

RUITER DA SILVA SOUZA

**ANÁLISE DOS FATORES DE INTERAÇÃO
ENTRE ESTACAS EM RADIER ESTAQUEADO:
COMPARAÇÃO ENTRE DUAS FERRAMENTAS
NUMÉRICAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Maurício Martines Sales

D0019G10

GOIÂNIA

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

S729a Souza, Ruiteir da Silva.
Análise dos fatores de interação entre estacas em radier
estaqueado : comparação entre duas ferramentas numéricas
[manuscrito] / Ruiteir da Silva Souza. - 2010.
205 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Martines Sales.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia Civil, 2010.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas, símbolos e
tabelas.

Apêndice.

1. Radier estaqueado 2. Estacas 3. Métodos numéricos 4.
Interação - estacas I. Título.

CDU: 624.155.1

*Aos meus queridos pais, Oton e Dirce,
sem os quais não teria chegado até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, cuja glória deste trabalho é toda dele, por me proteger, guiar meus passos e sempre dar oportunidades cada vez maiores. Obrigado senhor Jesus, sem tua ajuda não seria ninguém. Louvado seja seu santo nome.

À toda minha família, mas em primeiro lugar ao meu pai (Oton), minha mãe (Dirce) e minha esposa (Leidiane). Ao meu pai e amigo que sempre foi exemplo de honestidade, dignidade e, principalmente, por me incentivar a lutar pelos meus sonhos. À minha mãe pelo amor, suporte e por ser a maravilhosa pessoa que é. À minha esposa que sempre está do meu lado nas horas de felicidade e de dificuldade. Obrigado a vocês, sem essa ajuda nunca conseguiria chegar até aqui.

Ao meu orientador e amigo, prof. Maurício, por ser um grande profissional, e sempre estar disposto a ajudar com ótimas sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo, prof. Ademir, pela ajuda com o programa DIANA e por sempre estar disposto a colaborar.

À Cristal Engenharia, nas pessoas do eng. Paulo Ribeiro e eng. Rogério Favoretto, pelo apoio durante todo o período do curso de mestrado.

Ao Fausto Jr. (Faustinho), pelas ajudas na área de informática. Sem elas esta pesquisa talvez não se concretizasse.

À todos os professores do curso de mestrado, pela competência, retidão e profissionalismo. Com esse corpo docente, com certeza, o GECON só tende a crescer.

Aos meus colegas de trabalho, grandes profissionais e que tem, acima de tudo, senso de humor para encarar os desafios do dia-a-dia.

À Matilde, pelas “dicas” com o programa DIANA. Ajuda fundamental no início das simulações.

*E não vos conformeis a este mundo, mas transformai-vos pela renovação da vossa mente,
para que experimenteis qual seja a boa, agradável, e perfeita vontade de Deus.
Romanos 12:2*

RESUMO

As pesquisas realizadas nas últimas décadas sobre o recalque de fundações estaqueadas, principalmente quando a mesma é considerada como radier estaqueado, tiveram grande evolução devido ao avanço das ferramentas computacionais utilizadas nas análises. Porém, a análise tridimensional de uma fundação estaqueada considerando a interação entre seus componentes (solo, estacas e radier), continua sendo um problema muito complexo. Para uma avaliação satisfatória da interação entre os elementos da fundação, ferramentas numéricas como o Método de Elementos de Contorno (M.E.C.), o Método de Elementos Finitos (M.E.F.) e métodos híbridos, que combinam dois ou mais métodos, estão disponíveis, cada uma com suas vantagens e desvantagens. O M.E.F. é considerado pelo meio técnico como o método mais completo para avaliação de um radier estaqueado, mas seu alto tempo de processamento, tomado em grande parte das análises, impede que seu uso se torne mais corriqueiro. Com isso, surge a necessidade de se comparar essa metodologia com outras, como a usada em programas simplificados, que diminuem o tempo de processamento. Para a avaliação da proximidade dos resultados determinados por diferentes métodos, esta dissertação apresenta a simulação de alguns blocos de estacas, calculados como raders estaqueados, utilizando dois programas para prever seus comportamentos, o GARP e o DIANA. O GARP é um programa híbrido que analisa o radier pelo M.E.F. e o conjunto estacas-solo pelo M.E.C. e, como os demais programas do gênero divulgados na literatura, não considera a influência de estacas intermediárias na análise. O DIANA é um programa de elementos finitos puro, baseado no método dos deslocamentos. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar como a consideração ou não dos fatores de interação entre estacas pode modificar a previsão de recalques e carga nas estacas. Para isso, foi avaliado como a atribuição ou a omissão dos fatores de interação dentro de regiões específicas, que englobam algumas ou todas as estacas, modificam a previsão do desempenho da fundação e fazem com que se aproximem ou se distanciem dos resultados do M.E.F., considerado o mais exato. A forma como os programas simplificados tratam o problema faz com que suas previsões de recalques sejam excessivas. Para contornar este fato e fazer com que os resultados de recalques dos métodos simplificados sejam mais próximos dos previstos pelo M.E.F., a forma encontrada foi a imposição de um limite na distância usada no cálculo da interação entre as estacas, dependendo do tamanho do radier e número de estacas do caso. Vários exemplos de raders estaqueados em solos homogêneos foram estudados e são apresentados os limites máximos da distância de interação entre estacas que originaram melhores resultados na previsão do recalque. Em todos os exemplos avaliou-se o efeito da rigidez do radier nestes resultados. Também foi analisado um caso em solo heterogêneo, onde se observou que este fato também interfere no processo de interação entre estacas. Para a previsão de carga nas estacas o resultado foi distinto da previsão de recalques e observou-se que a não limitação da distância máxima de interação entre estacas foi o que resultou em melhores previsões.

Palavras-chave: Radier Estaqueado. Estacas. Métodos Numéricos. Interação entre Estacas.

ABSTRACT

Researches done in the last decades concerning the settlement of pile foundations, mainly when it's considered as piled raft, had greatly evolved due the progress on computational tools used in the analysis. However, the tridimensional analysis of a pile foundation, taking into account the interaction between your components (soil, piles and raft), is still a very complex problem. To achieve a satisfactory evaluation of the interaction between the foundation's elements, numerical tools like Boundary Elements Method (B.E.M.), Finite Elements Method (F.E.M.) and hybrid methods, that combines two or more methods, are available, each one with its own advantages and drawbacks. The F.E.M. is considered in the technical sphere as the most complete method for piled raft evaluation, but your high processing time requirements, required in the analyses, prevents your usual employment. For this reason, a necessity to compare this methodology with others, as the one used in simplified programs, that decreases the processing time, arises. To evaluate the results proximity achieved by different methods, this work presents the simulation of some pile blocks, calculated as piled rafts, employing two programs (GARP and DIANA) to foresee your behavior. GARP is a hybrid program which analyzes the raft by using F.E.M. and the piles-soil set by B.E.M. and, like the other programs of same kind published in the literature, it doesn't take the influence between intermediary piles into account for the analysis. DIANA is a purely finite elements program, based on the displacement method. Thus, the main objective of this work was to evaluate how taking or not the interaction factor between piles into consideration can modify the predictions of settlement and pile loads. For that, it was evaluated how the attribution or omission of these interaction factors into specific regions that comprise some or all the piles, modifies the predictions of the foundation performance and makes them approximate or distant from the F.E.M. results, considering the most exact one. The way that the simplified programs handle the problem, makes the settlement previsions excessive. To contour this and to make the settlement results from the simplified methods become close of the expected ones from F.E.M., the discovered way was the imposition of a limit in the distance used in the calculation of the piles interaction, based on the raft's size and the number of piles in that case. Many examples of pile rafts in homogeneous soils was evaluated and the maximum distance limits of interaction between piles that generated the best results in the settlement prevision are shown. In all examples, the effect of raft stiffness in these results was also taken into account. Also, an analysis case in heterogeneous soil was done, where it was observed that this fact also interferes in the piles interaction process. For pile load predictions, the results were distinct from settlement prediction and was noticed that not limiting the maximum interaction distance between the piles generated the best previsions.

Keywords: Piled Raft. Piles. Numerical Methods. Interaction Between Piles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Bloco sobre estacas (BEZERRA, 2003) – modificada pelo autor	33
Figura 2.2 – Radier estaqueado (BEZERRA, 2003) – modificada pelo autor	35
Figura 2.3 – Comparação do desempenho de duas fundações similares (SALES, 2000) – modificada pelo autor	37
Figura 2.4 - Colocação de estacas centrais para a redução dos recalques diferenciais (RANDOLPH, 1994b) – modificada pelo autor.....	38
Figura 2.5 – Esquema de como é feito o controle de recalques diferenciais (RANDOLPH, 1994b) – modificada pelo autor.....	39
Figura 2.6 – Interação entre uma estaca carregada e outra descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor	42
Figura 2.7 – Interação entre uma estaca carregada e a superfície do solo descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor	42
Figura 2.8 – Interação entre uma superfície de solo carregada e uma estaca descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor	43
Figura 2.9 – Interação entre superfície de solo carregada e outra descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor	44
Figura 2.10 – Edifício Messeturm (SILVA, 2009).....	46
Figura 2.11 – Disposição das estacas na fundação do edifício Messeturm (BACELAR, 2003) – modificada pelo autor	46
Figura 2.12 – Posição da instrumentação da fundação do edifício Messeturm (SALES, 2000) – modificada pelo autor	47
Figura 2.13 – Edifício Messe-Torhaus (REUL; RANDOLPH, 2003) – modificada pelo autor	48
Figura 2.14 – Distribuição de carga em algumas estacas do radier norte. Comparação entre o medido e o calculado (CHOW, 2007) – modificada pelo autor	49
Figura 2.15 – Seção Transversal do edifício Westend st. 1 (REUL; RANDOLPH , 2003) – modificada pelo autor	50

Figura 2.16 – Layout das estacas e posição dos dispositivos de medição do edifício Westend st. 1 (SALES , 2000).....	51
Figura 2.17 – Comparação entre os resultados de análises e valores medidos – modificada pelo autor (REUL; RANDOLPH , 2003)	52
Figura 3.1 – Fluxo de trabalho no Fx^+ for DIANA (TNO, 2008)	56
Figura 3.2 – Janela principal do Fx^+ for DIANA (TNO, 2008) – modificada pelo autor	57
Figura 3.3 – Estaca isolada utilizada na análise	58
Figura 3.4 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 20 m (H/L=4)	60
Figura 3.5 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 20 m (H/L=1,5)	61
Figura 3.6 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 40 m (H/L=1,5)	62
Figura 3.7 – Comparação entre as variadas malhas e condições (L=20m e H/L=4).....	63
Figura 3.8 – Grupo de 9 estacas proposto por Ottaviani (1975)	64
Figura 3.9 – Resultados do comportamento de um grupo de 9 estacas com 17 m de comprimento.....	65
Figura 3.10 – Resultados do comportamento de um grupo de 9 estacas com 37 m de comprimento.....	66
Figura 3.11 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-18 (SALES, 2000).....	67
Figura 3.12 – Elemento TE12L (TNO, 2008)	68
Figura 3.13 – Elemento CTE30 (TNO, 2008).....	68
Figura 3.14 – Teste de convergência do problema proposto pelo TC-18.....	70
Figura 3.15- Vista em planta do domínio horizontal usado nas análises do radier sobre 100 estacas	71
Figura 3.16 – Fatores de interação utilizados no GARP (LIMA, 2007)	73
Figura 3.17 – Comportamento de um radier com 9 estacas proposto por Kuwabara (1989) para valores de $s/D=3$	75
Figura 3.18 – Comportamento do radier com 9 estacas para valores de $s/D=5$	76
Figura 3.19 – Exemplo hipotético analisado por vários métodos (POULOS <i>et al.</i> , 1997)	77

Figura 3.20 – Comparação dos métodos no Radier com 15 estacas (P=12 MN).....	78
Figura 3.21 – Comparação dos métodos no Radier com 15 estacas (P=15 MN).....	79
Figura 3.22 – Comparação dos métodos no Radier com 9 estacas (P=12 MN).....	79
Figura 4.1 – Grupo com duas estacas (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor	83
Figura 4.2 – Fatores de interação entre duas estacas em uma camada semi-infinita (POULOS, 1968) – modificada pelo autor.....	88
Figura 4.3 – Fatores de correção de α devido ao efeito de camada finita (POULOS; DAVIS, 1980)- modificada pelo autor	89
Figura 4.4 – Fatores de correção de α devido ao efeito do alargamento da base (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor.....	90
Figura 4.5 – Fatores de correção de N_v devido ao efeito do coeficiente de Poisson (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor.....	91
Figura 4.6 – Efeito da distribuição de E_s no fator de interação (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor	92
Figura 4.7 – Fatores de interação para estacas com carga de ponta predominante (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor.....	93
Figura 4.8 – Fator de redução da interação F_E (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor.....	94
Figura 4.9 – Interação entre duas estacas de diâmetros diferentes (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor	95
Figura 4.10 – Distribuição da tensão cisalhante na direção radial da estaca (RANDOLPH; WROTH, 1978) – modificada pelo autor	96
Figura 4.11- Fatores de interação para um par de estacas rígidas (a) solo homogêneo ($\nu=0,4$); (b) solo não-homogêneo ($\nu=0,4$) (RANDOLPH; WROTH, 1979) – modificada pelo autor.	100
Figura 4.12- Processo de interação entre estacas (MYLONAKYS; GAZETAS, 1998) – modificada pelo autor	102
Figura 4.13- Notação para análise de grupo de estacas e numeração dos nós (EL SHARNOUNY; NOVAK, 1990).....	104
Figura 4.14- Problema proposto para avaliação dos métodos.....	109

Figura 4.15- Condições de contorno do problema	109
Figura 4.16- Malha usada na análise com $s/D=2,5$ e $L/D=10$: (a) vista geral; (b) ampliação da vista próxima às estacas; (c) vista da região entre as estacas	110
Figura 4.17- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=10$	111
Figura 4.18- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=25$	111
Figura 4.19- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=50$	112
Figura 4.20- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=100$	113
Figura 4.21- Casos propostos para avaliação dos métodos em solo estratificado (MYLONAKIS; GAZETAS, 1998) – modificada pelo autor	114
Figura 4.22- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 1)	115
Figura 4.23- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 2)	115
Figura 4.24- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 3)	116
Figura 4.25- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 4)	117
Figura 5.1- Radier sobre 2 estacas com o pilar no centro	121
Figura 5.2- Malhas utilizadas na modelagem do radier com 2 Estacas: (a) Vista geral; (b) Malha da estaca e radier (espessura de 1,0 m); (c) Ampliação da vista próxima ao radier (espessura de 0,5 m)	122
Figura 5.3- Carga mobilizada nas estacas: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura	122
Figura 5.4- Carga mobilizada pelo radier: (a) Caso com 1,0 m de espessura ; (b) Caso com 0,5 m de espessura	123
Figura 5.5- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier com 2 estacas.....	124
Figura 5.6- Plano e coordenadas consideradas para os resultados de recalque no radier sobre 2 estacas	125
Figura 5.7- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 2 estacas (espessura de 1,0 m)	125
Figura 5.8- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 2 estacas (espessura de 0,5 m)	126
Figura 5.9- Radier sobre 4 estacas com o pilar no centro	127

Figura 5.10- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 4 Estacas: (a) Detalhe da placa e estaca; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,0 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura).....	127
Figura 5.11- Carga mobilizada nas estacas: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura	128
Figura 5.12- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 4 estacas	128
Figura 5.13- Carga mobilizada pelo radier: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura	129
Figura 5.14- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 4 estacas	130
Figura 5.15- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 4 estacas (Placa de 1,0 m).....	130
Figura 5.16- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 4 estacas (Placa de 0,5 m).....	131
Figura 5.17- Radier sobre 9 estacas com o pilar no centro.....	132
Figura 5.18- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 9 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,0 m de espessura); (c) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)	132
Figura 5.19- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 9 estacas (1,0 m de espessura)	133
Figura 5.20- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 9 estacas	134
Figura 5.21- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 9 estacas (0,5 m de espessura)	135
Figura 5.22- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 9 estacas	135
Figura 5.23- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 9 estacas (Placa de 1,0 m).....	136
Figura 5.24- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 9 estacas (Placa de 0,5 m).....	136
Figura 5.25- Radier sobre 25 estacas com o pilar no centro.....	137

Figura 5.26- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 25 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,5 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura).....	138
Figura 5.27- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 25 estacas (1,5 m de espessura)	139
Figura 5.28- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 25 estacas	139
Figura 5.29- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 25 estacas (0,5 m de espessura)	140
Figura 5.30- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 25 estacas	141
Figura 5.31- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 25 estacas (Placa de 1,5 m)...	142
Figura 5.32- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 25 estacas (Placa de 0,5 m)...	143
Figura 5.33- Radier sobre 36 estacas com o pilar no central.....	144
Figura 5.34- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 36 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,5 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura).....	145
Figura 5.35- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas (1,5 m de espessura)	145
Figura 5.36- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 36 estacas	146
Figura 5.37- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas (0,5 m de espessura)	147
Figura 5.38- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais (radier sobre 36 estacas).....	148
Figura 5.39- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas (Placa de 1,5 m)...	149
Figura 5.40- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas (Placa de 0,5 m)...	150
Figura 5.41- Radier sobre 64 estacas com o pilar no central.....	151

Figura 5.42- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 64 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 2,0 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura).....	151
Figura 5.43- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 64 estacas (2,0 m de espessura)	152
Figura 5.44- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 64 estacas	153
Figura 5.45- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 64 estacas (0,5 m de espessura)	154
Figura 5.46- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 64 estacas	155
Figura 5.47- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 64 estacas (Placa de 2,0 m)...	156
Figura 5.48- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 64 estacas (Placa de 0,5 m)...	157
Figura 5.49- Radier sobre 100 estacas com o pilar no central.....	158
Figura 5.50- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 100 Estacas: (a) Vista geral; (b) Detalhe da malha das estacas; (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 2,0 m de espessura).....	159
Figura 5.51- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 100 estacas (2,0 m de espessura)	159
Figura 5.52- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 100 estacas	160
Figura 5.53- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 100 estacas (0,5 m de espessura)	161
Figura 5.54- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 100 estacas	162
Figura 5.55- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 100 estacas (Placa de 2,0 m) .	163
Figura 5.56- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 100 estacas (Placa de 0,5 m) .	164
Figura 5.57 – Perfil de solo estratificado estudado	165

Figura 5.58- Detalhe da malha utilizada na modelagem do radier com 36 estacas em solo estratificado: (a) Vista geral; (b) Ampliação da malha próxima às estacas.....	165
Figura 5.59- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas: (a) radier em solo estratificado; (b) radier em solo homogêneo	166
Figura 5.60- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas: (a) radier em solo estratificado; (b) radier em solo homogêneo	167
Figura 6.1- Recalque máximo nos casos com radier rígido	173
Figura 6.2- Recalque máximo nos casos com radier flexível (0,5 m de espessura).....	174
Figura 6.3- Recalque na estaca do canto (radier rígido).....	175
Figura 6.4- Recalque na estaca do canto (radier flexível).....	176
Figura 6.5- Recalques mínimos (casos de radier rígido).....	177
Figura 6.6- Recalques mínimos (casos de radier flexível)	177
Figura 6.7- Recalques médios (casos de radier rígido)	178
Figura 6.8- Recalques médios (casos de radier flexível).....	179
Figura 6.9- Carga mobilizada pelos radiers nos casos de placa rígida	180
Figura 6.10- Carga mobilizada pelos radiers nos casos de placa flexível.....	181
Figura 6.11- Previsão da carga mobilizada pelo radier com o aumento de $s/D_{m\acute{a}x}$ no GARP	182
Figura 6.12- Posição prevista para a estaca mais carregada de acordo com os dois programas (radier mais rígido).....	183
Figura 6.13- Carga na estaca mais solicitada, normalizada pela carga média, prevista para cada estaca nos diferentes casos (radier rígido).....	183
Figura 6.14- Carga na estaca mais solicitada, segundo o DIANA, normalizada pela carga média prevista para cada estaca nos diferentes casos (radier flexível).....	184
Figura 6.15- Posição prevista para a estaca mais carregada de acordo com o GARP (radier mais flexível).....	185
Figura 6.16- Carga na estaca mais solicitada, segundo o GARP, normalizada pela carga média prevista para cada estaca nos diferentes casos (radier flexível)	185

Figura 6.17- Posição prevista para a estaca menos carregada de acordo com os dois programas (radier mais flexível)	186
Figura 6.18- Carga na estaca menos solicitada, normalizada pela carga média prevista para cada estaca nos diferentes casos (radier rígido).....	187
Figura 6.19- Carga na estaca menos solicitada segundo o DIANA, normalizada pela carga média prevista para cada estaca nos diferentes casos (radier flexível).....	188
Figura A.1 – Interação entre duas estacas de diferentes comprimentos (WONG; POULOS, 2005) – Modificada pelo autor	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Programas utilizados na análise de radier estaqueado (SALES, 2000) – modificada pelo autor	41
Tabela 3.1 – Comportamento do Radier proposto pelo TC-18	67
Tabela 3.2 – Tempos de processamento elemento TE12L.....	69
Tabela 3.3 – Tempos de processamento elemento CTE30.....	69
Tabela 5.1- Tempos de processamento de alguns casos.....	168

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ISSMFE – *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*;

M.E.C. – Método dos Elementos de Contorno;

M.E.F. – Método dos Elementos Finitos;

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação;

PPG-GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil.

LISTA DE SÍMBOLOS

- c_u – Coesão não-drenada do solo;
- d – Diâmetro da estaca;
- g – Parâmetro que dita a parcela de redução do módulo elástico;
- h – Espessura da camada de solo;
- l – Comprimento da estaca;
- q – Carga distribuída aplicada;
- r – Medida radial do ponto onde se deseja conhecer o recalque;
- r_0 – Raio da estaca;
- r_m – Máximo raio de influência da tensão cisalhante;
- s – Espaçamento entre estacas;
- s/D – Espaçamento relativo;
- t_r – Espessura do radier;
- w – Recalque da estaca;
- w_b – Recalque da base da estaca;
- w_s – Recalque no fuste da estaca;
- B – Extensão do domínio horizontal;
- D – Lado da seção; Diâmetro da estaca;
- E_0 – Módulo de elasticidade inicial do solo;
- E_b – Módulo de elasticidade do solo na base da estaca;
- E_p – Módulo de elasticidade da estaca;
- E_r – Módulo de elasticidade do radier;
- E_s – Módulo de elasticidade do solo;
- F_E – Fator dependente de K , L/d e E_b/E_s ;
- FS – Fator de segurança;

G, G_s – Módulo cisalhante do solo;

G_1 – Módulo cisalhante da camada de solo na ponta da estaca;

$G_{1/2}$ – Módulo cisalhante da camada de solo no meio do fuste da estaca;

H – Extensão do domínio vertical;

I_{ij} – Fator de influência de deslocamento;

K – Rigidez relativa estaca/solo;

$[K_p]$ – Matriz de rigidez global do grupo;

L – Comprimento da estaca;

N_{db} – Fator de correção do fator de interação devido ao alargamento de base;

N_h – Fator de correção do fator de interação devido à influência de camada finita;

N_v – Fator de correção do fator de interação devido ao coeficiente de Poisson;

P – Carga aplicada;

$P_{estacas}$ – Carga que vai para as estacas;

P_G – Carga total aplicada ao grupo;

P_T – Carga total aplicada ao sistema de fundação;

P_u – Carga última;

R_f – Parâmetro que dita a parcela de redução do módulo elástico;

α, α_{ij} – Fator de interação entre estacas;

α_{pp} – Fator de interação estaca-estaca;

α_{pr} – Coeficiente que define a porcentagem de carga nas estacas;

α_{ps} – Fator de interação estaca-superfície do solo;

α_{sp} – Fator de interação superfície do solo-estaca;

α_{ss} – Fator de interação superfície do solo carregada-superfície do solo descarregada;

γ – Deformação angular;

μ – Parâmetro de rigidez da base da estaca;

ν_c – Coeficiente de Poisson do concreto;

ν_p – Coeficiente de Poisson da estaca;

ν_r – Coeficiente de Poisson do radier;

ν_s – Coeficiente de Poisson do solo;

ρ – Recalque no topo da estaca;

ρ_1 – Recalque de uma estaca isolada sobre carga unitária;

ρ_i – Recalque da estaca i ;

$\sigma_{\text{máx}}$ – Taxa admissível do solo;

τ_0 – Tensão cisalhante máxima na direção radial;

ξ - Fator que representa a resistência da estaca receptora à recalques;

$\Psi_{(s)}$ – Fator de atenuação das deformações;

Ω - Parâmetro de transferência de carga de Winkler;

Σ - Somatório

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	27
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	28
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	29
CAPÍTULO 2 - COMPORTAMENTO DE GRUPOS DE ESTACAS	31
2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	32
2.1.1 Bloco Sobre Estacas.....	33
2.1.2 Radier Estaqueado	33
2.2 APLICABILIDADE DO RADIER ESTAQUEADO	35
2.3 ABORDAGENS PARA PROJETO	36
2.3.1 Abordagem Convencional	36
2.3.2 Creep Piling	36
2.3.3 Controle de Recalque Diferencial.....	38
2.4 MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO	39
2.5 ALGUNS TRABALHOS REGIONAIS SOBRE RADIER ESTAQUEADO.....	44
2.6 DESEMPENHO DE ALGUMAS OBRAS.....	45
2.6.1 Edifício Messeturm.....	45
2.6.2 Edifício Messe-Torhaus	48
2.6.3 Edifício Westend st. 1	50
2.6.4 Treptowers Berlin	52
CAPÍTULO 3 - FERRAMENTAS NUMÉRICAS	54
3.1 PROGRAMA DIANA.....	55
3.1.1 Procedimento de Análise	55
3.1.2 Validação do Programa DIANA.....	57
3.1.2.1 O caso de uma estaca isolada.....	58
3.1.2.2 O caso de um radier com 9 estacas	63
3.1.2.3 O caso de um radier sobre 16 estacas (TC-18).....	66
3.1.3 Escolha do Elemento Finito.....	68
3.1.4 Verificação do Domínio Lateral	70

3.2	PROGRAMA GARP.....	71
3.2.1	Validação do Programa GARP	74
3.2.1.1	O caso do radier sobre 9 estacas proposto por Kuwabara (1989).....	75
3.2.1.2	Exemplo de Radier sobre 15 estacas apresentado por Poulos <i>et al.</i> (1997) 76	
3.3	CASOS A SEREM ANALISADOS NESTE TRABALHO	80
3.3.1	Informações Geométricas	80
3.3.2	Propriedades dos Materiais e Demais Parâmetros	81
	CAPÍTULO 4 - FATORES DE INTERAÇÃO ENTRE ESTACAS DE FUNDAÇÃO.....	82
4.1	MÉTODOS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS.....	82
4.1.1	Método de Poulos e Davis	83
4.1.1.1	Análise de grupos gerais de estacas	85
4.1.1.2	Influência nos fatores de interação dos efeitos de estaca flutuante, do espaçamento entre estacas e da profundidade relativa	87
4.1.1.3	Efeito de uma camada finita	88
4.1.1.4	Efeito do alargamento da base	89
4.1.1.5	Efeito do coeficiente de Poisson.....	90
4.1.1.6	Efeito do módulo de elasticidade do solo	91
4.1.2	Estacas com carga de ponta predominante assentadas em camadas rígidas... 92	
4.1.2.1	Efeito de uma camada finita de solo compressível.....	93
4.1.3	Interação entre Estacas Diferentes	94
4.2	MÉTODO DE RANDOLPH E WROTH (1979)	96
4.3	MYLONAKIS E GAZETAS (1998).....	100
4.4	EL SHARNOUBY E NOVAK (1990).....	103
4.5	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	105
4.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO.....	107
4.7	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TEÓRICOS COM O M.E.F.....	108
4.7.1	Primeira Etapa (Solo Homogêneo)	108

4.7.2	Segunda Etapa (Solo Estratificado)	113
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
CAPÍTULO 5 - ANÁLISES E RESULTADOS		119
5.1	O RADIER SOBRE 2 ESTACAS.....	121
5.1.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	122
5.1.2	Recalques Diferenciais	125
5.2	O RADIER SOBRE 4 ESTACAS.....	126
5.2.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	127
5.2.2	Recalques Diferenciais	129
5.3	O RADIER SOBRE 9 ESTACAS.....	131
5.3.1	Carga Mobilizada Pelos Elementos	132
5.3.2	Recalques Diferenciais	135
5.4	O RADIER SOBRE 25 ESTACAS.....	137
5.4.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	138
5.4.2	Recalques Diferenciais	141
5.5	O RADIER SOBRE 36 ESTACAS.....	144
5.5.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	145
5.5.2	Recalques Diferenciais	147
5.6	O RADIER SOBRE 64 ESTACAS.....	150
5.6.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	152
5.6.2	Recalques Diferenciais	155
5.7	O RADIER SOBRE 100 ESTACAS.....	157
5.7.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	159
5.7.2	Recalques Diferenciais	162
5.8	O RADIER SOBRE 36 ESTACAS EM SOLO ESTRATIFICADO	164
5.8.1	Carga Mobilizada pelos Elementos	166
5.8.2	Recalques Diferenciais	167
5.9	COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO DOS DOIS PROGRAMAS	168

5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	169
CAPÍTULO 6 - COMPARAÇÃO DOS RADIERS ESTAQUEADOS ANALISADOS		172
6.1	RECALQUES.....	172
6.1.1	Recalque Máximo	173
6.1.2	Recalque na Estaca do Canto.....	174
6.1.3	Recalque Mínimo.....	176
6.1.4	Recalque Médio	178
6.2	CARGA NOS ELEMENTOS	179
6.2.1	Carga Mobilizada pelo Radier	179
6.2.2	Carga na Estaca Mais Solicitada.....	182
6.2.3	Carga na Estaca Menos Solicitada.....	186
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	188
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....		191
7.1	CONCLUSÕES	191
7.1.1	Análises Feitas para Pares de Estacas.....	191
7.1.2	Análises nos Radiers Estaqueados.....	192
7.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	194
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		196
APÊNDICE A - MÉTODO DE WONG E POULOS (2005) PARA CÁLCULO DOS FATORES DE INTERAÇÃO EM ESTACAS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS.....		202

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o número de habitantes elevando-se exponencialmente nos grandes centros urbanos, houve um aumento na taxa de ocupação do solo. Com isso, devido à especulação imobiliária que é uma das conseqüências deste efeito, as áreas habitacionais estão cada vez mais valorizadas, resultando na construção de edifícios cada vez mais altos em menores áreas causando, como conseqüência, estruturas cada vez mais esbeltas.

Esses edifícios mais esbeltos provocam carregamentos maiores a serem transmitidos às fundações. Um aspecto que contribui com esse aumento de carga na fundação é o próprio modelo estrutural utilizado em grande parte dos casos, o qual considera nessas edificações pilares de grandes dimensões (pilares-parede) compondo núcleos rígidos como principal sistema de contraventamento, implicando em elementos robustos que transmitem elevados esforços para as fundações. Outro fato também observado é a proximidade entre os pilares centrais, o que algumas vezes inviabiliza o projeto de fundações isoladas. Com isso, a solução para a maioria dos projetos de fundação desses grandes prédios tem sido a utilização de fundações estaqueadas, muitas vezes agrupando vários pilares.

Uma tendência nos projetos de fundações estaqueadas é a consideração do contato do bloco de coroamento com o solo, assim, o sistema de fundação passa a ser vislumbrado como “Radier Estaqueado”.

Este tipo de fundação vem sendo utilizado em vários países para suportar uma grande variedade de estruturas como pontes, edifícios residenciais e indústrias de grande porte. Esta solução em radier estaqueado vem sendo reconhecida como uma boa alternativa do ponto de vista econômico, em contrapartida da fundação convencional em que é considerado que toda a carga proveniente da superestrutura é transferida somente às estacas.

Por outro lado, a utilização de radiers estaqueados exige o desenvolvimento e aprimoramento dos métodos de análise que devem, obrigatoriamente, considerar os mecanismos de transferência de carga e interação entre todos os componentes do sistema de fundação.

Em um caso real, várias hipóteses de carga devem ser testadas pelo projetista de fundações para que se faça a verificação de qual delas gera a combinação mais desfavorável para o projeto. Com isso, o uso de ferramentas numéricas mais elaboradas é de fundamental importância face à complexidade de incorporar todos os fatores que devem ser envolvidos no estudo, como por exemplo, a consideração do efeito tridimensional.

O uso de ferramentas mais elaboradas pode dar respostas bem próximas da realidade com o inconveniente do tempo despendido nas análises. Dentre estas ferramentas destaca-se o Método de Elementos Finitos (M.E.F.), reconhecida pelo meio técnico como a que pode determinar os melhores resultados, por conseguir incorporar diversas propriedades do solo e dos elementos estruturais.

Levando em conta o exposto acima, surge a necessidade de se avaliar outras ferramentas que diminuam esse tempo de processamento como, por exemplo, os métodos híbridos que combinam dois ou mais procedimentos na análise que, a custo de algumas simplificações, pode gerar resultados em menor tempo. Estas simplificações, que podem levar a alguma perda de precisão, não implicam necessariamente em insegurança, cabendo ao projetista a avaliação dos resultados. Dentre os métodos híbridos destacam-se as ferramentas de análise que combinam o M.E.F. em uma parte do domínio, geralmente na simulação do radier, e o Método de Elementos de Contorno no restante (M.E.C.).

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da interação entre estacas, empregado nos métodos híbridos, ao analisar radiers estaqueados, comparando o resultado de um programa que emprega esta metodologia com um resultado mais preciso proveniente de análises de com o M.E.F.

Para isso, foi estudado o efeito dos fatores de interação em radiers estaqueados variando o número de estacas e estratificação do solo.

Outro objetivo importante foi avaliar formas simplificadas para melhorar a acurácia de ferramentas numéricas, baseadas em metodologias híbridas, em relação a soluções mais exatas (M.E.F.) na previsão de recalques e cargas suportadas por estacas e radiers estaqueados.

Como objetivo secundário do trabalho destacou-se a revisão dos métodos teóricos de previsão dos fatores de interação, onde se procurou comparar os resultados de alguns métodos com os determinados por ferramentas numéricas baseadas em elementos finitos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor estruturação do trabalho foi proposta a seguinte organização dos capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta-se o tema estudado e os objetivos do trabalho;
- **Capítulo 2 – Comportamento de Grupos de Estacas:** É feita a fundamentação teórica do tema apresentando os conceitos de fundações estaqueadas, abordagens utilizadas nos projetos e os mecanismos de interação em radier estaqueado. No final do capítulo são apresentados os desempenhos de algumas obras cujas fundações tiveram a concepção em radier estaqueado;
- **Capítulo 3 – Ferramentas Numéricas:** São apresentadas as ferramentas numéricas utilizadas nas análises: O programa GARP e o DIANA. São também expostas as condições e parâmetros utilizados nas análises. E, por último, são simulados com os dois programas casos presentes na literatura para comparação entre os valores obtidos e os resultados publicados, para validação das ferramentas;
- **Capítulo 4 – Fatores de Interação Entre Estacas de Fundação:** Neste capítulo são apresentados os vários métodos para previsão dos fatores de interação por diferentes autores. No final do capítulo são comparados os resultados dos fatores de interação previstos pelos métodos teóricos e os calculados pelo DIANA, em alguns casos propostos na literatura para solo homogêneo e solo estratificado;
- **Capítulo 5 – Análises e Resultados:** São apresentados os vários raders estaqueados analisados e divulgados os resultados obtidos com os dois programas em cada caso;
- **Capítulo 6 - Comparação dos Raders Estaqueados Analisados:** São mostrados gráficos comparativos entre os resultados dos diferentes raders estaqueados, apontando quais os limites de valores de s/D mais se aproximaram para cada grandeza.

- **Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos:** Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas por meio dos resultados das análises efetuadas, nos capítulos anteriores, e as sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

COMPORTAMENTO DE GRUPOS DE ESTACAS

As pesquisas realizadas nas últimas décadas sobre o recalque de estacas evoluíram muito devido ao grande avanço tecnológico no que diz respeito a ferramentas computacionais usadas na análise. Isto aprimorou muito os processos de cálculo que antes eram realizados manualmente, e, com isso, houve um grande avanço no tema. Com esse avanço computacional, alguns autores começaram a desenvolver métodos analíticos para prever de forma mais realista, em relação aos métodos empíricos das décadas de 50 e 60, o comportamento de estacas isoladas e tubulões. Com essas análises, feitas a partir de métodos elásticos, esses autores chegaram a resultados que eram muito satisfatórios quando comparados a dados obtidos em campo. Pôde-se então concluir que a teoria desenvolvida era útil para prever recalque de estacas isoladas e tubulões. Isto estimulou esses pesquisadores e indicou que se a teoria da elasticidade poderia gerar resultados satisfatórios para estacas isoladas, também poderia ser expandida para grupos de estacas com boas previsões.

De acordo com Cunha *et al.* (2001), a concepção tradicional de projeto considera que toda a carga proveniente da superestrutura é transferida às estacas, a capacidade portante do bloco que une as estacas é simplesmente ignorada. Isto gera altos fatores de segurança para as estaca mais solicitadas no grupo e fatores ainda maiores para as demais estacas. Em alguns projetos de fundações estaqueadas, o próprio bloco de coroamento das estacas seria suficiente para suportar toda a carga transmitida pela estrutura à fundação, o que fez surgir o conceito de “estacas como redutores de recalque” e não mais como únicos elementos responsáveis por transferir essa carga ao solo. A partir dessa idéia Randolph (1994a) afirmou que, na maioria dos casos, a primeira razão que deveria governar o projeto de fundações estaqueadas seria o recalque e não a capacidade portante. Isso fez com que uma melhor previsão de recalques de fundações estaqueadas tivesse uma maior importância no contexto dos projetos modernos.

A discussão sobre o uso das estacas como elementos redutores de recalque foi levantada primeiramente em 1977 na conferência de Tóquio da ISSMFE, na qual pesquisadores afirmaram que o projeto de fundações estaqueadas deveria ser regido pela hipótese de se chegar a um recalque aceitável com o menor número de estacas possível, considerando a

influência do bloco de coroamento na análise (BURLAND *et al.*, 1977; VAN TOL *et al.*, 2009).

Assim, uma melhor previsão no comportamento de blocos sobre estacas e radier estaqueado, no que diz respeito a recalques, torna-se de fundamental importância para um projeto otimizado e seguro. E para uma análise satisfatória, com bons resultados, é necessário entender como acontece a interação entre os elementos constituintes do sistema de fundação.

