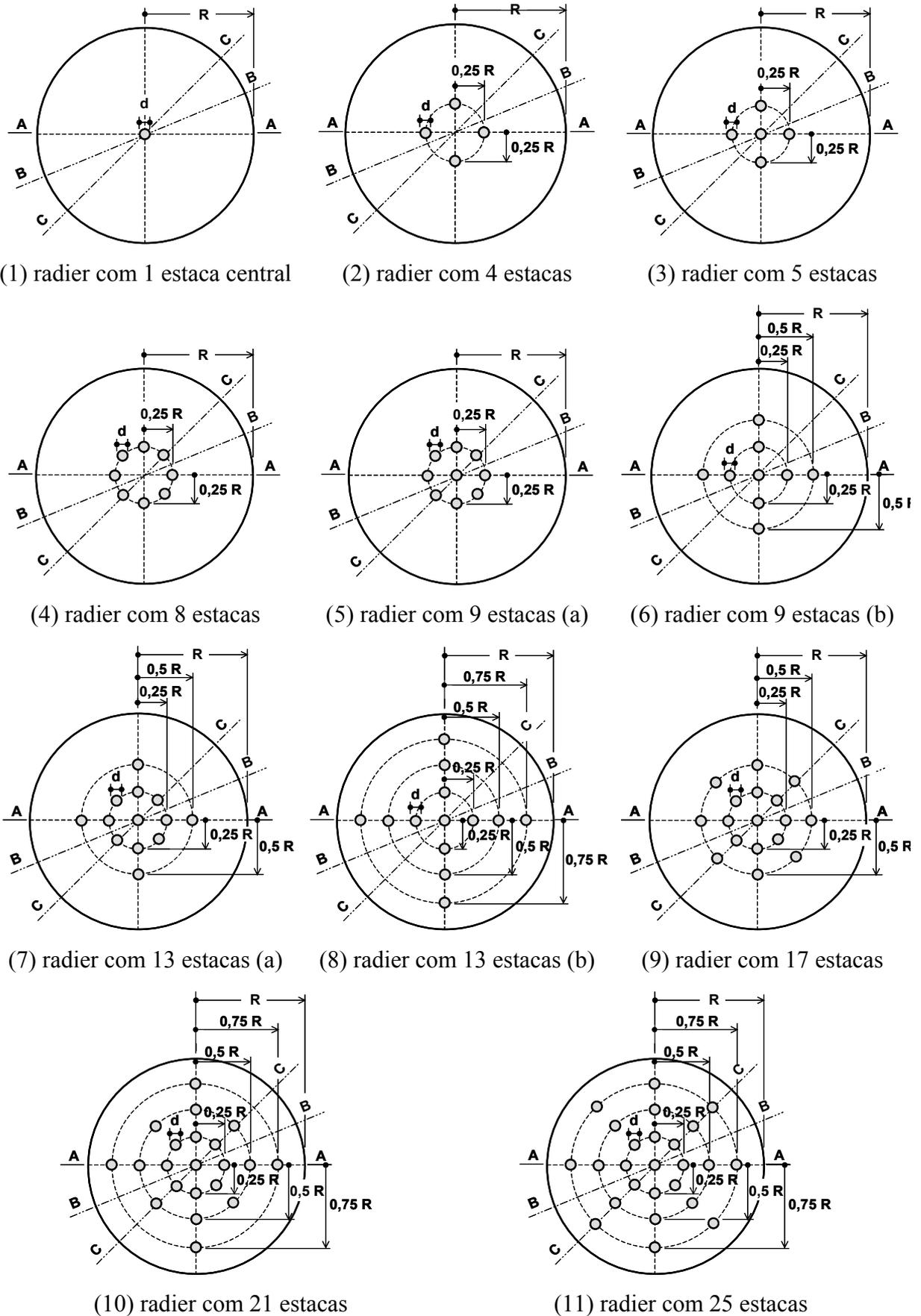


Figura 4.13 – Configurações de estacas analisadas no estudo paramétrico.

4.6.2. Características das análises

4.6.2.1. Propriedades elásticas dos materiais

O radier e as estacas são construídos em concreto armado com módulo de Young $E_r = E_p = 35\text{GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu_r = \nu_p = 0,16$.

O solo foi admitido com comportamento elástico linear, apresentando módulo de Young E_s e coeficiente de Poisson ν_s constantes em toda a camada, o que pode caracterizar um meio homogêneo ou um meio estratificado simplificado através de um meio homogêneo equivalente (Poulos, 1979; Yamashita *et al.*, 1987).

Com o objetivo de estudar a distribuição dos recalques imediato e total foram consideradas três situações para os parâmetros elásticos do solo, conforme Tabela 4. 7.

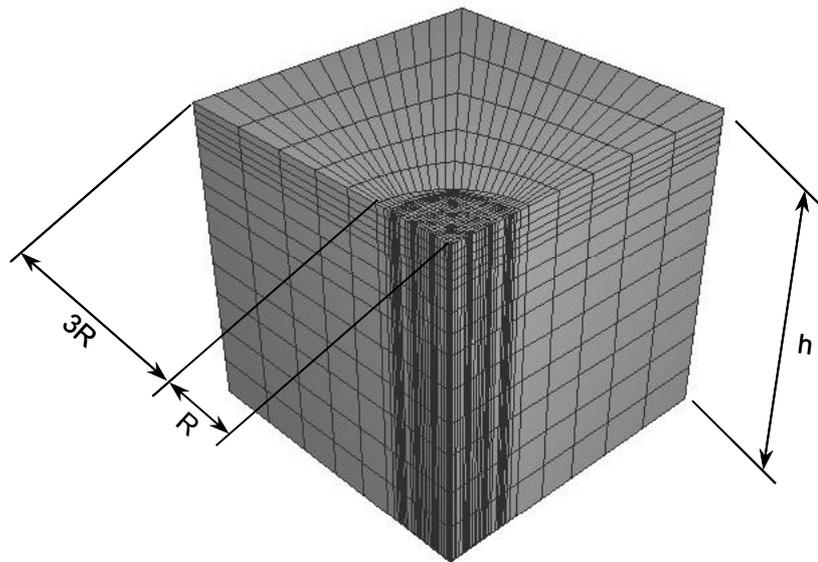
Tabela 4. 7 – Parâmetros elásticos do solo de fundação.

Situação	Condição	Módulo de Young E_s (MPa)	Coefficiente de Poisson ν_s
1	Não-drenada	40	0,5
2	Drenada	35	0,3
3	Drenada	29	0,1

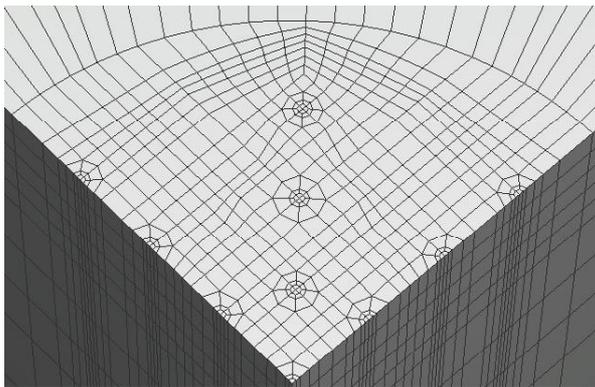
4.6.2.2. Malha de elementos finitos

As malhas de elementos finitos para análise de cada caso tem aproximadamente 2303 nós e 2220 elementos para a modelagem do radier e 10305 nós e 8848 elementos finitos para a discretização do conjunto solo-estacas. As estacas e o solo de fundação são modelados através de elementos sólidos tridimensionais de 8 nós enquanto que a modelagem do radier é feita através de elementos de placa de 4 nós. Conforme detalhado no início desse capítulo (item 4.2.4), o contato entre a base do radier e o conjunto estacas/solo é modelado de tal forma que os deslocamentos calculados sejam compatíveis em ambas as superfícies.

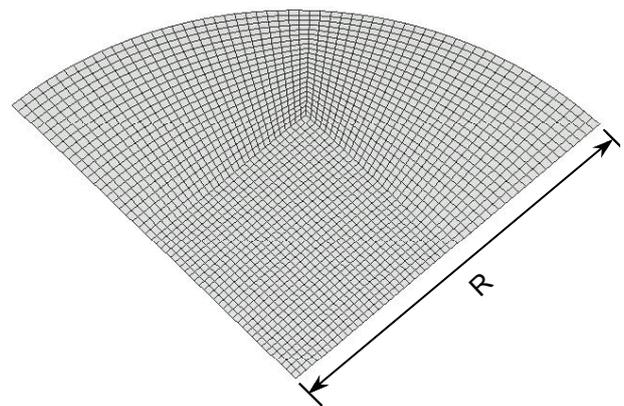
A Figura 4. 14 mostra a geometria da malha de elementos finitos usada nas análises, onde apenas um quarto do problema foi modelado devido às condições de simetria em relação aos eixos horizontais. A escolha da malha resultou de uma investigação preliminar na qual foram testadas várias discretizações bem como as condições de contorno laterais.



(a) malha completa



(b) detalhe da discretização da face superior do conjunto solo-estacas



(c) detalhe da discretização da face superior do radier

Figura 4. 14 – Malha de elementos finitos usada nas análises paramétricas.

Os contornos da malha foram posicionados às seguintes distâncias:

- a) na direção vertical: 40m abaixo da base do radier, ou seja 1,6 vezes o máximo comprimento L adotado para as estacas;
- b) na direção horizontal: 40 m em cada direção, ou seja, 3 vezes o raio do radier R a partir de sua borda.

Ottaviani (1975) sugere que os contornos laterais e inferior sejam posicionados, respectivamente, a distâncias iguais a 2,5 vezes o raio do radier R , a partir de sua borda, e 1,5 vezes o comprimento das estacas L , para a obtenção de resultados numéricos confiáveis.

As seguintes condições foram prescritas no contorno:

- a) os pontos nodais no contorno inferior têm os deslocamentos restritos na direção vertical (condição de base livre);
- b) os pontos nodais nos contornos verticais de simetria têm os deslocamentos restritos nas direções horizontais;
- c) os pontos nodais nos contornos verticais externos têm os deslocamentos restritos nas direções horizontais.

O tempo médio de processamento para cada uma dessas análises foi cerca de 15 minutos em um microcomputador Pentium III com 256MB de memória RAM.

4.6.3. Resultados da análise paramétrica

4.6.3.1. Distribuição de pressões no contato solo-radier

Com o objetivo de melhor entender a distribuição de recalques no radier estaqueado, inicialmente verificou-se a distribuição das pressões de contato em radiers não-estaqueados considerando $K_r = 0,01, 0,1$ e 1 (Figura 4. 15), comparando-as com a solução proposta por Rowe (1982) para radiers rígidos, já apresentada anteriormente (Equação (4.4)).