2.1 FUNDAMENTOS TÉORICOS

Na engenharia estrutural, fundação é o conjunto de elementos estruturas que transmitem ao solo a sobrecarga da superestrutura. Na engenharia geotécnica, fundação não é apenas o conjunto de elementos estruturais responsáveis por transferir o carregamento da superestrutura para o solo, e sim, todo e qualquer elemento que suporta os esforços gerados pela edificação sobre o solo. Daí, para a engenharia geotécnica, fundação pode ser tanto os elementos estruturais como também o próprio solo que receberá todas as cargas provenientes da edificação, conceito esse exemplificado por Sales (2000), o qual afirma que na construção de barragens, o termo fundação diz respeito às camadas de solo ou rocha que receberá a sobrecarga do barramento. No que diz respeito a esta pesquisa, fundação será o elemento estrutural que transmite ao solo a sobrecarga da edificação além do solo que os envolve (BEZERRA, 2003).

Ainda no conceito de fundação, a mesma pode se subdividir em dois tipos: profunda e superficial. Segundo Cunha (2003), a diferença básica entre esses dois tipos de fundação é que no segundo, que também é chamado de fundação direta, o mecanismo de ruptura atinge a superfície do terreno enquanto que no primeiro isso não acontece.

Nas fundações profundas destacam-se as fundações estaqueadas. A NBR 6122 (1996) define estaca como o elemento de fundação executado com equipamentos ou ferramentas sem que, em nenhum momento, haja decida de operário. Dentre as fundações estaqueadas, podemos destacar dois tipos os blocos sobre estacas e os radiers estaqueados.

2.1.1 Bloco Sobre Estacas

O conceito de bloco sobre estacas se refere à fundação em que as estacas são interligadas por um bloco responsável apenas pelo coroamento das mesmas, um elemento de ligação, isso faz com que o sistema apresente grande rigidez. O bloco interfere no mecanismo de transmissão da carga transferida para as estacas e esta interferência depende de alguns fatores como, por exemplo, espessura do bloco, comprimento das estacas, espaçamento entre elas, etc (BEZERRA, 2003).

No presente trabalho será empregado o termo “bloco sobre estacas” para o elemento de fundação que, geometricamente tem a mesma forma do radier estaqueado, porém a concepção de projeto é a clássica, onde as estacas são os únicos elementos responsáveis por suportar toda a carga oriunda da estrutura e transmiti-la ao solo onde, mesmo que o bloco esteja em contato com o solo, não se leva em consideração sua contribuição na capacidade de carga do sistema, a Figura 2.1 ilustra esse comportamento.

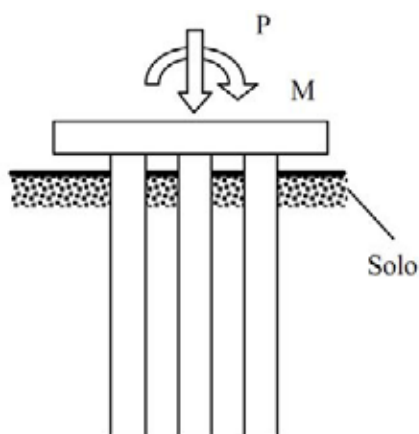


Figura 2.1 – Bloco sobre estacas (BEZERRA, 2003) – modificada pelo autor

2.1.2 Radier Estaqueado

Nas últimas décadas vários trabalhos têm sido publicados, com ênfase no que agora são chamados de "radiers estaqueados", ou seja, grupos de estacas em que o bloco de coroamento contribui positivamente para o comportamento da fundação (por exemplo, Ottaviani, 1975; Randolph, 1994; Mandolini e Viggiani, 1997 e Poulos, 1998). No Contexto do presente trabalho, e em todos os documentos acima mencionados, o termo "radier estaqueado" é expresso como um sistema de fundação no qual ambos os componentes estruturais (estacas e radier) interagem uns com os outros e com o solo ao redor para sustentar as cargas verticais,

horizontais ou momentos provenientes da superestrutura. Independentemente se as estacas são concebidas como "reduzores de recalque" ou não, radiers estaqueados serão definidos aqui conforme mencionado anteriormente (JANDA *et al.*, 2009).

Mandolini (2003) afirma que o projeto de radier estaqueado pode ser concebido observando a ótica de "capacidade de carga e recalque", "capacidade de carga" ou "recalque diferencial". Considerando essa visão de Mandolini (2003), Janda *et al.* (2009) afirma que a definição do parágrafo anterior é inquestionavelmente válida para descrever radiers estaqueados projetados em qualquer um dos possíveis critérios estabelecidos por este último autor.

De acordo com Reul (2004) radier estaqueado é uma construção geotécnica composta, sendo formada por três elementos, estaca, radier e solo. O autor menciona que o projeto do radier estaqueado difere do projeto de fundação tradicional, onde, no primeiro caso, a carga é transferida para o radier e para as estacas.

Segundo Bacelar (2003), radiers estaqueados são um tipo de fundação mista composta por um elemento horizontal, o radier, e elementos verticais que são as estacas, onde a transferência de carga se dá pela base do elemento horizontal e pelo fuste e ponta dos elementos verticais.

O termo "radier estaqueado" pode ser confundido com "sapata estaqueada", pois nos dois casos tem-se um elemento horizontal ligado a uma ou mais estacas. Segundo a NBR 6122 (1996), a diferença estaria no fato de que o radier seria responsável por suportar a carga de todos os pilares de uma obra. Essa conceituação fica meio vaga para a situação de se ter uma fundação com múltiplos pilares, mas não necessariamente todos da obra. Em muitos países esse conceito é mais amplo, aceitando o termo "radier" para grandes placas suportando vários pilares (não necessariamente todos os pilares da obra).

Esse tipo de fundação, na maioria das vezes, parte do princípio de que os elementos verticais são responsáveis por diminuir os recalques diferenciais e totais do sistema. Isto faz com que a quantidade de estacas necessárias seja bem menor que em um projeto tradicional de bloco sobre estacas, gerando menor rigidez do sistema. Randolph (1994b) fala que essa redução é da ordem de 65-75% do número total de estacas e esta, talvez seja, a principal diferença entre o bloco sobre estacas e o radier estaqueado. A Figura 2.2 ilustra o comportamento do radier estaqueado em que, no cálculo, é considerado que a placa está em contato com o solo.

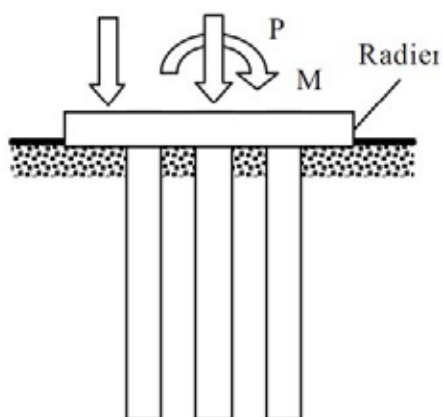


Figura 2.2 – Radier estaqueado (BEZERRA, 2003) – modificada pelo autor

No presente trabalho será usado o termo “Radier Estaqueado” para todos os grupos de estacas analisados com as ferramentas numéricas, uma vez que, em todas as simulações, será considerado o contato da placa com o solo. Assim, o radier contribuirá para o desempenho do sistema de fundação em todos os casos.

2.2 APLICABILIDADE DO RADIER ESTAQUEADO

Segundo Poulos (1994), o projeto de um radier estaqueado envolve duas fases. A primeira preliminar, onde se avalia a viabilidade do uso e estimativa do número de estacas, esta fase geralmente envolve cálculos simples sem o uso do computador. A segunda a fase é de detalhamento, onde se busca a otimização do número e posição das estacas, além da espessura do radier, esta fase deverá fornecer os momentos atuantes, forças e recalques com o auxílio do computador.

Poulos (2001) afirma que a aplicabilidade do radier estaqueado se dá pela inclusão de estacas para controle dos recalques totais e/ou diferenciais, o que significa dizer que, em alguns casos, somente o radier já seria capaz de suportar toda a carga da superestrutura.

Nesse mesmo trabalho o autor numera condições favoráveis a aplicação do radier estaqueado como, por exemplo, perfis de solo formados por areias compactas ou argilas rijas. Perfis de solo compressíveis, solo que estão em processo de adensamento ou sofrendo expansão não são bons para a aplicação do radier estaqueado.

Quanto à capacidade de carga, Mandolini (2003) afirma que esta não é simplesmente a soma algébrica da capacidade de carga do radier e das estacas. O autor diz que as propriedades do

radier são modificadas devido à inserção de estacas e, além disso, o comportamento carga-recalque das estacas é modificado devido à interação entre elas e a sobrecarga no atrito lateral e na ponta das mesmas, provocado pelo radier.

2.3 ABORDAGENS PARA PROJETO

Mandolini (2005) afirma que a prática atual na maioria dos projetos analisa a fundação estaqueada com o bloco de coroamento acima do solo sem contato com o mesmo, considerando um fator de segurança global para o sistema. Porém, em alguns casos, pode ser considerado um F.S. individual para cada estaca, o que é um agravamento adicional, devido a não uniformidade de distribuição das cargas suportadas pelas estacas no sistema e isto leva a um projeto conservador.

Randolph (1994b) divide as visões utilizadas na elaboração do projeto de radier estaqueado em três abordagens: convencional, *creep piling* e abordagem baseada no controle de recalques diferenciais.

2.3.1 Abordagem Convencional

Nesse tipo de abordagem, a fundação é projetada como um bloco sobre estacas, porém considera-se que o radier suportará uma parcela da carga total aplicada ao sistema. As estacas são distribuídas de maneira regular na área no radier e os espaçamentos usados são próximos aos normalmente utilizados para grupos de estacas. As estacas, por serem mais rígidas que o radier, suportam a maior parcela da carga e os elementos trabalham longe da mobilização total, com razoáveis fatores de segurança (F.S.) para todas as estacas, as do canto com fatores menores e as do centro com fatores maiores. Um exemplo de aplicação dessa metodologia é o caso do edifício QV1, que será descrito com mais detalhes posteriormente (BACELAR, 2003; SALES, 2000).

2.3.2 Creep Piling

Segundo Sales (2000), esta metodologia, também chamada de mobilização total das estacas por Bacelar (2003), foi proposta inicialmente para solos coesivos relativamente moles. A estaca deve absorver de 70 a 80% de sua carga última causando, assim, uma parcela de

deformação plástica, “creep”. E a quantidade de estacas necessárias é calculada de forma que a pressão no solo, sob o radier, não ultrapasse a tensão de pré-adensamento do solo.

Bacelar (2003) afirma que a fundação é projetada como um radier e a inclusão das estacas é feita com o objetivo de reduzir os recalques do sistema, o que pode provocar deslocamentos relativos da estaca em relação ao solo adjacente (escorregamento).

Hansbo (1993) apresentou o desempenho de dois edifícios similares, onde o primeiro apresentou um projeto com a visão “convencional”, com 211 estacas, e o segundo utilizou a concepção “creep piling” e foram necessárias apenas 104 estacas. A Figura 2.3 mostra que a diferença na resposta de recalques, representados por isolinhas de mesmo recalque, é pequena.

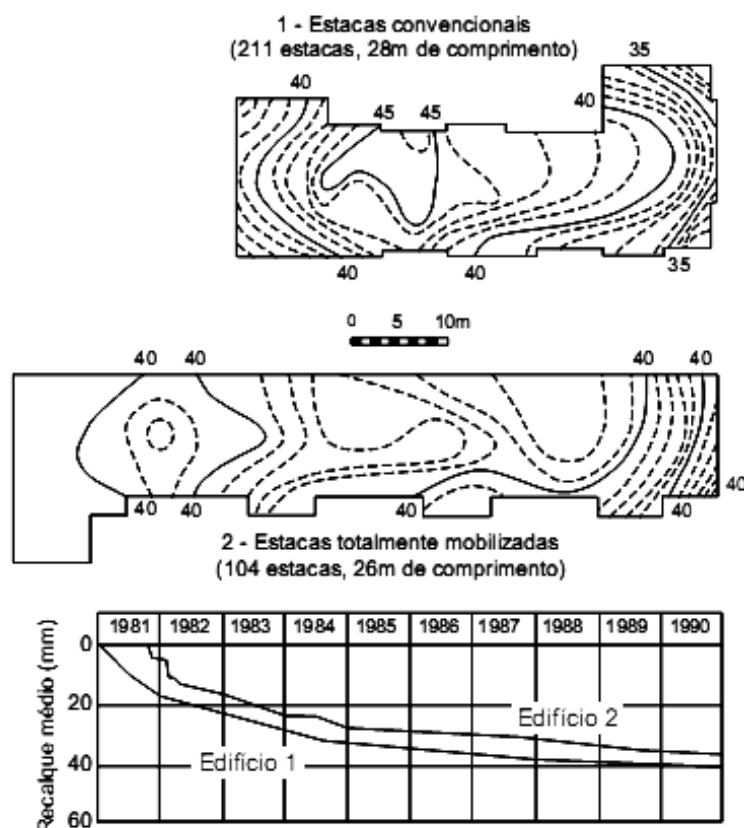


Figura 2.3 – Comparação do desempenho de duas fundações similares (SALES, 2000) – modificada pelo autor

Poulos (1998) afirmou que o conceito “creep piling” pode ser usado numa versão mais severa, na qual algumas estacas, ou todas, atingem sua carga máxima e mesmo assim seria garantido o fator de segurança global da fundação. O que não seria possível segundo o conceito “tradicional”, onde deve ser garantido o fator de segurança das estacas isoladamente.

Sales *et al.* (2005) apresentaram um procedimento de cálculo para previsão do comportamento carga-recalque de rádiers estaqueados, seguindo esta metodologia, onde é avaliado o comportamento carga-recalque considerando as estacas plenamente mobilizadas em sua capacidade de carga e todas as interações radier-solo-estaca são levadas em consideração.

2.3.3 Controle de Recalque Diferencial

As duas metodologias anteriores utilizavam estacas com espaçamentos uniformes sob o radier, de modo a limitar os recalques absolutos e conseqüentemente os recalques diferenciais eram também limitados.

Considerando um radier, não estaqueado, submetido a uma carga distribuída uniformemente em sua superfície, o mesmo apresentará a tendência de recalcar mais na região central. Com isso, a colocação de algumas estacas na região central, submetidas à carga próxima da última, reduzirá os recalques diferenciais. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram como esse fenômeno acontece.

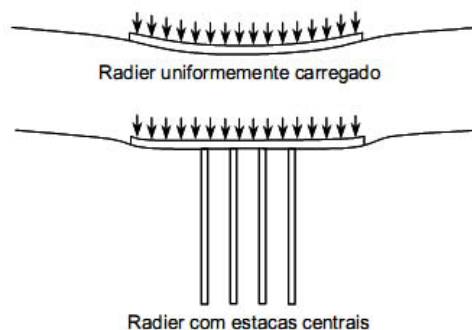


Figura 2.4 - Colocação de estacas centrais para a redução dos recalques diferenciais (RANDOLPH, 1994b) – modificada pelo autor

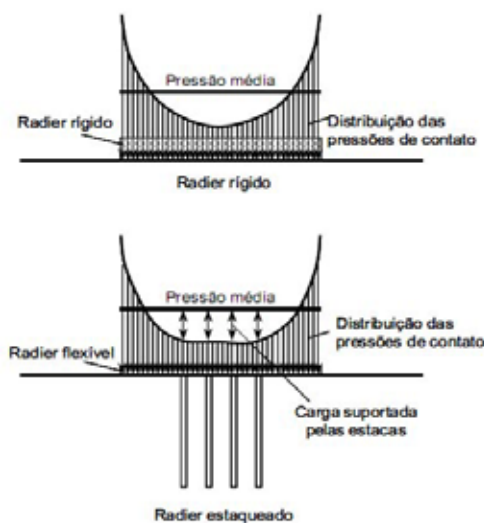


Figura 2.5 – Esquema de como é feito o controle de recalques diferenciais (RANDOLPH, 1994b) – modificada pelo autor

Geralmente o projeto baseado nos dois últimos métodos é mais econômico do que o primeiro. A idéia principal seria gerar a menor quantidade de estacas capaz de atender os recalques admissíveis, principalmente o diferencial.

2.4 MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO

Para um análise completa de radier estaqueado é necessário observar alguns tipos de interação entre os componentes da fundação mista: interação estaca-estaca, interação radier-estaca, interação estaca-radier e interação radier-radier.

Hain e Lee (1978) foram uns dos pioneiros no estudo do processo de interação entre os elementos constituintes deste tipo de fundação. Eles apresentaram um programa que analisa o radier como elemento de placa pelo método dos elementos finitos (M.E.F.) e considera a rigidez do mesmo e o conjunto estaca-solo pelo método dos elementos de contorno (M.E.C.), que usa o método da superposição dos fatores de interação para cada estaca. Para a combinação do M.E.F. e o M.E.C., o programa impõe uma compatibilidade de deslocamentos na interface radier-solo, gerando um único sistema de equações a serem resolvidas (SALES, 2000).

De acordo com Sales (2000), no mesmo trabalho, Hain e Lee (1978) tiraram algumas importantes conclusões como:

- ◆ A inclusão de apenas algumas estacas reduz significativamente os recalques do sistema;
- ◆ Quanto maior a compressibilidade do grupo de estacas, menor será a carga absorvida pelo mesmo;
- ◆ Quanto mais flexível for o radier, em uma mesma fundação, maior será a carga absorvida pelo grupo de estacas;
- ◆ Quanto mais rígido for o radier, maior será o momento gerado e maior a desigualdade de carga absorvida pelas estacas.

Clancy e Randolph (1993) também fizeram sua análise considerando as quatro formas de interação. Na análise, eles consideraram o radier como elementos “finos de placa 2D” e as estacas foram discretizadas como cilindros interligados.

Poulos (1994) apresentou o programa GARP que leva em consideração todas as formas de interação propostas por Hain e Lee (1978), pelo método da superposição dos campos de deformação, usava o método das diferenças finitas para o radier e representava as estacas por molas equivalentes. Depois disso Small e Poulos (1998) revisaram o programa (GARP6) e o bloco passou a ser representado por elementos de placa através do M.E.F. (SALES, 2000).

El-Mossalamy e Franke (1997) mostraram um programa que combinava o M.E.F. (análise do radier) e o M.E.C. (análise solo/estacas). A resposta não-linear da interface estaca/solo era considerada separadamente na ponta e no fuste. No mesmo programa era simulado o escorregamento relativo de trechos da estaca e do solo após a total mobilização do atrito lateral das mesmas (SALES, 2000).

Em nível de Brasil dois trabalhos merecem destaque, o de Val e Mello (1986), que expandiu o método de Aoki e Lopes, onde o cálculo é feito por um processo iterativo de estimativa de recalque do sistema considerando a contribuição do bloco, e o de Mendonça (1997) que também desenvolveu um programa híbrido combinando o M.E.F. com o M.E.C., onde o solo foi considerado como elástico linear e foi verificada a interferência da compressibilidade das estacas no resultado.

Bacelar (2003) fez um estudo numérico de radiers estaqueados utilizando um programa de elementos finitos onde obteve os recalques ao longo de algumas seções da placa e distribuição de carga nas estacas variando alguns parâmetros do problema como comprimento relativo das

estacas (L/D), coeficiente de Poisson do solo e espessura do radier. A autora também fez estudos dos recalques que acontecem nos radies estaqueados sob condições drenadas e não-drenadas chegando a conclusões bem interessantes.

Sales (2000) apresentou a Tabela 2.1 onde ele compara os métodos utilizados pelos autores.

A interação entre os elementos da fundação pode ser representada pelos chamados fatores de interação. Chow (2007) afirma que estes fatores de interação vêm sendo amplamente utilizados desde Poulos (1968). A autora define ainda os tipos de fatores que devem ser observados na previsão do comportamento dos radies estaqueados: interação estaca-estaca, interação estaca-solo, interação solo-estaca e interação solo-solo.

Tabela 2.1 – Programas utilizados na análise de radier estaqueado (SALES, 2000) – modificada pelo autor

Programa	Autor	Ano	Método
HyPR	Clancy e Randolph	1993	Radier modelado pelo M.E.F. e as estacas consideradas como molas interligadas
GARP	Poulos	1994	Radier modelado pelo M.E.F.(versão atual), sobre molas considerando as interações dos elementos.
NAPRA	Russo	1995	Radier pelo M.E.F. e estacas como molas não-lineares considerando as interações
PIRAF	Ta e Small	1996	Radier pelo M.E.F. e o solo/estacas pelo método das camadas finitas
GAPR	El-Mossalamy e Franke	1997	M.E.C. considerando a resposta não-linear das estacas
Nome não mencionado	Yamashita et al	1998	Radier pelo M.E.F. e estacas como molas de comportamento não-linear

A interação estaca-estaca, que é o foco principal desse trabalho, foi definida por Poulos (1968) como sendo o recalque em uma estaca descarregada causada por uma estaca adjacente, foi denominada α_{pp} e representada pela Equação 2.1.

$$\alpha_{pp} = \frac{\text{deflexão adicional da estaca descarregada}}{\text{deflexão de uma estaca isolada carregada}} \quad (2.1)$$

Esta interação é calculada para um par de estacas apresentando uma distância “s” entre elas e, as mesmas, podem ter diâmetros e comprimentos diferentes. Chow (2007), em seu trabalho, mostra como calcular e a Figura 2.6 ilustra o processo para obtenção do α_{pp} .

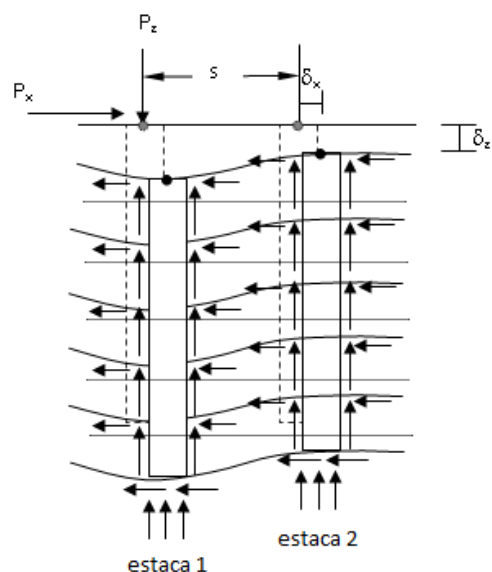


Figura 2.6 – Interação entre uma estaca carregada e outra descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor

A interação estaca-radier corresponde à interação entre uma estaca carregada e uma superfície do solo, a uma distância “s”, descarregada. A Figura 2.7 ilustra o processo e o fator de interação, α_{ps} , é expresso pela Equação 2.2.

$$\alpha_{ps} = \frac{\text{deflexão adicional na superfície do solo descarregada}}{\text{deflexão de uma estaca isolada carregada}} \quad (2.2)$$

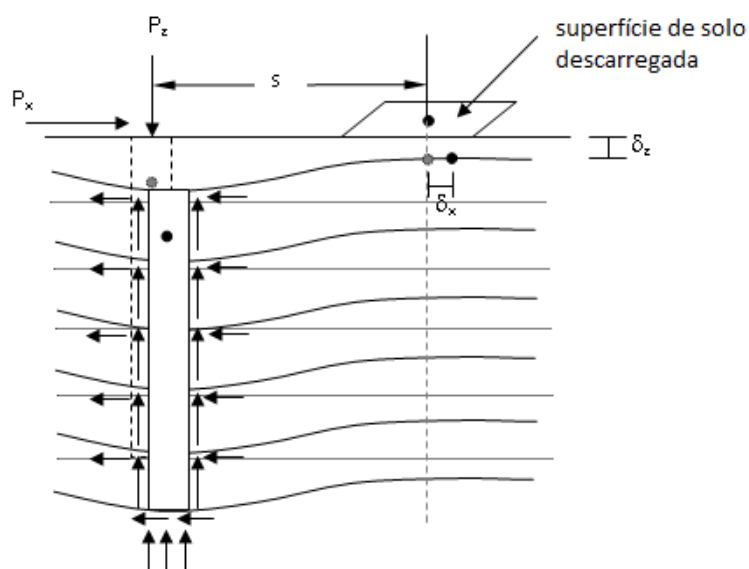


Figura 2.7 – Interação entre uma estaca carregada e a superfície do solo descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor

No mesmo trabalho, a autora diz que o processo de obtenção desse fator de interação é semelhante ao usado para encontrar o fator de interação estaca-estaca com uma única diferença, a matriz de rigidez é feita para uma estaca apenas.

A interação solo-estaca é aquela que ocorre entre uma superfície retangular de solo submetida a uma carga uniformemente distribuída e uma estaca descarregada, a uma distância “s”, conforme mostra a Figura 2.8. Esse fator é calculado considerando primeiramente o solo e dividindo a deflexão em duas componentes, uma devido ao atrito lateral no fuste da estaca e a outra devido à carga aplicada na superfície de solo. Esse fator de interação é chamado de α_{sp} e definido pela Equação 2.3.

$$\alpha_{sp} = \frac{\text{deflexão adicional de uma estaca sem carga}}{\text{deflexão da superfície de solo carregada}} \quad (2.3)$$

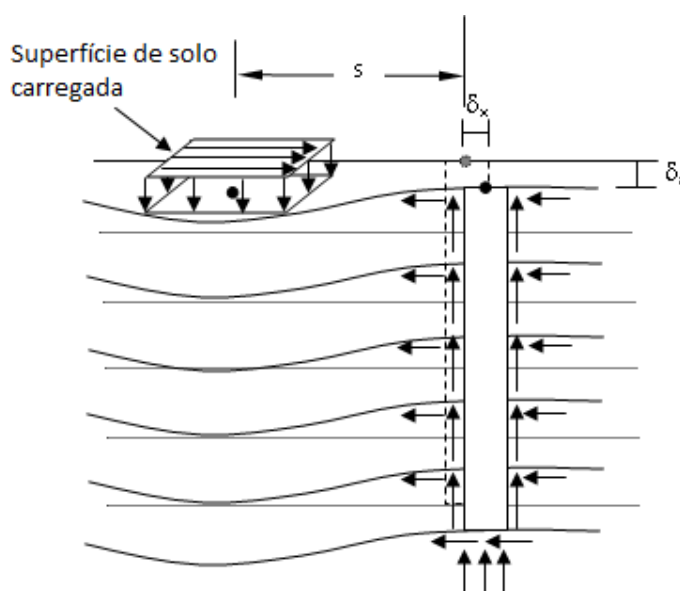


Figura 2.8 – Interação entre uma superfície de solo carregada e uma estaca descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor

E, por último, a interação solo-solo é a que acontece entre uma superfície de solo uniformemente carregada e uma superfície descarregada de solo a uma distância “s”, do centro da superfície carregada, é definida pela Equação 2.4.

$$\alpha_{ss} = \frac{\text{deflexão adicional de uma superfície de solo sem carga}}{\text{deflexão de uma superfície de solo carregada}} \quad (2.4)$$

Essa interação, ilustrada na Figura 2.9, pode ser calculada usando o método das camadas finitas, conforme apresentado por Chow (2007).

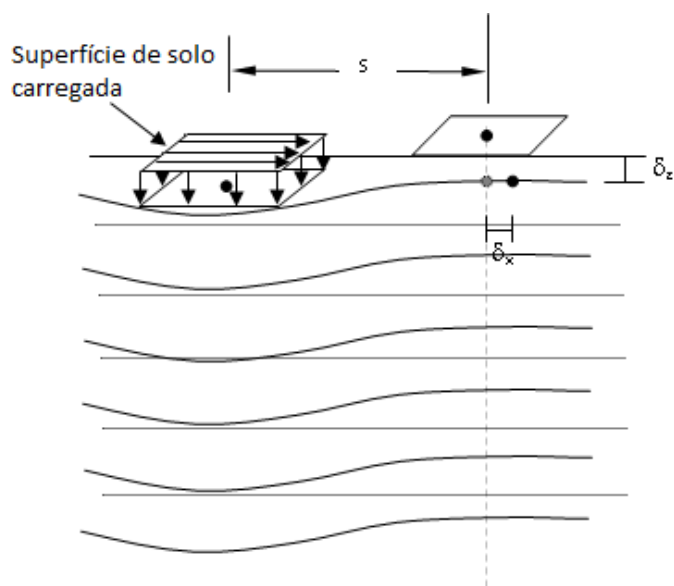


Figura 2.9 – Interação entre superfície de solo carregada e outra descarregada (CHOW, 2007) – modificada pelo autor

2.5 ALGUNS TRABALHOS REGIONAIS SOBRE RADIER ESTAQUEADO

Vários trabalhos foram desenvolvidos pela UnB e UFG, nos últimos anos, abordando o tema radier estaqueado. Nestes trabalhos foram feitos importantes estudos sobre o comportamento de radiers estaqueados.

Sales (2000) desenvolveu um trabalho precursor sobre radier estaqueado. Esse autor fez uma revisão crítica da literatura sobre o comportamento de radiers estaqueados apresentando os conceitos, metodologias de cálculo, trabalhos pioneiros e o desempenho de algumas obras que utilizaram esse tipo de fundação. Foram feitas, também, provas de carga em sapatas estaqueadas com solo na condição natural e pré-inundada comparando os resultados com os previstos por um método híbrido. Por fim, foi proposta uma nova metodologia para considerar a respostas das estacas totalmente mobilizadas, implementando esse novo método em uma ferramenta híbrida (GARP).

Bezerra (2003) retroanalisou ensaios de campo, feitos anteriormente, utilizando ferramentas numéricas simples e detalhadas a fim de verificar o desempenho de cada uma dessas ferramentas. Esse autor fez, também, análises paramétricas em radiers estaqueados alterando

suas propriedades geométricas e de seus materiais constituintes, desenvolvendo alguns conceitos de otimização.

Cunha (2003) fez análises de grupos de estacas com o objetivo de comparar os resultados encontrados pelo M.E.F. com os determinados pelo M.E.C.

Cordeiro (2007) analisou alguns casos hipotéticos de radiers estaqueados através de um método misto e comparou seus resultados com os previstos por uma ferramenta de elementos finitos. Esse autor fez, também, análises com o programa GARP onde foram simulados danos (estacas defeituosas) que possam ocorrer, durante a execução da obra, e possíveis soluções a serem adotadas caso esses danos venham a ocorrer.

Lima (2007) fez um estudo onde procurou analisar a fundação em radier estaqueado sob o ponto de vista da otimização. Esse autor analisou diversos casos, utilizando um programa de otimização, variando o tipo de carregamento, tipo de solo e diâmetro das estacas.

Janda *et al.* (2009) fizeram um estudo numérico/experimental, no campo experimental da Universidade de Brasília, levando a conclusões acerca da adequabilidade de se adotar parâmetros de laboratório, campo ou retroanalisados como dados de entrada de programas numéricos que simulam tridimensionalmente fundações em radier estaqueado. Nesse mesmo trabalho, os autores fizeram análises numéricas e compararam com os resultados de campo verificando a influência do contato solo/radier.

2.6 DESEMPENHO DE ALGUMAS OBRAS

Sales (2000) comentou que os relatos na literatura do desempenho de obras projetadas com o conceito de “radier estaqueado”, considerando a interação estaca-radier-solo, ainda são bem poucos. São apresentados a seguir alguns casos de obras em radier estaqueado.

2.6.1 Edifício Messeturm

O edifício Messeturm foi construído entre 1988 e 1990 em Frankfurt na Alemanha. A Figura 2.10 mostra o esquema do edifício que, com 256 m de altura, é um dos edifícios mais altos da Europa, usado principalmente para escritórios também conta com apartamentos e restaurantes. A Figura 2.11 mostra a disposição das estacas cuja distribuição foi escolhida com base experiência do caso do Torhaus que, também, levou a maiores espaçamentos entre estacas e

disposição das mesmas na forma de três anéis concêntricos. Por outro lado, as estacas foram posicionadas o mais próximo possível dos pontos de aplicação de carga da superestrutura principal. Os comprimentos diferentes das estacas foram adotados para ajudar a equalizar a distribuição de carga nas mesmas. A Figura 2.12 mostra a instrumentação empregada (FRANKE *et al.*, 2000).

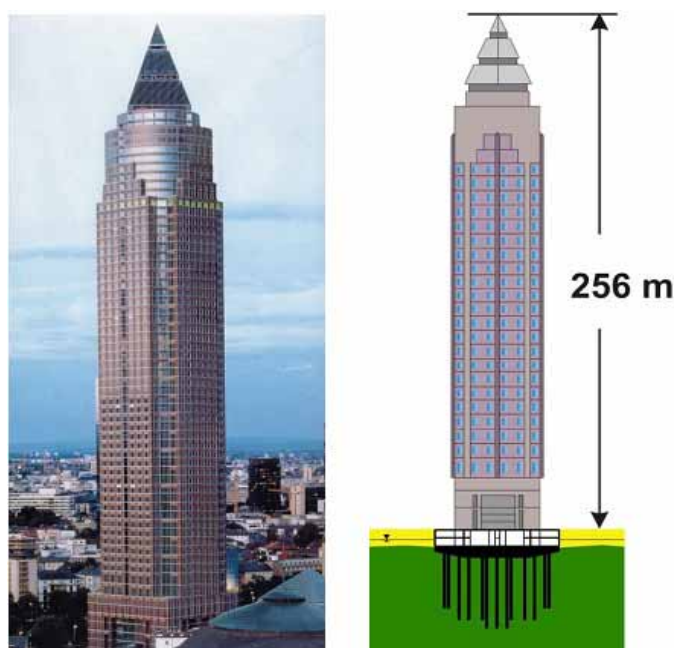


Figura 2.10 – Edifício Messeturm (SILVA, 2009)

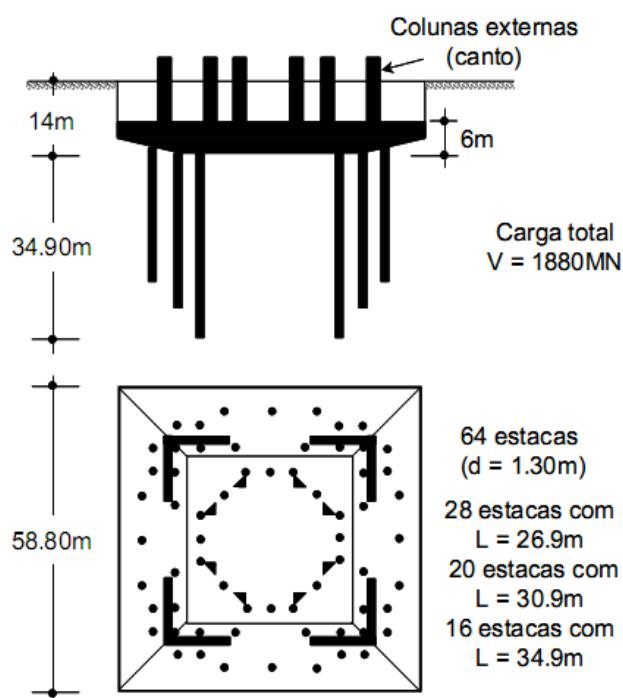


Figura 2.11 – Disposição das estacas na fundação do edifício Messeturm (BACELAR, 2003) – modificada pelo autor

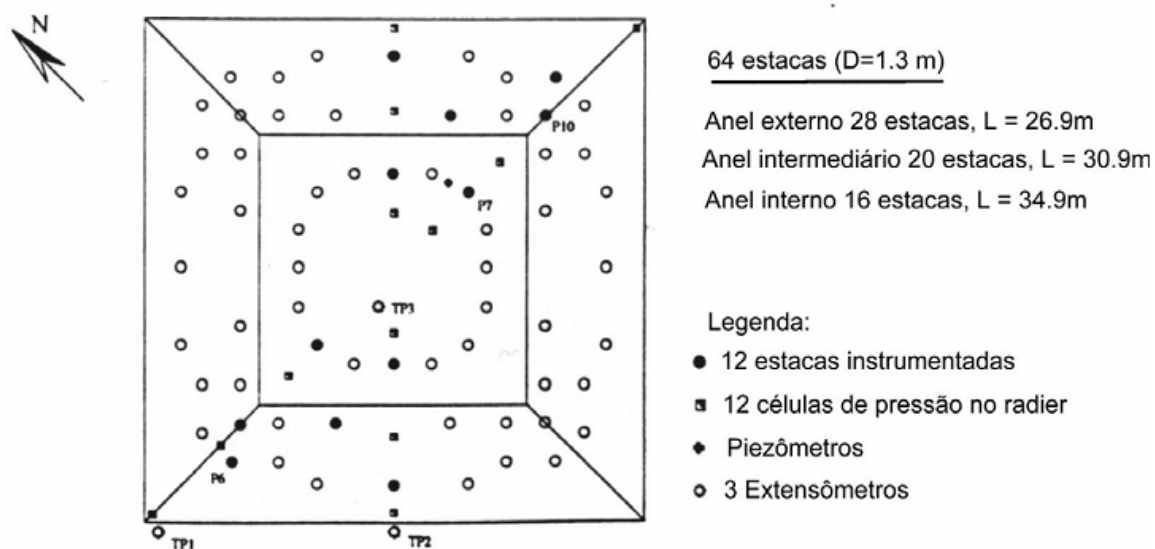


Figura 2.12 – Posição da instrumentação da fundação do edifício Messeturm (SALES, 2000) – modificada pelo autor

O solo do local é composto por argila de matriz sedimentar (argila de Frankfurt) com veios de areia até a profundidade de 70 m, maiores detalhes do solo são dados em Sales (2000) e Reul et al. (2006). O interessante é que para essa fundação somente o radier seria suficiente, em termos de capacidade de carga, e ainda geraria fatores de segurança (F.S.) entre 3,4 para parâmetros não drenados de solo e 5,6 para parâmetros drenados. O problema dessa fundação seria os altos recalques estimados (entre 40 e 50 cm para recalques totais e 15 cm para recalques diferenciais). A capacidade de carga das 64 estacas representava uma parcela de 7-12% da capacidade do radier isolado, o que mostra que as mesmas foram usadas como verdadeiras redutoras de recalque (SALES, 2000; SILVA, 2009).

El-Mossalamy e Franke (1997) compararam o radier isolado com o radier estaqueado e notaram que a redução de recalque total ficou da ordem de 55%, a redução de recalque diferencial foi de 60% e a redução de momentos fletores no radier ficou em 35%.

De acordo com Sales (2000), a instrumentação mostrou que as estacas realmente atingiram suas máximas capacidades de carga e mobilizaram atrito lateral de baixo para cima, o que não é comportamento típico de uma estaca isolada. Elas absorveram 60% da carga total (foram estimados 55%) e o efeito da interação entre os componentes da fundação aumentou a capacidade de carga individual em 20% e tornou as mesmas menos rígidas quando comparadas a estacas isoladas.

2.6.2 Edifício Messe-Torhaus

Outro caso de radier estaqueado é o do edifício Messe-Torhaus, de 30 pavimentos, ilustrado na Figura 2.13, que também está localizado na cidade de Frankfurt e foi o primeiro projeto em radier estaqueado na argila de Frankfurt. A fundação do Messe-Torhaus é composta por dois raders separados, com 2,5 m de espessura, cada um com 42 estacas escavadas de 20 m de comprimento e 90 cm de diâmetro. A distribuição das estacas no radier foi feita uniformemente, com espaçamentos de 3 a 3,5 vezes o diâmetro das estacas. Ambos os raders tem dimensões de 17,5 x 24,5 m em planta. O radier está localizado 3 m abaixo do nível do terreno e os dois foram submetidos a uma carga de 200 MN cada (MEKBIB, 2004).

O solo local é composto por uma camada de 5,5 m de pedregulho quaternário e, logo abaixo até grandes profundidades, da argila de Frankfurt (KATZENBACH *et al.*, 2000).

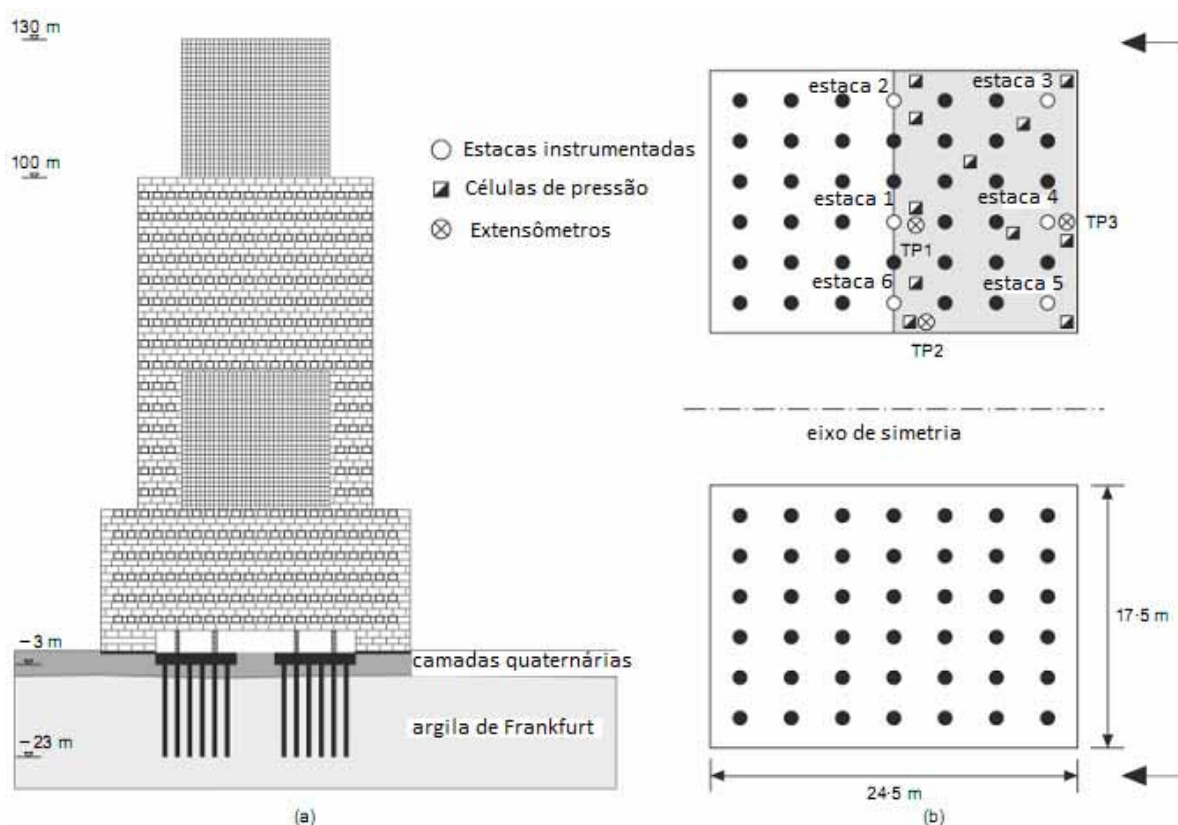


Figura 2.13 – Edifício Messe-Torhaus (REUL; RANDOLPH, 2003) – modificada pelo autor

Segundo Katzenbach *et al.* (2000), o Messe-Torhaus teve o projeto baseado na concepção de que as estacas atingem a sua máxima capacidade de carga e o restante, o radier deve transmitir ao solo.

Chow (2007) fez uma análise desse edifício com o programa APRILS, que é baseado no método das camadas finitas, comparou com os resultados de Reul e Randolph (2003), que usaram o método dos elementos finitos, e medições. O recalque medido no fim da construção foi de 70 mm e houve um incremento de 150 mm devido à consolidação da argila de Frankfurt. Na análise, ela considerou a fundação como um todo, ou seja, a interação entre os dois radiers separados, simulando uma placa de pequena espessura entre os dois para representar o espaço vazio entre os mesmos. A autora considerou um comportamento não-linear na análise e comentou que devido à interação entre os dois radiers e a excentricidade de aplicação da carga, a distribuição de carga entre as estacas não foi simétrica, o que foi confirmado pela medição em Katzenbach *et al.* (2000). A Figura 2.14 mostra a distribuição de carga entre algumas estacas do radier norte, medidas e calculadas por Chow (2007) e Reul e Randolph (2003), esta figura mostra que as estacas do canto mobilizaram mais carga que as estacas do interior.

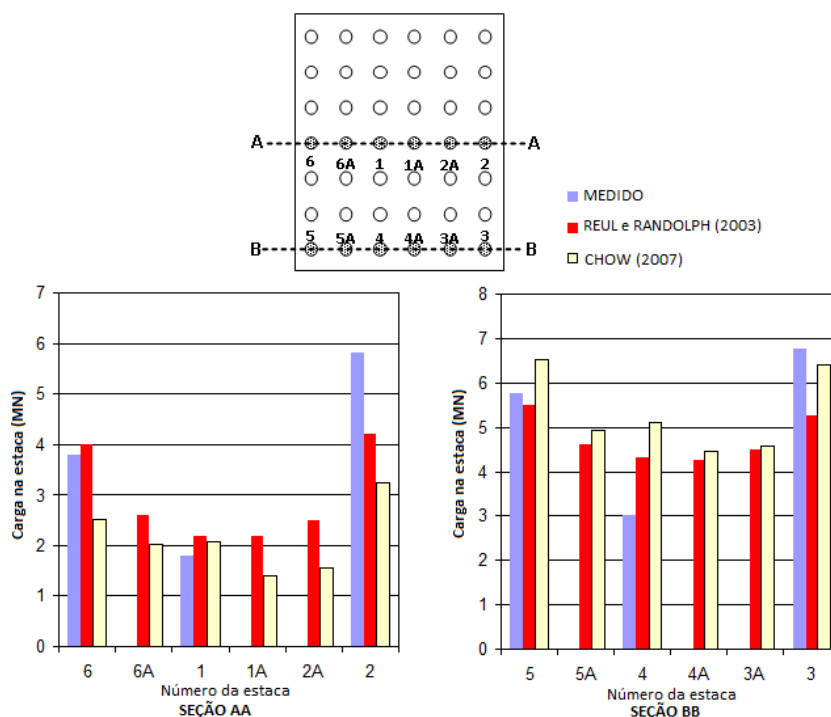


Figura 2.14 – Distribuição de carga em algumas estacas do radier norte. Comparação entre o medido e o calculado (CHOW, 2007) – modificada pelo autor

Sales *et al.* (2010) fizeram simulações, para este edifício, onde avaliaram os recalques utilizando o programa GARP (SMALL; POULOS, 2007) para os diversos espaçamentos relativos máximos ($s/D_{máx}$) e compararam com medições de campo e simulações feitas por Small e Liu (2008) que fizeram análises pelo M.E.F. Os resultados das análises, feitas com o

programa híbrido, se mostraram satisfatórios quando comparadas com o M.E.F. e medições de campo.

2.6.3 Edifício Westend st. 1

Mais um edifício que seguiu essa linha foi o Westend st. 1, mostrado na Figura 2.15, localizado em Frankfurt, é um edifício de escritórios com 51 andares, tem aproximadamente 208 m de altura e a fundação da torre central é o radier estaqueado mostrado na Figura 2.16. O radier tem 47 x 62 m e possui uma espessura de 4,5 m na região central e 3,0 m nas bordas. A base do radier fica 14 m abaixo do nível do terreno natural e possui 40 estacas escavadas de 1,30 m de diâmetro e 30m de comprimento. A excentricidade de carga, bem como a rigidez relativa da torre central, foram fatores determinantes na opção pelo radier estaqueado que buscou a limitação dos recalques totais e diferenciais. Os espaçamentos entre as estacas foram uniformes, porém não foram utilizadas estacas nas bordas (SALES, 2000; EL-MOSSALAMY; FRANKE, 1997).

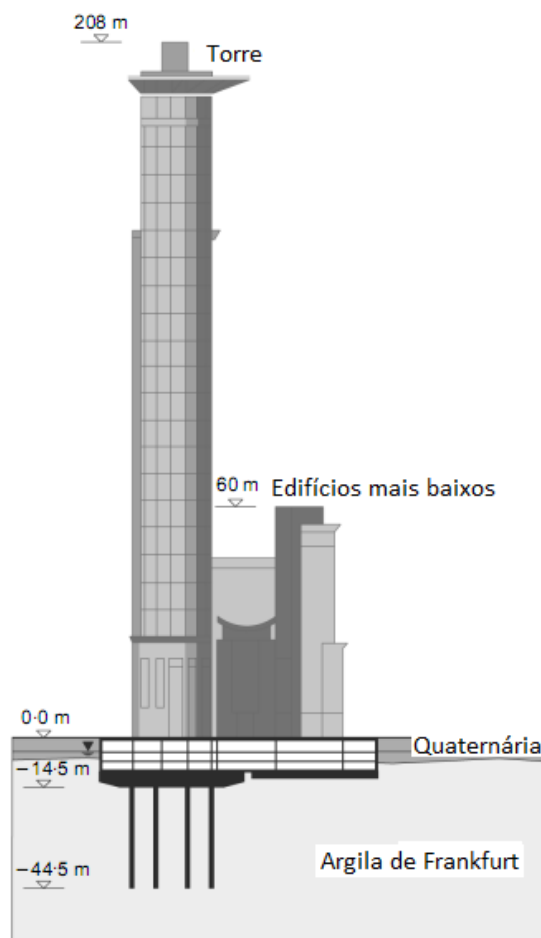


Figura 2.15 – Seção Transversal do edifício Westend st. 1 (REUL; RANDOLPH , 2003) – modificada pelo autor

Alguns autores como El-Mossalamy e Franke (1997), Franke *et al.* (1994) e El-Mossalamy e Franke (1999²) *apud* Sales (2000), simularam o comportamento do radier estaqueado do edifício Westend st. 1, o que gerou resultados satisfatórios. A distribuição de carga ficou em, aproximadamente, 50% para o radier e 50% para as estacas. A interação entre radier-estacas-solo reduziu a rigidez das estacas e aumentou a carga última das estacas entre 11 e 67%, em relação ao comportamento de uma estaca isolada. As estacas mobilizaram carga máxima e a mobilização máxima de atrito lateral ocorreu de baixo para cima, diferente do convencional. As medições constataram que os momentos fletores no radier foram reduzidos em 40% quando comparados com a hipótese de radier não-estaqueado.

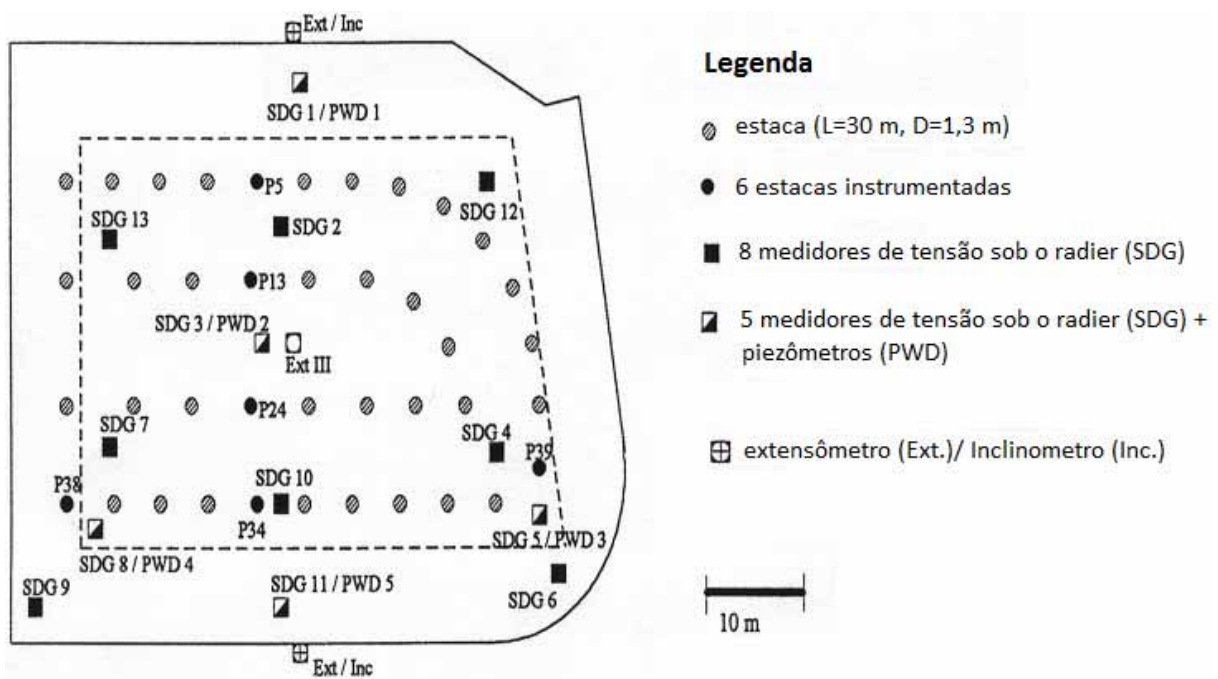


Figura 2.16 – Layout das estacas e posição dos dispositivos de medição do edifício Westend st. 1 (SALES , 2000)

Reul e Randolph (2003) simularam o comportamento do edifício com o M.E.F. e compararam os resultados com os métodos propostos por outros autores, a Figura 2.17 mostra essa comparação. A Figura 2.17 mostra que as análises pelo M.E.F. apresentaram boa acurácia em relação aos valores medidos. O coeficiente α_{pr} diz respeito à porcentagem de carga que vai para as estacas. Garcia *et al.* (2006) definem esse coeficiente como a relação entre a carga que vai para as estacas e a carga total aplicada à fundação, de acordo com a Equação 2.5.

² EL-MOSSALAMY, Y.; FRANKE, E. Piled raft foundations: theory and application. Submetido ao **Journal of Geotechnical Engineering**. Division, ASCE, 1999.

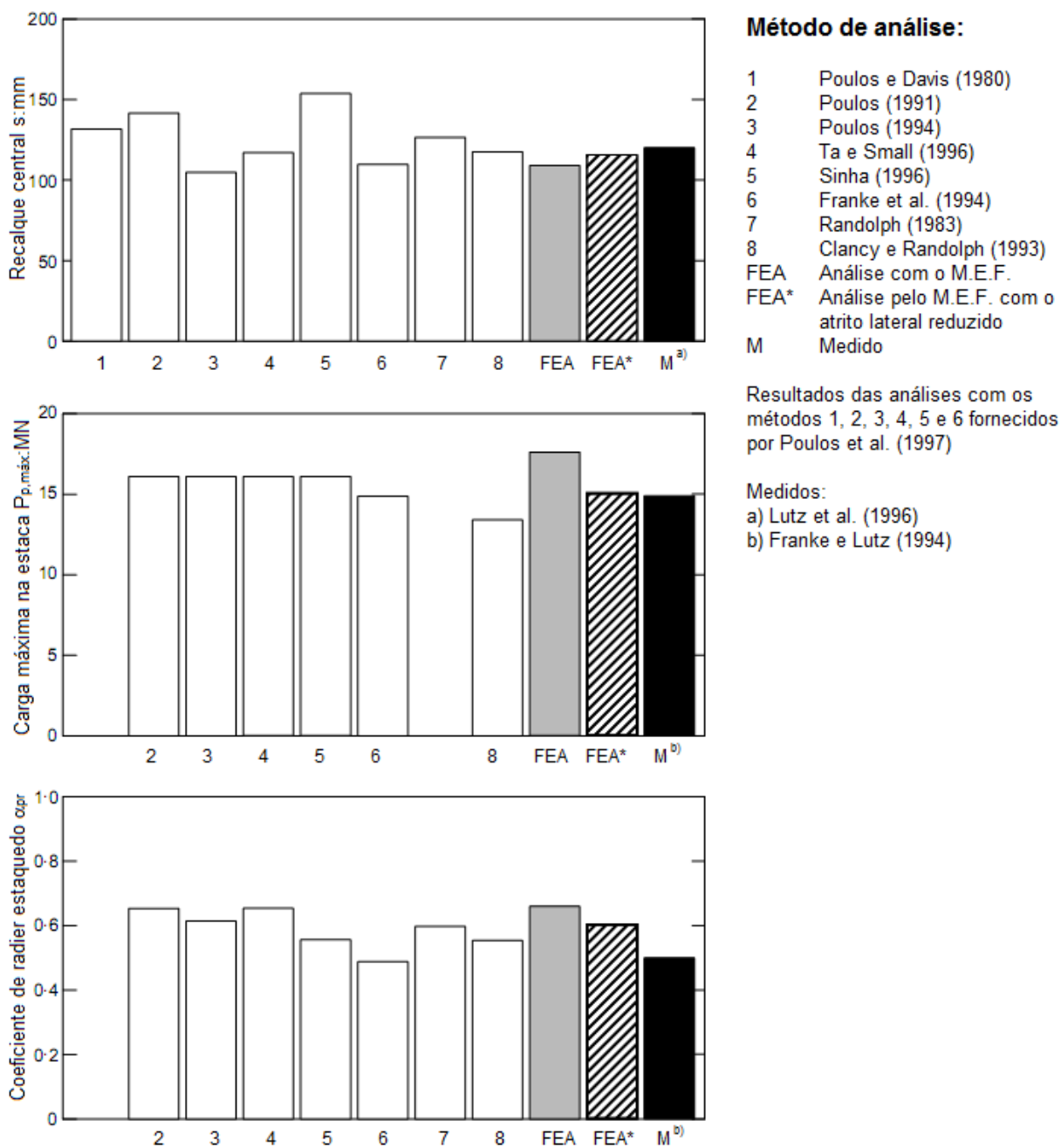


Figura 2.17 – Comparação entre os resultados de análises e valores medidos – modificada pelo autor (REUL; RANDOLPH, 2003)

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum P_{estacas}}{P_{total}} \quad (2.5)$$

2.6.4 Treptowers Berlin

Com 121 m de altura, o Treptowers é um edifício de escritórios localizado na cidade de Berlin que também utilizou a solução de fundação em radier estaqueado.

De acordo com Reul (1998), o solo local apresentava uma areia fofa para o nível logo abaixo do radier, que fica 3 m abaixo do nível natural do terreno, e areia meio compacta a compacta até 40 m de profundidade.

A fundação do Treptowers consiste em um radier de 37,1 x 37,1 m com espessura variando de 2 a 3 m e 54 estacas escavadas de 88 cm de diâmetro e comprimentos variando de 12,5 m a 16 m. O projeto foi controlado por medidas geotécnicas, através de células de carga no topo das estacas, extensômetros colocados de tempos em tempos ao longo do fuste das mesmas e células de pressão no contato com o radier, além de medidas geodésicas. No final da construção o recalque médio medido foi de 6,3 cm (REUL, 1998; SALES, 2000).

Segundo Reul (1998), no Instituto Geotécnico da Universidade de Darmstadt, foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos isoparamétricos (modelo estrutural), onde levava em consideração os seguintes efeitos:

- ◆ As diferenças nas curvas carga x recalque do radier e das estacas;
- ◆ A interação solo-radier;
- ◆ A interação estaca-estaca;
- ◆ A interação estaca-radier.

Os resultados gerados por esse modelo estão apresentados em Katzenbach e Reul (1997).

De acordo com a análise numérica do edifício Treptowers, feita por Reul (1998), puderam ser tiradas as seguintes conclusões:

- ◆ O recalque calculado foi bem próximo ao medido;
- ◆ A resistência das estacas 1 e 17 (estacas com medições) foi superestimada;
- ◆ Devido ao efeito de interação, as estacas tiveram uma redução de rigidez considerável e absorveram 65% da carga enquanto que o radier 35%;
- ◆ O radier estaqueado reduziu o recalque em 57% quando comparado ao recalque do radier isolado.

CAPÍTULO 3

FERRAMENTAS NUMÉRICAS

A análise tridimensional de uma fundação estacada, considerando que todos os componentes (Bloco e estacas) interferem em seu comportamento, é um problema complexo. Sales (2000) afirma que na análise deve ser levada em consideração a associação dos elementos com diferentes respostas carga-recalque, o efeito de interação entre os elementos e o solo, entre outros aspectos. O mesmo autor salienta que não há solução fechada para o problema, mesmo para configurações simples, e que análises mais rigorosas são feitas com o método de elementos finitos (M.E.F.) ou o método de elementos de contorno (M.E.C.).

Autores como Ottavianni (1975) e Chow (1987), utilizaram o M.E.F. na análise de fundações estacadas, que é considerado um método mais rigoroso e leva em conta mais variáveis que os demais métodos, o que pode gerar resultados mais próximos do real.

Alguns autores vêm analisando o problema com soluções combinando mais de um método, considerando hipóteses simples na obtenção da interação entre os elementos o que, em geral, diminui o tempo de processamento. Na publicação desses métodos, os autores comparam seus resultados com os obtidos através de ferramentas mais rigorosas, buscando a validação dos mesmos (SALES, 2000).

No presente capítulo serão apresentadas duas ferramentas para análise de fundações estacadas, são elas:

- ◆ **GARP8** – *Geotechnical Analysis of Rafts with Piles* (SMALL; POULOS, 2007). É um programa híbrido que analisa o radier como elementos planos de placa pelo M.E.F. e o conjunto estacas-solo utilizando a Teoria da Elasticidade, com o M.E.C na estimativa dos fatores de interação entre estacas.
- ◆ **DIANA** - É um programa de Elementos Finitos baseado no método dos deslocamentos. Desenvolvido pela TNO Building and Construction Research Company.

Neste capítulo serão apresentadas as ferramentas numéricas utilizadas na análise dando ênfase às características pertinentes às modelagens deste trabalho, posteriormente serão apresentados alguns resultados de casos descritos na literatura e comparados com os resultados obtidos através dos programas, para validação dos mesmos.

3.1 PROGRAMA DIANA

O DIANA é um programa de elementos finitos que usa como base o método dos deslocamentos. Vem sendo desenvolvido na Holanda a partir de 1972 por engenheiros civis da TNO Building and Construction Research Company e é considerado uma excelente ferramenta para análises tridimensionais, tanto lineares quanto não-lineares. Sem dúvida, o fato de ele ser desenvolvido para atender principalmente problemas de engenharia civil é o que diferencia o programa DIANA dos outros programas de elementos finitos existentes no mercado, outro diferencial desse programa são os modelos avançados para análise do comportamento do solo e do concreto (BARROS, 2009; MELO, 2009).

De acordo com Melo (2009), o programa inclui aplicações tridimensionais, axissimétricas, no estado plano de tensões e deformações, em análises lineares, não-lineares, viscoelásticas, térmicas, dinâmicas, fluidas, com interações e contatos entre elementos, dentre outras. A TNO (2008) comenta que esse programa também possui em sua biblioteca uma ampla variedade de materiais e condições de contorno, que são normalmente utilizados em projetos complexos como pontes, barragens, túneis e estudos técnico-científicos.

3.1.1 Procedimento de Análise

O software DIANA conta com um pré e pós-processador, no qual se definem a geometria, as cargas, condições de contorno, propriedades físicas e mecânicas dos materiais e se visualizam os resultados da análise como tensões, deslocamentos, deformações, reações de apoio, etc. Esse programa é chamado de Midas Fx⁺ for DIANA e, de acordo com a TNO (2008), está equipado com funções avançadas de modelagem geométrica, poderosos algoritmos de geração de malhas, várias condições de análises e apresenta resultados com a última tecnologia em saída gráfica. A Figura 3.1 mostra as extensões encontradas no Fx⁺, ilustrando o fluxo de passos para uma análise completa.

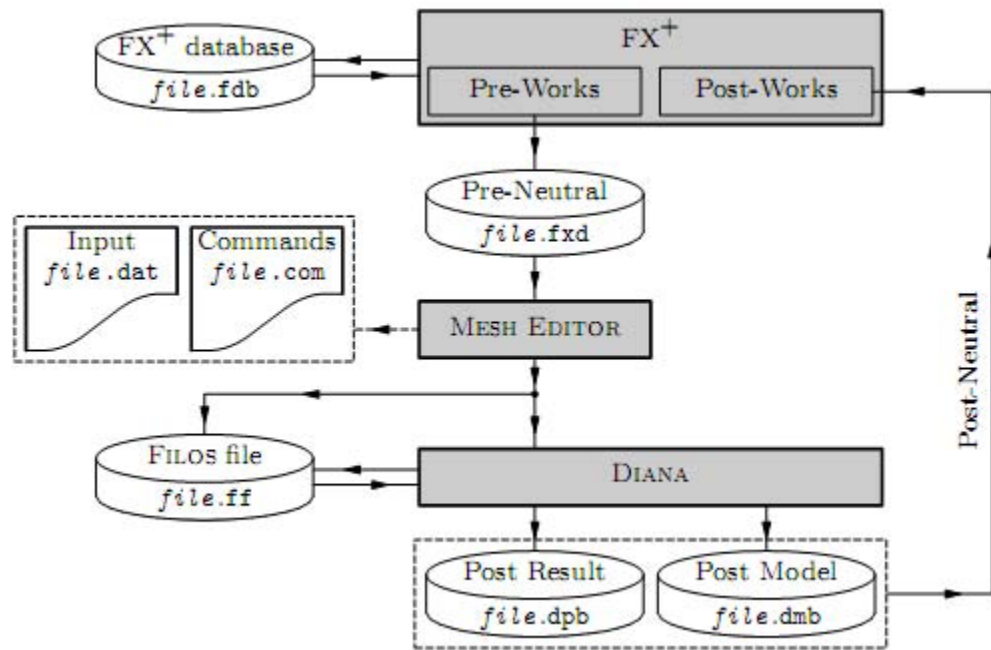


Figura 3.1 – Fluxo de trabalho no Fx⁺ for DIANA (TNO, 2008)

A interface do programa Fx⁺ é bem amigável e está disponível para o sistema operacional MS Windows, o que facilita bastante sua utilização. A Figura 3.2 mostra a janela principal do programa. A seqüência de análise apresenta os seguintes passos:

- ◆ Geração da geometria e definição das propriedades dos materiais, geração da malha, carregamentos e condições de apoio no Fx⁺;
- ◆ Processamento pelo programa DIANA;
- ◆ Saída dos resultados (tensões, deformações, deslocamentos, reações de apoio, etc.) e visualização através de gráficos ou tabelas no Fx⁺.

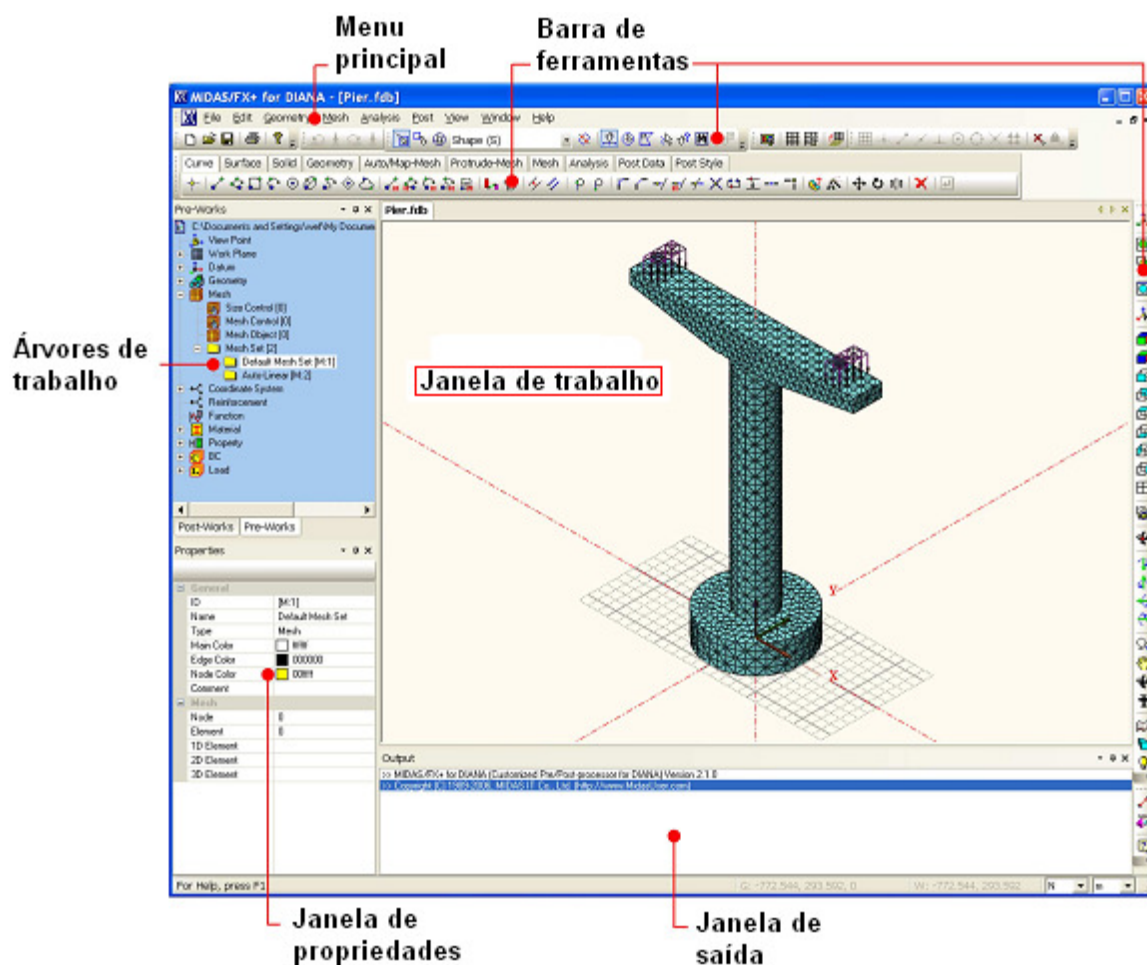


Figura 3.2 – Janela principal do Fx⁺ for DIANA (TNO, 2008) – modificada pelo autor

3.1.2 Validação do Programa DIANA

A seguir serão apresentados os casos e resultados das análises feitas por Ottaviani (1975) que utilizou o programa UNIVAC 1108 e Sales (2000) que usou o programa ALLFINE para simular os mesmos problemas, os dois baseados em elementos finitos. Foram utilizados três casos: o primeiro de uma estaca isolada, o segundo de um grupo de 9 estacas e o terceiro de um grupo de 16 estacas, diferente dos dois anteriores que foram propostos por Ottaviani (1975), esse último caso foi proposto pelo comitê técnico TC-18 da ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*). Em todos os casos analisados foram considerados modelos elástico-lineares.

O objetivo principal destas comparações é avaliar a concordância ou a discrepância dos resultados nos casos considerados, para que se possa mensurar o grau de aproximação entre os programas em questão.

3.1.2.1 O caso de uma estaca isolada

Sales (2000) afirma que a resposta carga-recalque das estacas é um dos principais fatores que influenciam o comportamento global de um radier estaqueado. Assim, o primeiro caso corresponde ao de uma estaca isolada sem o radier sobre a mesma.

Ottaviani (1975) analisou o comportamento de uma estaca isolada e publicou os resultados que posteriormente foram utilizados por Sales (2000) para validação do ALLFINE e por Bittencourt e Lima (2009) para calibração do FLEXPDE, que não é um programa convencional como os demais, mas um solucionador de equações diferenciais parciais. No presente trabalho, os resultados destes dois estudos serão apresentados juntamente com os valores originais na comparação com o DIANA. A Figura 3.3 ilustra o problema e os dados são apresentados a seguir.

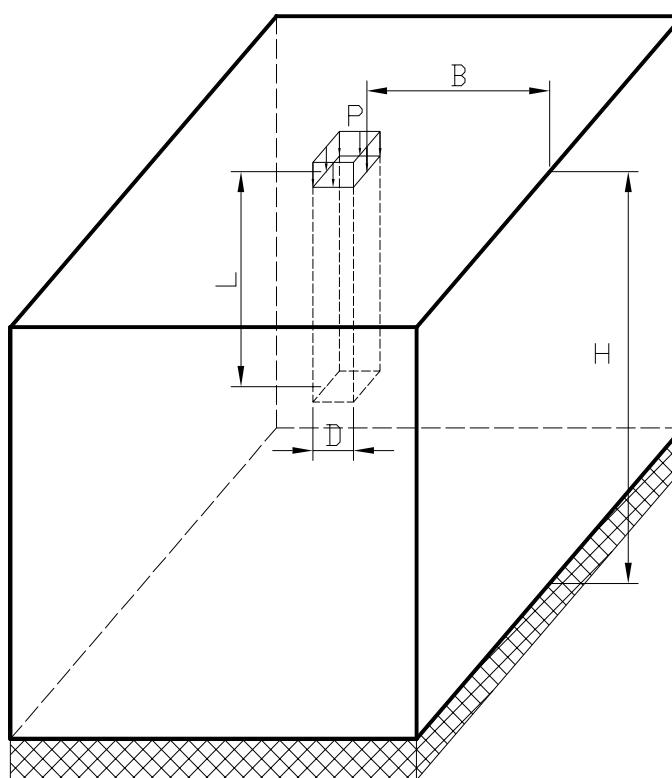


Figura 3.3 – Estaca isolada utilizada na análise

Onde:

- ◆ L: comprimento da estaca;
- ◆ P: Carga uniformemente distribuída aplicada no topo da estaca;
- ◆ D: lado da seção;

- ◆ H: Extensão do domínio vertical até o indeslocável;
- ◆ B: Domínio horizontal do problema considerado igual a $3L$;
- ◆ Módulo de elasticidade da estaca: $E_p=20$ GPa;
- ◆ Coeficiente de Poisson do concreto: $\nu_c=0,25$;
- ◆ Solo homogêneo;
- ◆ Coeficiente de Poisson do solo: $\nu_s=0,45$;

Foram utilizados três casos para este problema, mantendo o módulo de elasticidade do concreto (E_c) constante e variando o módulo de elasticidade do solo (E_s). A extensão do domínio vertical e o comprimento das estacas também variaram. Os resultados serão apresentados em termos de rigidez relativa K (E_p/E_s) e fator adimensional de recalque ($E_p \cdot D \cdot w/P$), onde w é o recalque no topo da estaca. Este método de apresentação dos resultados foi proposto por Ottaviani (1975).

Na primeira análise, a extensão do domínio vertical é de 80 m e o comprimento das estacas de 20 m ($H/L=4$). A Figura 3.4 mostra os resultados obtidos nos diferentes trabalhos.

De acordo com a Figura 3.4, a previsão do programa DIANA foi bem semelhante às obtidas por Ottaviani (1975), Bittencourt e Lima (2009) e Sales (2000) para o caso de estacas de 20 m, as retas dos dois primeiros trabalhos e do DIANA praticamente se sobrepuseram e tiveram uma pequena divergência em relação ao ALLFINE, provavelmente pelo fato de que na análise com este programa o autor usou a condição 2D axissimétrica e nos demais casos foram usados modelos tridimensionais.

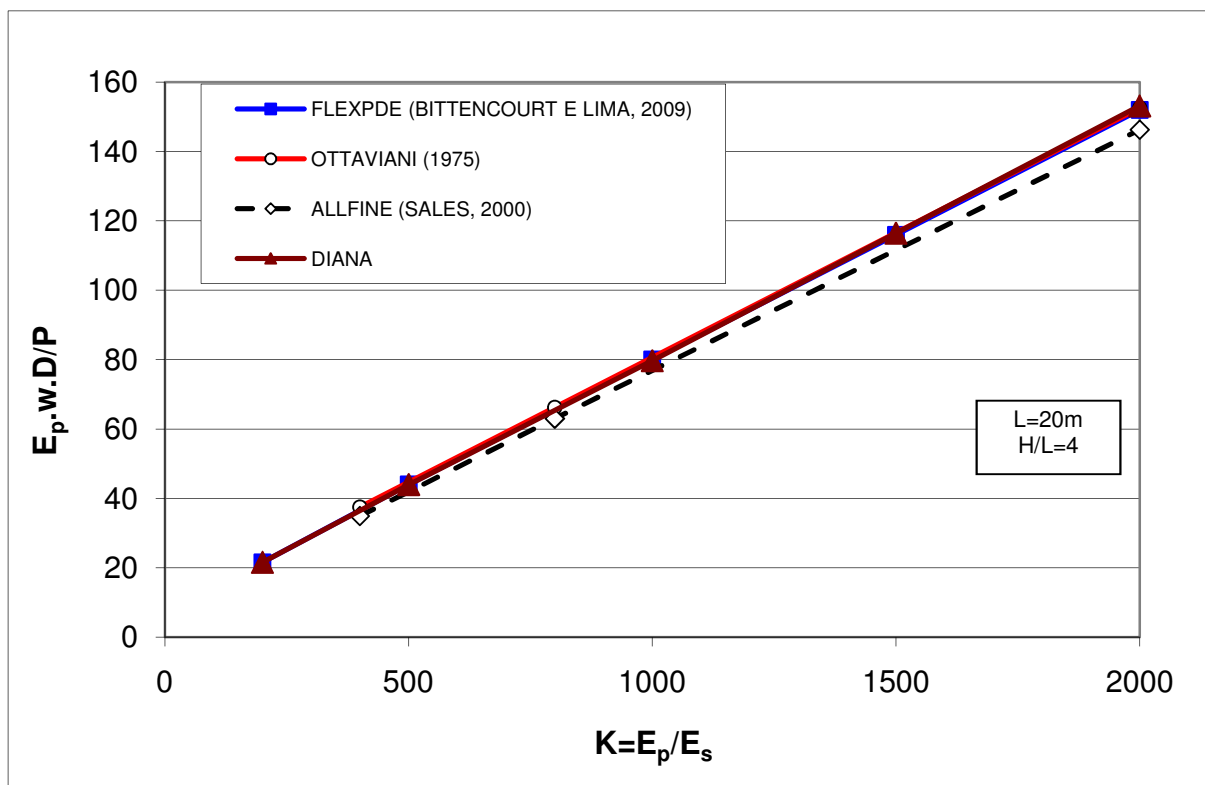


Figura 3.4 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 20 m (H/L=4)

No segundo caso, a extensão do domínio vertical é de 30 m e o comprimento das estacas de 20 m (H/L= 1,5). A Figura 3.5 mostra o comportamento carga x deslocamentos do problema.