Pode-se observar que com o aumento da rigidez relativa K_r , a distribuição das pressões de contato torna-se menos regular com concentrações nas bordas, conforme esperado.

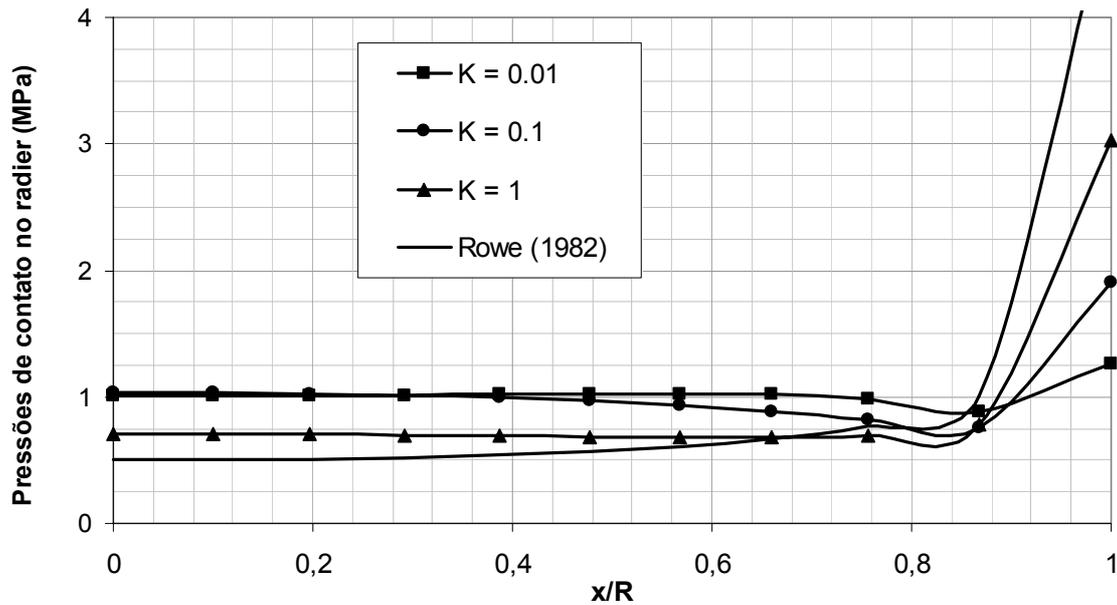


Figura 4. 15 – Distribuição de pressões no contato solo-radier de radiers não-estaqueados.

4.6.3.2. Distribuição de recalques

As distribuições de recalque em cada uma das seções (A-A, B-B e C-C) de cada arranjo de estacas da Figura 4. 13 foram expressas em termos de um fator de recalque normalizado I_Z definido como:

$$I_Z = \frac{\rho E_s d}{q \pi R^2} \quad (4.5)$$

onde:

ρ é o recalque em cada ponto do radier;

E_s é o módulo de Young do solo;

d é o diâmetro da estaca;

q é a carga vertical uniformemente distribuída na superfície do radier;

R é o raio do radier.

A Eq.(4.5) pode ser comparada àquela para obtenção do fator de influência do recalque de estacas submetidas a um carregamento axial (Poulos e Davis, 1980), ou seja,

$$I_{\rho} = \frac{\rho_{est} E_s d}{P} \quad (4.6)$$

onde:

ρ_{est} é o recalque no topo da estaca;

E_s é o módulo de Young do solo;

d é o diâmetro da estaca;

P é a carga axial aplicada no topo da estaca.

O recalque imediato é calculado considerando-se o valor do módulo de Young não-drenado E_u e coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,5$, enquanto que para o cálculo do recalque final, adota-se o módulo de Young e coeficiente de Poisson drenados (Tabela 4. 7).

O efeito do arranjo das estacas, bem como do comprimento relativo L/d na deflexão do radier é apresentado nas figuras do Apêndice 1.

Kuwabara (1989) sugere que a proporção entre o recalque imediato e o recalque final pode ser afetada pelo número de estacas, comprimento relativo, espaçamento entre as estacas, e outros fatores, mas como pode ser observado no Apêndice 2, a influência do número de estacas não é tão significativa nesta proporção, de modo que os resultados apresentados nos gráficos da Figura 4. 16 representam as médias dos valores obtidos para cada uma das configurações estudadas.

A Figura 4. 16 apresenta a razão percentual média entre o recalque imediato ρ_i e o recalque final ρ_F em função do comprimento relativo das estacas, no centro e na borda do radier. Como se pode observar, nos casos estudados, a maior parte do recalque ocorre imediatamente após a construção, sendo que o acréscimo nesses recalques ao longo do tempo (recalques de adensamento) é maior no centro do que na borda do radier. Uma breve análise dessas figuras mostra que o efeito do coeficiente de Poisson drenado para os casos analisados $\nu_s = 0,1$ e $\nu_s = 0,3$, é muito mais preponderante no recalque de adensamento do que a rigidez do radier K_r ou o comprimento relativo das estacas L/d . Para estacas com comprimento relativo maior que 25, a proporção entre os recalques imediato e final tende a se estabilizar.

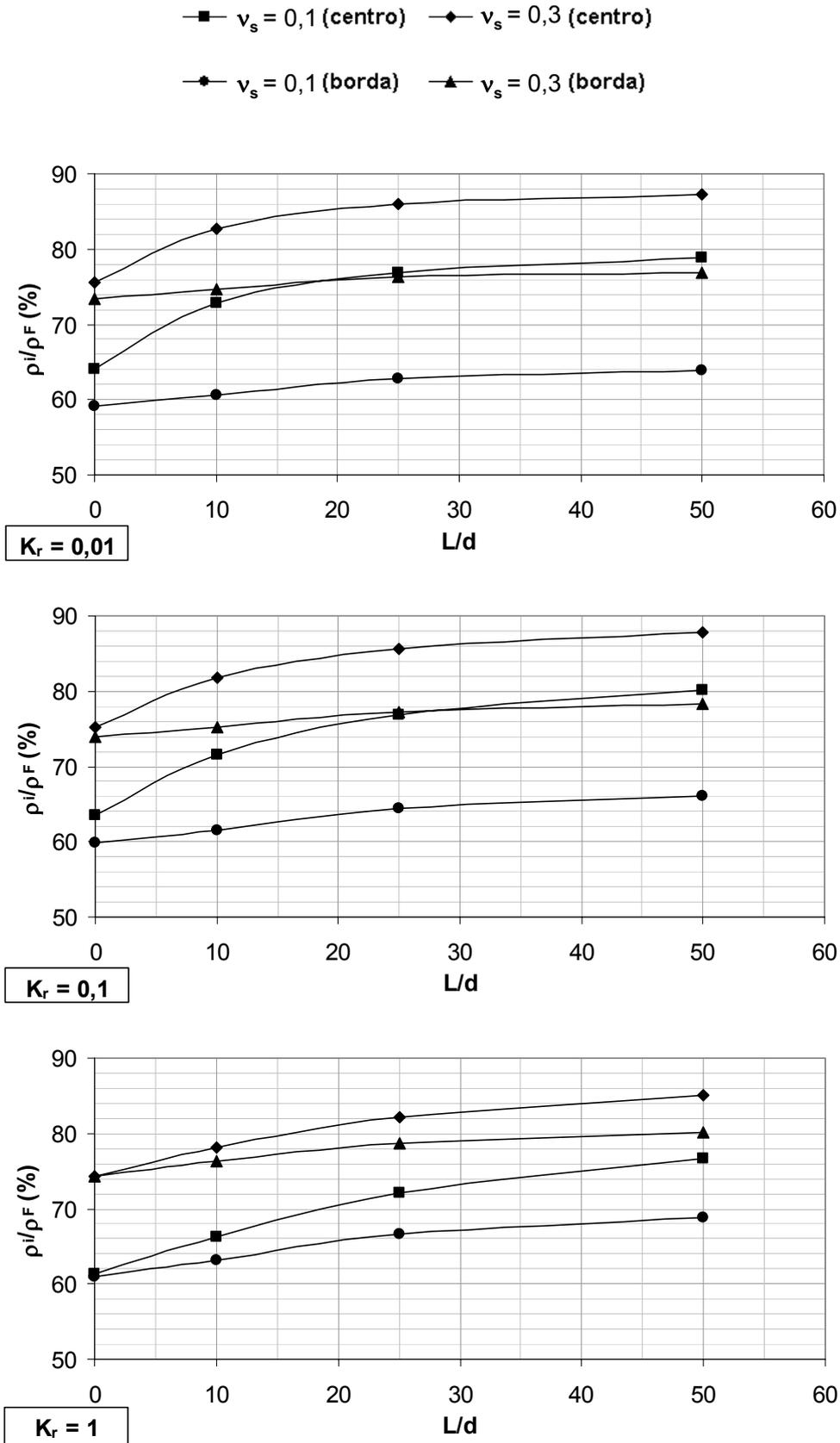


Figura 4. 16 – Proporção média entre o recalque imediato ρ_i e o recalque final ρ_F em função de L/d .

4.6.3.3. Distribuição de cargas

A carga atuante individualmente no topo de cada uma das estacas para cada caso analisado foi obtida indiretamente neste estudo, considerando que,

$$P_p^i = \sigma_{V_i} A_p \quad (4.7)$$

onde:

P_p^i é a carga atuante no topo da estaca i ;

σ_{V_i} é a tensão vertical média atuante no topo da estaca i , obtida na saída gráfica do ABAQUS;

A_p é a área da seção transversal da estaca.

Desse modo, pôde-se obter a carga P_p suportada pelo grupo de n estacas,

$$P_p = \sum_{i=1}^n P_p^i \quad (4.8)$$

Logo, a carga transmitida diretamente do radier para o solo de fundação P_r pode ser estimada como,

$$P_r = P_t - P_p \quad (4.9)$$

onde P_t é a resultante do carregamento total aplicado na fundação pela superestrutura.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 mostram as parcelas do carregamento total suportadas pelo radier (P_r) e pelas estacas (P_p) em cada caso investigado nas análises paramétricas.

Pode-se observar que uma considerável parcela da carga aplicada é transferida diretamente ao solo através do radier, especialmente sob condições não-drenadas. Para condições drenadas essa proporção é reduzida, mostrando que o efeito do coeficiente de Poisson do solo na distribuição de cargas é significativo. Essa redução representa cerca de 12-17% do carregamento total para $\nu_s = 0,1$ e de 16-23% no caso $\nu_s = 0,3$.