Como no outro caso, neste o comportamento previsto pelo DIANA foi extremamente semelhante ao do ALLFINE e do FLEXPDE e teve uma pequena discrepância dos valores de Ottaviani (1975), provavelmente por motivos de refinamento de malha, que não foi maior que 5% quando comparados os recalques adimensionais, portanto esta análise se mostrou válida.

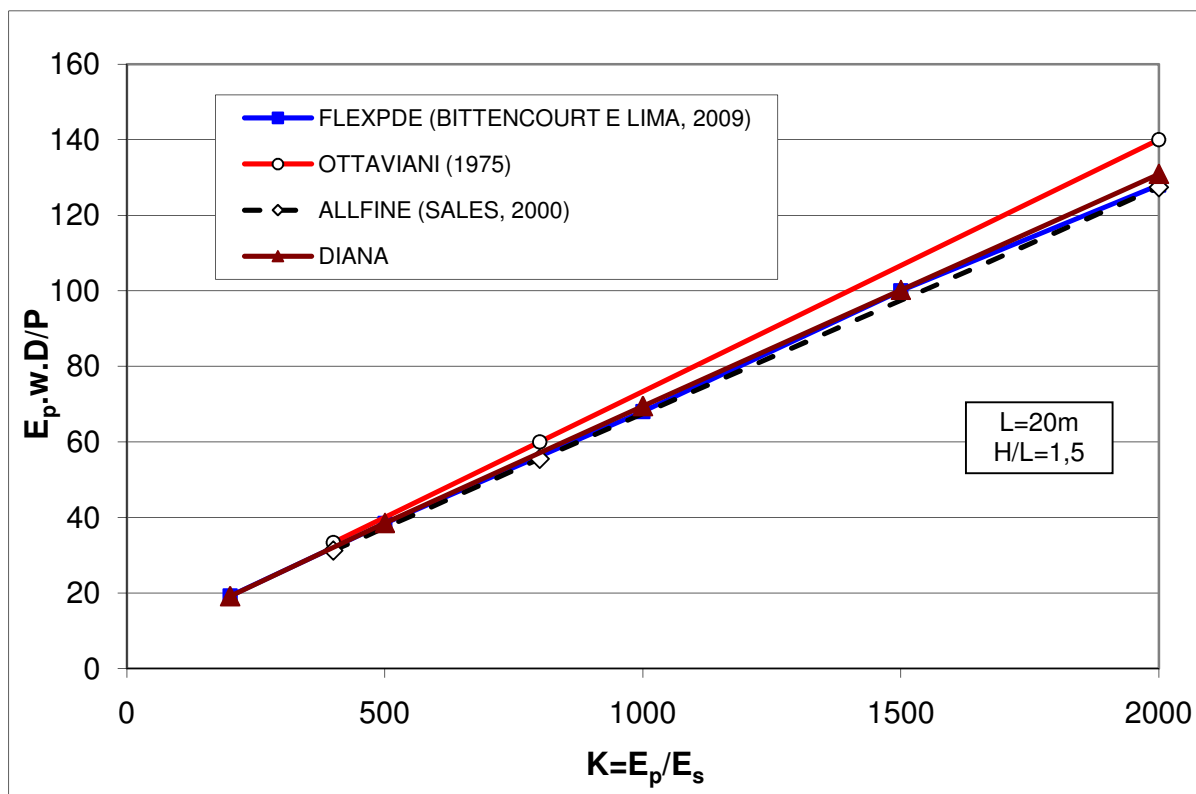


Figura 3.5 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 20 m ($H/L=1,5$)

No terceiro caso, a extensão do domínio vertical foi de 60 m ($H/L=1,5$) e o comprimento das estacas de 40 m. A Figura 3.6 mostra os resultados encontrados.

A resposta do programa DIANA para esse caso foi praticamente a mesma do FLEXPDE. Em comparação com o ALLFINE e os valores de Ottaviani (1975), a variação máxima dos valores de recalque adimensional gerados pelo DIANA ficou inferior a 5%, ou seja, bem pequena. Cabe ressaltar que, para valores de rigidez relativa menores onde o solo é mais rígido, a diferença entre os programas é ainda menor.

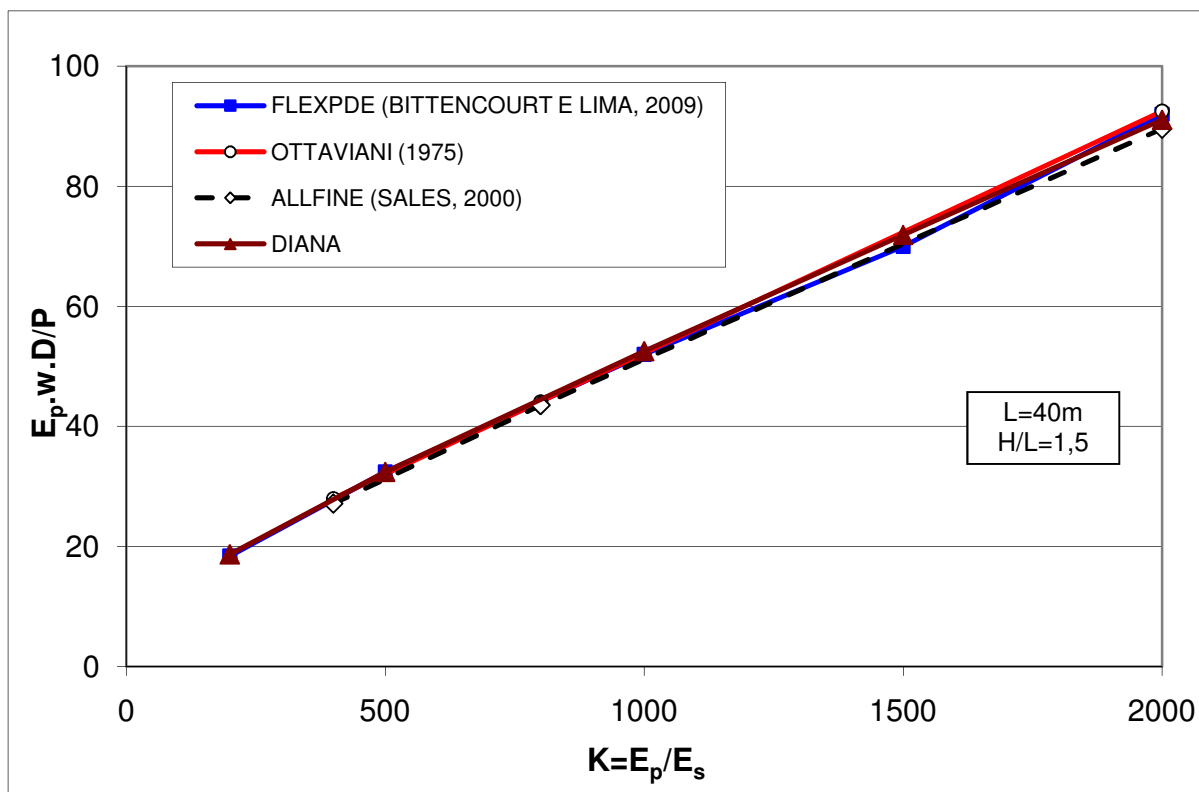


Figura 3.6 – Resultados do comportamento de uma estaca isolada de 40 m ($H/L=1,5$)

Ainda no caso de estaca isolada (20 m de comprimento e $H/L=4$), foram elaboradas análises no programa DIANA com variadas malhas e condições de problema. Foram feitas análises com $\frac{1}{4}$ de malha (3D), malha inteira (3D) e análise axissimétrica (2D) comparando os resultados com os gerados pelo ALLFINE de Sales (2000). As análises com $\frac{1}{4}$ de malha (3D) e malha inteira (3D) tiveram a densidade de elementos compatível, para efeito de comparação de valores. A Figura 3.7 mostra os diferentes resultados obtidos.

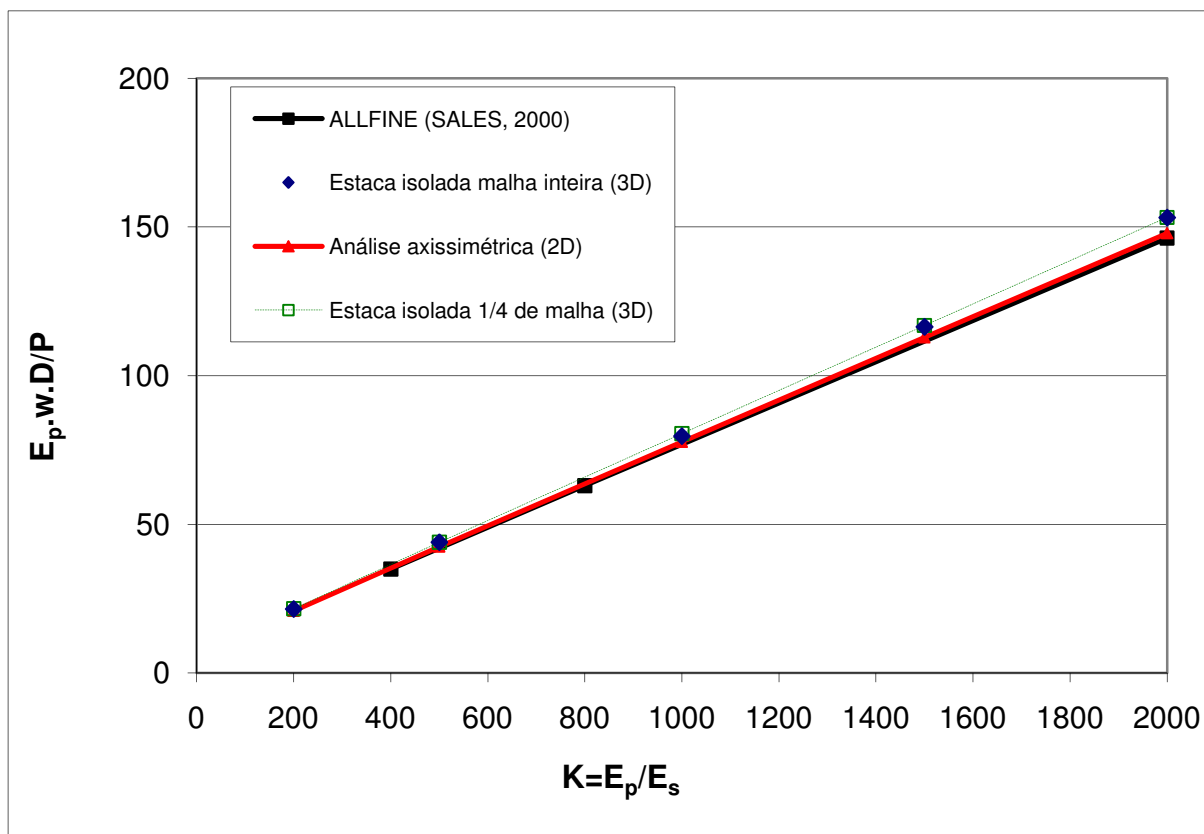


Figura 3.7 – Comparação entre as variadas malhas e condições ($L=20\text{m}$ e $H/L=4$)

De acordo com a Figura 3.7, pode-se observar que as análises tridimensionais com $\frac{1}{4}$ de malha e malha inteira geraram os mesmos resultados, as retas se sobrepuseram. Isto mostra que, para os problemas posteriores, poderá ser usado $\frac{1}{4}$ de malha, tendo em vista que isso reduzirá significativamente o tempo de processamento. Já os resultados das análises 2D axissimétricas, feitas pelo DIANA, ficaram muito próximos dos gerados pelo ALLFINE e deram pequena diferença (menores que 5%) em relação às análises 3D. Considerando o exposto acima e para uma maior precisão nos resultados, com respectiva redução no tempo de processamento, será usada no presente trabalho $\frac{1}{4}$ de malha (3D) e, para todos os casos, será verificada a convergência dos resultados através do refinamento da malha.

3.1.2.2 O caso de um radier com 9 estacas

O segundo caso, também proposto por Ottaviani (1975), é de um grupo com 9 estacas sob um bloco rígido de 3 m de espessura. Este problema também foi analisado por Sales (2000) com o ALLFINE e por Bittencort e Lima (2009) com o FLEXPDE.

Trata-se de um caso mais complexo que apresenta um bloco sobre as estacas, a aplicação da carga se dá em forma de pressão aplicada em uma área central da placa, a qual Ottaviani (1975) não deixou claro em seu artigo qual valor foi usado. O bloco não tem contato, nas paredes laterais, com o solo. Essa análise pode ser considerada como a de um radier estaqueado, uma vez que todos os elementos influenciarão no comportamento global do sistema. A Figura 3.8 mostra a geometria do problema proposto.

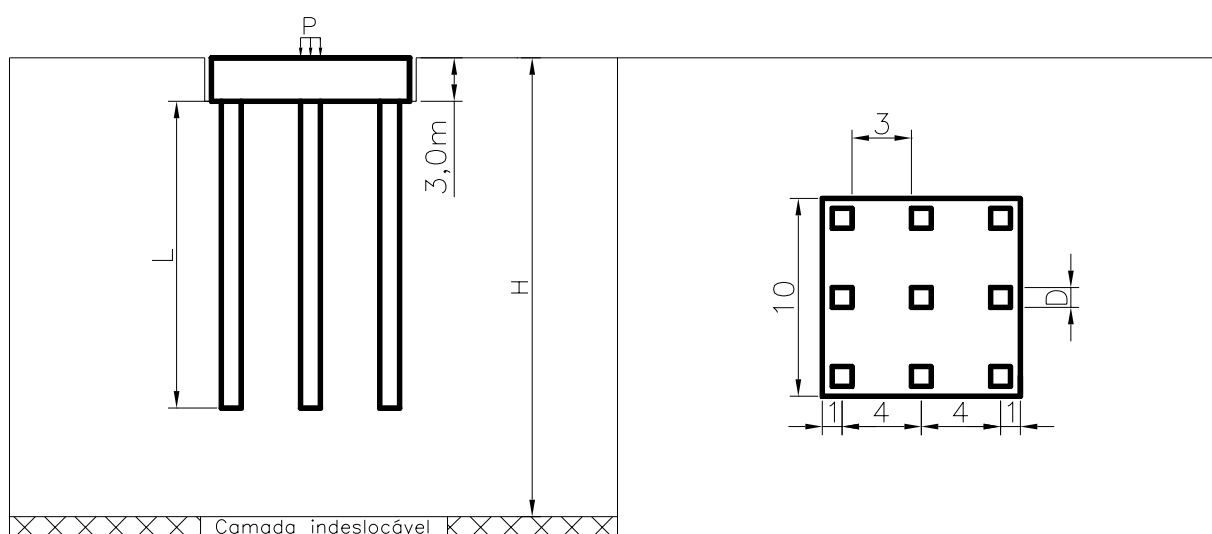


Figura 3.8 – Grupo de 9 estacas proposto por Ottaviani (1975)

Onde:

- ◆ L: comprimento da estaca;
- ◆ D: lado da seção;
- ◆ H: Profundidade até a camada indeslocável

Como dados de entrada para resolução do problema, Ottaviani (1975) propôs as seguintes condições:

- ◆ Módulo de elasticidade do concreto: $E_c=20$ GPa;
- ◆ Coeficiente de Poisson do concreto: $\nu_c=0,2$;
- ◆ Solo Homogêneo;
- ◆ Coeficiente de Poisson do solo: $\nu_s=0,45$;

Como feito por Ottaviani (1975) e Sales (2000), no presente trabalho foram desenvolvidos dois casos. O primeiro é para estacas com $L=17$ m e $H=30$ m e o segundo para estacas com $L=37$ m e $H=60$ m, salienta-se que o comprimento das estacas considerado é somente o que está sob o bloco. Manteve-se, na apresentação dos resultados, o mesmo critério utilizado para estacas isoladas, variou-se o módulo de elasticidade do solo (E_s) mantendo o módulo de elasticidade do concreto constante. O resultados serão apresentados em função do fator de adimensional de recalque ($E_p \cdot D \cdot w/P$), onde o P é igual ao valor total da carga aplicada no bloco dividida pelo número de estacas. A carga foi aplicada em um quadrado de um metro de lado, no centro do bloco, na forma de pressão.

Os resultados do primeiro caso estão mostrados na Figura 3.9, juntamente com os encontrados por Sales (2000), Ottaviani (1975) e Bittencourt e Lima (2009).

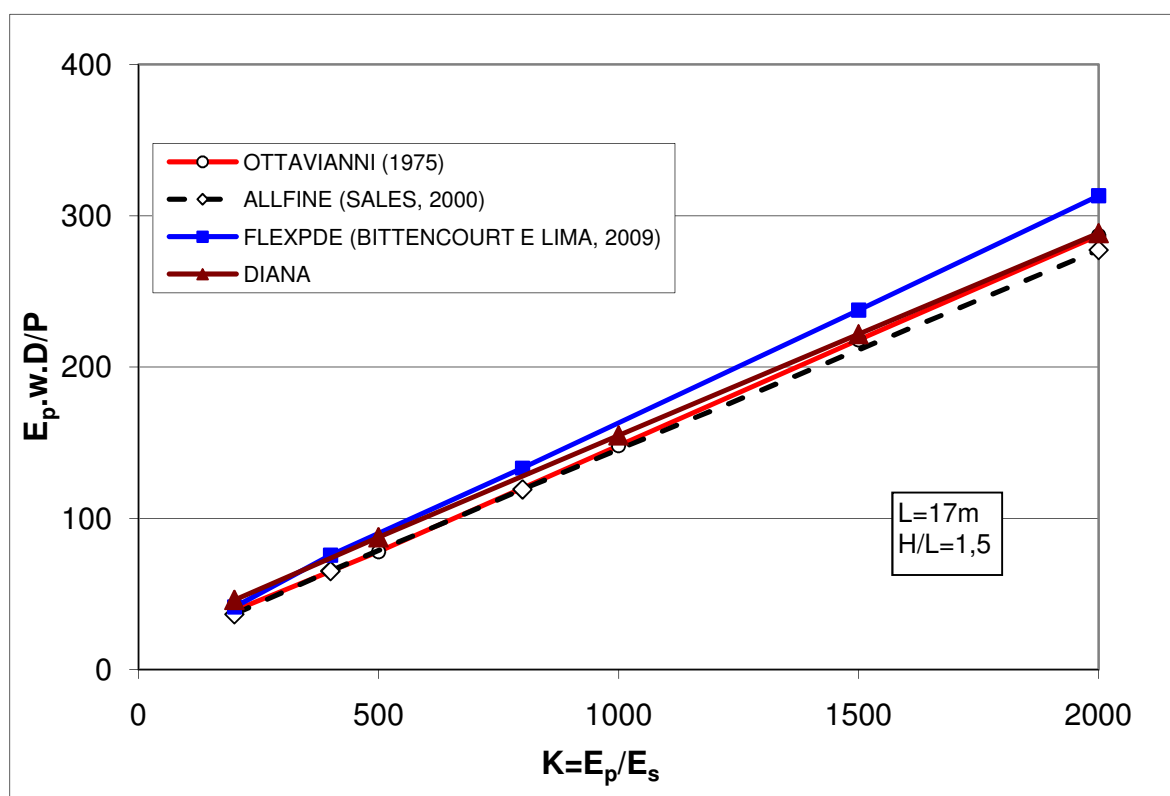


Figura 3.9 – Resultados do comportamento de um grupo de 9 estacas com 17 m de comprimento

Observa-se, pela análise da Figura 3.9, que a concordância entre os resultados dos programas ALLFINE, UNIVAC 1108 (OTTAVIANNI, 1975) e DIANA é muito grande, já o programa FLEXPDE mostrou-se mais conservador, gerando um recalque cerca de 10% maior que os outros 3 programas.

Os resultados do segundo caso são apresentados na Figura 3.10 que mostra a comparação do comportamento carga x recalque entre os programas para estacas com 37 m.

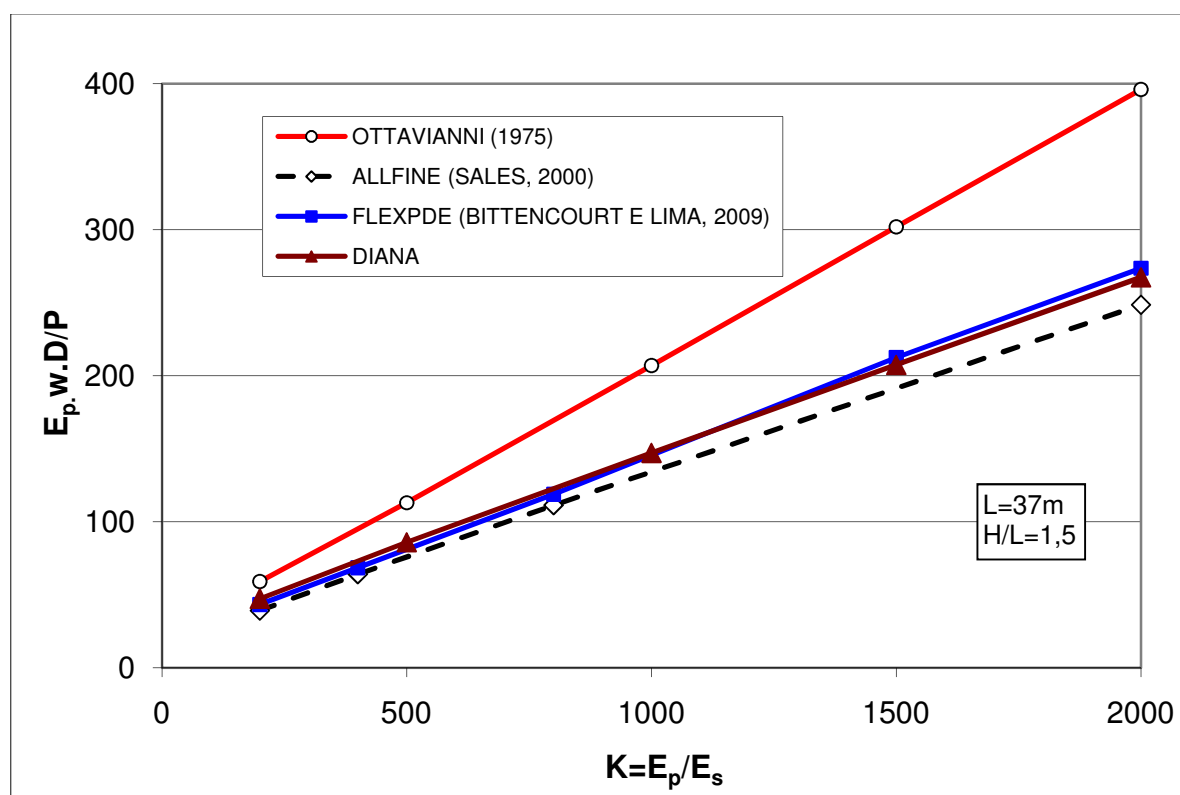


Figura 3.10 – Resultados do comportamento de um grupo de 9 estacas com 37 m de comprimento

O comportamento previsto pelos programas DIANA, FLEXPDE e ALLFINE foram muito próximos, com diferenças máximas de 10%. Já os resultados de Ottaviani (1975) foram bem superiores, o que a priori é um fato estranho, como já observado por Sales (2000). Esse autor comentou que ficou constatado, inclusive pelo próprio Ottaviani (1975), que estacas de 40 m são mais rígidas que as de 20 m, portanto, o bloco com estacas de 40 m não pode recalcar mais que o bloco com estacas de 20 m. Ottaviani (1975) tentou explicar esse fato com sendo função das tensões impostas no contato radier-solo, mas deve ter sido um equívoco na entrada de dados ou montagem do problema.

3.1.2.3 O caso de um radier sobre 16 estacas (TC-18)

O problema foi proposto pelo comitê técnico TC-18 da ISSMGE e foi analisado por diversos autores de todo o mundo.

Este caso é considerado um pouco mais complexo que os apresentados inicialmente, pois o solo tem seu módulo de elasticidade crescendo linearmente com a profundidade. Para a

análise elástica no DIANA foi considerado um solo estratificado, onde o módulo de elasticidade de cada camada se refere ao ponto central da mesma e seu valor obtido pela função matemática originalmente fornecida. A Figura 3.11 mostra a geometria e as propriedades do radier, solo e estacas.

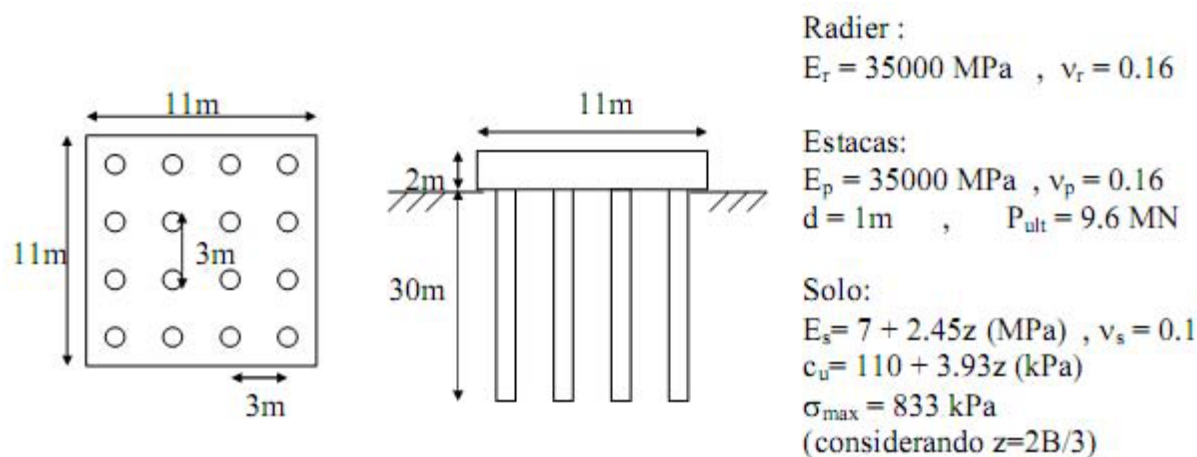


Figura 3.11 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-18 (SALES, 2000)

Devido às dimensões das estacas, ao solo bem resistente e ao espaçamento relativo ($s/D=3$), o grupo de estacas torna-se bem mais rígido que o radier e isso faz com que o comportamento da fundação esteja muito mais de acordo com um bloco sobre estacas que para um radier estaqueado propriamente dito, onde o bloco tem papel irrelevante no comportamento do sistema.

Sales (2000) apresentou uma tabela onde ele compara os diversos resultados encontrados por outros autores, considerando que foi aplicada uma carga uniformemente distribuída de 80 MN na superfície do radier. Na Tabela 3.1 encontram-se os valores mostrados por Sales (2000), somente para os casos em que os autores utilizaram programas baseados no M.E.F, bem como o valor previsto através do DIANA.

Tabela 3.1 – Comportamento do Radier proposto pelo TC-18

Programa / Método / Autor	Recalque (mm)
MEF (H/L=3) – Yamashita (1998)	29
ALLFINE – MEF (H/L=5) - Sales (2000)	27
DIANA	31

Comparativamente, observou-se que os valores de recalque ficaram bem próximos, com diferença de menos de 10% entre os métodos, diferença esta que foi bem pequena.

De acordo com Matsumoto *et al.* (1998), os menores valores previstos por Yamashita (1998) talvez pudesse ser atribuído à baixa relação H/L utilizada. Sales (2000) fez sua análise para H/L=3 e também para H/L=5 e verificou uma diferença de 1,4%, o que leva a acreditar que a diferença está associada às simplificações de cada método e não simplesmente pelo domínio vertical empregado. Na simulação com o DIANA foi adotado H/L=5.

3.1.3 Escolha do Elemento Finito

Pela análise tridimensional, a qual este trabalho se propõe, deveriam ser utilizados elementos sólidos. Devido a particularidades na geração da malha optou-se pela escolha de elementos espaciais de pirâmide, presentes na biblioteca do DIANA. Antes da escolha do elemento foram testados dois tipos: o de 4 nós (TE12L) e o de 10 nós (CTE30).

O TE12L, mostrado na Figura 3.12, é um elemento isoparamétrico de pirâmide de 3 faces e 4 nós, com interpolação linear e integração numérica. O polinômio que representa a translação nas três direções (u_{xyz}) é expresso pela Equação 3.1.

$$u_i(\xi, \eta, \zeta) = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\zeta \quad (3.1)$$

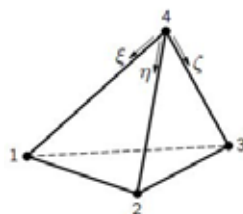


Figura 3.12 – Elemento TE12L (TNO, 2008)

O CTE30, mostrado na Figura 3.13, é um elemento isoparamétrico de pirâmide de 3 faces e 10 nós, com interpolação quadrática e integração numérica. O polinômio de translação (u_{xyz}) deste elemento é expresso pela Equação 3.2.

$$u_i(\xi, \eta, \zeta) = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\zeta + a_4\xi\eta + a_5\eta\zeta + a_6\xi\zeta + a_7\xi^2 + a_8\eta^2 + a_9\zeta^2 \quad (3.2)$$

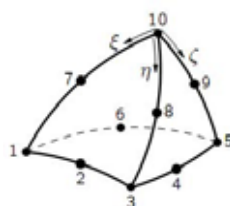


Figura 3.13 – Elemento CTE30 (TNO, 2008)

A princípio os dois tipos de elementos finitos poderiam ser usados. A escolha de um elemento linear de 4 nós ou um quadrático de 10 nós vai influenciar no refinamento da malha e, conseqüentemente, no tempo de processamento. Isso quer dizer que, em tese, a opção pelo elemento quadrático com 10 nós pode fazer com que o usuário empregue uma malha mais pobre e, mesmo assim, tenha um resultado satisfatório. Para que o resultado seja o mesmo, utilizando o elemento de 4 nós, a malha deveria ser mais refinada, ou seja, conter mais elementos. Para verificação desse princípio foi feito um teste de refinamento de malha no problema do TC-18, descrito no item anterior, e o resultado mostrado na Figura 3.14.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram o número de elementos e o tempo de processamento despendido em cada análise.

Tabela 3.2 – Tempos de processamento elemento TE12L

Elemento	Nº de elementos	Tempo
TE12L	37.788	20s
	39.228	25s
	53.315	33s
	81.203	6min12s
	109.603	17min12s
	158.342	34min42s
	171.769	47min23s
	229.477	52min50s
	253.700	58min23s
	292.509	64min32s

Tabela 3.3 – Tempos de processamento elemento CTE30

Elemento	Nº de elementos	Tempo
CTE30	31657	10min12s
	38821	16min33s
	47934	22min21s
	61988	34min15s
	74760	56min05s

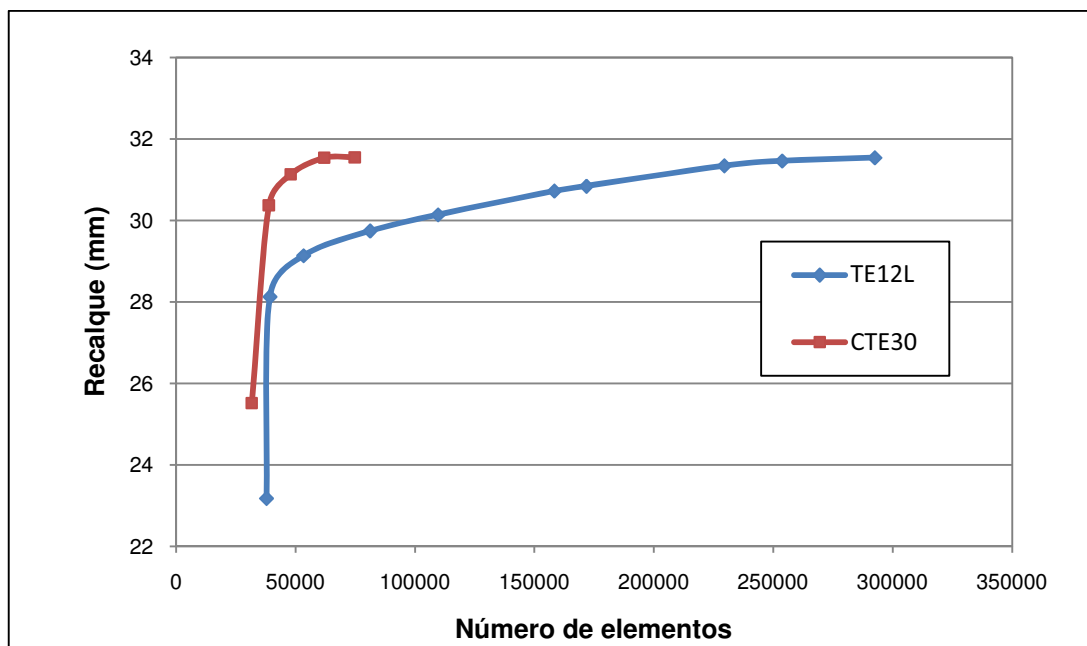


Figura 3.14 – Teste de convergência do problema proposto pelo TC-18

De acordo com a Figura 3.14 e Tabelas 3.2 e 3.3 observou-se que, para o elemento tipo TE12L, o problema converge com 229.477 elementos e, com o elemento tipo CTE30, a convergência acontece com 61.988 elementos. A Tabela 3.2 mostra que, para se chegar ao valor razoável de recalque usando o elemento TE12L, o tempo de processamento foi de 52min e 50s. No elemento CTE30, para a convergência de resultados, o tempo gasto foi de 34min e 15s. Em função desta análise, avaliando conjuntamente os resultados gerados e os tempos de processamento despendidos, optou-se pela escolha do elemento CTE30 em todas as demais modelagens do presente trabalho.

3.1.4 Verificação do Domínio Lateral

Um radier sobre 100 estacas, que será analisado no capítulo 5 deste trabalho, foi o primeiro caso a ser simulado e o principal motivo disso foi sua utilização, primeiramente, para verificar a importância do domínio lateral nas respostas do programa DIANA.

Foi usado um radier de 2,0 m de espessura e aplicada uma carga igual a 5000 kN, distribuída em uma área central com dimensões de 0,2 x 0,6 m, simulando um pilar. Primeiro foi simulado um caso em que o domínio lateral foi de 50 m e, posteriormente com as mesmas condições, foi modelado o outro caso alterando apenas o domínio lateral para 100 m, conforme a Figura 3.15.

O parâmetro de saída analisado foi o recalque máximo no radier. Para o domínio horizontal de 50 m, o resultado foi de 28,4 mm e, para o domínio horizontal de 100 m, o resultado foi de 28,1 mm, diferença de 1,06%.

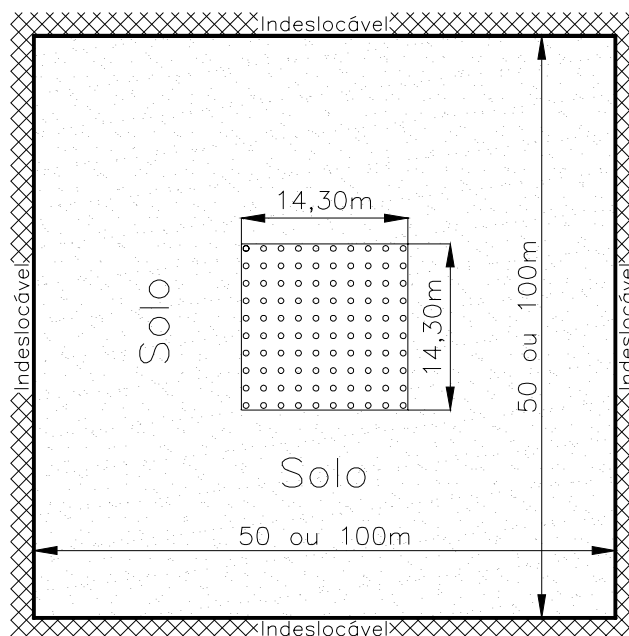


Figura 3.15- Vista em planta do domínio horizontal usado nas análises do radier sobre 100 estacas

Assim, ficou constatado que a alteração do domínio lateral de 50 para 100 m influenciou muito pouco nos resultados, enquanto que esta alteração em termos de malha aumenta muito a quantidade de elementos da análise, logo também aumenta o tempo de processamento. Enquanto que no domínio lateral de 100 m o tempo de processamento gasto no DIANA foi de 26h 12min e 07s, a mudança para o domínio lateral de 50 m diminuiu o tempo para 18h 40min e 02s.

Considerando o exposto acima, foi adotado para todos os outros casos o uso do domínio lateral de 50 m, o que permitiu diminuir consideravelmente o tempo das análises numéricas.

3.2 PROGRAMA GARP

De acordo com Lima (2007), o programa GARP é um programa para análise e dimensionamento de radier estaqueado já bastante desenvolvido e testado em várias pesquisas, e que serviu como base para alguns trabalhos como o de Sales (2000) e Poulos (2001). O mesmo pode considerar, na análise, as seguintes condições:

- ◆ Heterogeneidade do solo, considerando camadas estratificadas na entrada de dados;
- ◆ Limitação da tensão admissível (compressão ou tração) no solo sob o radier;
- ◆ Estacas com resposta não-linear e limite de capacidade de carga para compressão e tração;
- ◆ Estacas com diferentes propriedades mecânicas dentro do mesmo problema, tais como diâmetro, rigidez, comprimento, limites de tensão, comportamento não-linear, entre outras;
- ◆ Possibilidade de aplicação de cargas uniformemente distribuídas, concentradas verticais e momentos nas duas direções pertencentes ao plano do radier;
- ◆ Imposição de pré-deformações no solo para simular efeitos de consolidação ou expansão;
- ◆ Radier com formato ou altura variáveis, necessitando apenas de uma adaptação ao formato da malha de elementos finitos.

O GARP (SMALL; POULOS, 2007), é um programa híbrido que usa o M.E.F. para análise do radier e as estacas são representadas por molas equivalentes com as interações estaca-estaca, estaca-solo e solo-estaca (Figura 3.16) são consideradas através do M.E.C., que utiliza a teoria da elasticidade. Deve-se, também, impor a compatibilidade dos deslocamentos verticais do solo e dos elementos do radier. Assim, ao se resolver o sistema final de equações, o programa obterá os deslocamentos e tensões que satisfazem ao equilíbrio do radier e do sistema estacas/solo (SALES, 2000; LIMA, 2007).

Segundo Sales (2000), alguns autores vêm adotando esta técnica de utilizar mais de um método, cuja representação do radier pelo M.E.F. possibilita incorporar efeitos da flexibilidade deste, bem como a determinação mais detalhada de todos os esforços em várias seções do mesmo. Para a simplificação da análise das estacas, cada uma é modelada por uma mola de rigidez equivalente que é fornecida ao programa GARP depois de obtido por outros programas ou métodos, como o DEFPIG (POULOS, 1980) usado nesta dissertação, que é

baseado nas equações de Mindlin (1936) associado à aproximação de Steinbrenner (1934³) *apud* Sales (2000) para a presença de extrato inferior indeslocável.

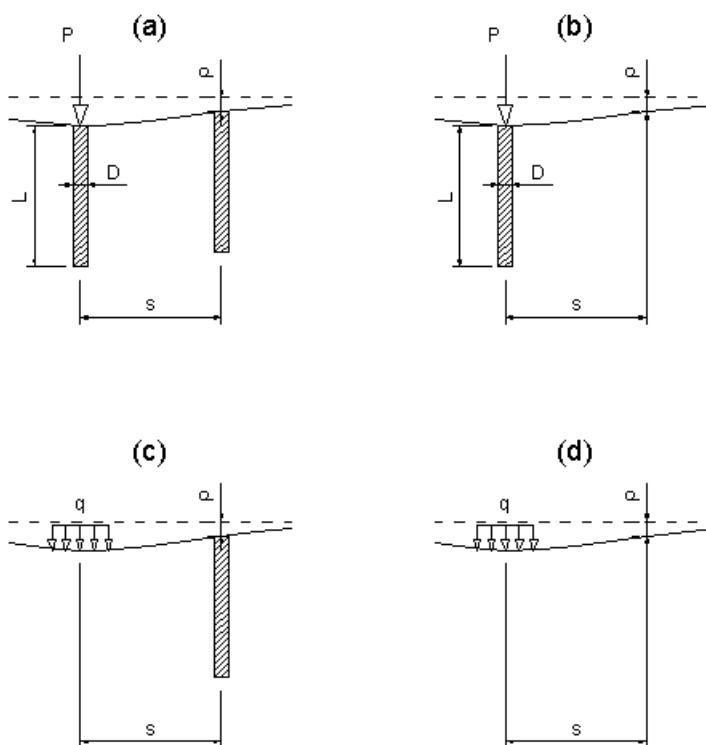


Figura 3.16 – Fatores de interação utilizados no GARP (LIMA, 2007)

Até a versão 6 (GARP6), quando a estaca atingia sua carga máxima, esta estaca era retirada do sistema de equações, mas sua rigidez era mantida constante. Assim, não era permitido que o recalque dessa estaca tivesse seu valor aumentado, uma vez que a rigidez era constante.

Sales (2000) realizou algumas alterações no programa que passou para a próxima versão, GARP7, onde se modificou o comportamento não-linear das estacas, a análise no regime elástico continuou igual à versão anterior. A principal alteração feita por esse autor foi a variação da rigidez das estacas depois de atingida sua carga máxima. O programa foi alterado de modo que, após a estaca atingir sua carga máxima, ela teria sua rigidez diminuída, fazendo com que as deformações pudessem aumentar com o aumento de carga do sistema (LIMA, 2007).

Na simulação do modelo não-linear do solo, é utilizado pelo GARP o modelo hiperbólico simples para representar a variação do módulo de elasticidade que é questionado por autores

³ STEINBRENNER, W. (1934). **Tafeln Zur Setzungsberechnung. Die Strasse**, 1-221.

como Fahey e Carter (1993), para alguns tipos de solos. Estes autores propuseram a Equação 3.3 para o cálculo do módulo elástico.

$$E_s = E_0 \left[1 - R_f \left(\frac{p}{P_u} \right)^g \right] \quad (3.3)$$

Onde:

E_0 = módulo de elasticidade inicial do solo;

p = nível de carga atual;

P_u = máxima capacidade de carga da estaca (valor adotado);

R_f = parâmetro que dita a parcela de redução do módulo elástico;

g = parâmetro que dita a curvatura do comportamento não-linear do solo.

Nas versões anteriores do GARP (GARP6 e GARP7), considera-se que, quando existir uma estaca ou um grupo, sob um elemento do radier, toda a carga atuante naquele elemento será suportada pela estaca. Na versão 8 (GARP8), as estacas foram consideradas sob os nós e os elementos vizinhos àquele nó, tem contato com o solo e, com isto, a área do topo das estacas é desprezada e a área do radier fica um pouco superior a real.

No presente trabalho será usada a oitava versão do GARP e o programa DEFPIG (POULOS, 1980), baseado no M.E.C., será usado para obter os valores de rigidez das estacas e fatores de interação, através do método de Poulos e Davis (1980), a distâncias pré-estabelecidas para posterior entrada no GARP.

3.2.1 Validação do Programa GARP

Neste item foi avaliada a concordância dos resultados gerados pelo programa GARP8 em relação aos casos analisados por outros autores, que também usaram o mesmo programa, contudo em versões anteriores.

Para validação do programa GARP, versão 8, foram analisados dois casos presentes na literatura, o primeiro foi de Kuwabara (1989), também simulado por Sales (2000) com o GARP7 e o segundo de Poulos *et al.* (1997) que usou o GARP6.

3.2.1.1 O caso do radier sobre 9 estacas proposto por Kuwabara (1989)

Kuwabara (1989) analisou um radier sobre 9 estacas por elementos de contorno. Onde usou o M.E.C. para representar todos os elementos da fundação, sem a associação com qualquer outro método nem simplificações na consideração das interações, por isso, sua análise foi considerada uma análise “M.E.C.-completo” como mencionou Sales (2000).

Na Figura 3.17 são apresentados os resultados de Kuwabara (1989) e Sales (2000) para o caso do radier sobre 9 estacas com espaçamento entre estacas de 3 vezes o diâmetro. O bloco foi considerado rígido e possuía a distância do centro da última estaca à borda do radier igual ao diâmetro da estaca. O solo foi considerado elástico com coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,5$ e rigidez relativa estaca/solo igual a 1000.

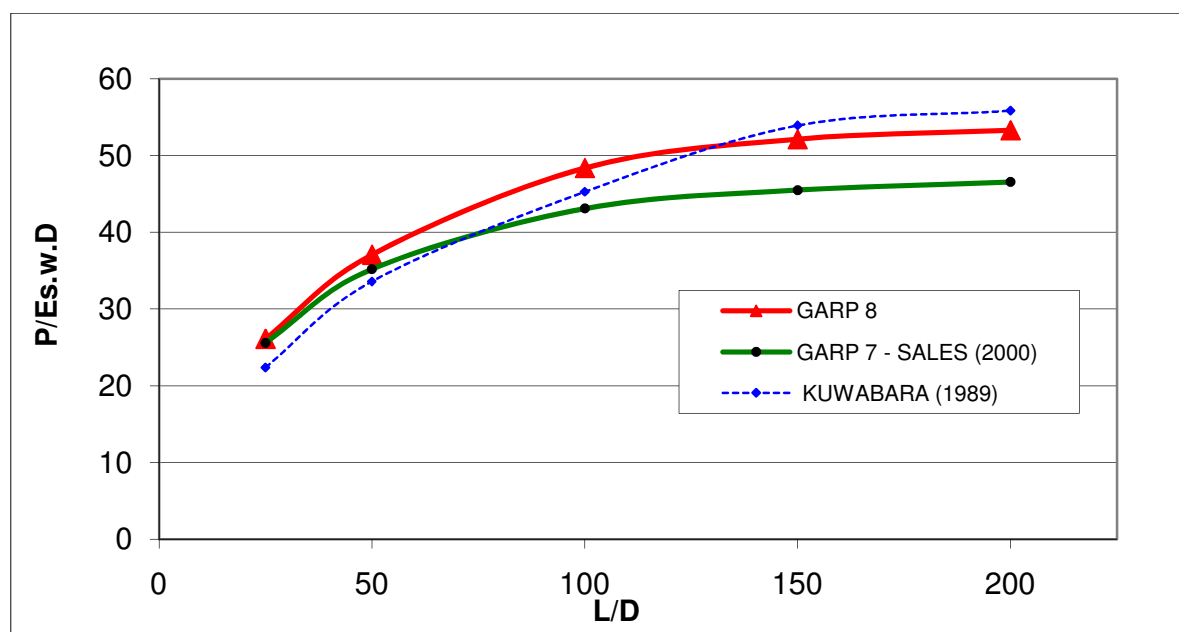


Figura 3.17 – Comportamento de um radier com 9 estacas proposto por Kuwabara (1989) para valores de $s/D=3$

De acordo com a Figura 3.17 pode-se observar que os valores gerados com o GARP 8 estão relativamente próximos dos de Kuwabara (1989) e de Sales (2000), com o GARP 7, para valores de L/D menores que 100. Para valores de L/D maiores que 100, o GARP 8 gerou resultados relativamente próximos dos valores de Kuwabara (1989) e houve uma pequena discrepância em relação ao GARP7 de Sales (2000).

Na Figura 3.18 são apresentados os resultados para valores de espaçamento entre as estacas de 5 vezes o diâmetro e os mesmos parâmetros considerados na primeira análise.

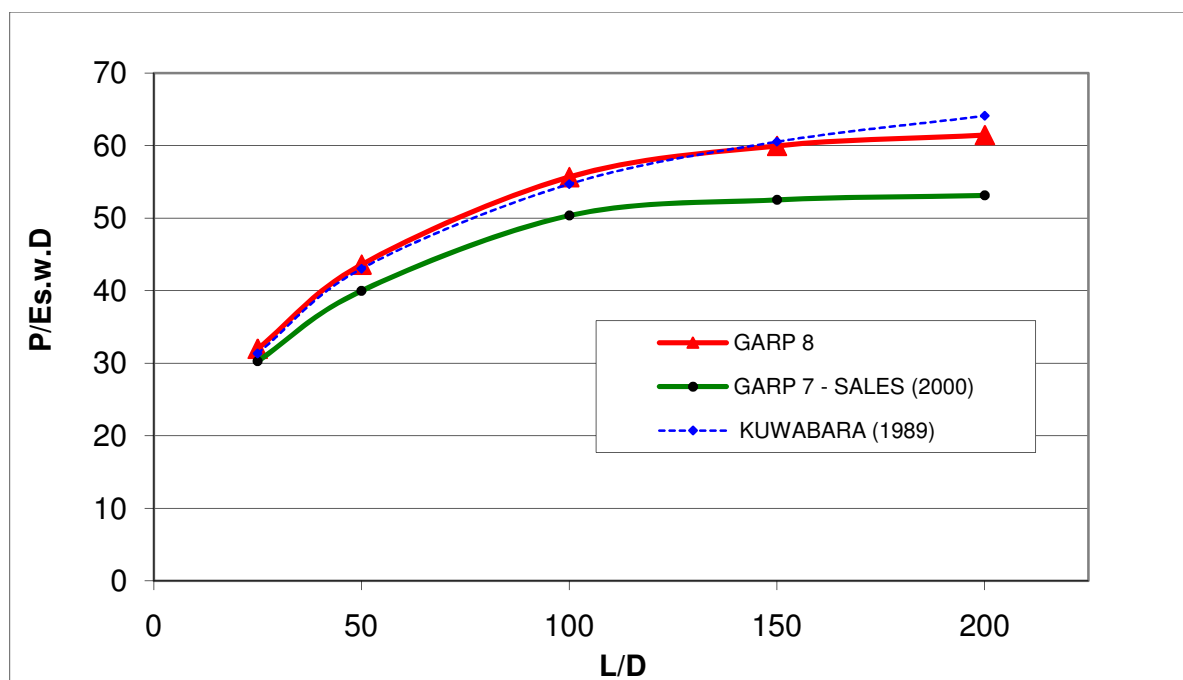


Figura 3.18 – Comportamento do radier com 9 estacas para valores de $s/D=5$

A Figura 3.18 mostra que os valores gerados pelo GARP8 são muito próximos aos originais de Kuwabara (1989) e tiveram uma pequena discrepância em relação ao GARP7, o que pode ser explicado pelas diferenças de concepção entre os dois programas.

De acordo com a análise das figuras 3.17 e 3.18, pode-se concluir que o programa GARP8 gerou resultados bem próximos ao M.E.C. e com uma pequena discrepância em relação à versão anterior, porém pela pequena diferença de concepção entre os dois programas esta diferença nos resultados foi considerada pequena (menor que 15%).

3.2.1.2 Exemplo de Radier sobre 15 estacas apresentado por Poulos *et al.* (1997)

Poulos *et al.* (1997) propuseram um caso hipotético ilustrado pela Figura 3.19, também em radier estaqueado, onde analisaram em três etapas e compararam os valores do GARP6 com seis métodos distintos.

Taxa admissível do Radier=0,3 MPa

Capacidade de carga de cada estaca

Tração=0,786 MN

Compressão=0,873 MN

Caso	P1	P2	Nº de estacas	Observações
A	2,00	1,00	15	-
B	2,50	1,25	15	-
C	2,00	1,00	9	As estacas A não são apresentadas

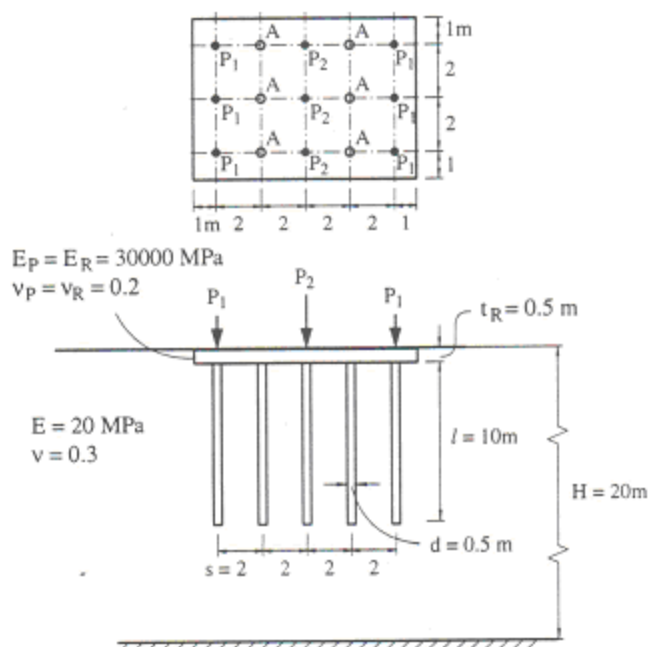


Figura 3.19 – Exemplo hipotético analisado por vários métodos (POULOS *et al.*, 1997)

Os autores, em seu artigo, apresentaram os resultados de cada etapa, onde foram feitas análises com os métodos de Poulos e Davis (1980), Randolph (1983), Poulos (1991) usando o programa GASP, Poulos (1994) com o programa GARP6, Ta e Small (1996) com o M.E.F., e Sinha (1997) com um método híbrido (combinando o M.E.C. e o M.E.F.). Foram inseridos os resultados do GARP8 para efeito de comparação.

Na primeira etapa, que os autores chamaram de caso A, eles analisaram um radier com 15 estacas, carga total de 12 MN aplicada e coeficiente de segurança de 2,6 para o sistema de fundação (radier + estacas). A Figura 3.20 apresenta os resultados dos seis métodos juntamente com o resultado do GARP8.

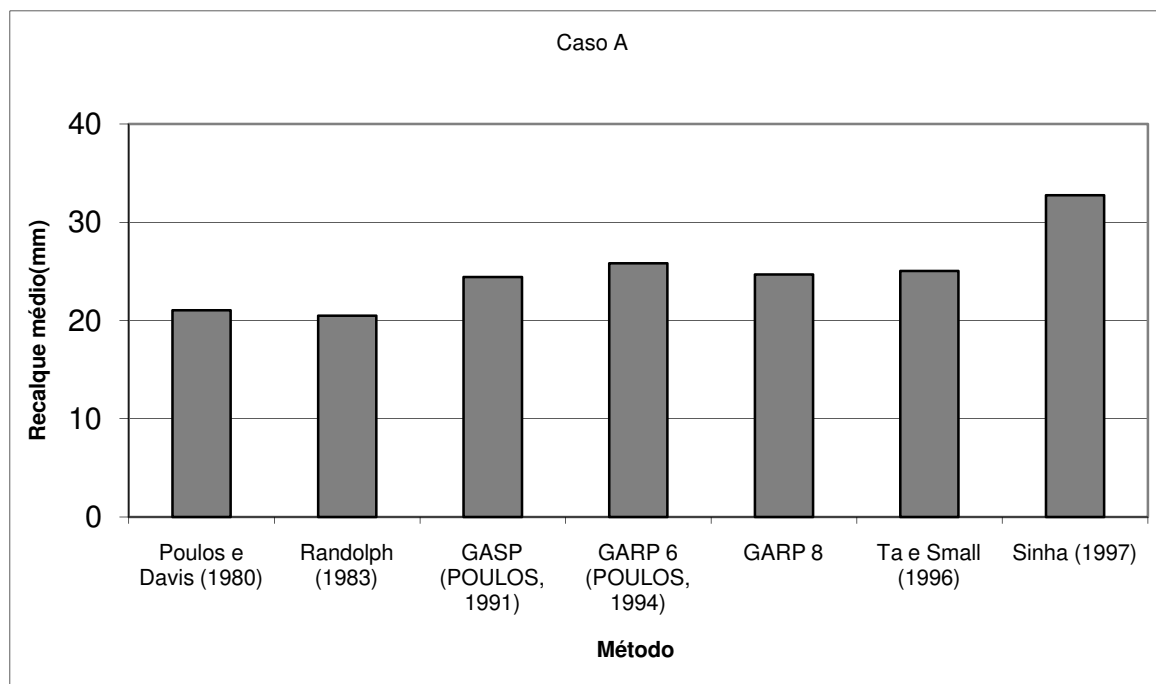
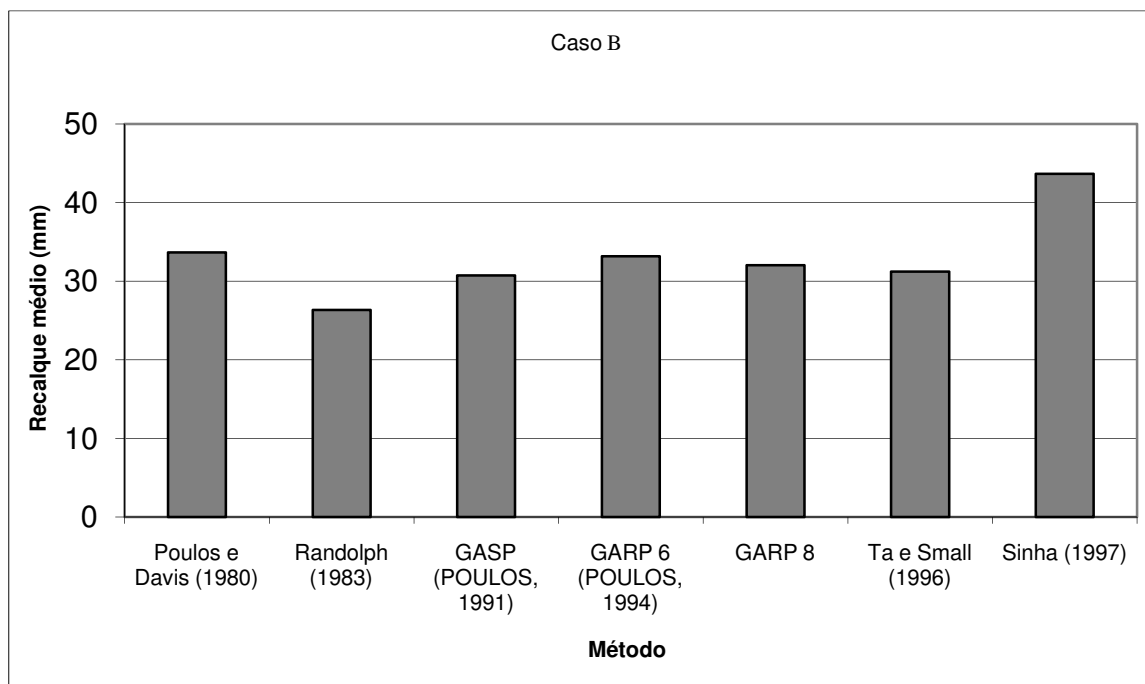


Figura 3.20 – Comparação dos métodos no Radier com 15 estacas (P=12 MN)

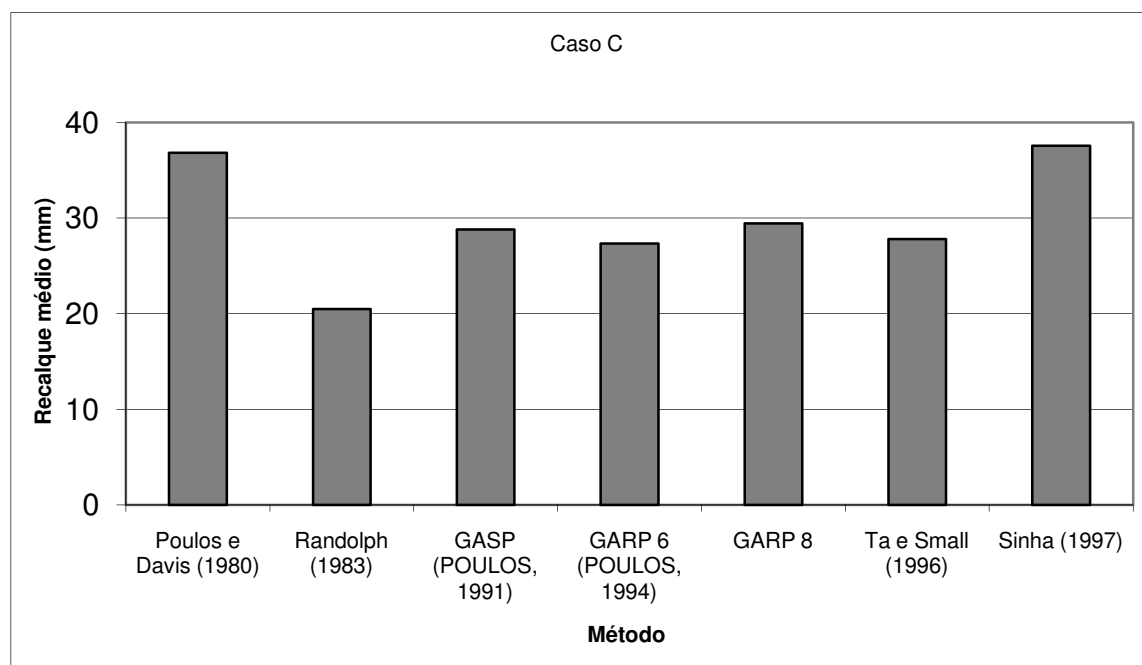
De acordo com a Figura 3.20, pode-se verificar que o valor do GARP 8 é razoavelmente semelhante aos demais, com exceção do método de Sinha (1997) que gerou um valor maior, isso se deve ao um ajuste feito pelo autor para o módulo de elasticidade do solo, para simular a heterogeneidade das camadas. Os resultados do GARP 6 e do GARP 8 foram bem próximos, com diferença de aproximadamente 4%, sendo o deste último ligeiramente menor.

Na segunda etapa, que os autores denominaram de caso B, foi considerado um radier com 15 estacas, submetido a uma carga total aplicada de 15 MN e tendo um fator de segurança para 2,07 para o sistema. A Figura 3.21 apresenta os resultados encontrados para este caso.

Os valores dos recalques calculados pelos vários métodos, de acordo com a Figura 3.21, ficaram bem próximos de 30 mm, com variações máximas de 10%, a exceção foi o recalque médio gerado pelo método de Randolph (1983), que gerou o menor dos valores de recalque médio, e Sinha (1997), que gerou o maior. Os resultados do GARP 6 e do GARP 8 ficaram bem próximos (diferença menor que 4%) sendo este último, levemente menor.

Figura 3.21 – Comparação dos métodos no Radier com 15 estacas ($P=15$ MN)

A terceira etapa, chamada de caso c, foi analisado um radier sobre 9 estacas, uma em cada coluna carregada, e uma carga total de 12 MN aplicada ao sistema, o que gerou um fator de segurança total de 2,15 para a fundação. A Figura 3.22 mostra os valores encontrados.

Figura 3.22 – Comparação dos métodos no Radier com 9 estacas ($P=12$ MN)

De acordo com a Figura 3.22 os valores dos métodos de Poulos e Davis (1980), Randolph (1983) e Sinha (1997) ficaram um pouco discrepantes dos demais que giraram em torno de

30mm, com diferenças máximas de 7%. Os valores do GARP6 e GARP8 ficaram bem próximos, com diferença de aproximadamente 5%, este último sendo um pouco maior.

De acordo com os casos analisados, foram encontrados valores bem próximos de recalque médio através do GARP8, quando comparado com o GARP6, o que mostra que apesar dos programas serem levemente distintos, as diferenças dos resultados são bem pequenas.

3.3 CASOS A SEREM ANALISADOS NESTE TRABALHO

Serão analisados neste trabalho radiers estaqueados com 2, 4, 9, 25, 36, 64 e 100 estacas, onde serão comparadas as respostas dos dois programas.

Serão propostas duas etapas para a análise, a primeira considerando o radier com espessuras usualmente aplicadas na prática e a segunda com o radier de espessura de 0,50 m (placa bastante flexível), espessura esta propositalmente adotada para garantir que as reações em todas as estacas fossem de compressão, já que estacas presentes no grupo submetidas a reações de tração poderiam comprometer os resultados a serem analisados. Isso pode ser explicado pelo fato de que, uma estaca com reação de tração entre duas adjacentes submetidas a reações de compressão, aumentaria seu recalque devido ao campo de deslocamentos das demais e diminuiria o mesmo devido à sua própria carga, além de gerar um campo de deslocamento que diminuiria o recalque das demais, e isso poderia comprometer as conclusões deste trabalho.

Em todas as análises feitas pelo programa DIANA, antes da reprodução dos resultados, foi feito um teste de convergência onde se buscou uma precisão adequada dos resultados para uma correta avaliação dos dados de saída.

Foi adotado o caso do radier convencional com 36 estacas para simulação do perfil de solo estratificado com o módulo de elasticidade crescente com a profundidade, também para comparação dos resultados dos dois programas.

3.3.1 Informações Geométricas

Para as simulações dos casos propostos serão adotadas as seguintes informações geométricas:

- ◆ Diâmetro das estacas: $D = 0,5 \text{ m}$

- ◆ Comprimento das estacas: $L= 10$ m;
- ◆ Distância da superfície do solo até o impenetrável: $H= 30$ m;
- ◆ Espaçamento entre as estacas: $s = 3D$;
- ◆ Espessura das placas dos raders estaqueados convencionais: $t=1,0$ m, para raders com até 9 estacas; $t=1,5$ m, para os raders de 25 e 36 estacas e $t=2,0$ m, para os raders de 64 e 100 estacas;
- ◆ Espessura das placas dos raders estaqueados flexíveis: $t= 0,5$ m;
- ◆ Distância do eixo da estaca do canto à borda do Radier = 40 cm;
- ◆ Domínio Horizontal: 50 m (25 m para cada lado);
- ◆ Seção do pilar para os raders convencionais: 0,2 x 0,6 m.

3.3.2 Propriedades dos Materiais e Demais Parâmetros

As propriedades dos materiais e o carregamento considerado nas análises foram os seguintes:

- ◆ Módulo de elasticidade do concreto das estacas e blocos: $E_c= 28$ GPa;
- ◆ Módulo de elasticidade do solo homogêneo: $E_s= 50$ MPa;
- ◆ Módulos de elasticidade do solo estratificado: $E_{s1}= 50$ MPa, $E_{s2}= 100$ MPa; $E_{s3}= 150$ MPa e $E_{s4}= 200$ MPa.
- ◆ Coeficiente de Poisson do concreto das estacas e raders: $\nu_c= 0,2$;
- ◆ Coeficiente de Poisson do solo: $\nu_s= 0,3$;

Carga aplicada: $P= 500$ kN x N° de estacas (Uniformemente distribuída na seção do pilar para os raders convencionais e uniformemente distribuída em toda a superfície da placa, para o radier de 0,5m).

CAPÍTULO 4

FATORES DE INTERAÇÃO ENTRE ESTACAS DE FUNDAÇÃO

Fundações estacadas são estruturas compostas basicamente por três elementos: as estacas, o radier (ou bloco de coroamento) e o solo de apoio. A avaliação da interação entre os elementos é fundamental para uma boa previsão do comportamento da fundação, tanto no que diz respeito às cargas nas estacas, momentos no radier e recalques. Quatro diferentes tipos de interação devem ser considerados na análise: interação radier-solo, radier-estaca, estaca-estaca e estaca-solo. Neste capítulo, os métodos para previsão dos fatores de interação estaca-estaca serão discutidos.

O conceito de fatores de interação tem sido amplamente adotado para a análise de grupos de estacas e radier estacado (HAIN; LEE, 1978; KAKURAI *et al.*, 1987, KITIYODOM; MATSUMOTO, 2003) desde a sua introdução por Poulos (1968). Esse autor publicou um método utilizado para análise de recalques de fundações estacadas, baseado na teoria da elasticidade, introduzindo o conceito de interação entre as estacas. Nesta análise ele assumiu a hipótese de que não há deslizamento entre a estaca e o solo. Ele ressaltou que as teorias elásticas são válidas para análises no trecho linear da curva carga-recalque e isso acontece para cargas de até um terço ou metade da carga última, ou seja, cargas normais de trabalho, portanto as análises elásticas são perfeitamente aplicáveis para cargas de projeto.

No presente capítulo serão apresentados alguns métodos para cálculo dos fatores de interação entre estacas e, posteriormente, serão comparadas suas previsões com as geradas pelo programa DIANA que é baseado no método de elementos finitos (M.E.F.), para alguns casos propostos na literatura.

4.1 MÉTODOS PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

Para se ter bons resultados na previsão do comportamento de fundações estacadas, os métodos que utilizam os chamados “fatores de interação” são ferramentas que, se alimentadas com bons parâmetros de entrada, podem gerar resultados satisfatórios.

A seguir serão apresentados alguns métodos que usam o conceito de fatores de interação na previsão do comportamento de fundações estaqueadas.

4.1.1 Método de Poulos e Davis

Poulos (1968), em seu trabalho baseado na Teoria da Elasticidade, diz que para se fazer a análise de um grupo de estacas, deve-se levar em consideração a interação entre elas e isto deve ser feito aos pares. De acordo com o autor, a análise pode ser feita dividindo as estacas em vários elementos cilíndricos, cada um deles carregados com uma carga uniforme atuando no contorno da periferia do cilindro e uma carga uniformemente distribuída na base. A Figura 4.1 ilustra a análise.

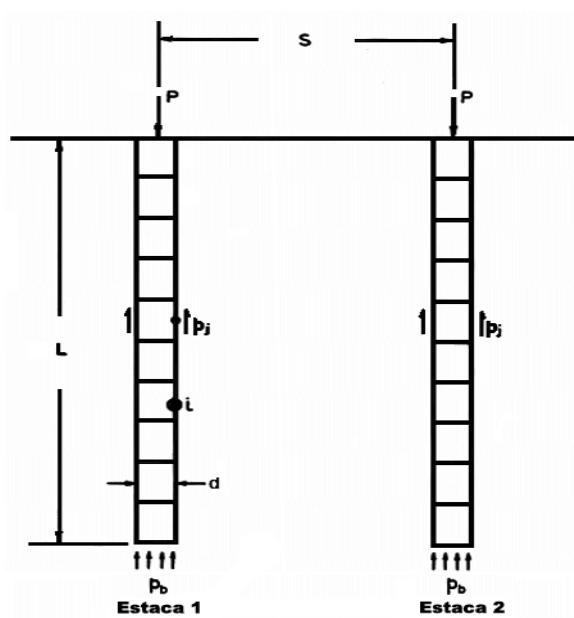


Figura 4.1 – Grupo com duas estacas (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

De acordo com a Figura 4.1, o deslocamento ρ_i do solo adjacente ao ponto i na estaca 1 devido ao deslocamento dela mesma mais um incremento gerado pelo deslocamento da estaca 2 é dado pela Equação 4.1.

$$\rho_i = \sum_{j=1}^{j=n} p_j ({}_1I_{ij} + {}_2I_{ij}) + p_b ({}_1I_{ib} + {}_2I_{ib}) \quad (4.1)$$

Onde:

- ◆ ${}_1I_{ij}$ é o fator de influência de deslocamento no elemento i devido a carga no contorno do elemento j da estaca 1;
- ◆ ${}_2I_{ij}$ é o fator de influência de deslocamento no elemento i devido a carga no contorno do elemento j da estaca 2;
- ◆ ${}_1I_{ib}$ é o fator de influência de deslocamento no elemento i devido a carga na base da estaca 1;
- ◆ ${}_2I_{ib}$ é o fator de influência de deslocamento no elemento i devido a carga na base da estaca 2.

E, para se obter o recalque ρ_b , pode-se usar uma equação similar a Equação 4.1 para o solo imediatamente abaixo da base da estaca.

Nesse método, Poulos (1968) afirma que os fatores ${}_1I_{ij}$ e ${}_2I_{ij}$ podem ser encontrados por integração das equações de Mindlin para deslocamento vertical sobre as paredes do cilindro e os fatores ${}_1I_{ib}$ e ${}_2I_{ib}$ pelas mesmas integrações de Mindlin feitas sobre a base da estaca 1 e estaca 2.

Para todos os elementos da estaca 1 o deslocamento vertical do solo adjacente pode ser escrito em forma matricial conforme mostrado na Equação 4.2.

$$[\rho] = ([{}_1I] + [{}_2I])[p] + p_b ([{}_1I_b] + [{}_2I_b]) \quad (4.2)$$

Se as duas estacas forem idênticas, a Equação 4.2 pode ser aplicada para estaca 2. O deslocamento de cada elemento do solo pode ser então, igualado com o deslocamento de cada elemento da estaca e assumido unitário segundo a Equação 4.3.

$$[\rho] = 1 \quad (4.3)$$

Assim, substituindo a Equação 4.2 na Equação 4.3, tem-se a Equação 4.4.

$$([{}_1I] + [{}_2I])[p] + p_b ([{}_1I_b] + [{}_2I_b]) = 1 \quad (4.4)$$

A Equação 4.4 pode então ser resolvida, obtendo a distribuição de tensões cisalhantes ao longo de cada elemento da estaca e da tensão na base por unidade de deslocamento da mesma que, então, seu deslocamento pode ser calculado para uma carga unitária.

Dessa maneira, a influência do recalque de uma estaca em outra adjacente pode ser calculada para vários espaçamentos entre as mesmas.

Dessa forma, Poulos (1968) definiu o parâmetro α que chamou de fator de interação, como o acréscimo de recalque sofrido por uma estaca devido ao recalque de outra adjacente, exemplificada pela Equação 4.5.

$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional devido a estaca adjacente}}{\text{recalque da estaca carregada devido a sua carga}} \quad (4.5)$$

Para um grupo de duas estacas, α pode variar de 1 para espaçamento 0 entre estacas (recalque da estaca sobre sua própria carga) e zero para um espaçamento infinito entre estacas.

4.1.1.1 Análise de grupos gerais de estacas

Com esse princípio de interação entre duas estacas, Poulos e Davis (1980) propõem a extensão do mesmo para grupos simétricos com mais estacas, as quais têm comportamento idêntico. Os autores relatam que, essa solução para tais grupos de estacas, tem revelado que o incremento de deslocamento devido à interação das estacas no grupo é quase igual à soma das interações entre as estacas aos pares, o que pode justificar o uso do fator de interação individual entre duas estacas para essa análise. Assim, segundo o método proposto, pode-se considerar que o incremento de recalque na estaca central de um grupo de três estacas igualmente carregadas e espaçadas é duas vezes o incremento gerado pela análise da interação entre duas estacas.

O incremento de deslocamento provocado pela interação entre estacas adjacentes no grupo pode sobrepor-se, considerando a hipótese do solo ter o comportamento elástico linear, com isso, a distribuição da tensão cisalhante na região é ligeiramente alterada e a proporção de carga que vai para a base aumenta à medida que aumenta o número de estacas no grupo (POULOS, 1968).

Poulos e Davis (1980) afirmam que se pode, desde que sejam aceitáveis as hipóteses elásticas, aplicar o princípio da superposição dos efeitos para grupos gerais de estacas e recomendam que o recalque de uma estaca ρ_k , em um grupo com n estacas idênticas, pode ser calculado pela Equação 4.6.

$$\rho_k = \rho_1 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (P_j \cdot \alpha_{kj}) + \rho_1 \cdot P_k \quad (4.6)$$

onde:

- ◆ ρ_1 = recalque de uma estaca isolada sobre carga unitária;
- ◆ P_j = carga na estaca j ;
- ◆ α_{kj} = fator de interação para o espaçamento entre as estacas k e j

Para estacas com diferentes diâmetros, pode-se reescrever a equação acima como mostra a Equação 4.7.

$$\rho_k = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (\rho_{1j} \cdot P_j \cdot \alpha_{kj}) + \rho_{1k} \cdot P_k \quad (4.7)$$

onde:

- ◆ ρ_{ij} = deslocamento da estaca isolada j sobre carga unitária;
- ◆ α_{kj} = fator de interação entre as estacas i e j para os parâmetros geométricos da estaca j .

As Equações 4.6 e 4.7 podem ser escritas para todas as estacas do grupo gerando n equações de deslocamento. Também, pode-se fazer o equilíbrio vertical de cargas conforme indicado pela Equação 4.8.