A carga suportada pelo radier também varia com o comprimento relativo das estacas de modo que quanto maior for o valor de L/d , maior será a parcela de

carga suportada pelas estacas. Considerando-se $K_r = 1$, $\nu_s = 0,3$, pode-se identificar duas situações extremas: radiers com 8 estacas longas ($L/d = 50$) ou 25 estacas curtas ($L/d = 10$) transferem cerca de 60% do carregamento total diretamente para o solo. No caso de estacas mais longas, a transferência de carga ocorre totalmente pelo fuste visto que a contribuição da parcela de resistência de ponta é praticamente desprezível em relação à parcela de resistência lateral. Por outro lado, no caso de estacas curtas, predomina a transferência por atrito lateral visto que a contribuição da parcela de ponta não chega a ultrapassar 30% da resistência total. É interessante notar que para que se obtenha os mesmos resultados em termos de transferência de carga entre os elementos de um radier estaqueado com estacas longas, é necessário um número três vezes maior de estacas curtas.

Esse comportamento também foi observado por Kuwabara (1989) que, além disso, mostra que adotando-se configurações com estacas largamente espaçadas ($s/d > 15$) mais do que 50% do carregamento total aplicado será suportado pelo radier, enquanto que para espaçamentos comumente usados na prática ($s/d < 10$), a carga suportada pelo radier é reduzida para cerca de 20-40% da carga aplicada. Essa diminuição é mais significativa do que a constatada por Kuwabara (*op. cit.*), ou seja, na grande maioria dos casos analisados neste trabalho (onde $s/d \cong 5$) mais que 50% do carregamento total é suportado pelo radier, excetuando-se apenas a situação de configurações com 25 estacas e $L/d > 25$ em condições drenadas. Essa diferença pode ser justificada pela elevada rigidez das estacas adotadas nessas análises ($K_p \cong 1000$), o que reduz a transferência de carga para a parte mais inferior da estaca, e conseqüentemente reduz a proporção da carga transmitida diretamente para as mesmas.

É importante ressaltar ainda o efeito da configuração geométrica das estacas na distribuição de cargas no radier. Os pontos vazados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 representam os valores obtidos para as configurações 9(b) e 13(b), deixando claro que a depender da posição que as estacas ocupem no radier, uma maior parcela do carregamento será transmitida diretamente do radier para o solo, o que ocorre com as configurações 9(b) e 13 (a), sendo este fato ainda mais representativo à medida que aumenta a rigidez do radier.

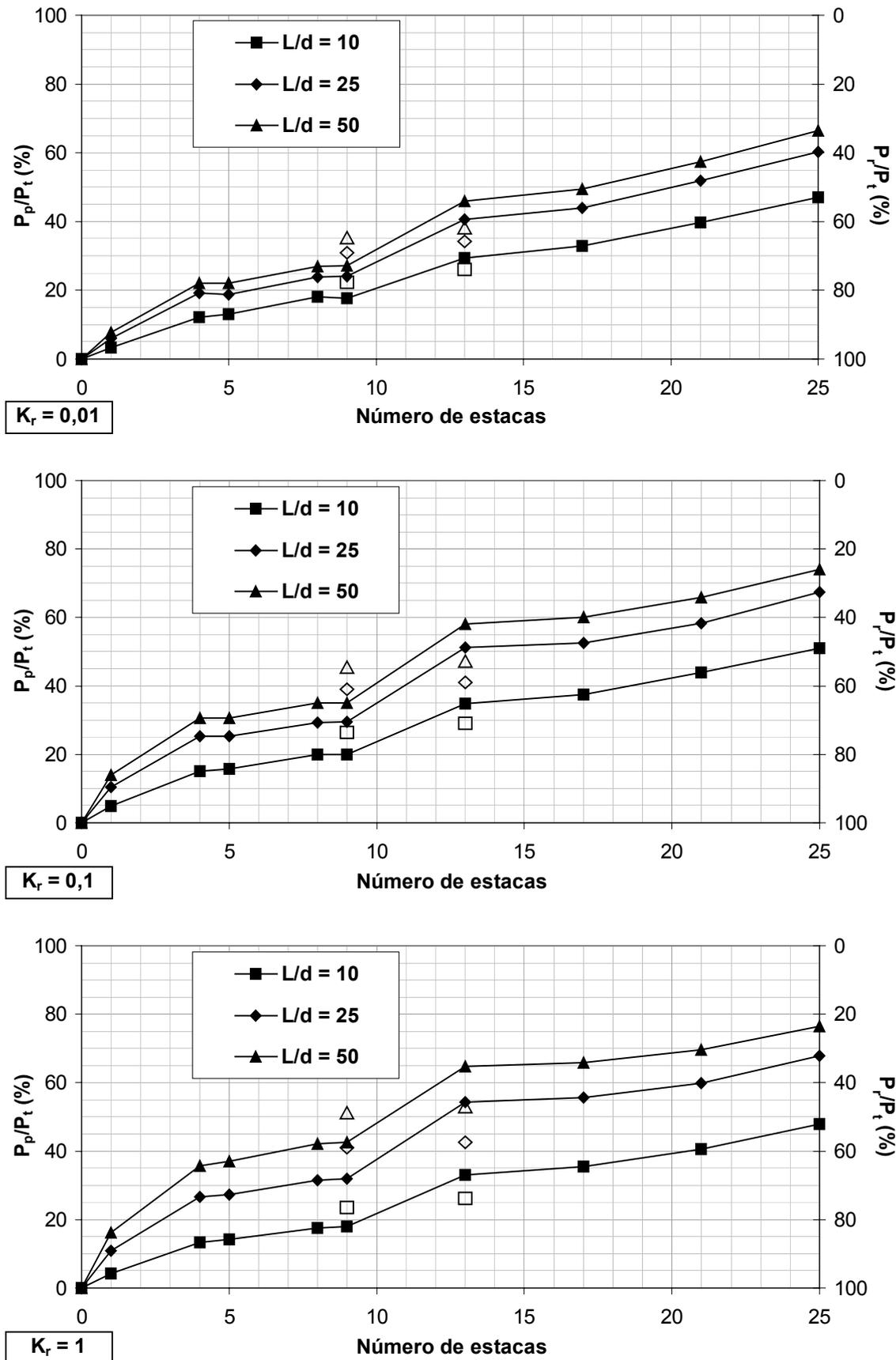


Figura 4. 17 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ($v_s = 0,1$). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 13.

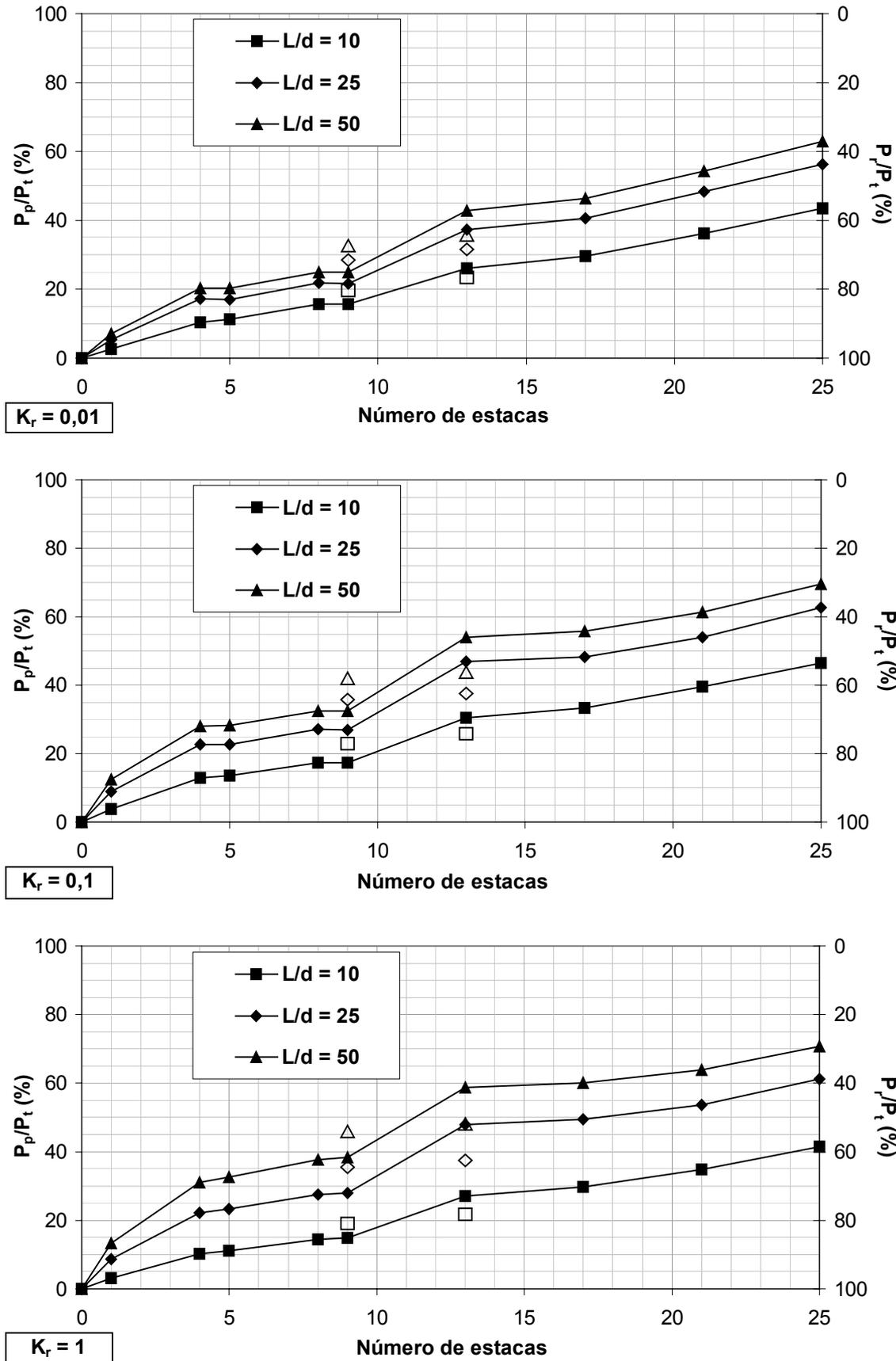


Figura 4. 18 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ($v_s = 0,3$). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 13.