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

onde: P_G é a carga total aplicada ao grupo.

Assim as $n+1$ equações obtidas podem ser resolvidas observando-se duas condições:

1. Carga igual e recalques diferentes entre as estacas, correspondendo a um bloco perfeitamente flexível;
2. Cargas diferentes e recalques iguais, correspondendo a um bloco perfeitamente rígido

Para a primeira condição, $P_j = P_G/n$, assim a Equação 4.6 pode ser diretamente usada para se encontrar o recalque diferencial entre as estacas. Já para a segunda condição, as n equações de recalque são igualadas, gerando $n+1$ equações, que, para o caso de grupos simétricos, muitas equações podem ser eliminadas facilitando a solução e, assim, tem-se a carga em cada estaca como incógnita.

4.1.1.2 Influência nos fatores de interação dos efeitos de estaca flutuante, do espaçamento entre estacas e da profundidade relativa

Para se encontrar o fator de interação α para as mais variadas situações, devem ser observados alguns fatores intervenientes como, por exemplo, se a estaca é flutuante ou de ponta. Estaca flutuante é aquela onde a camada abaixo da ponta não é uma camada rígida.

Poulos (1968) mostrou os valores obtidos para estacas flutuantes em solo homogêneo como função da relação s/d (s é o espaçamento entre as estacas e d é o diâmetro) e do coeficiente de Poisson do solo.

A Figura 4.2 mostra os fatores de interação para vários valores de L/d para o caso de $\nu=0,5$ e $\nu=0$ (no caso de $L/d=25$). Através da análise da Figura 4.2 nota-se que os valores dos fatores de interação decrescem com o aumento do espaçamento relativo (s/d) entre as estacas. Observa-se, também, que para espaçamentos relativamente grandes os fatores de interação ainda são relevantes. Por exemplo, para espaçamentos de $10d$ o fator de interação, para $\nu=0,5$ e $L/d=25$, é aproximadamente 0,35, o que significa que o deslocamento de uma outra estaca vizinha provocará um incremento de 35 % em outra estaca do grupo.

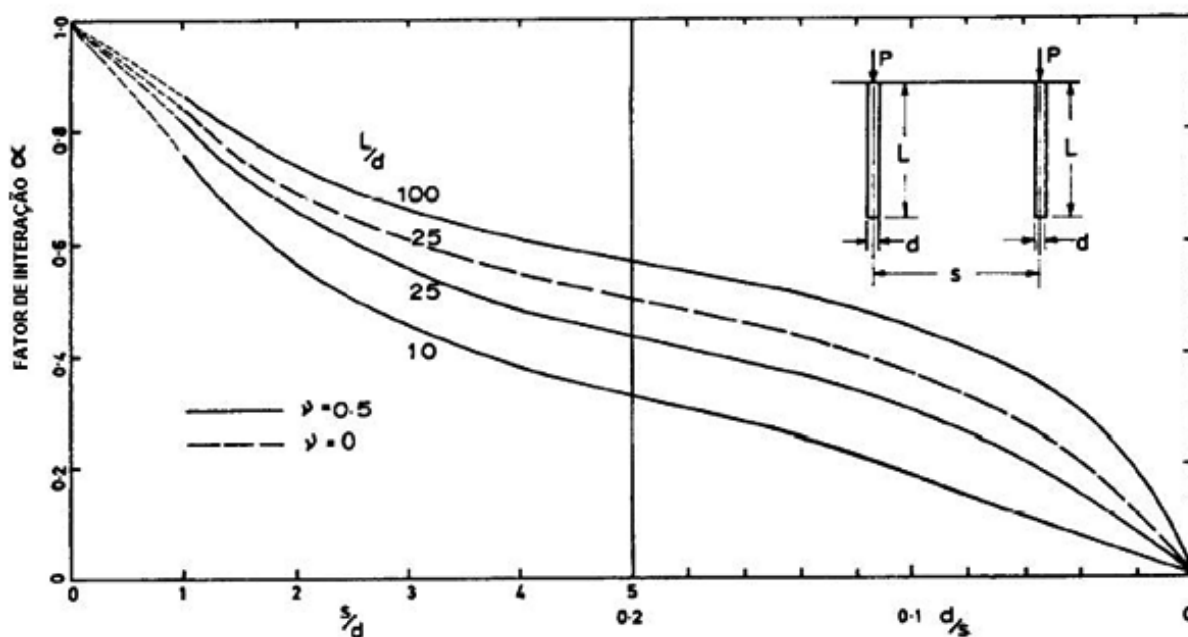


Figura 4.2 – Fatores de interação entre duas estacas em uma camada semi-infinita (POULOS, 1968) – modificada pelo autor

Outro fator que deve ser observado na obtenção de α é a profundidade relativa L/d . Pode-se observar que a interação entre as estacas aumenta à medida que essa relação aumenta. Este efeito torna-se maior à medida que o espaçamento entre as estacas também aumenta.

4.1.1.3 Efeito de uma camada finita

O efeito de uma camada rígida abaixo da base é mostrado na Figura 4.3, onde os valores de s/d são plotados para alguns valores de h/L , variando entre 1,2 até ∞ , onde h é a espessura da camada de solo até a camada rígida. O efeito da camada rígida é o de diminuir os fatores de interação em relação aos de uma camada semi-infinita, ou seja, reduzir a influência do recalque de uma estaca em outra. Pode-se verificar que, para espaçamentos pequenos, os fatores de interação não são muito afetados para valores de h/L maiores que 2,5, mas para valores de h/L menores que 2,5, ou seja, camadas rígidas mais próximas da superfície, α é reduzido consideravelmente devido a influência da camada rígida. Poulos e Davis (1980) propuseram fatores de correção de α , chamados de N_h , que devem ser aplicados ao fator de interação encontrado para uma camada semi-infinita, conforme proposto pela Equação 4.9, para levar em consideração a influência da camada finita sobre os fatores de interação. Os valores de N_h são mostrados na Figura 4.3.

$$\alpha = \alpha_F \cdot N_h \quad (4.9)$$

onde:

- ◆ N_h é o fator de correção do fator de interação;
- ◆ α_F é o fator de interação para uma camada semi-infinita de solo.

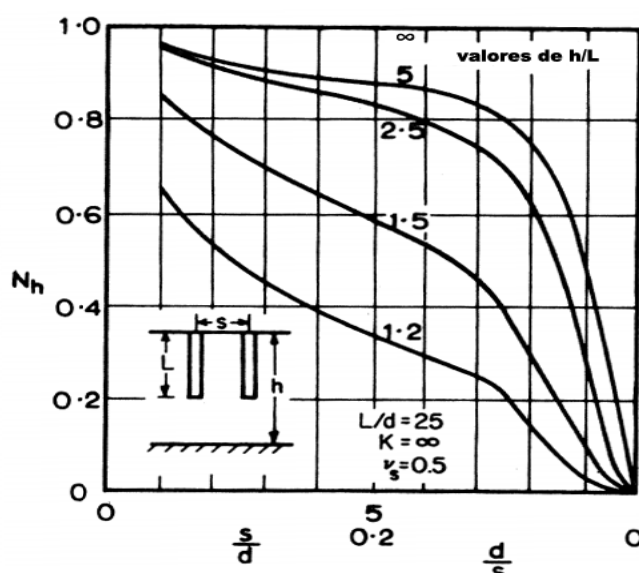


Figura 4.3 – Fatores de correção de α devido ao efeito de camada finita (POULOS; DAVIS, 1980)- modificada pelo autor

4.1.1.4 Efeito do alargamento da base

Poulos e Davis (1980) mostraram, também, a influência do alargamento da base nos fatores de interação, e propuseram fatores de correção de α devido a esse efeito, segundo eles o fator de interação entre duas estacas de base alargada deveria ser corrigido conforme a Equação 4.10.

$$\alpha = \alpha_F \cdot N_{db} \quad (4.10)$$

onde:

- ◆ α_F é o fator de interação para a relação $d_b/d=1$;
- ◆ N_{db} é o fator de majoração de α_F devido ao alargamento da base.

A Figura 4.4 mostra os fatores de redução, N_{db} , para d_b/d de 2 e 3 e para valores de L/d de 10, 25 e 100. Nota-se, pela análise da Figura 4.4, que a interação entre as estacas aumenta com o

aumento da base das mesmas, porém esse efeito só é mais representativo para estacas curtas com relação L/d iguais ou menores que 10.

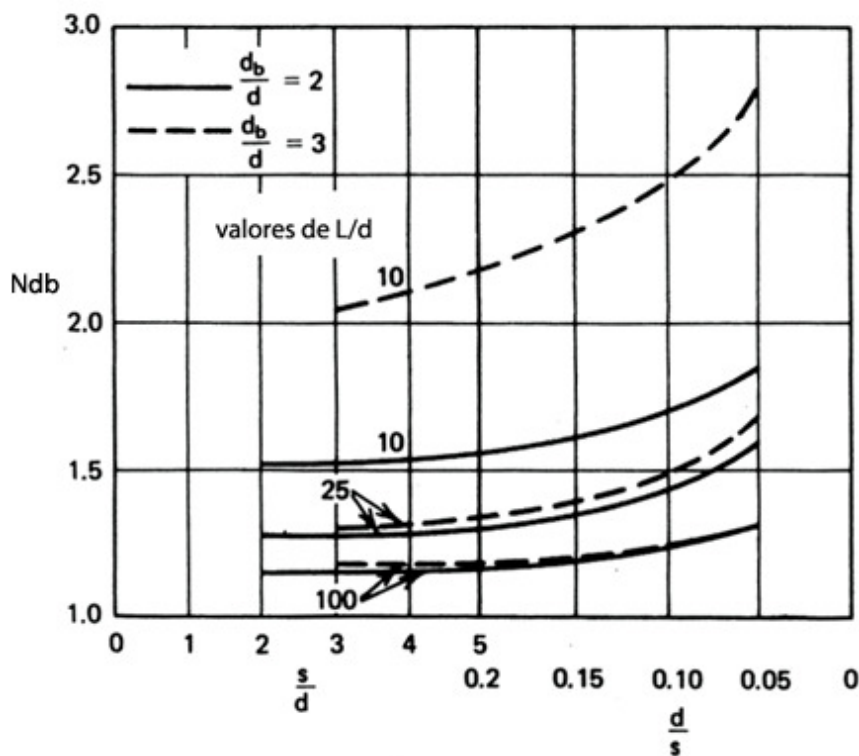


Figura 4.4 – Fatores de correção de α devido ao efeito do alargamento da base (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

4.1.1.5 Efeito do coeficiente de Poisson

Poulos e Davis (1980) propuseram, também, uma correção devido ao efeito da influência do coeficiente de Poisson nos fatores de interação, conforme expressa a Equação 4.11.

$$\alpha = N_v \cdot \alpha_{0,5} \quad (4.11)$$

onde:

- ◆ $\alpha_{0,5}$ é o fator de interação obtido para $\nu=0,5$.

A Figura 4.5 mostra os valores de N_v para $L/d=50$, camada infinita e rigidez relativa (E_p/E_s) igual a 1000.

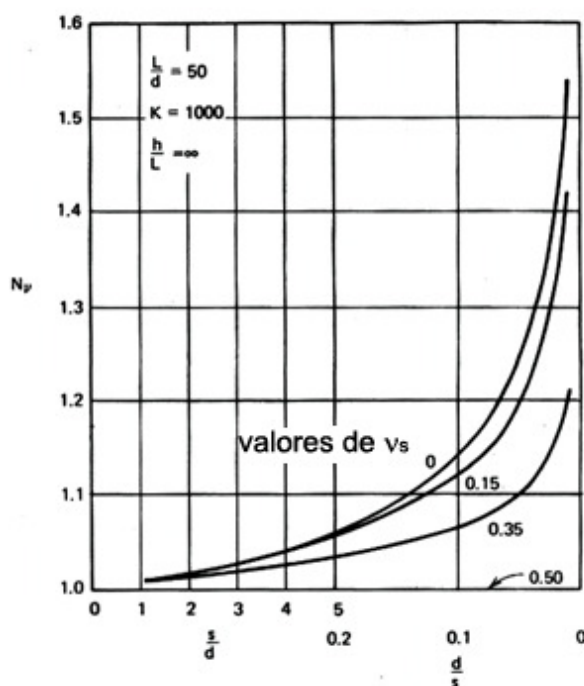


Figura 4.5 – Fatores de correção de N_p devido ao efeito do coeficiente de Poisson (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

Nota-se, de acordo com a Figura 4.5, que os valores dos fatores de interação aumentam com o decréscimo do coeficiente de Poisson. Esse efeito é mais representativo com o aumento do espaçamento relativo.

4.1.1.6 Efeito do módulo de elasticidade do solo

Todas as soluções que envolvem os fatores de interações consideram o módulo de elasticidade do solo ao longo do fuste das estacas como homogêneo e, na maioria dos casos práticos, os módulos crescem com a profundidade (POULOS; DAVIS, 1980).

Na Figura 4.6 é mostrada uma comparação dos fatores de interação considerando o módulo constante com a profundidade e o módulo crescente linearmente com a profundidade, o que mostra que os fatores de interação para solos com módulo não-homogêneo são de 20 a 25% menores que para solos com módulos homogêneos. Portanto, o uso dos fatores de interação para módulos homogêneos, pode superestimar os recalques em relação aos solos como módulos crescentes com a profundidade.

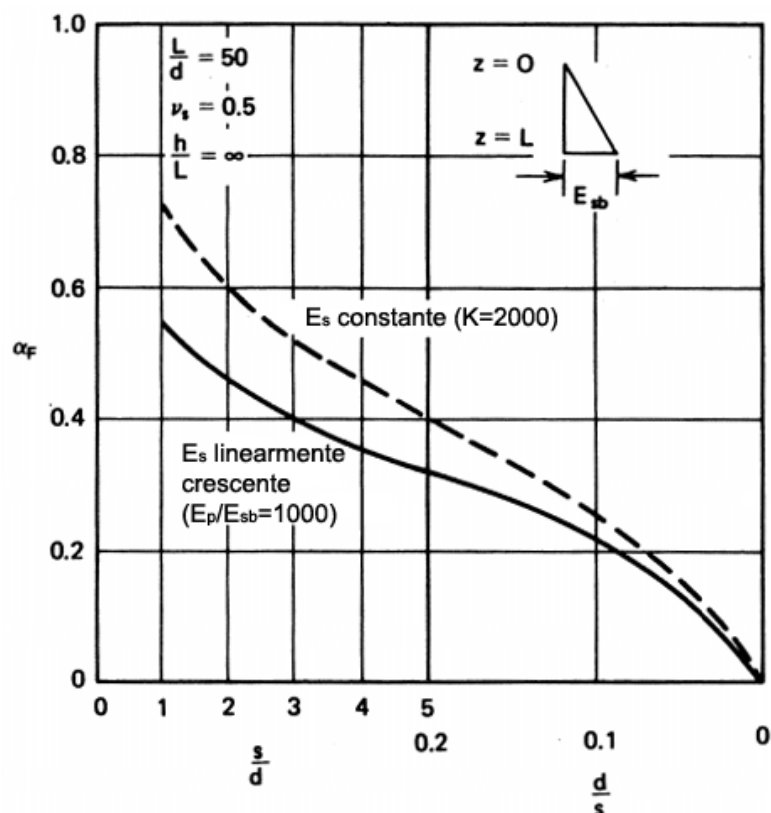


Figura 4.6 – Efeito da distribuição de E_s no fator de interação (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

4.1.2 Estacas com carga de ponta predominante assentadas em camadas rígidas

Para estacas onde a carga de ponta é predominante em relação ao atrito lateral, os fatores de interação foram apresentados no trabalho de Poulos e Mattes (1971). Um exemplo dos resultados encontrados por aqueles autores é apresentado na Figura 4.7, onde se observa que a interação entre as estacas reduz com o aumento de s/d , porém, diferentemente com o que ocorre com estacas flutuantes, a interação decresce com o aumento de K e para valores de $K = \infty$ não ocorre nenhuma interação entre elas. Com o decréscimo de L/d a interação também decresce. O efeito de Poisson é pequeno em relação ao efeito de L/d e K .

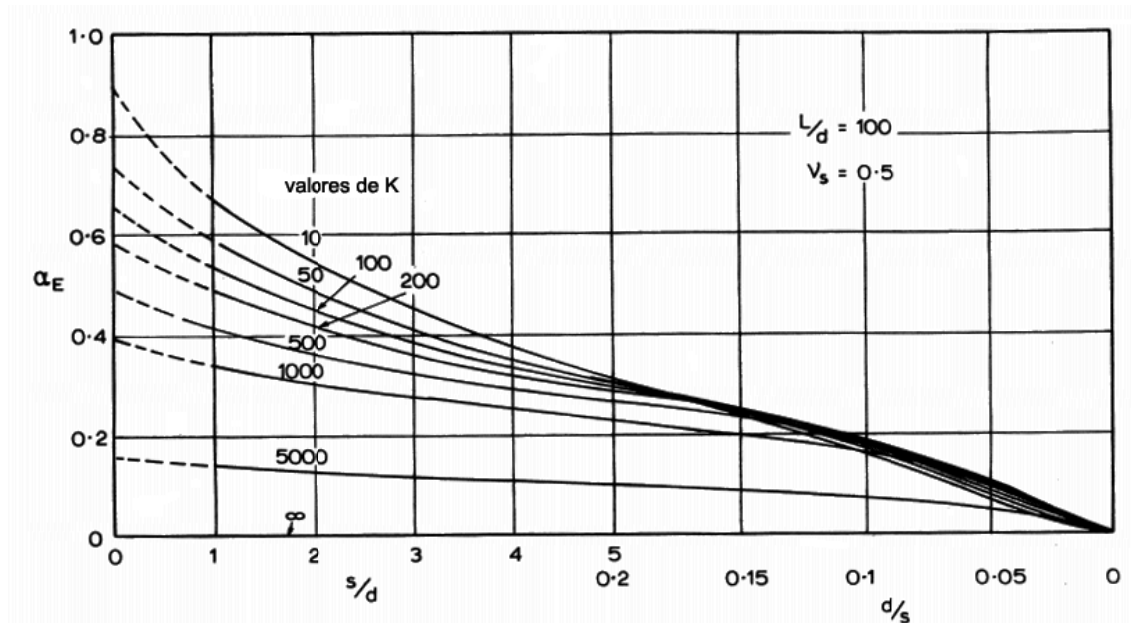


Figura 4.7 – Fatores de interação para estacas com carga de ponta predominante (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

4.1.2.1 Efeito de uma camada finita de solo compressível

Estacas assentes em camadas com diferentes compressibilidades, que não são tão rígidas como as consideradas para estacas de ponta, deverão ter seus fatores de interação como uma média entre aqueles obtidos para uma estaca flutuante em uma massa homogênea de solo e aqueles dados para uma estaca assentada em uma camada rígida na base através da inserção de um parâmetro F_E e, assim, podem ser expressos pela Equação 4.12.

$$\alpha = \alpha_F \cdot F_E (\alpha_F - \alpha_E) \quad (4.12)$$

onde:

- ◆ α_F é o fator de interação obtido para estaca flutuante;
- ◆ α_E é o fator de interação obtido para estaca com carga de ponta predominante;
- ◆ F_E é um fator dependente de K , L/d e E_b/E_s .

Os valores de F_E em função de L/d são mostrados na Figura 4.8 que mostra a transição entre a interação para estaca de ponta e estaca flutuante em função de E_b/E_s e K .

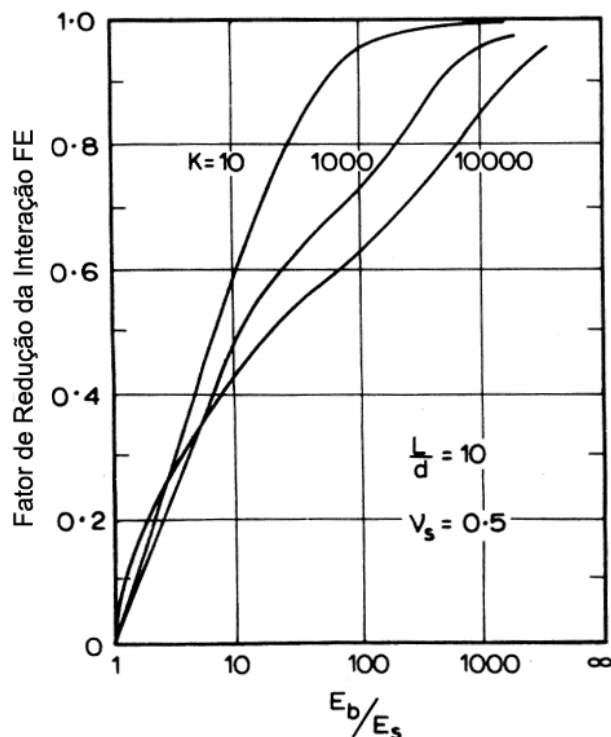


Figura 4.8 – Fator de redução da interação F_E (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

4.1.3 Interação entre Estacas Diferentes

A proposta de Poulos e Davis (1980) para calcular o acréscimo de recalque em uma estaca i , provocado pelo recalque de uma estaca j de diâmetro diferente, como mostrado na Figura 4.9, seria, obtido pela Equação 4.13.

$$\Delta\rho_{ij} = \rho_j \cdot \alpha_{ij} \quad (4.13)$$

onde:

- ◆ ρ_j é o recalque da estaca j sobre sua própria carga;
- ◆ α_{ij} é o coeficiente de interação correspondente ao espaçamento entre as estacas i e j e aos parâmetros geométricos (comprimento e diâmetro) da estaca j .

Hewitt (1988) propôs em suas análises numéricas que, para estacas de diferentes diâmetros imersas em solo homogêneo, os fatores de interação α_{ij} seriam aproximadamente igual a α_{ji} .

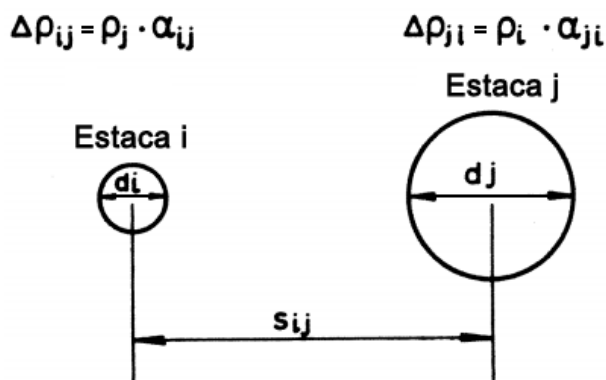


Figura 4.9 – Interação entre duas estacas de diâmetros diferentes (POULOS; DAVIS, 1980) – modificada pelo autor

Ainda no mesmo trabalho, Hewitt (1988) fez uma consideração em relação aos fatores de interação para estacas com diferentes comprimentos que, segundo ela, poderiam ser aproximados pelas Equações 4.14 e 4.15.

$$\alpha_{ij} \cong \frac{\alpha_{ii} + \alpha_{jj}}{2}, \text{ se } L_i > L_j; \quad (4.14)$$

$$\alpha_{ij} \cong \alpha_{jj}, \text{ se } L_i < L_j. \quad (4.15)$$

Posteriormente Wong e Poulos (2005), através do estudo paramétrico de alguns casos usando o programa GEPAN que é baseado no Método de Elementos de Contorno (M.E.C), propuseram uma correção no método de Hewitt (1988). Segundo esses autores, os fatores de interação para estacas com diferentes comprimentos seriam expressos pelas Equações 4.16 e 4.17, onde esses fatores f_{1s} e f_{s1} dependem do diâmetro das estacas, espaçamento entre as mesmas e profundidade da camada impenetrável.

$$\alpha_{ij} \cong \frac{\alpha_{ii} + \alpha_{jj}}{f_{1s}}, \text{ se } L_i > L_j; \quad (4.16)$$

$$\alpha_{ij} \cong \frac{\alpha_{jj}}{f_{s1}}, \text{ se } L_i < L_j. \quad (4.17)$$

Os valores das constantes f_{1s} e f_{s1} podem ser calculadas pelas expressões apresentadas no Apêndice A deste trabalho.

Os mesmos autores sugeriram ainda para camadas estratificadas, fatores de correção dos fatores de interação em função da rigidez da estaca ($K=E_p/E_s$) e relação L/D da maior estaca, quando esta tem a ponta assente em uma camada rígida.

4.2 MÉTODO DE RANDOLPH E WROTH (1979)

O método apresentado por Randolph e Wroth (1979) parte do princípio que o recalque de uma estaca em um grupo é igual à soma do recalque que ela sofre devido a sua própria carga, mais o recalque originado devido à mesma estar em um campo de deslocamento das estacas vizinhas.

Os autores dividem a interação entre as estacas em duas partes, a primeira acontece ao longo do fuste da estaca (tomada no meio da profundidade do mesmo) e a outra na base, conforme mostra a Figura 4.10. As Equações 4.18 e 4.19 fornecem o perfil de recalque no meio do fuste e na base da estaca, respectivamente, como mostrado por Randolph e Wroth (1978) para análise de estacas isoladas.

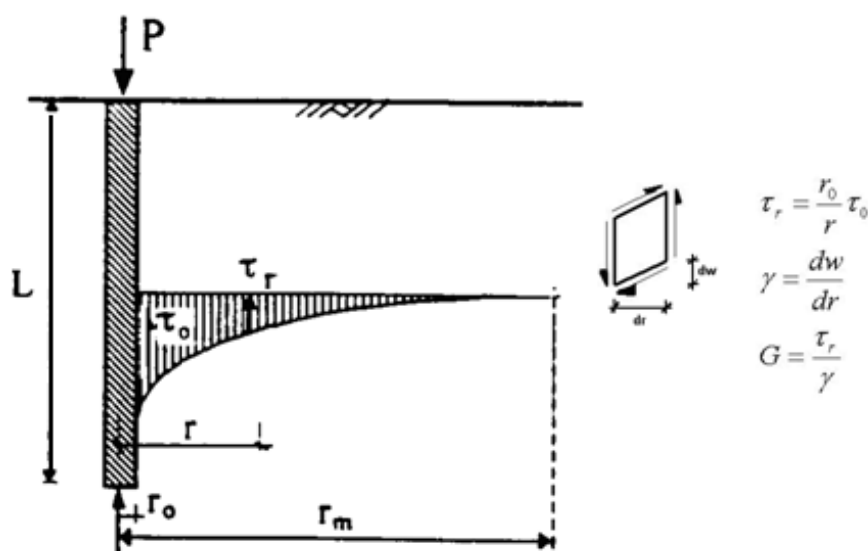


Figura 4.10 – Distribuição da tensão cisalhante na direção radial da estaca (RANDOLPH; WROTH, 1978) – modificada pelo autor

$$\left. \begin{aligned} w(r) &= \frac{\tau_0 r_0}{G} \ln\left(\frac{r_m}{r}\right), & r_0 \leq r \leq r_m \\ w(r) &= 0, & r > r_m \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

$$\frac{w(r)}{w_b} = c \frac{r_0}{r} \quad (4.19)$$

onde:

- ◆ τ_0 = tensão cisalhante máxima na direção radial (ocorre no limite do fuste);
- ◆ r_0 = raio da estaca;
- ◆ G = módulo cisalhante do solo a uma profundidade igual ao comprimento da estaca;
- ◆ r_m = máximo raio de influência da tensão cisalhante;
- ◆ r = medida radial do ponto onde se deseja saber o recalque.
- ◆ w_b = recalque na camada de solo imediatamente abaixo da base;
- ◆ $c = 2/\pi$

Assim, em um grupo de duas estacas, o recalque de cada estaca seria a soma do recalque causado por sua própria carga (w_1) e o provocado pelo campo de deslocamentos de sua vizinha (w_2), conforme Equação 4.20.

$$w = w_1 + w_2 \quad (4.20)$$

Então, fazendo a análise no meio da profundidade do fuste, temos a Equação 4.21.

$$w_s = w_1 + w_2 = \frac{\tau_0 r_0}{G} \left[\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{r_m}{s}\right) \right] \quad (4.21)$$

Admitindo que s seja a distância de centro a centro entre as estacas, logo, s passa a ser considerado como o raio médio de uma estaca olhando de sua vizinha. Assim, a relação carga-recalque, similarmente a análise de estacas isoladas, para cada fuste da estaca é dada pela Equação 4.22.

$$\frac{P_s}{G_1 r_0 w_s} = \frac{2\pi\rho}{\zeta + \ln(r_m/s)} \frac{l}{r_0} \quad (4.22)$$

com:

- ◆ G_1 = módulo cisalhante na ponta da estaca;
- ◆ $\zeta = \ln(r_m/r_0)$;

- ◆ l = comprimento da estaca;
- ◆ $\rho = G_{1/2}/G_1$;
- ◆ $G_{1/2}$ = módulo cisalhante da camada do meio do fuste;

E, similarmente para a base, chega-se as Equações 4.23 e 4.24.

$$w_b = w_1 + w_2 = \frac{P_b(1-\nu)}{4r_0G} \left(1 + \frac{c r_0}{s} \right) \quad (4.23)$$

$$\frac{P_b}{G_l r_0 w_b} = \frac{4}{1-\nu} \frac{s}{r_0 c + s} \quad (4.24)$$

onde:

ν = coeficiente de Poisson do solo;

Assim, fazendo essas substituições, a relação carga-recalque para o grupo de duas estacas igualmente carregadas é apresentada pela Equação 4.25.

$$\left(\frac{P_t}{G_l r_0 w_t} \right)_2 = \frac{4}{1-\nu} \frac{s}{r_0 c + s} + \frac{2\pi\rho}{\zeta + \ln(r_m/s)} \frac{l}{r_0} \quad (4.25)$$

De acordo com Randolph e Wroth (1979), este método pode ser estendido para um grupo com três estacas igualmente carregadas dispostas na forma de um triângulo equilátero, onde as estacas estão localizadas nos vértices (Equação 4.26) e, também, dão um exemplo de aplicação desse método analítico para um grupo quadrado de estacas igualmente carregadas (Equação 4.27).

$$\left(\frac{P_t}{G_l r_0 w_t} \right)_3 = \frac{4}{1-\nu} \frac{s}{2r_0 c + s} + \frac{2\pi\rho}{\zeta + 2\ln(r_m/s)} \frac{l}{r_0} \quad (4.26)$$

$$\left(\frac{P_t}{G_l r_0 w_t} \right)_4 = \frac{4}{1-\nu} \frac{s}{2 \cdot 0,707 r_0 c + s} + \frac{2\pi\rho}{\zeta + \ln(r_m^3 / \sqrt{2} s^3)} \frac{l}{r_0} \quad (4.27)$$

É possível, através da Equação 4.25, obter os fatores de interação entre duas estacas. Tais fatores podem ser aplicados através do método de Poulos (1968) para análise de grupos rígidos. Esses fatores de interação podem ser calculados através da inversão da relação carga-

recalque e pode ser escrito conforme a Equação 4.28, onde α_v é o fator de interação entre as duas estacas.

$$\left(\frac{G_l r_0 w_t}{P_t}\right)_2 = (1 + \alpha_v) \left(\frac{G_l r_0 w_t}{P_t}\right)_1 \quad (4.28)$$

Esse fator de interação pode ser calculado para as diversas relações de esbeltez das estacas e diferentes espaçamentos entre elas. A Figura 4.11 mostra resultados típicos para estacas em solos homogêneos e coeficientes de Poisson 0,4. A comparação dos resultados calculados com os resultados encontrados por Banerjee (1970), que apresentou um método baseado na resolução de equações integrais, mostra razoável acurácia do método proposto, principalmente para a relação $5 \leq s/r_0 \leq 20$. O método analítico proposto tende a superestimar os fatores de interação quando comparado com os resultados de Banerjee (1970), especialmente para $l/r_0 < 40$. Entretanto, Randolph e Wroth (1979) atentam para o fato de que na análise de um solo real, de natureza não-linear, os métodos tradicionais que fazem uma análise linear para encontrar os fatores de interação, geram fatores maiores que os obtidos experimentalmente.

Outro fator, que gera fatores de interação superestimados, são as análises elásticas feitas considerando o solo homogêneo com rigidez que geralmente aumenta com a profundidade, como na análise de Poulos (1968) e Banerjee (1970). De acordo com Banerjee e Davies (1977), a interação entre as estacas cai à medida que o grau de homogeneidade do solo cai. A Figura 4.11(b) mostra a variação típica dos fatores de interação como o espaçamento e esbeltez $l/r_0=40$, para estacas imersas em solos com diferentes graus de homogeneidade ρ ($\nu=0,4$). Quando $\rho=1$, o solo é totalmente homogêneo e, à medida que ρ cai o solo se torna mais heterogêneo.

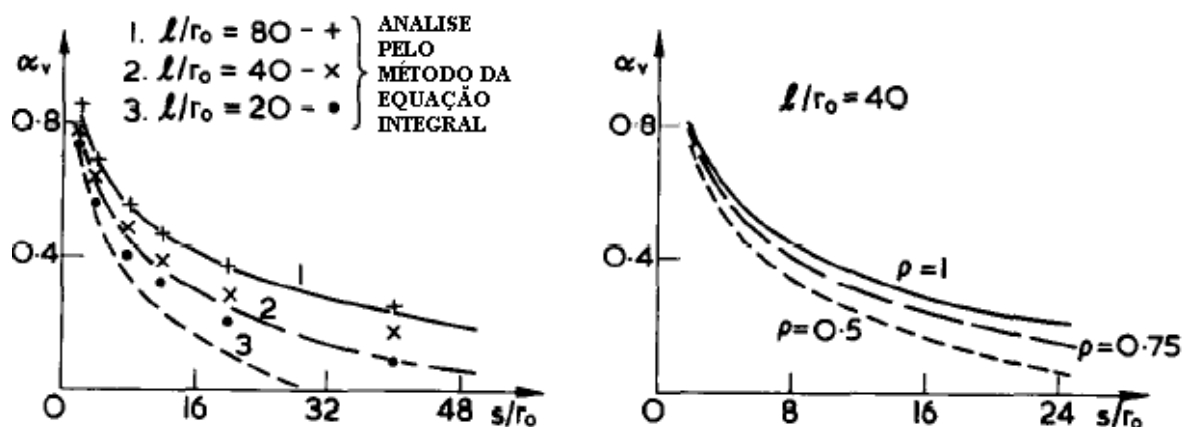


Figura 4.11- Fatores de interação para um par de estacas rígidas (a) solo homogêneo ($\nu=0,4$); (b) solo não-homogêneo ($\nu=0,4$) (RANDOLPH; WROTH, 1979) – modificada pelo autor

De acordo com Ghosh (1975⁴), *apud* Randolph e Wroth (1979), os fatores de interação são úteis para dar uma noção de aumento do recalque de uma estaca devido ao deslocamento de uma vizinha, mas negligenciam um fator importante que é a alta parcela de carga tomada pela base da estaca quando comparada com a análise para uma estaca isolada. Isto é devido à interação entre o campo de deslocamentos do fuste e o campo de deslocamentos da base. Assim, mais carga é transferida para a base das estacas para que os deslocamentos do fuste e da base sejam compatíveis. Tendo em vista esse fator, Randolph e Wroth (1979) recomendam que, para grupos gerais de estacas, devem ser feitas análises mais elaboradas como, por exemplo, ferramentas que utilizam elementos finitos.

4.3 MYLONAKIS E GAZETAS (1998)

Mylonakis e Gazetas (1998) afirmam que o efeito da deformação do solo ao redor de uma estaca, considerando o solo homogêneo, cai com a profundidade e a função de decaimento pode ser aproximada para uma função logarítmica. E propõem o que chamaram de fator de atenuação de deformações no solo nas proximidades da estaca em função da distância $\psi(s)$ como sendo o indicado pela Equação 4.29.

$$\psi(s) = \left(\frac{\ln(r_m / s)}{\ln(r_m / r_0)} \right) \quad (4.29)$$

⁴ GHOSH, N. (1975). A model scale investigation of the working load stiffness of single piles and groups of piles in clay under centric and eccentric vertical loads. PhD thesis, University of Southampton.

Onde os fatores considerados na formulação são definidos como:

- ◆ r_m = raio máximo de influência da tensão cisalhante;
- ◆ r_0 = raio da estaca;
- ◆ s = espaçamento entre as estacas.

Essa distância s entre as estacas deve estar entre r_0 e r_m , ou seja, $r_0 < s < r_m$, pois para valores maiores que r_m $\psi(s)$ será zero, onde o r_m pode ser encontrado a partir da análise de Randolph e Wroth (1979).

De acordo com Mylonakis e Gazetas (1998), os fatores de interação entre as estacas devem refletir não somente a redução logarítmica dos deslocamentos induzidos ao solo com a distância, mas também a resistência das estacas que receberão esse incremento de recalque e afirmam que para se considerar esses dois efeitos, deve-se fazer o produto de $\psi(s)$ com um fator que eles definiram como $\xi(\mu L, \Omega)$, dessa forma pode-se expressar o fator de interação entre estacas em solos homogêneos conforme definido pela Equação 4.30.

$$\alpha = \psi(s) \cdot \xi(\mu L, \Omega) = \left(\frac{\ln(r_m / s)}{\ln(r_m / r_0)} \right) \cdot \xi(\mu L, \Omega) \quad (4.30)$$

Com $\xi(\mu L, \Omega)$ e Ω definidos pelas Equações 4.31 e 4.32.

$$\xi(\mu L, \Omega) = \frac{2\mu L + \sinh(2\mu L) + \Omega^2 [\sinh(2\mu L) - 2\mu L] + 2\Omega [\cosh(2\mu L) - 1]}{2\sinh(2\mu L) + 2\Omega^2 \sinh(2\mu L) + 4\Omega \cosh(2\mu L)} \quad (4.31)$$

$$\Omega = \frac{P_b}{w_b (E_p \cdot A_p) \mu} \quad (4.32)$$

E os termos usados na formulação são definidos como:

- ◆ L = comprimento da estaca;
- ◆ w_b = deslocamento sofrido pela base da estaca;
- ◆ P_b = carga tomada pela base;
- ◆ Ω = parâmetro de transferência de carga de Winkler;
- ◆ μ = parâmetro de rigidez da base da estaca = $\sqrt{\frac{\delta \cdot G_s}{E_p \cdot A_p}}$;

$$\diamond \delta = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)};$$

◆ G_s = módulo cisalhante do solo;

O modelo proposto por Mylonakis e Gazetas (1998) pode ser ilustrado pela Figura 4.12, onde as constantes k representam as rigidezes de molas equivalentes à rigidez da estaca na respectiva profundidade.

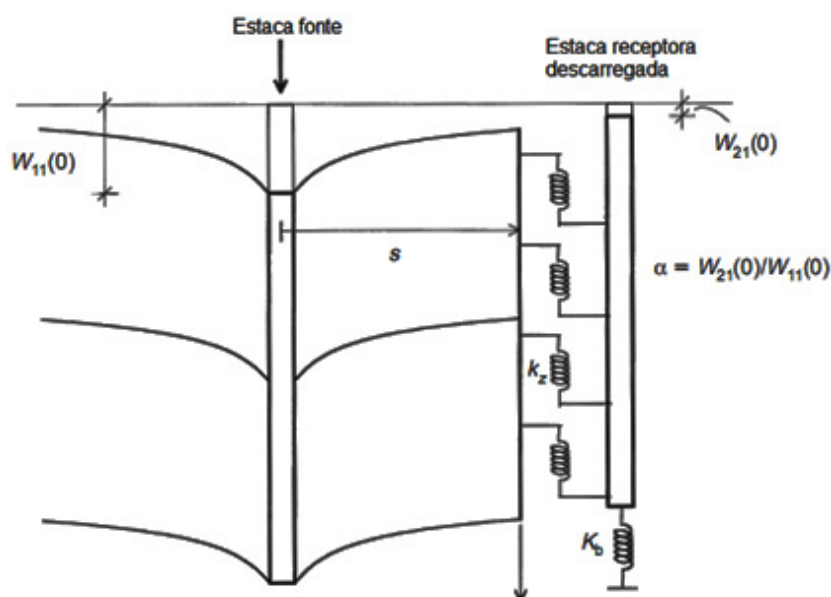


Figura 4.12- Processo de interação entre estacas (MYLONAKYS; GAZETAS, 1998) – modificada pelo autor

O fator ξ representa a resistência da estaca receptora aos recalques induzidos pelo fato da mesma estar no campo de deslocamentos de outra estaca e seu valor varia de 0 a 1. Para estacas muito longas ou compressíveis ξ tende a 0,5, para estacas de ponta é menor que 0,5 e para estacas flutuantes esta entre 0,5 e 1. A Equação 4.31 é válida para estacas de mesmo diâmetro em solos homogêneos. Randolph (2003) estendeu o uso dessa expressão para grupos de estacas com diferentes diâmetros, Equação 4.33, onde 1 é o índice para a estaca fonte e 2 para a receptora.

$$\xi_{21} = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_2^2 - \mu_1^2} \left[\frac{\mu_2}{\mu_1} - \frac{\sinh(\mu_1 L) + \frac{\Omega_2 \mu_2}{\mu_1} \cosh(\mu_1 L)}{\sinh(\mu_2 L) + \Omega_2 \cosh(\mu_2 L)} \right] - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_2^2 - \mu_1^2} \frac{(\Omega_1 + \tanh(\mu_1 L)) \left(\Omega_2 \sinh(\mu_2 L) + \cosh(\mu_2 L) - \cosh(\mu_1 L) - \frac{\Omega_2 \mu_2}{\mu_1} \sinh(\mu_1 L) \right)}{(1 + \Omega_1 \tanh(\mu_1 L)) (\sinh(\mu_2 L) + \Omega_2 \cosh(\mu_2 L))} \quad (4.33)$$

4.4 EL SHARNOUBY E NOVAK (1990)

A idéia do método proposto por El Sharnouby e Novak (1990) é que as estacas, isoladas ou presentes em um grupo, imersas no solo podem ter relações de equilíbrio que podem ser especificadas em n pontos discretos (nós). As condições de equilíbrio são representadas pelo método da rigidez, em que a rigidez estrutural das estacas é combinada com a rigidez do meio (solo).

O passo seguinte para resolução do problema é a determinação da matriz de flexibilidade do solo, para isso as estacas são divididas em n elementos ao longo do fuste. Os coeficientes de flexibilidade nodais do solo são gerados pela aplicação de uma tensão cisalhante vertical, uniformemente distribuída na superfície de cada elemento das estacas. Assim, as tensões são aplicadas e posteriormente substituídas por cargas pontuais, que são escolhidas de modo que as mesmas produzam deslocamentos nos pontos de referência quase iguais aos provocados pelas tensões cisalhantes. Segundo El Sharnouby e Novak (1990), essas simplificações se não forem feitas corretamente podem gerar resultados insatisfatórios, mas se feitas com o critério adequado podem gerar bons resultados e devem ser adotadas para reduzir o tempo de processamento computacional.

As estacas foram assumidas com seção transversal constante ao longo de toda a profundidade. De acordo com os autores, as estacas com baixa relação ($L/d < 50$), devem ser divididas em cerca 30 elementos para gerar uma precisão razoável e para estacas com $L/d > 50$ devem ser escolhidos 50 elementos para gerar boa acurácia.

O sistema estaca-solo considerado no cálculo é ilustrado na Figura 4.13. Os módulos de elasticidade considerados para a estaca, solo ao longo do fuste e solo na ponta são chamados, respectivamente, de E_p , E_s e E_b . Para a análise, a estaca é dividida em m elementos, os nós

onde as cargas P (equivalentes às tensões cisalhantes) são aplicadas, estão localizados nos eixos das estacas e, para cada estaca, o nó 1 é o localizado na cabeça e o nó 2 é o localizado na base. Um exemplo da forma da matriz de rigidez estrutural da estaca é mostrada na Equação 4.34.

$$[K_p]_i = \frac{E_p \cdot A_i}{l_i} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Com A_i e l_i definidos como a área da seção transversal e o comprimento de cada elemento.

A matriz de rigidez global do grupo de estaca $[K_p]$ é obtida pela superposição das rigidezes dos elementos individuais.

Com esse processo se obtém a matriz de rigidez e flexibilidade do sistema e os deslocamentos associados são calculados pelas soluções de Mindlin (1936).

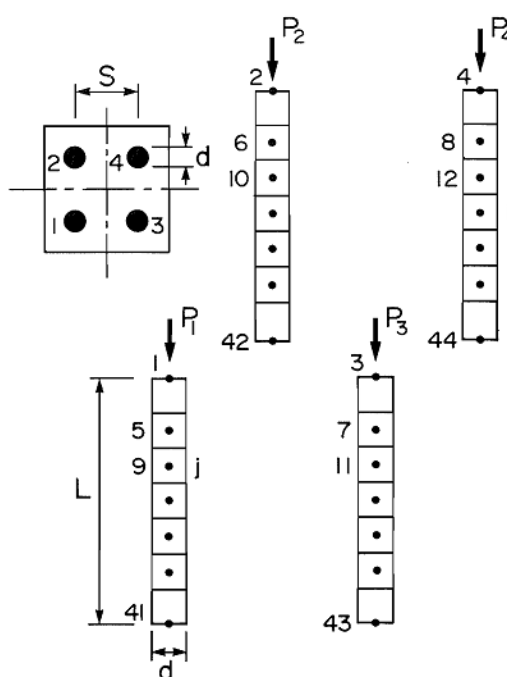


Figura 4.13- Notação para análise de grupo de estacas e numeração dos nós (EL SHARNOUNY; NOVAK, 1990)

Segundo os autores, os fatores de interação propostos por Poulos e Davis (1980) são algumas vezes superestimados, por exemplo, para estacas de ponta e citam duas razões para isso. A primeira é que os fatores de interação são calculados aos pares de estacas ignorando o efeito de enrijecimento do sistema radier-solo-estaca provocado pelas outras estacas intermediárias.

A segunda é que para cálculo dos fatores de interação foram as estacas foram divididas em 10 elementos apenas, o que pode levar a erros significativos.

4.5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Sales (2000) considera o método dos elementos finitos (M.E.F.) a ferramenta mais poderosa para a consideração dos diversos fatores intervenientes na análise de um radier estaqueado.

Segundo Bacelar (2003), o M.E.F. tem sido uma ferramenta freqüentemente utilizada na análise de fundações estaqueadas por apresentar resultados satisfatórios quando comparados a medições em campo.

Basicamente, em uma análise feita pelo M.E.F., o domínio é dividido em um número finito de subdomínios com geometria simples, chamados elementos finitos, que são interligados por nós ao longo de seus lados. A geometria de cada elemento do modelo é dada em termos de coordenadas dos pontos nodais por funções de interpolação, também conhecidas como funções de forma que, na maioria das vezes, são polinômios.

Os principais passos a serem seguidos em uma análise pelo M.E.F. são:

- ◆ Definição da geometria;
- ◆ Determinação de como será o comportamento das incógnitas (ex.: deslocamentos, forças, momentos) no interior do elemento;
- ◆ Obtenção da matriz de coeficientes que descrevem a resposta característica do elemento (matriz de rigidez);
- ◆ Determinação da matriz de rigidez global do sistema através da combinação das matrizes de rigidez dos elementos;
- ◆ Especificação das condições de contorno;
- ◆ Resolução das equações algébricas do sistema gerado e determinação dos valores da variável dependente em todos os nós conhecidos.

Um dos trabalhos pioneiros em grupos de estacas analisado pelo M.E.F. foi o de Ottaviani (1975) que fez o estudo considerando a contribuição do bloco de coroamento. O autor fez a análise tridimensional de grupos com 9 e 15 estacas, variando o comprimento das mesmas,

apresentou e comparou os resultados de recalques e tensões com os presentes na literatura da época, o que mostrou boa convergência de valores.

Posteriormente, Najjar (1994), empregando o M.E.F, estudou os efeitos da espessura do radier e da inclinação das estacas na resposta do sistema de fundação. O solo foi idealizado com comportamento não-linear e foi analisado por um modelo de plasticidade no qual as superfícies de plastificação e de ruptura são descritos por uma função matemática única. Como conclusão, o autor observou que a variação da espessura do radier pode influenciar significativamente a distribuição de forças e momentos no topo das estacas.

Katzenbach *et al.* (1994) realizaram um estudo da distribuição de carga entre os elementos da fundação do edifício Commerzbank Tower, construído na argila de Frankfurt. O radier estaqueado desse edifício apresentava 111 estacas escavadas e foi projetado considerando que toda a sobrecarga gerada pela superestrutura seria suportada pelas estacas. A conclusão dos autores naquele trabalho foi que 5% de todo o carregamento do edifício seria suportada pelo radier.

Smith e Wang (1998) simularam alguns radiers estaqueados pelo M.E.F. com modelos tridimensionais, onde também consideraram a interferência do bloco no comportamento da fundação. Para diminuir o tempo de processamento do problema, que no caso estudado apresentava aproximadamente um milhão de graus de liberdade, empregaram o método dos gradientes conjugados.

O M.E.F. é uma poderosa ferramenta amplamente utilizada nas fases de projeto, acompanhamento e retroanálise de estruturas com fundações em radier estaqueado. Vários exemplos disso foram apresentados no capítulo 2, em especial o edifício Messe-Torhaus, em que o projeto baseou-se em um estudo numérico para a obtenção de uma estrutura de fundação, ao mesmo tempo segura e econômica. Os resultados dos cálculos produziram resultados satisfatórios da previsão do comportamento do radier estaqueado no que diz respeito à capacidade de carga e recalques, sendo que essa previsão apresentou boa acurácia quando comparadas com os resultados iniciais das medições, obtidas através das instrumentações (BACELAR, 2003).

4.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

O Método de Elementos de Contorno (M.E.C.) é uma ferramenta poderosa que pode ser empregada em problemas de engenharia diminuindo a exigência de “potência” de hardware e reduzindo o tempo das análises.

Na análise de um problema utilizando o M.E.C. são resolvidas uma série equações integrais, onde somente o contorno precisa ser discretizado. Os elementos usados na análise são análogos aos do M.E.F., com a redução da dimensão do problema em uma unidade, o que é conseguido modelando-se apenas o contorno. Em problemas planos são utilizados elementos de uma dimensão e, em problemas espaciais, elementos bidimensionais (SALES, 2000; CUNHA, 2003).

Segundo Sales (2000), em geral as soluções disponíveis na literatura partiram das equações de Mindlin (1936), para uma carga pontual inserida em um semi-espaco elástico, que admitem a hipótese de isotropia e homogeneidade do solo. Assim, a heterogeneidade do solo, não-linearidade do solo e a interface estaca/solo podem ser consideradas apenas de maneira aproximada. Outra questão referente ao uso deste método é que a maioria das análises encontradas na literatura considera o radier como “rígido”, o que, na maioria das vezes, não é a situação real.

Dentre os casos relatados na literatura destaca-se o trabalho de Butterfield e Banerjee (1971) que analisaram o comportamento de blocos sobre estacas pelo M.E.C., considerando a placa em contato com o solo. Uma das principais conclusões dos autores foi a de que o radier absorveu de 20-60% da carga total aplicada ao sistema, dependendo do caso analisado. Outra conclusão importante foi a de que o contato da placa com o solo aumentou a rigidez do sistema de 5-15%.

Outro caso interessante relatado na literatura foi o de Kuwabara (1989) que desenvolveu um programa utilizando o M.E.C. e descreveu a análise de um radier rígido estaqueado em um meio semi-elástico. Esse autor simulou um radier com 9 estacas, $s/D=5$ (espaçamento relativo entre estacas), $L/D=25$ (comprimento relativo) e rigidez relativa estaca/solo igual a 1000, fazendo diversas análises paramétricas. Dentre as principais conclusões do autor destaca-se a de que as tensões no interior do solo entre as estacas são pequenas e relativamente homogêneas, e altas na região do solo exterior ao grupo (borda do radier). Outras importantes conclusões do autor foram a de que a carga vertical suportada pelo radier variou de 20-40%

do carregamento total e a distribuição da carga vertical ao longo do comprimento da estaca é pouco afetada pela presença do radier, exceto na parte superior do fuste onde a carga foi reduzida.

Poulos (1991) apresentou uma formulação simplificada, baseada no M.E.C., para o estudo do comportamento de uma sapata estaqueada corrida, sujeita a diversos tipos de carregamento. A sapata foi modelada com elementos de viga e as estacas como elementos de mola. A interação entre os componentes da fundação foi implicitamente considerada ao tratar o solo como contínuo elástico.

4.7 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TEÓRICOS COM O M.E.F.

Foram simulados dois casos, um considerando duas estacas em um solo homogêneo, ou seja, com o mesmo módulo de elasticidade E_s ao longo de todo o perfil e o outro considerando o perfil de solo estratificado, com diferentes módulos de elasticidade das varias camadas.

Os resultados serão apresentados para as diferentes relações de L/D das estacas.

4.7.1 Primeira Etapa (Solo Homogêneo)

A primeira etapa de simulações, realizadas para avaliação dos métodos em comparação com o M.E.F., foi feita considerando o solo homogêneo. A geometria do problema é mostrada na Figura 4.14. O problema foi proposto inicialmente por Mylonakis e Gazetas (1998) e foi simulado no DIANA nesta dissertação, em uma análise tridimensional, e comparado com os resultados obtidos pelos métodos de Poulos e Davis (1980), Randolph e Wroth (1979) e El Sharnouby e Novak (1990).

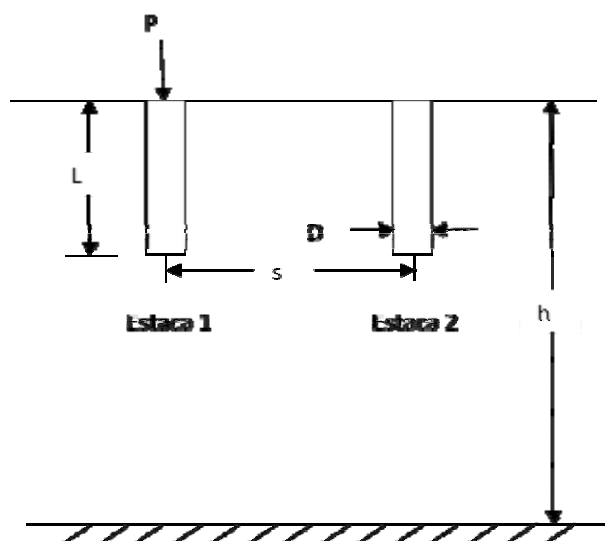


Figura 4.14- Problema proposto para avaliação dos métodos

De acordo com o caso proposto, o valor de h (espessura da camada de solo até o impenetrável) tende ao infinito. O valor da rigidez relativa (E_p/E_s) foi adotado igual a 1000. E o coeficiente de Poisson do solo foi de 0,5.

Sales *et al.* (1998) concluíram que para não interferir nos resultados dos problemas, quando se faz uma análise com M.E.F. para estacas isoladas, é razoável a adoção do domínio lateral igual ou superior a $2L$. Na modelagem proposta usando o programa DIANA, o domínio lateral foi tomado igual a $3L$, medido a partir do eixo da estaca 2.

Os mesmo autores propuseram ainda que, para o domínio vertical (h) na análise com estacas isoladas, é aceitável usar valores entre 1,5 e $2L$. Na presente simulação foi adotado $h=10L$.

A carga foi aplicada em forma de pressão, uniformemente distribuída na área da cabeça da Estaca 1, e foi modelado 1/4 de problema visando a diminuição do tempo de processamento.

As condições de contorno do problema são apresentadas na Figura 4.15.

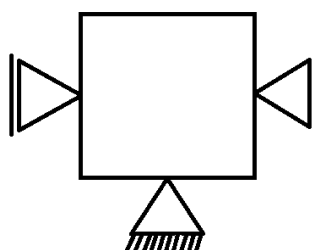


Figura 4.15- Condições de contorno do problema

A Figura 4.16 mostra a malha usada em uma das análises ($s/D=2,5$ e $L/D=10$), onde foram usados 16.565 elementos com um total 27.084 nós.

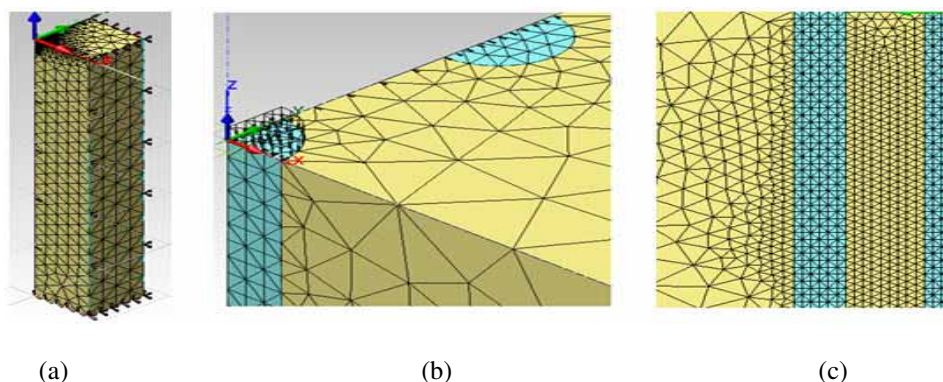


Figura 4.16- Malha usada na análise com $s/D=2,5$ e $L/D=10$: (a) vista geral; (b) ampliação da vista próxima às estacas; (c) vista da região entre as estacas

Para a modelagem no DIANA foi inicialmente aplicada uma carga no topo da Estaca 1 e encontrado seu recalque. Posteriormente foi medido o recalque do topo da Estaca 2 e, através da Equação 4.5, foi calculado o fator de interação para cada caso.

Os resultados serão apresentados em função de s/D e comparados com o DIANA para as diversas relações de L/D das estacas.

A Figura 4.17 apresenta os resultados do DIANA e os calculados pelos métodos teóricos propostos pelos autores citados anteriormente para o caso de $L/D=10$.

Conforme observado na Figura 4.17, os métodos que mais se aproximaram do DIANA foram o de Poulos e Davis (1980) e o Mylonakis e Gazetas (1998), o primeiro superestimando em cerca de 6 até 57% os valores dos fatores de interação, dependendo do valor de s/D , e o segundo subestimando em cerca de 10 até 48%.

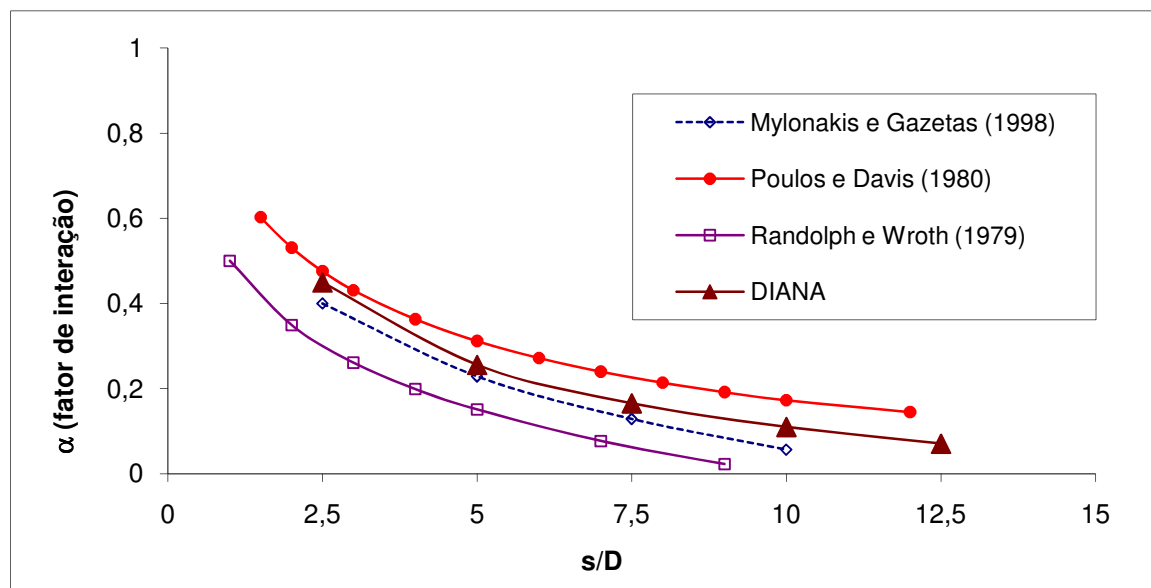


Figura 4.17- Fatores de interação para solo homogêneo com L/D=10

A Figura 4.18 apresenta, para o mesmo caso, agora modificando a relação L/d das estacas para 25.

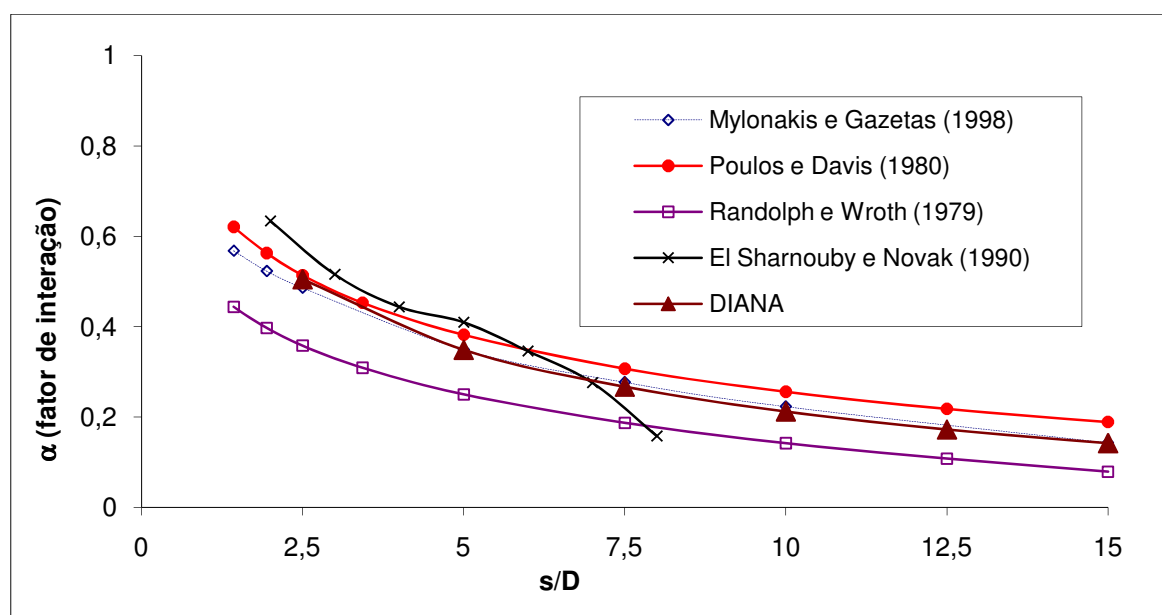


Figura 4.18- Fatores de interação para solo homogêneo com L/D=25

Conforme mostrado na Figura 4.18, para a relação de L/D=25, os métodos de Poulos e Davis (1980) e Mylonakis e Gazetas (1998) foram os que tiveram maior acurácia em relação ao DIANA. O primeiro superestimando os fatores de interação, com diferenças variando entre 1,8 a 32,8% e o segundo ora subestima e ora superestima levemente, com diferenças variando entre 3,7 e 17%. O método de El Sharnouby e Novak (1990) teve resultados razoáveis para

baixos valores de s/D (diferenças entre 5 e 17%) e resultados com menor acurácia para relações de s/D maiores que 7,5. O método de Randolph e Wroth (1998) subestimou os valores dos fatores de interação, com diferenças variando de 29 a 44%.

A Figura 4.19 mostra os resultados para a estaca com $L/D=50$, estaca um pouco mais longa, em solo homogêneo.

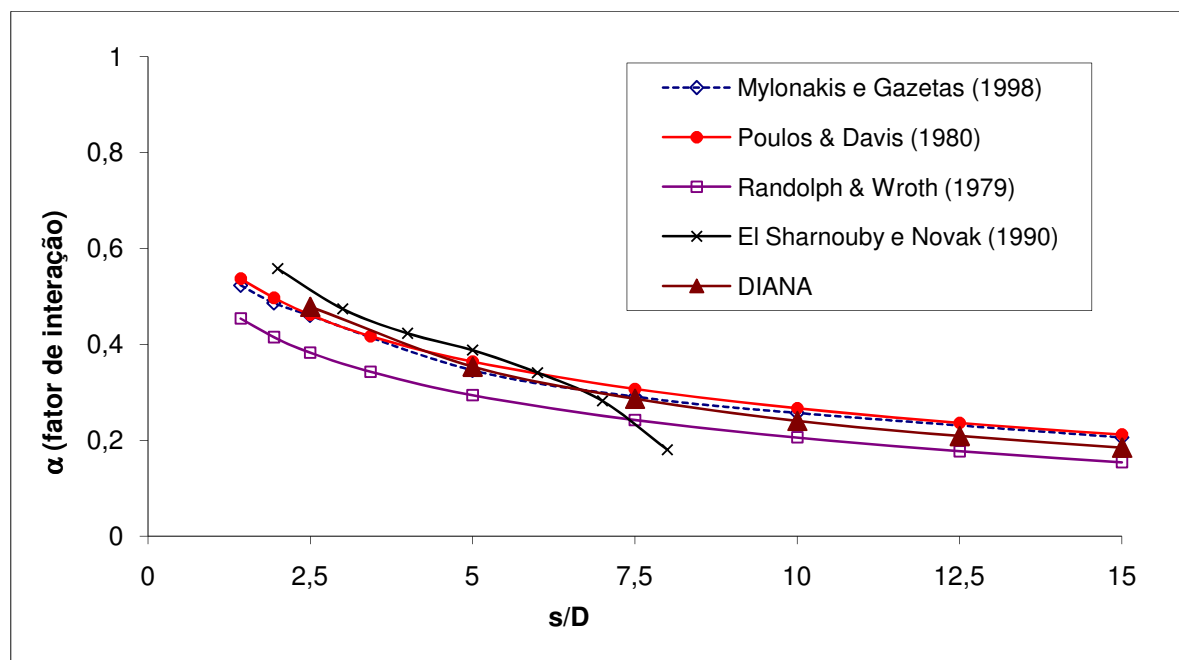


Figura 4.19- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=50$

De acordo com os resultados para as estacas com $L/D=50$, todos os métodos se aproximaram mais dos valores encontrados pelo DIANA, quando comparado com os casos anteriores. O método de Poulos e Davis (1980) continuou tendo boa acurácia, com valores levemente superiores de fatores de interação quando comparados ao DIANA (diferenças de 3,4 a 14,9%). O método de Mylonakis e Gazetas (1980), teve valores levemente inferiores para baixos valores de s/D , praticamente acertou os valores do DIANA para valores médios de s/D e teve resultados levemente superiores para altos valores de s/D . O método de El Sharnouby e Novak (1990) manteve a mesma tendência do caso anterior, que foi de boa concordância para baixos valores de s/D e subestimou muito os resultados do DIANA para altos valores de s/D , em termos de diferenças esse método teve praticamente as mesmas do caso anterior.

Para o último caso de L/D , agora igual a 100, os resultados são mostrados na Figura 4.20.

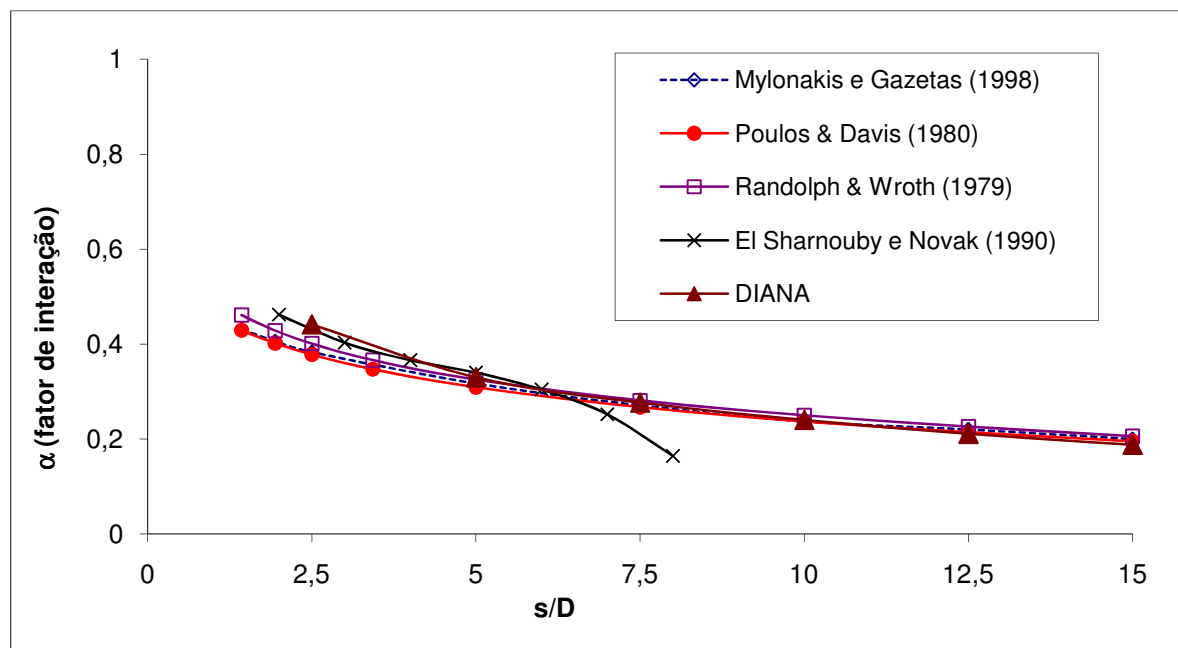


Figura 4.20- Fatores de interação para solo homogêneo com $L/D=100$

Para o caso de $L/D=100$, todos os métodos tiveram um bom grau de convergência em relação aos resultados do DIANA. Com exceção do método de El Sharnouby e Novak (1990), que manteve a mesma tendência dos casos anteriores, com resultados razoáveis para baixos valores de s/D e tendo uma grande divergência para valores maiores de s/D , os demais métodos praticamente acertaram os resultados do DIANA, tendo uma leve discrepância para valores de s/D menores que 5.

4.7.2 Segunda Etapa (Solo Estratificado)

A segunda etapa de simulações para avaliação dos métodos foi feita para um perfil de solo estratificado, o problema proposto também foi analisado Mylonakis e Gazetas (1998) e Chow (1987) que utilizou o M.E.F. E, para comparação com a análise tridimensional feita com o DIANA, foram acrescentados os resultados previstos pelos métodos de Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth (1979).

Foram consideradas 3 camadas de solo e analisados 4 casos, em cada caso foi modificado a grandeza do módulo de elasticidade do solo (E_s) em cada camada e avaliada a interferência disso nos fatores de interação.

Para a geometria do problema, apresentada na Figura 4.21, Mylonakis e Gazetas (1998) e Chow (1987) consideraram a relação $L/D=25$, a espessura da camada até o impenetrável $h/L=2$ e a rigidez relativa $E_p/E_s=1000$.

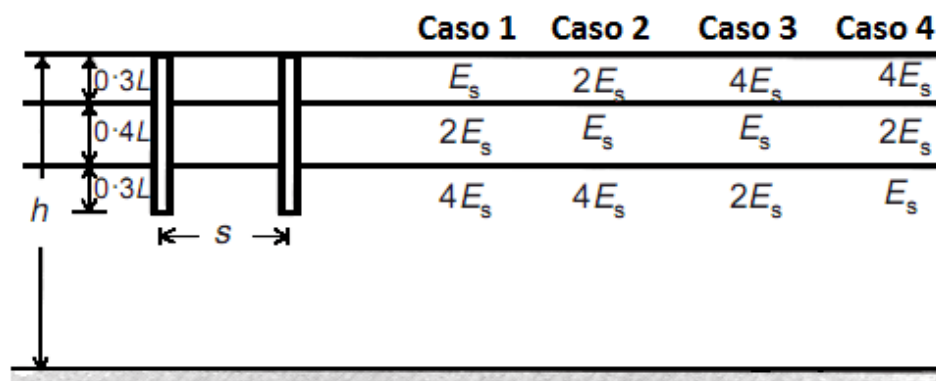


Figura 4.21- Casos propostos para avaliação dos métodos em solo estratificado (MYLONAKIS; GAZETAS, 1998) – modificada pelo autor

Os resultados para o Caso 1, com o módulo de elasticidade do solo crescente com a profundidade, são vistos na Figura 4.22.

Embora o resultado independa do valor de E_s e E_c , foram adotados para simulação no DIANA, $E_s=20$ MPa e $E_c=20$ GPa.

Conforme observado na Figura 4.22, os resultados encontrados por Chow (1987) e o DIANA foram praticamente iguais, com uma pequena diferença que pode ser atribuída ao refinamento da malha empregada. Ao contrário dos resultados previstos para solo homogêneo, o método de Poulos e Davis (1980) subestimou os fatores de interação com diferenças em relação ao DIANA variando entre 7 e 67%. Já o método de Randolph e Wroth (1979) manteve a mesma tendência do caso de solo homogêneo, subestimando os fatores de interação, com diferenças nesse caso, de 39 a 73%. O método de Mylonakis e Gazetas (1998) gerou resultados com bom grau de aproximação em relação ao DIANA, subestimando levemente para pequenos valores de s/D e superestimando para relações de s/D maiores que 2,5, com diferenças variando entre 3 e 58%, se afastando mais da curva do DIANA para altos valores s/D .

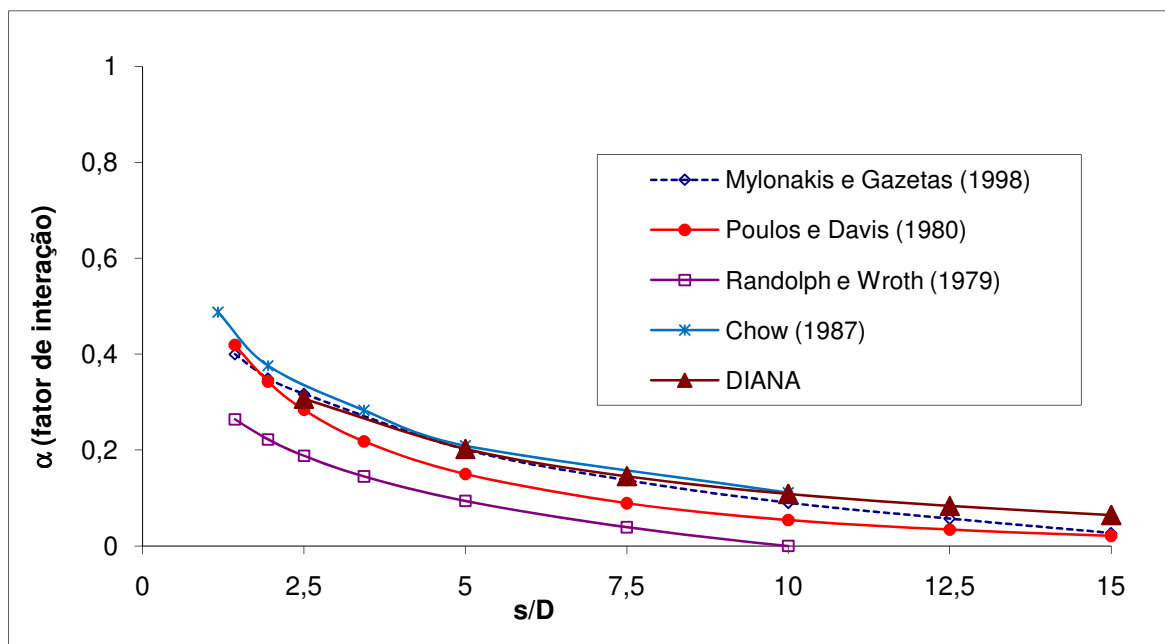


Figura 4.22- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 1)

A Figura 4.23 apresenta os resultados para o Caso 2, agora com E_s decrescendo da primeira para a segunda camada, considerando o nível do terreno como referência, e tem da segunda para a terceira camada um aumento de 4 vezes.