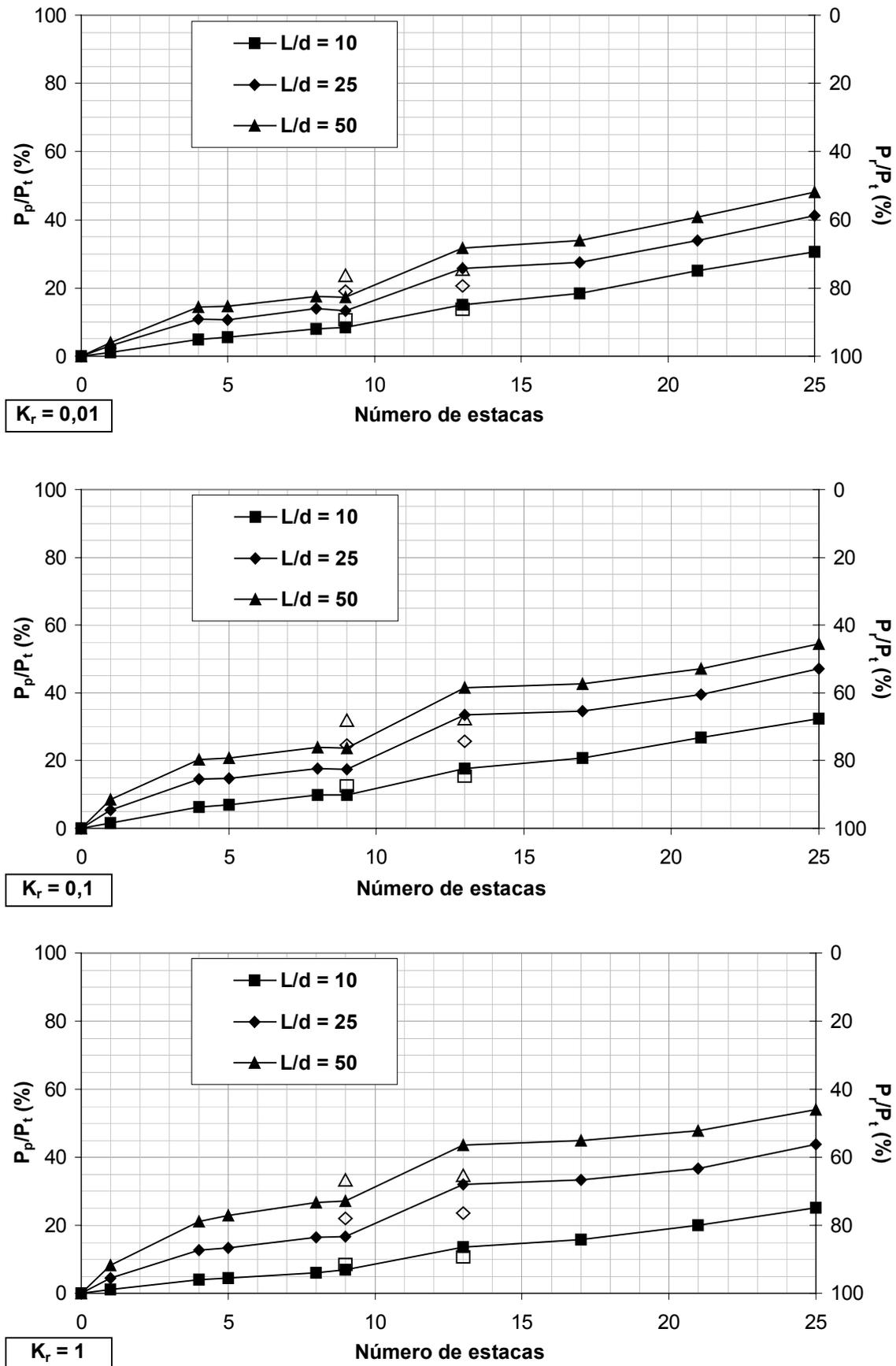


Figura 4. 19 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ($\nu_s = 0,5$). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 13.

A Tabela 4. 8 mostra o acréscimo médio na carga suportada pelo radier em função da rigidez do mesmo para diferentes configurações com mesmo número de estacas. Pode-se observar então que o efeito da disposição das estacas é bastante significativo na distribuição de cargas entre o radier e as estacas, principalmente quando o comprimento relativo aumenta.

Tabela 4. 8 – Aumento médio na proporção da carga suportada pelo radier em função da rigidez do radier para condições drenadas.

L/d	$K_r = 0,01$		$K_r = 0,1$		$K_r = 1$	
	$P_r^{9(a)}/P_r^{9(b)}$	$P_r^{13(b)}/P_r^{13(a)}$	$P_r^{9(a)}/P_r^{9(b)}$	$P_r^{13(b)}/P_r^{13(a)}$	$P_r^{9(a)}/P_r^{9(b)}$	$P_r^{13(b)}/P_r^{13(a)}$
10	5,51	4,13	8,01	7,78	6,16	8,79
25	9,74	9,96	14,63	19,10	13,53	22,96
50	12,24	13,29	17,64	24,46	15,92	29,50

Conforme apresentado no Capítulo 3, com base nas observações feitas em radiers estaqueados em solos argilosos, Cooke (1986) ressalta que a distribuição de carga entre as estacas e o radier depende sobretudo do carregamento estrutural e da rigidez do sistema fundação-superestrutura, sendo que nos casos em que a superestrutura é altamente rígida ao fim da construção, a distribuição de carga depende particularmente do número de estacas e do espaçamento entre elas.

Por outro lado, Sommer *et al.* (1991) mostram que cerca de 55% da carga total da construção foi transferida ao subsolo através das estacas, enquanto que os 45% restantes foram transferidos diretamente ao solo pelo radier, o que também concorda com os valores sugeridos por Butterfield e Banerjee (1971).

Uma análise sobre a distribuição de carga entre as estacas de uma mesma configuração mostra que quanto mais afastada do centro do radier uniformemente carregado, maior será o carregamento no topo da estaca. As estacas foram classificadas em tipos conforme a sua posição em relação ao centro do radier como mostra a Figura 4. 20.

As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam as cargas médias no topo das estacas de acordo com o tipo da estaca e em função do número de estacas do grupo, para condições drenadas. A carga total no topo das estacas de determinado tipo P_0 foi normalizada em função de P_{AV} que é a carga total aplicada ao radier P_t

dividida pelo número de estacas n . Como se pode notar, as cargas no topo das estacas centrais são bem menores se comparadas com aquelas posicionadas nos anéis mais externos. Além disso, a carga média nas estacas dos tipos 1 e 2 não apresentam significativas variações em função do aumento do número de estacas no grupo, o que pode ser observado também no caso das estacas dos tipos 3 e 4, principalmente para baixos valores de rigidez relativa do radier ($K_r = 0,01$).

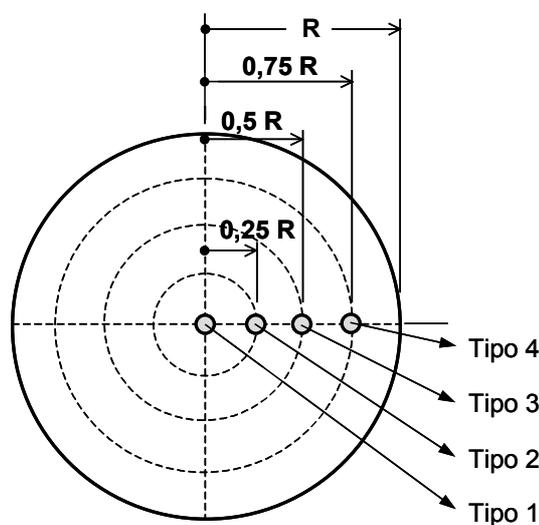


Figura 4. 20 – Classificação das estacas em função da sua posição no radier.

Whitaker mostrou para um grupo de 9 estacas ($s/d = 4$) que as razões entre as cargas suportadas pelas estacas do canto, do eixo e do centro são da ordem 2,2:1,5:1, enquanto Cooke *et al.* (1981) obtiveram razões 2,2:1,7:1 para um radier estaqueado com grande número de estacas.

Nesse trabalho, as razões médias obtidas para cada configuração constituída por mais de um tipo de estaca são apresentadas nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, para condições drenadas. Como se pode observar, quanto maior for L/d e menor K_r , maior será a proporção de carga suportada pelas estacas mais externas.

Tabela 4. 9 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 0,01$.

Nº de estacas	L/d = 10	L/d = 25	L/d = 50
5	1,8:1	2,5:1	2,4:1
9 (a)	2:1	3,1:1	2,4:1
9 (b)	1,8:1,4:1	2,5:1,7:1	2,6:1,6:1
13 (a)	1,4:1,4:1,4:1	2:1,7:1,6:1	2:1,8:1,5:1
13 (b)	2,5:1,6:1	3,9:1,9:1	3,5:1,7:1
17	2,1:2:1,6:1	3,4:2,8:1,9:1	3,1:2,6:1,7:1
21	2:2:1,2:1	3:2,7:1,2:1	2,9:2,6:1,2:1
25	2,1:1,8:1,1:1	2,9:2,1:1,2:1	2,8:2:1,2:1

Tabela 4. 10 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 0,1$.

Nº de estacas	L/d = 10	L/d = 25	L/d = 50
5	1,5:1	2,2:1	2,1:1
9 (a)	1,8:1	4,1:1	3,3:1
9 (b)	1,7:1,3:1	2,7:1,6:1	3:1,6:1
13 (a)	1,4:1,4:1,2:1	2,2:1,8:1,5:1	2,3:1,9:1,4:1
13 (b)	2,6:1,5:1	5,8:2,5:1	5,5:2,3:1
17	2,2:2,1:1,5:1	4,6:3,5:2,1:1	4,6:3,4:2:1
21	2,2:2:1,2:1	4,2:3,2:1,4:1	4,5:3,3:1,5:1
25	2,1:1,8:1,2:1	3,7:2,3:1,3:1	3,7:2,3:1,3:1

Tabela 4. 11 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 1$.

Nº de estacas	L/d = 10	L/d = 25	L/d = 50
5	1,3:1	1,5:1	1,4:1
9 (a)	1,4:1	1,9:1	1,7:1
9 (b)	1,5:1,2:1	2,2:1,4:1	2,1:1,3:1
13 (a)	1,6:1,3:1,2:1	2,4:1,7:1,3:1	2,2:1,6:1,2:1
13 (b)	2,1:1,3:1	3,6:1,7:1	3,2:1,6:1
17	2,3:1,8:1,3:1	4:2,6:1,6:1	3,6:2,4:1,5:1
21	2,4:1,8:1,1:1	4,5:2,9:1,4:1	4,3:2,8:1,4:1
25	2,3:1,6:1,1:1	4:2,2:1,3:1	3,8:2,2:1,3:1

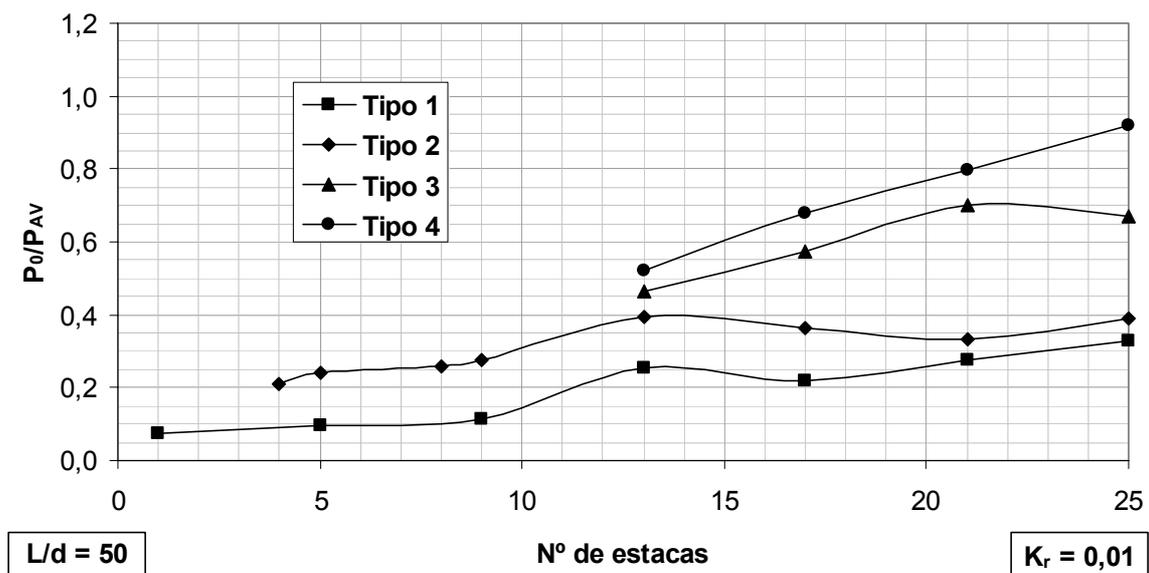
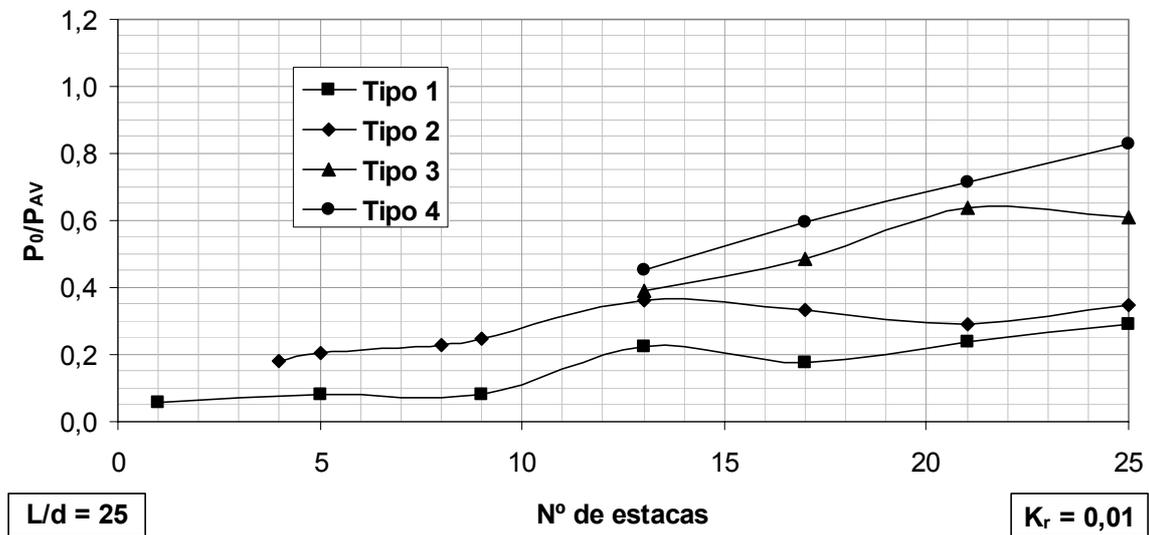
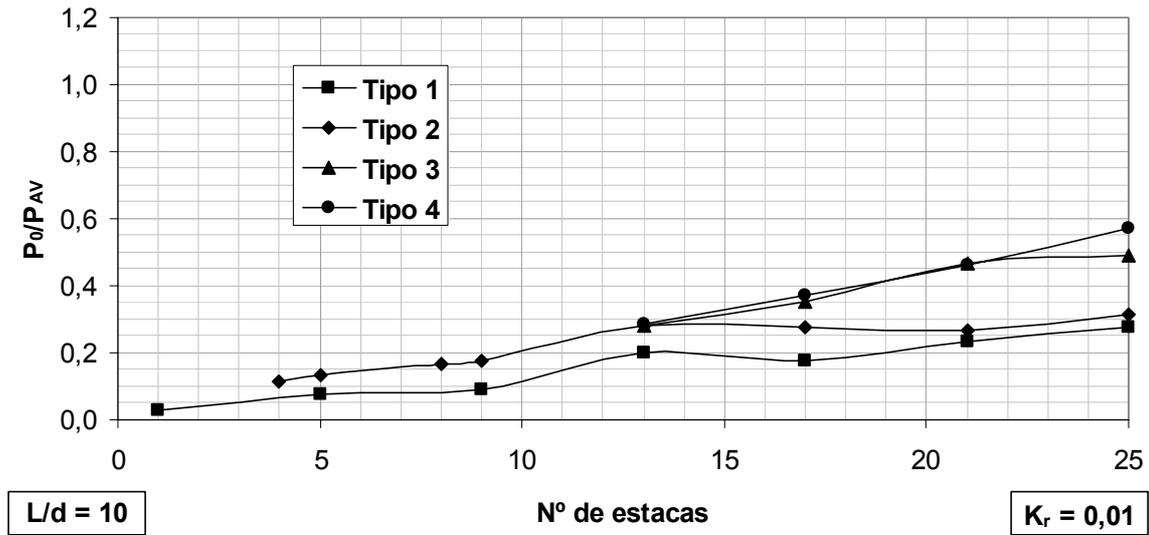


Figura 4. 21 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 0,01$.

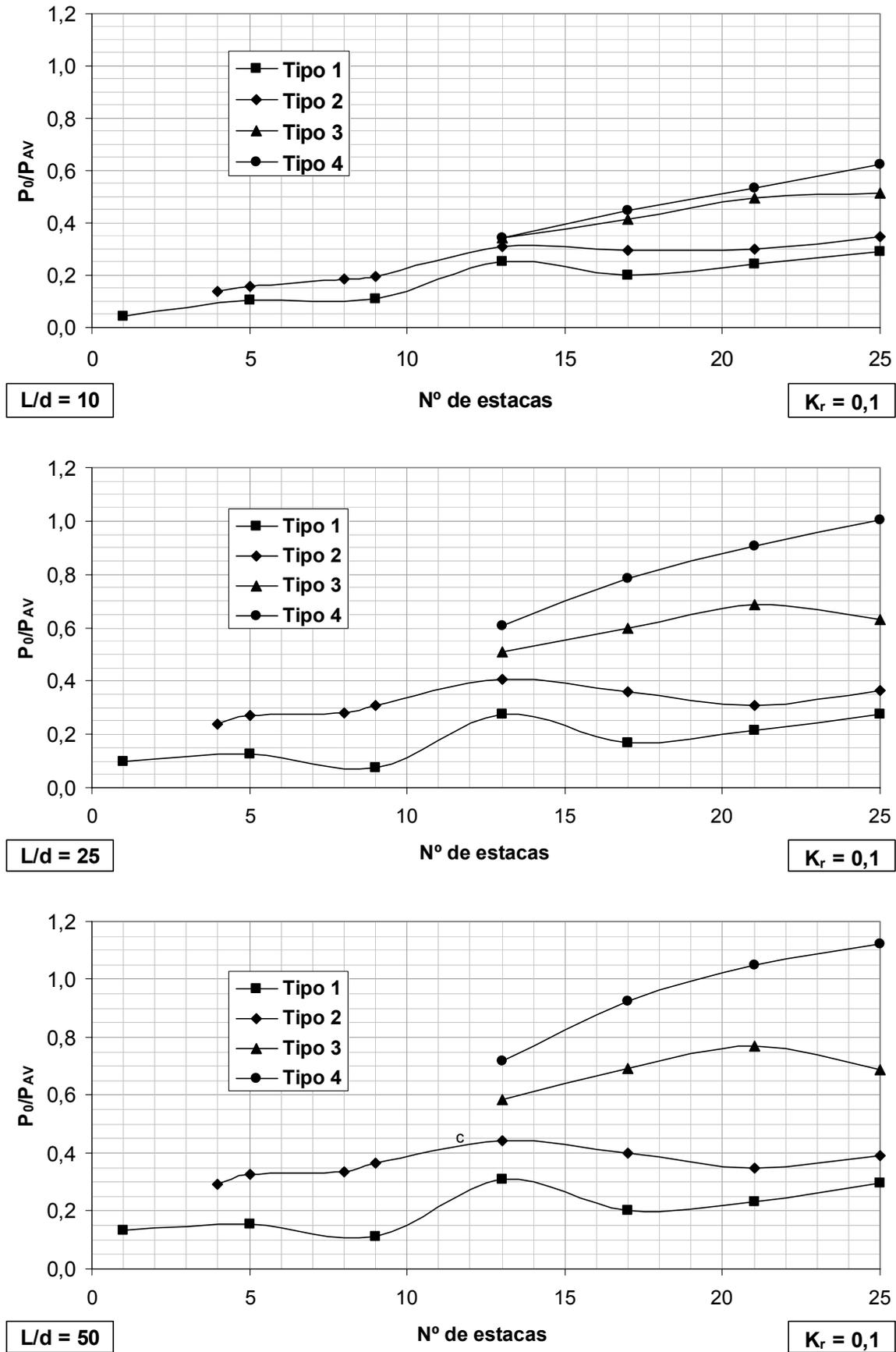


Figura 4. 22 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 0,1$.

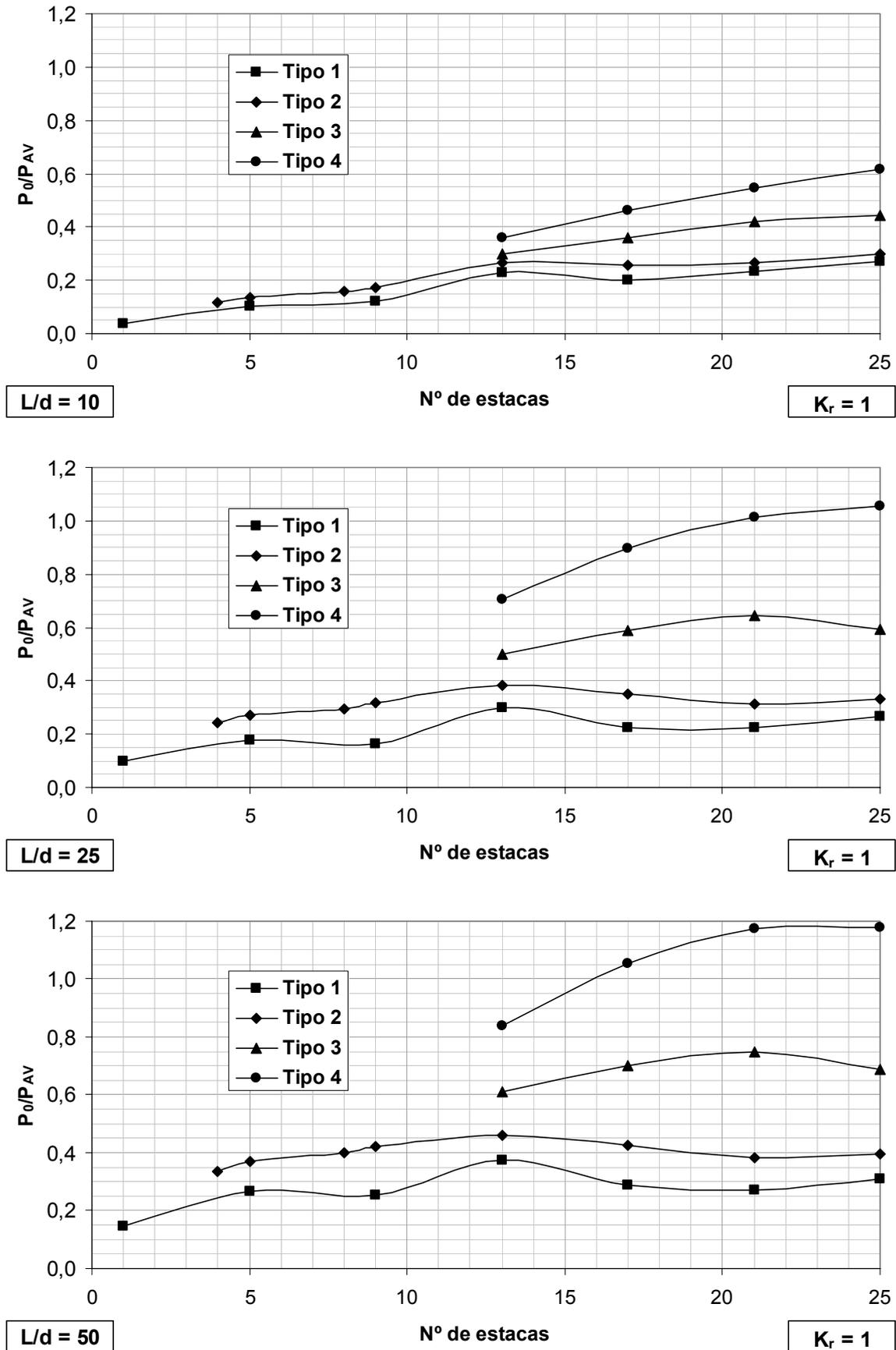


Figura 4. 23 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 1$.

4.6.3.4. Distorções angulares

A fixação de valores admissíveis para os recalques diferenciais e totais de uma fundação é um problema bastante complexo por envolver não somente as características do solo de fundação, como também o tipo, porte, função da superestrutura e propriedades dos materiais empregados na sua construção.

Dada essa complexidade, entende-se que a forma mais eficiente de controlar os recalques diferenciais de um radier estaqueado seria limitar os valores das distorções angulares observadas.

Por exemplo, considerando quatro pontos quaisquer de um radier (A, B, C e D), conforme mostra a Figura 4. 24, o recalque diferencial δ pode ser definido como a diferença de recalque entre dois pontos, após eliminação da parcela de recalque uniforme e da rotação, enquanto que a distorção angular β é a rotação da linha que liga dois pontos sucessivos ($\beta_{AB} = \delta_{AB}/L_{AB}$, $\beta_{CD} = \delta_{CD}/L_{CD}$).

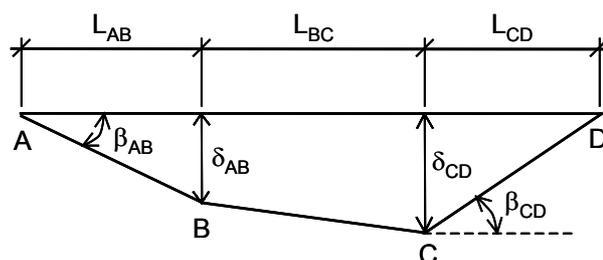


Figura 4. 24 – Definição de recalques diferenciais e distorções angulares.

Bjerrum (1963) apresenta alguns critérios para a fixação de limites para a distorção angular β em função de vários tipos de danos, conforme reproduzido na Figura 4. 25.

A distribuição das distorções angulares ao longo das seções (A-A, B-B e C-C) em cada caso estudado foi obtida através da obtenção de equações que aproximam as curvas de deflexão do radier estaqueado apresentadas no Apêndice 1. Essas equações, por sua vez, foram determinadas por análise de regressão não-linear, sob forma polinomial, pelos mínimos quadrados.

$$I_Z = c_0 + c_1(x/R) + c_2(x/R)^2 + c_3(x/R)^3 + c_4(x/R)^4 + c_5(x/R)^5 + c_6(x/R)^6 \quad (4. 10)$$

onde x/R representa a posição normalizada do ponto ao longo da seção analisada e c_j ($j = 0, \dots, 6$) são coeficientes a determinar.

Em seguida, por derivação direta da Eq.(4.10), foram obtidas as distorções angulares,

$$\beta = c_1 + 2c_2(x/R) + 3c_3(x/R)^2 + 4c_4(x/R)^3 + 5c_5(x/R)^4 + 6c_6(x/R)^5 \quad (4.11)$$

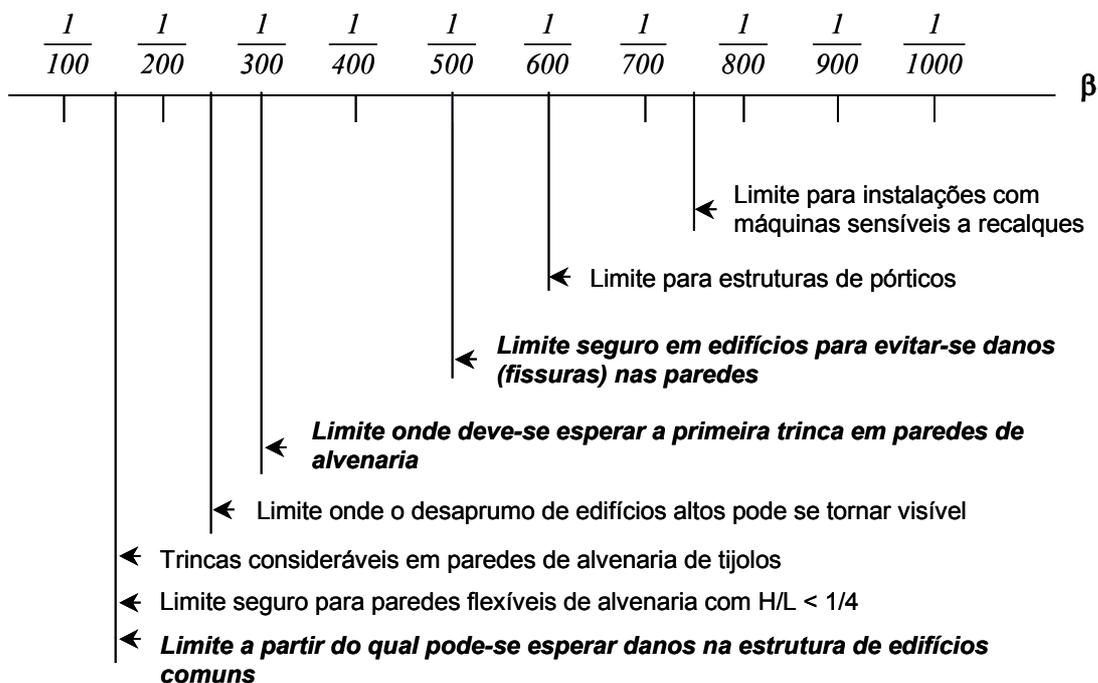


Figura 4. 25 – Critérios para fixação de limites para a distorção angular β (modificado Hachich et al., 1996).

Desse modo puderam ser obtidas as máximas distorções angulares ao longo de cada seção (A-A, B-B e C-C), em função do número de estacas, do coeficiente de Poisson do solo, do comprimento relativo e da rigidez do radier. Nas tabelas do Apêndice 3 aparecem em negrito os valores das máximas distorções angulares das configurações que satisfazem o limite proposto na Figura 4. 25, para que sejam evitados danos nas paredes.

Combinando-se os resultados obtidos em cada caso para as três seções analisadas, pôde-se enfim chegar às configurações que minimizam os recalques diferenciais de modo que as distorções angulares associadas sejam aceitáveis. Nenhuma configuração foi aprovada para $K_r = 0,01$ ou $K_r = 0,1$ e para $K_r = 1$, com

$L/d = 50$, foram aceitas as configurações com os seguintes números de estacas: 13 (configuração (a)), 17, 21 e 25. Isso mostra que o número de estacas pode ser significativamente reduzido (no caso, de 25 para 13) se o objetivo de estaquear o radier for simplesmente a redução dos recalques diferenciais.

Ainda com relação aos resultados apresentados no Apêndice 3, também é importante observar as diferenças apresentadas entre as configurações com mesmo número de estacas em diferentes posições, o que provavelmente decorre das diferenças entre a distribuição de carga entre o radier e as estacas já comentada anteriormente.

4.6.3.5. Capacidade de suporte

Com o objetivo de validar as hipóteses feitas nesta análise, ou seja, a utilização de estacas como elementos de redução de recalques, projetadas para atuar em condições de não-ruptura, foi procedida a estimativa do coeficiente de segurança contra a ruptura das mesmas.

Para esta análise considerou-se que o solo investigado apresenta características de uma argila rija saturada cuja resistência ao cisalhamento não-drenada foi adotada como $S_u = 0,3\text{MPa}$.

A capacidade de carga do radier foi estimada então

$$q_r = N_c S_u = 2\pi \times 0,3 = 1,88\text{Mpa} \quad (4.12)$$

onde N_c é um fator de capacidade de carga, nesse caso igual a 2π .

Considerando que a carga uniformemente distribuída atuante no radier é igual a $0,5\text{MPa}$, pode-se concluir que o radier como elemento isolado de fundação apresenta adequada capacidade de suporte, sendo as estacas adotadas apenas com o objetivo de minimizar os recalques diferenciais.

Em contrapartida, a capacidade de carga das estacas Q_p foi calculada por

$$Q_p = Q_B + Q_L = (N_c S_u + \sigma_{V0}) A_p + (S_u A_L) \quad (4.13)$$

onde:

Q_B é a parcela de resistência de ponta;

Q_L é a parcela de resistência lateral;

N_c é um fator de capacidade de carga, cujo valor foi estimado como 15;

A_p é a área da seção transversal da estaca;

σ_{V0} é a tensão vertical total na profundidade da ponta da estaca;

A_L é a área lateral da estaca.

A Figura 4. 26 apresenta as parcelas de resistência de ponta, lateral e total na profundidade da base da estaca em função do comprimento relativo L/d .

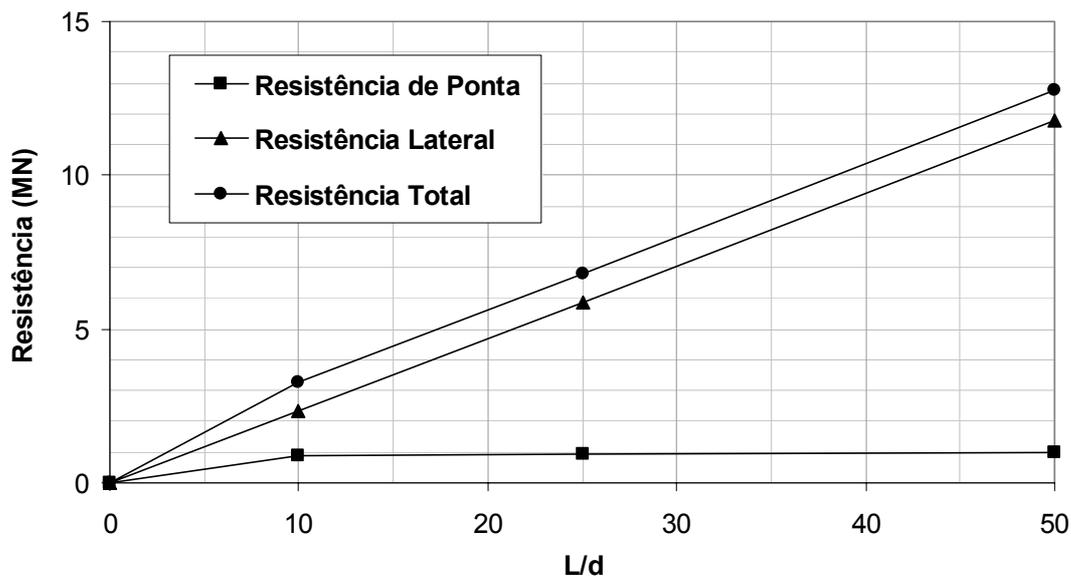


Figura 4. 26 – Parcelas de resistência de ponta, lateral e total em função do comprimento relativo das estacas.

As considerações de projeto aqui adotadas pressupõem que as estacas atuem apenas como elemento redutor de recalque e não de suporte, de tal modo que não se admite a total mobilização da sua capacidade de carga, o que significaria submetê-la a grandes deslocamentos, contrariando a sua função de redutora de recalques.

Com o propósito de verificar essa consideração, após calcular a capacidade de carga de cada uma das estacas em cada caso estudado, o passo seguinte foi obter um coeficiente de segurança contra a ruptura para cada tipo de estaca do grupo, expresso por

$$F_s = \frac{Q_p}{P_p^i} \quad (4. 14)$$

onde P_p^i é a carga atuante no topo da estaca i que representa o tipo de estaca analisado, calculada pela eq. (4.7).

Os valores dos fatores de segurança obtidos são apresentados graficamente nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29. Conforme esperado, analisando os valores dos coeficientes de segurança dos grupos cujas configurações reduziram satisfatoriamente os recalques diferenciais (13(a), 17, 21 e 25 estacas, com $K_r = 1$ e $L/d = 50$), pode-se notar que apenas as estacas do tipo 4 (estacas mais distantes do centro do radier) para valores de v_s iguais a 0,1 e 0,3 apresentam coeficientes de segurança um pouco mais próximos da unidade. Considerando que a análise de capacidade de carga foi realizada em condições não-drenadas (situação mais crítica) e admitindo valor mínimo, e portanto conservador, para a resistência ao cisalhamento não-drenada, pode-se esperar que as estacas estejam razoavelmente distantes das condições de ruptura.

Além disso, da análise desses gráficos, pode-se concluir que o aumento na rigidez do radier contribui significativamente para o aumento dos coeficientes de segurança contra a ruptura das estacas.

Da Figura 4. 26, pode-se observar que a parcela de resistência lateral aumenta significativamente em função do aumento no comprimento da estaca, enquanto a resistência de ponta sofre apenas uma suave alteração. Isso justifica o fato das estacas mais curtas apresentarem fatores de segurança bastante inferiores quando comparadas com estacas mais longas, principalmente quando se trata das estacas mais afastadas do centro do radier, por apresentarem um carregamento mais elevado.

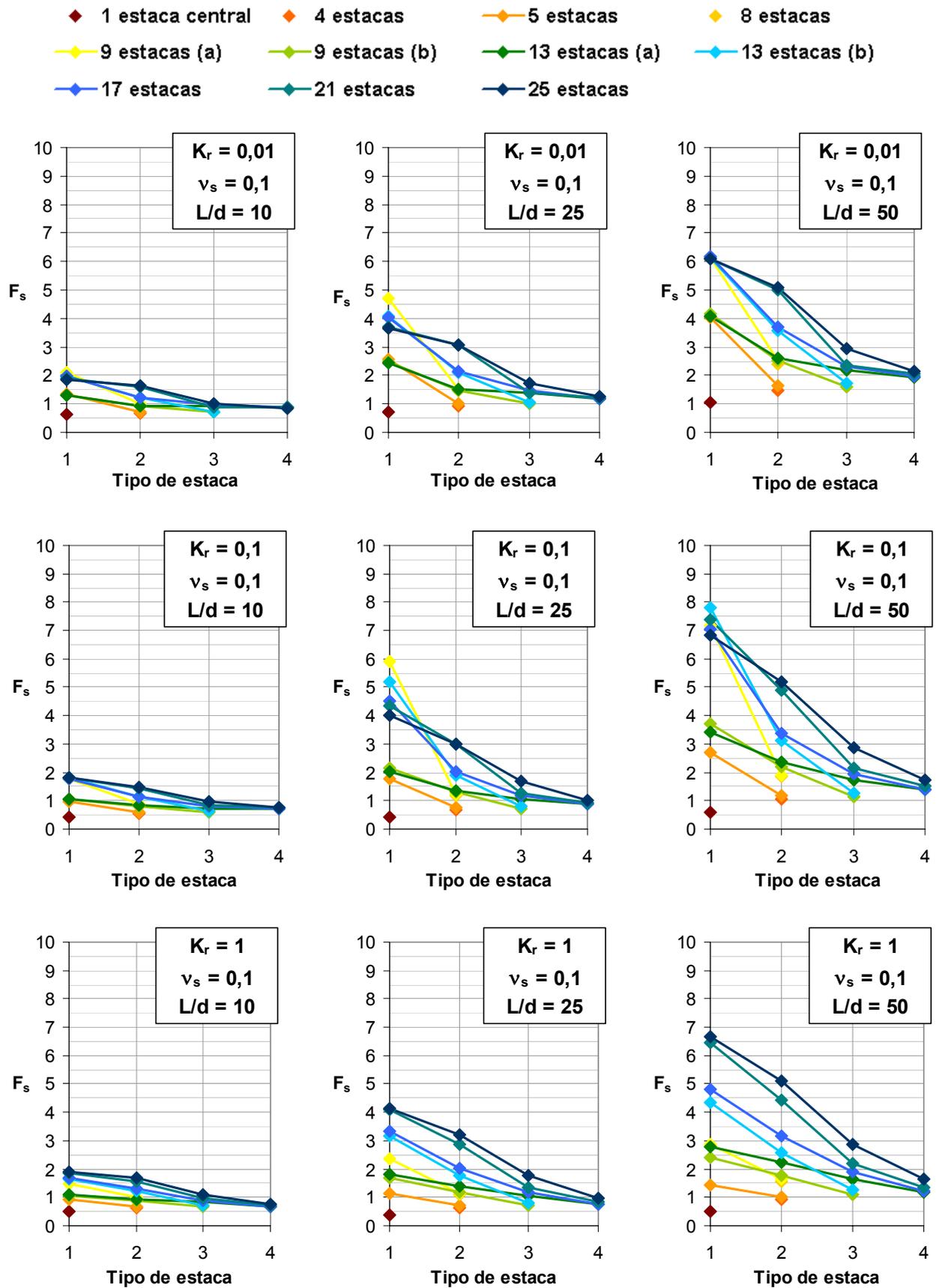


Figura 4. 27 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,1$.

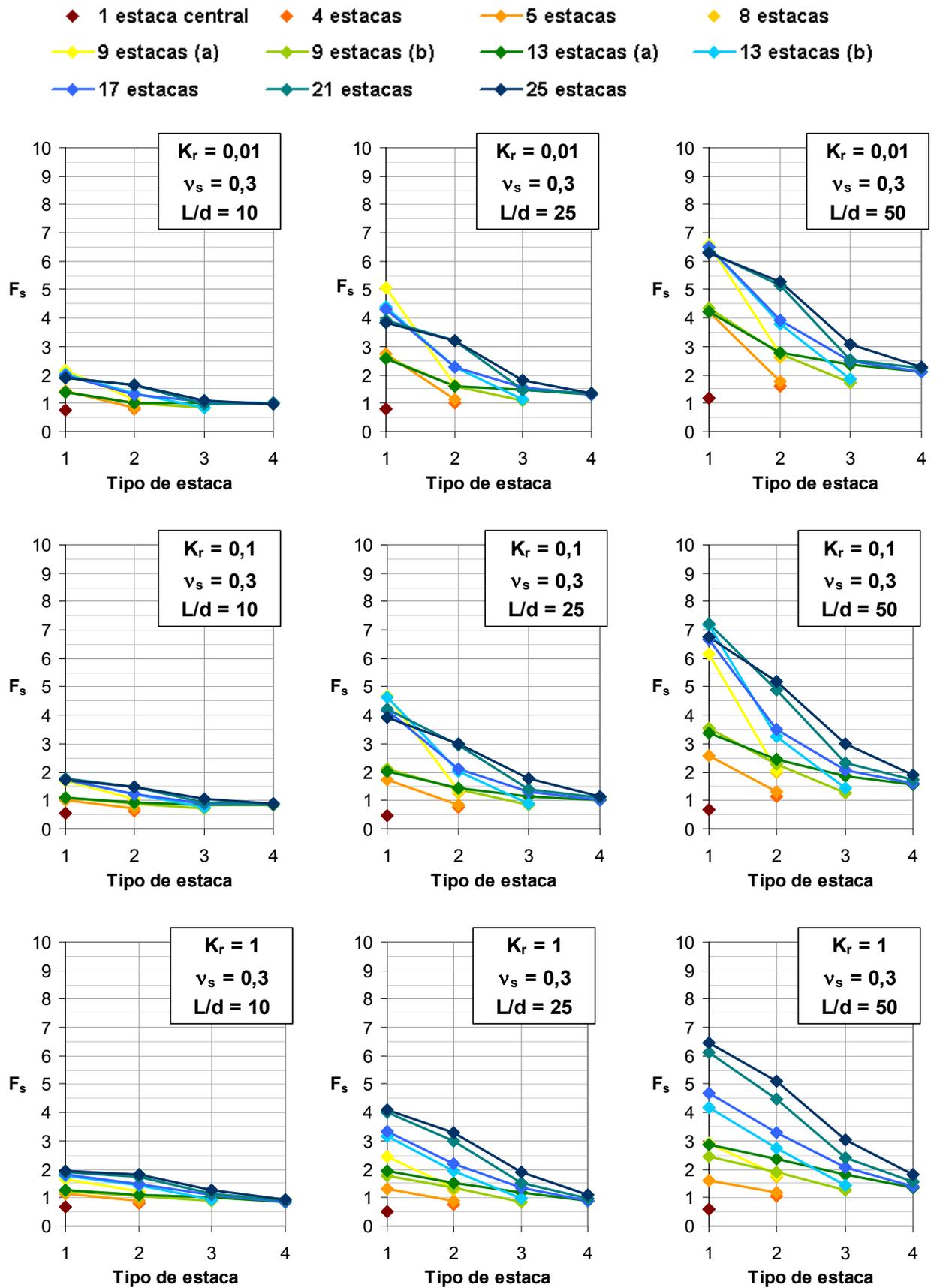


Figura 4. 28 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,3$.

- ◆ 1 estaca central ◆ 4 estacas ◆ 5 estacas ◆ 8 estacas
- ◆ 9 estacas (a) ◆ 9 estacas (b) ◆ 13 estacas (a) ◆ 13 estacas (b)
- ◆ 17 estacas ◆ 21 estacas ◆ 25 estacas

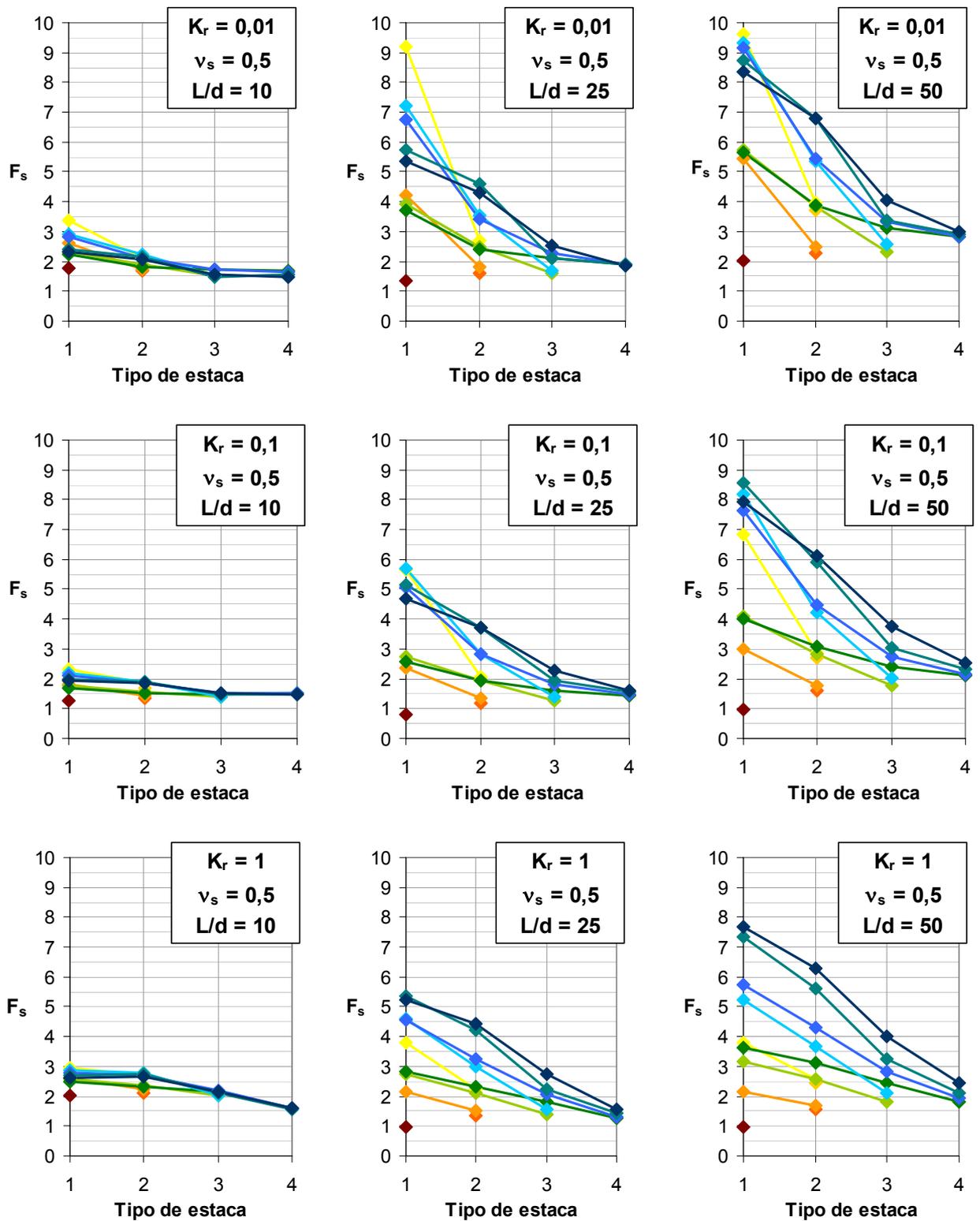
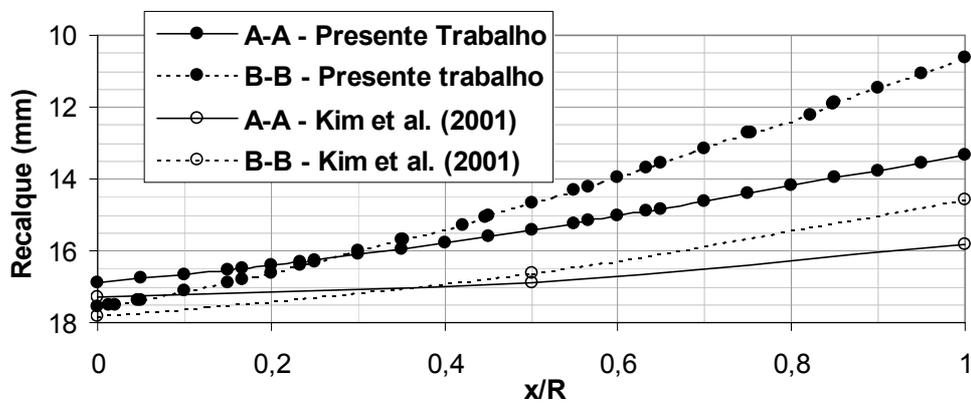


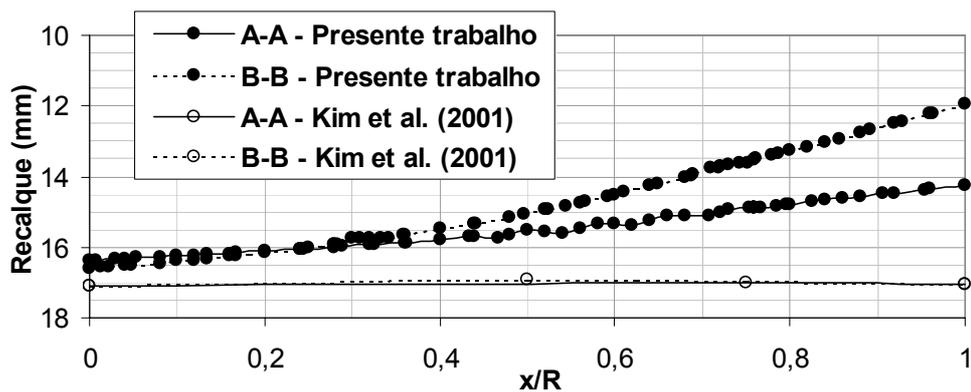
Figura 4. 29 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,5$.

4.7. ESTUDO DE CASO APRESENTADO POR KIM *et al.* (2001)

Com o objetivo de verificar a validade do método de análise proposto por Kim *et al.* (*op. cit.*) para avaliar a interação do conjunto radier-estacas-solo procedeu-se uma retroanálise do exemplo 1 descrito anteriormente no item 2.5, no qual considera-se uma carga uniformemente distribuída sobre a superfície do radier. A metodologia de análise adotada nessa verificação corresponde àquela proposta no presente trabalho. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.30 juntamente com aqueles obtidos por Kim *et al.* (*op.cit.*).



(a) configuração inicial



(b) configuração ótima

Figura 4.30 – Resultados obtidos no presente trabalho para caso apresentado por Kim *et al.* (2001).

Conforme esperado, pode-se comprovar que embora o processo de otimização proposto por Kim et al. (2001) apresente resultados satisfatórios com relação à minimização dos recalques diferenciais, o mesmo não acontece com o método de análise adotado para estimativa de recalques do radier estaqueado devido às diversas limitações já citadas anteriormente no item 2.5.