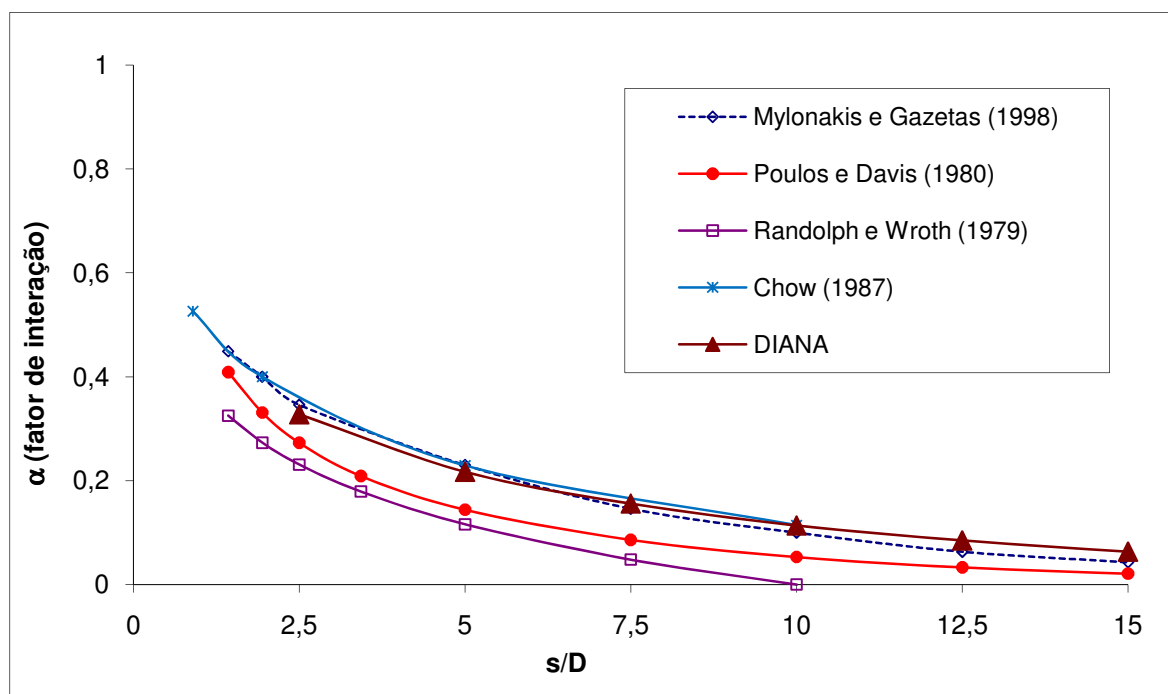


Figura 4.23- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 2)

De acordo com a Figura 4.23, para o Caso 2, assim como no Caso 1, os resultados encontrados por Chow (1987) e o DIANA também foram praticamente iguais. O método de

Poulos e Davis (1980) continuou subestimando os fatores de interação, com diferenças variando entre 17 e 67%. Para o método de Randolph e Wroth (1979) as diferenças variaram de 29 a 69%. O método de Mylonakis e Gazetas (1998) continuou com bons resultados, diferenças de 5 a 31%, com valores melhores para baixos valores de s/D .

Os resultados do Caso 3 são expostos na Figura 4.24. Nesse caso, o solo começa com a primeira camada bem mais rígida que as demais, com o valor de E_s quatro vezes maior que o da segunda, e da segunda para a terceira camada há um aumento de 2 vezes no valor de E_s .

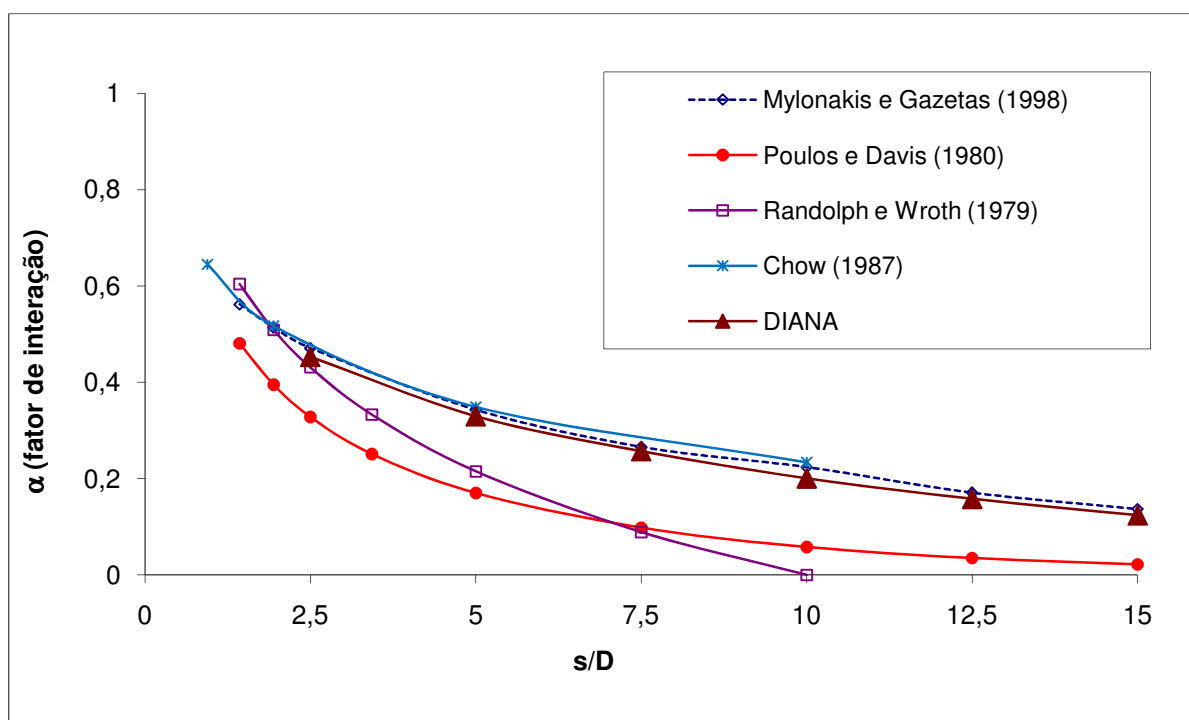


Figura 4.24- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 3)

A Figura 4.24 mostra que os resultados de Chow (1987) e Mylonakis e Gazetas (1998) tiveram pequena diferença em relação ao DIANA, máxima de 16%. O método de Poulos e Davis (1980) apresentou considerável diferença para esse caso, chegando até 82% para maiores valores de s/D . Esta grande diferença entre o método de Poulos e Davis (1980) e o DIANA talvez possa ser atribuída ao fato de que, no primeiro método, os autores fazem uma “simplificação”, considerando uma média ponderada entre os módulos de elasticidade das camadas de solo no cálculo dos fatores de interação, uma vez que o método foi concebido para meios homogêneos (módulo constante ao longo todo o perfil de solo). Para o método de Randolph e Wroth (1979) as diferenças foram pequenas para s/D menores que 2,5 e foram

aumentando para maiores valores de s/D , até que para $s/D=10$ não prevê mais interação, enquanto que o DIANA ainda prevê um fator de interação igual a 0,2.

No último caso apresentado para solo estratificado o módulo de elasticidade do solo é decrescente com a profundidade numa razão de 2 vezes. A Figura 4.25 mostra os valores de fatores de interação obtidos pelos métodos.

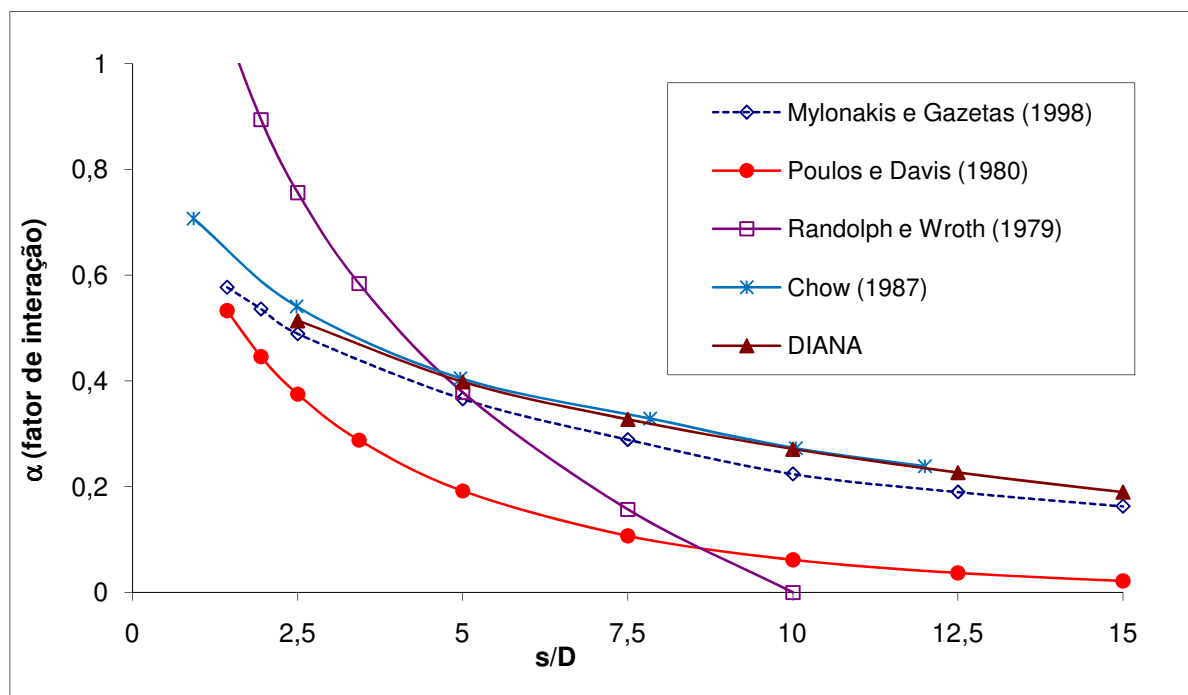


Figura 4.25- Fatores de interação para solo estratificado (Caso 4)

Pela análise da Figura 4.25, pode-se observar que os resultados de Chow (1987) foram praticamente os mesmos do DIANA. O método de Mylonakis e Gazetas (1998) subestimou em cerca de 5 a 18% os valores dos fatores de interação. O método de Poulos e Davis (1980) subestimou bastante os fatores de interação com diferenças que aumentam à medida que aumenta a relação s/D . O método de Randolph e Wroth (1979) apresentou uma tendência diferente da apresentada no caso anterior, para valores de $s/D < 5$ superestimou os fatores de interação e para $s/D > 5$ subestimou os mesmos, até que em $s/D=10$ zerou a interação, enquanto que o DIANA ainda previa $\alpha=0,224$.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos métodos teóricos analisados, o de Mylonakis e Gazetas (1998) foi o que mais se aproximou dos valores do obtidos com DIANA. Os próprios autores já haviam comparado

seus resultados, no artigo original, com o M.E.F. através dos resultados do trabalho de Chow (1987) e mostrado que o método apresentava boa precisão, o que foi novamente comprovado com o DIANA.

O método de El Sharnouby e Novak (1990), elaborado para solos homogêneos, gerou boa precisão para pequenos valores de s/D (menores que 5), tendo seus resultados apresentado maiores divergências à medida que aumentou-se os valores de s/D .

O método de Poulos e Davis (1980) apresentou acurácia razoável em relação ao M.E.F., superestimando para solos homogêneos e chegando a subestimar para solos estratificados.

O método de Randolph e Wroth (1979) é um método simplificado, sendo seus resultados facilmente obtidos através de cálculos manuais. Dentre os métodos teóricos analisados foi o que apresentou a menor precisão entre todos, com tendência a subestimar os resultados do DIANA na maioria dos casos. Cordeiro (2007) concluiu em seu trabalho que essa metodologia de cálculo dos fatores de interação não leva em consideração a relação H/L das estacas, onde H é a profundidade da camada indeslocável e L o comprimento da estaca. Isto eliminaria a influência da camada rígida no cálculo dos fatores de interação, extinguindo uma incógnita.

CAPÍTULO 5

ANÁLISES E RESULTADOS

A resolução de problemas tridimensionais utilizando ferramentas mais elaboradas como o Método de Elementos Finitos (M.E.F.) não é tarefa fácil. A busca da precisão adequada, às vezes, pode exigir um tempo de processamento alto que, dependendo da quantidade, grau de dificuldade e do prazo para execução das análises, pode tornar o uso dessa ferramenta inviável para aplicações práticas.

Para contornar esse problema, na análise de radiers estaqueados foram desenvolvidas ferramentas alternativas de análise que utilizam mais de um método para resolução do problema, como é o caso do GARP (SMALL; POULOS, 2007) que, assumindo algumas hipóteses simplificadoras que podem reduzir a precisão, diminui exponencialmente o tempo de processamento. Essa precisão deverá ser avaliada para ver se não inviabiliza a análise.

O GARP, que combina o M.E.F. com o Método de Elementos de Contorno (M.E.C.) na resolução do problema, apresenta algumas simplificações. Das simplificações desse programa, a que se pronuncia como a maior responsável pelo sucesso ou fracasso dos resultados é a forma com que ele considera os mecanismos de interação estaca-radier-solo.

Cunha (2003) observou que a análise pelo M.E.C., para grupos de estacas diferentes, mas com a mesma quantidade de estacas carregadas, gerava resultados de recalques muito próximos e concluiu com isso que os programas descritos na literatura que empregam o M.E.C. não consideram estacas intermediárias na resposta do problema e sim, somente a interação entre pontos carregados.

O M.E.F. considera o problema de uma forma global, levando em conta todos os fatores intervenientes, inclusive a interferência de estacas intermediárias na resposta do comportamento do grupo. Essas estacas intermediárias alteram a resposta do problema, pois funcionam como intrusões rígidas diminuindo os recalques induzidos na vizinhança.

Esse modo diferente que os dois métodos consideram para analisar o comportamento das fundações estaqueadas faz com que os resultados gerados por ambos sejam distintos, principalmente quando se leva em conta a parcela de contribuição da interação entre os

elementos constituintes dessas fundações. Isso faz com que as respostas de recalques, cargas nas estacas e tensões (indiretamente momentos) que os programas geram, em especial o DIANA que é baseado em elementos finitos e o GARP que combina o M.E.F. e o M.E.C, sejam diferentes.

Com o objetivo de quantificar a diferença entre o GARP e o M.E.F. e propor algumas correções nos dados de entrada do GARP para gerar resultados próximos aos do DIANA, superando essa “dificuldade” na resposta do problema, que é da não consideração das estacas intermediárias por aquele programa, são propostos a seguir alguns casos de radies estaqueados onde são comparados os resultados de recalques e cargas nos elementos pelos dois programas.

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar até que ponto a consideração ou não dos fatores de interação, que são dados impostos pelo usuário do GARP, podem modificar a resposta desse programa. Para isso, será avaliado como a colocação ou a omissão dos respectivos fatores de interação modificam a resposta do GARP, implicando na maior ou menor proximidade do resultado correto.

O termo “elementos”, na presente dissertação, faz referência tanto às estacas quanto ao radier. Este termo pode, eventualmente, ser confundido com os elementos da malha no M.E.F., porém quando a referência for em relação aos elementos da malha de elementos finitos será usado o termo “elementos da malha”.

A nomenclatura utilizada para apresentação dos resultados do programa GARP, em todo o trabalho, seguirá a seguinte convenção:

- ◆ GARP (8) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 8;
- ◆ GARP (10) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 10;
- ◆ GARP (12) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 12;
- ◆ GARP (15) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 15;

- ◆ GARP (20) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 20;
- ◆ GARP (30) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 30;
- ◆ GARP (50) – Serão atribuídos fatores de interação correspondentes a até o máximo espaçamento relativo ($s/D_{\text{máx}}$) igual a 50.

5.1 O RADIER SOBRE 2 ESTACAS

Foram simulados dois casos para o Radier sobre 2 estacas, um com espessura da placa igual a 1,0 m e o segundo caso com a placa de 0,50 m. A geometria do primeiro é mostrada na Figura 5.1. O Radier com 0,50 m de espessura tem geometria idêntica à do com 1,0 m, diferenciando-se apenas pelo fato de que a carga é uniformemente distribuída em toda a superfície da placa enquanto que o anterior a carga é distribuída na região do pilar.

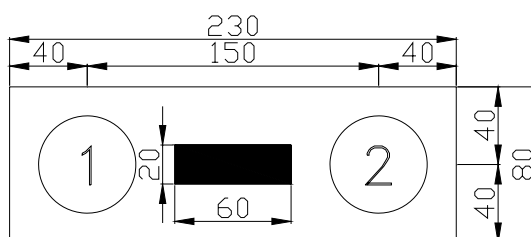


Figura 5.1- Radier sobre 2 estacas com o pilar no centro

As malhas utilizadas nas análises foram compostas de 29.032 elementos e 45.639 nós, para a placa com 1,0 m de espessura e 43.605 elementos e 65.923 nós para a placa com 0,5 m, refinamento escolhido para gerar uma precisão adequada dos resultados. Detalhes da malha e condições de contorno utilizadas são mostradas na Figura 5.2.

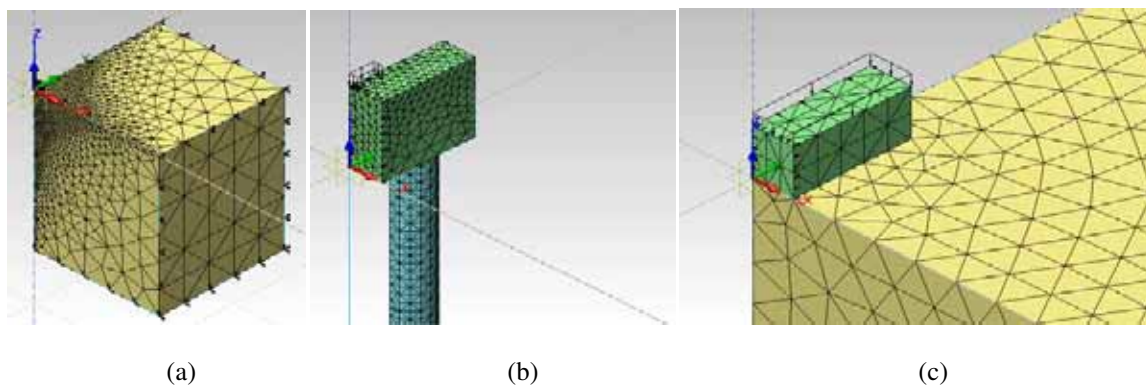


Figura 5.2- Malhas utilizadas na modelagem do radier com 2 Estacas: (a) Vista geral; (b) Malha da estaca e radier (espessura de 1,0 m); (c) Ampliação da vista próxima ao radier (espessura de 0,5 m)

5.1.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram a porcentagem de carga mobilizada pelos elementos para os dois casos: placa com 1,0 m de espessura e Placa com 0,5 m de espessura.

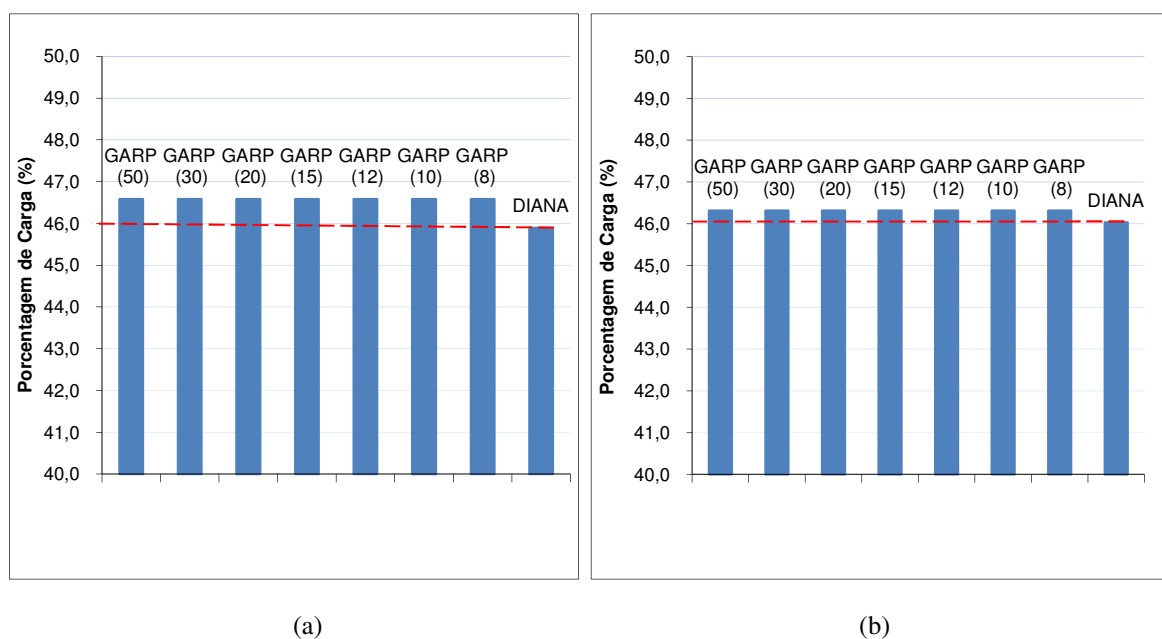


Figura 5.3- Carga mobilizada nas estacas: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura

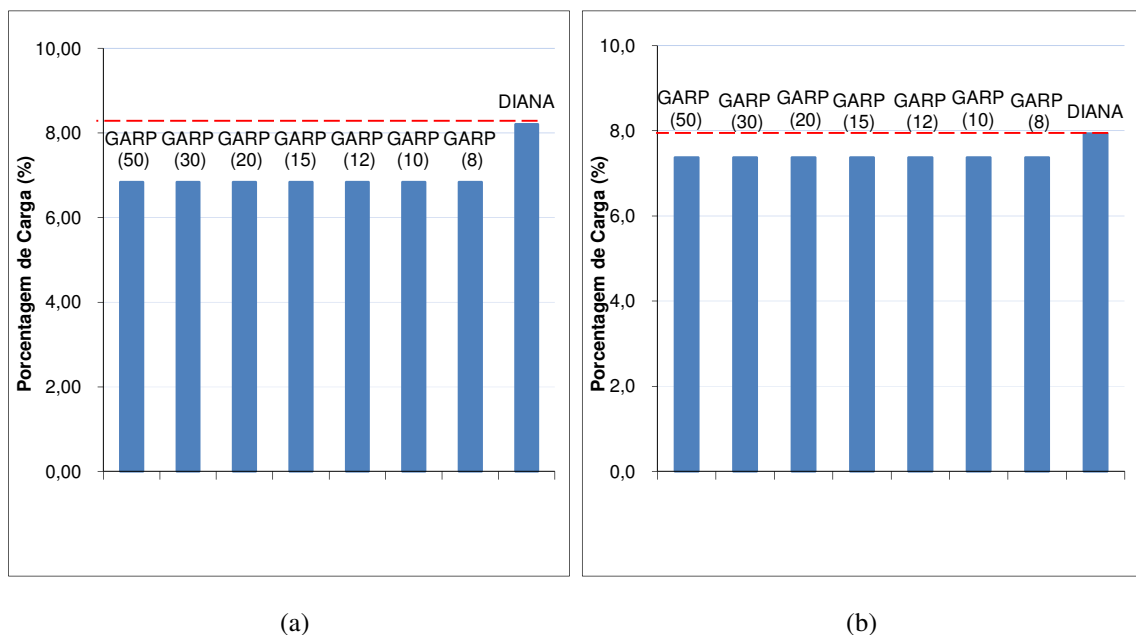


Figura 5.4- Carga mobilizada pelo radier: (a) Caso com 1,0 m de espessura ; (b) Caso com 0,5 m de espessura

Apesar de, na prática, não se poder comparar os resultados dos radiers mais rígidos com os dos radiers mais flexíveis, tanto no radier sobre 2 estacas como nos demais, uma vez que a configuração da carga nos dois casos são diferentes, concentrada na região do pilar e distribuída em toda a superfície do radier, respectivamente, essa comparação foi feita exclusivamente para se ter uma idéia de evolução dos valores (cargas nos componentes da fundação e recalques) com as modificações propostas de geometria e demais aspectos.

Pode-se observar nas Figuras 5.3 e 5.4 que, todos os valores de fatores de interação atribuídos ao GARP, para os diferentes espaçamentos relativos ($s/D_{máx}$), resultaram no mesmo resultado de carga nos elementos. Isso mostra que esse programa não utilizou os fatores de interação correspondentes aos valores de $s/D_{máx}$ superiores a 8 ($s/D_{máx} > 4$ m), distância esta que é maior que o espaçamento entre estacas de 1,5 m, conforme observado na Figura 5.5, motivo pelo qual a atribuição de fatores de interação para $s/D_{máx}$ maiores que 8 são indiferentes para esse caso.

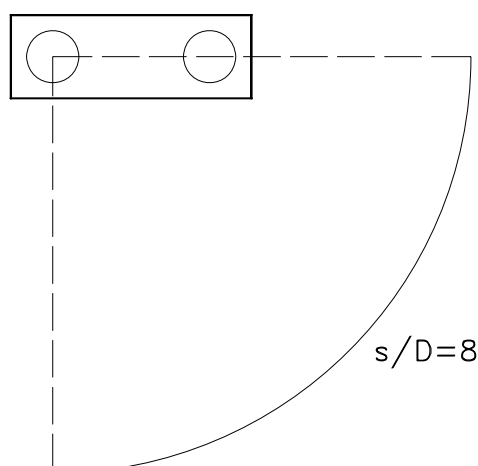


Figura 5.5- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier com 2 estacas

Ainda com base na Figura 5.3 verifica-se que, no caso da placa de 1,0 m de espessura, a porcentagem de carga tomada por cada estaca corresponde a 46,58% segundo o GARP e 45,90% de acordo com o DIANA, diferença de 1,49%. Já no caso da placa com 0,5 m de espessura, a carga tomada por cada estaca foi 46,31% de acordo com o GARP e 46,03% segundo o DIANA, diferença de 0,60%. Estas diferenças tanto para a placa de 1,0 m quanto para a placa de 0,5 m foram pequenas, já que neste caso não se tinha a presença de estacas intermediárias.

De acordo com esses resultados de carga tomada pelos elementos, para o Radier com 2 estacas observa-se que o DIANA previu menos carga tomada pelas estacas e mais carga para o Radier em comparação com o GARP, apesar das diferenças terem sido pequenas.

A Figura 5.4 mostra que, no caso da placa de 1,0 m, a porcentagem de carga tomada pelo Radier foi de 6,84% de acordo com o GARP, enquanto que o previsto pelo DIANA foi de 8,21%, diferença de 16,63%. Já no caso da placa de 0,5 m, o previsto pelo GARP foi de 7,37% e pelo DIANA foi de 7,94%, diferença de 7,10%, menor que no caso da placa mais rígida.

A comparação entre os dois casos mostra que, no GARP, a carga tomada pelas estacas foi um pouco maior na placa de 1,0 m, 46,58% contra 46,31% na placa de 0,5 m. Já no DIANA, esta tendência foi o contrário, apesar das diferenças serem ainda menores, 45,90% na placa de 1,0 m contra 46,03% na placa de 0,5 m.

A comparação da parcela de carga que vai para o Radier nos dois casos mostra que, no GARP a parcela aumentou de 6,84% no caso da placa de 1,0 m para 7,37% no caso da placa de 0,5 m, e no DIANA caiu de 8,21 para 7,94%.

5.1.2 Recalques Diferenciais

A seguir serão mostrados os recalques dos pontos, tomados no nível do terreno (base do radier), considerando um plano que corta o eixo central do Radier (Corte XX), conforme mostrado na Figura 5.6.

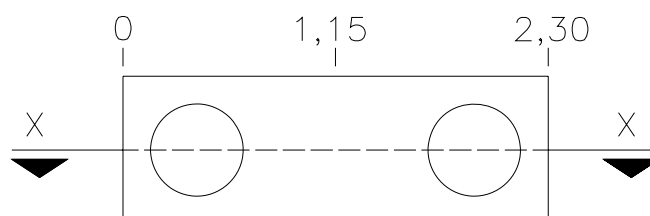


Figura 5.6- Plano e coordenadas consideradas para os resultados de recalque no radier sobre 2 estacas

A Figura 5.7 mostra os recalques diferenciais ao longo do plano de referência (Corte XX), para o bloco de 1,0 m.

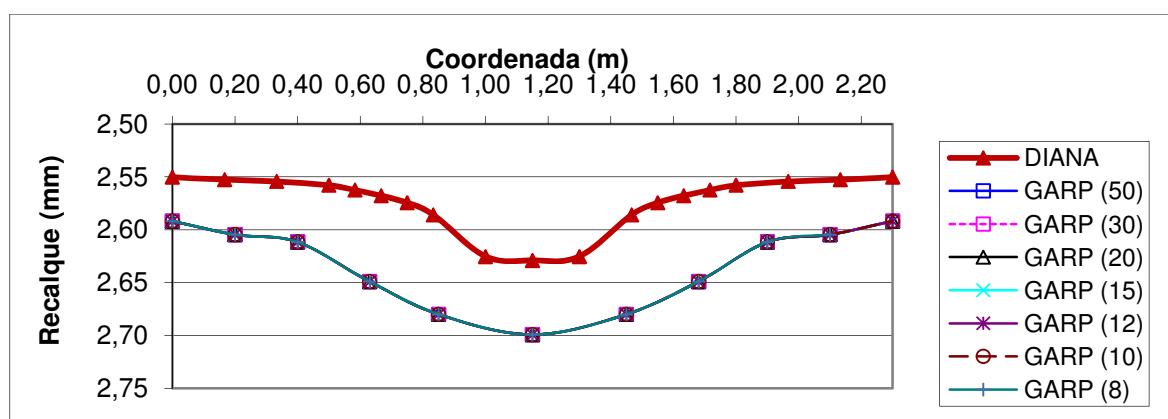


Figura 5.7- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 2 estacas (espessura de 1,0 m)

A análise da Figura 5.7 mostra que o DIANA gerou resultados de recalques um pouco menores que os gerados pelo GARP, com pequenas diferenças. As diferenças máximas foram da ordem de 2,60%.

A Figura 5.8 mostra os recalques diferenciais referentes ao caso da placa de 0,5 m de espessura.

De acordo com a Figura 5.8, o DIANA determinou resultados de recalques diferenciais menores que o GARP, apesar das diferenças terem sido pequenas. As diferenças máximas para esse caso ficaram em torno de 4,2%.

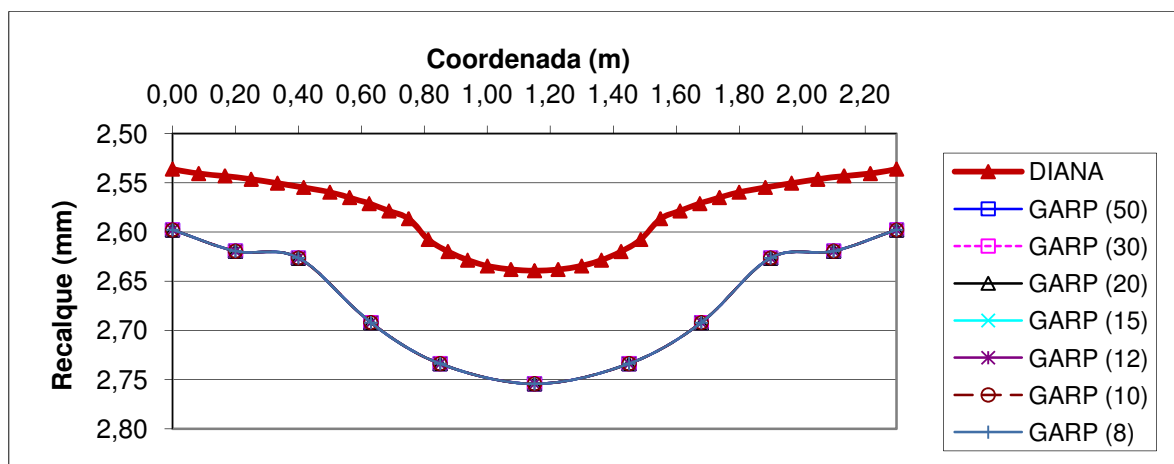


Figura 5.8- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 2 estacas (espessura de 0,5 m)

Como visto para a análise das cargas tomadas pelos elementos, também neste caso, a introdução de fatores de interações para espaçamentos relativos superiores a 8 não influenciou no resultado final, um vez que todos os resultados de recalques no GARP foram iguais, independente do valor de máximo de s/D .

Quando comparadas as duas placas, para este caso, a placa de 0,5 m de espessura gerou recalques um pouco superiores aos recalques da placa de 1,0 m, o que era esperado uma vez que a placa de 0,5 m é mais flexível que a outra.

5.2 O RADIER SOBRE 4 ESTACAS

Como no caso anterior, no radier sobre 4 estacas foram feitas simulações com os dois programas, considerando placas de 1,0 m de espessura para os radies convencionais e 0,5 m de espessura para os radies mais flexíveis. A Figura 5.9 mostra a geometria do radier estaqueado, o pilar situado na região central não está presente no bloco com 0,5 m de espessura.

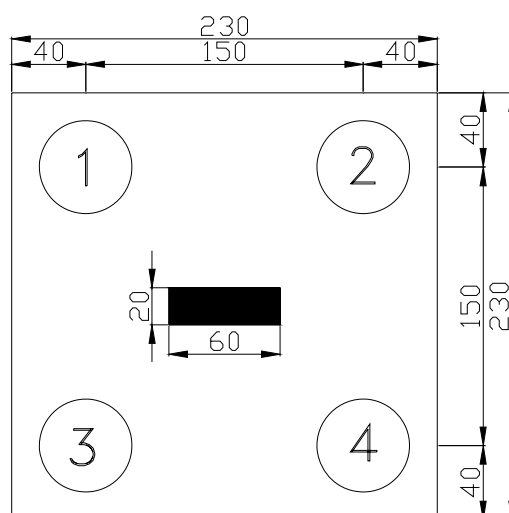


Figura 5.9- Radier sobre 4 estacas com o pilar no centro

A malha utilizada na análise deste caso apresenta 45.232 nós e 30.875 elementos para o caso da placa com 1,0 m e 77.914 nós e 51.896 elementos para o caso da placa de 0,5 m de espessura. A Figura 5.10 mostra detalhes das malhas e condições de contorno para as duas placas.

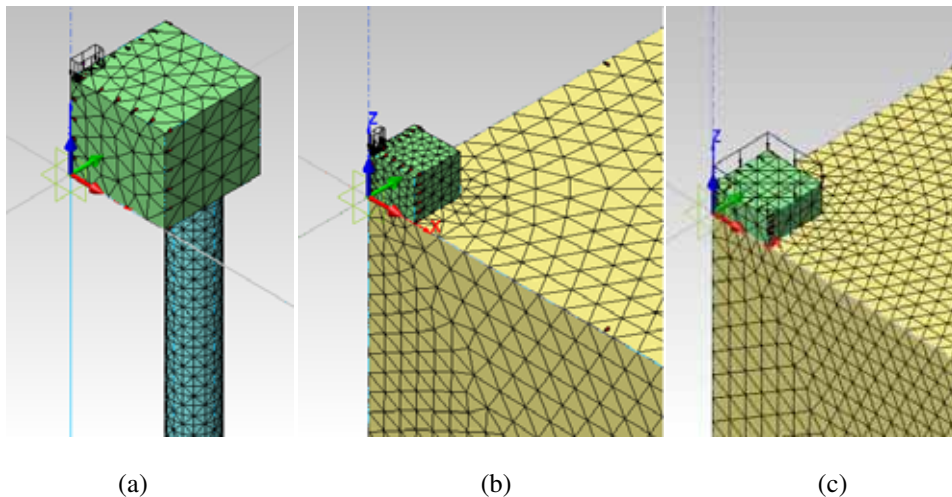


Figura 5.10- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 4 Estacas: (a) Detalhe da placa e estaca; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,0 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)

5.2.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

As Figuras 5.11 mostra as carga mobilizada pelas estacas. São mostrados os resultados para os dois casos propostos, com placas de 1,0 m e 0,5 m.

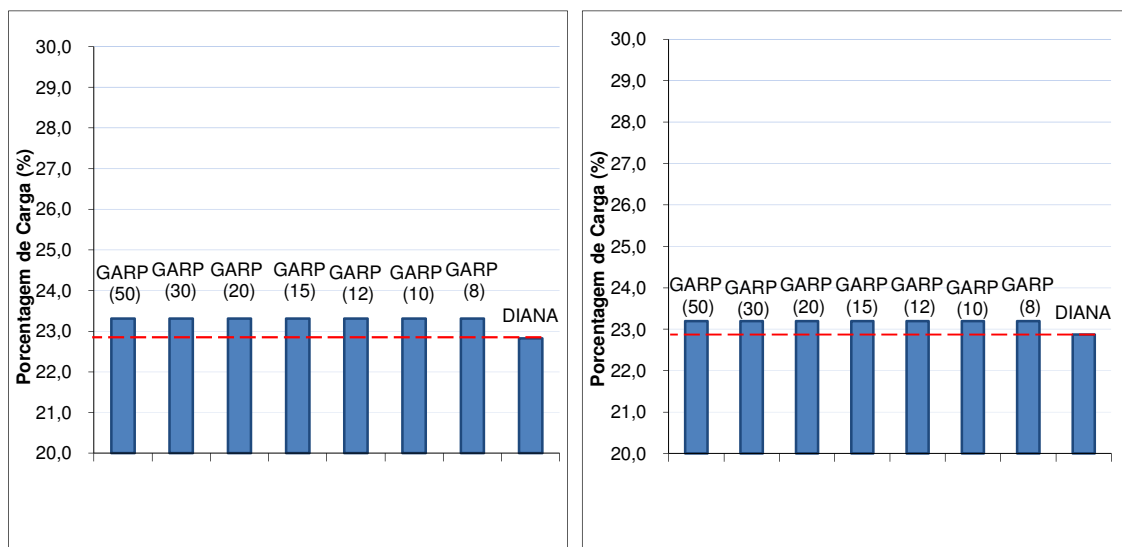


Figura 5.11- Carga mobilizada nas estacas: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura

Neste caso também, todos os resultados do GARP foram iguais, independente do espaçamento relativo máximo. A Figura 5.12 mostra que o espaçamento relativo máximo, $s/D_{\text{máx}}=8$, ainda é maior que as distâncias entre estacas. Portanto a atribuição de fatores interação correspondentes à espaçamentos relativos maiores que 8 são indiferentes para o GARP.

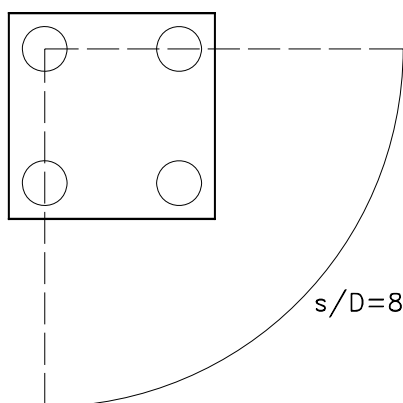


Figura 5.12- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 4 estacas

A Figura 5.11 apresenta os resultados das análises e, de acordo com ela seguindo a mesma tendência do caso anterior, a porcentagem de carga que vai para as estacas, dada pelo DIANA, é um pouco menor que os valores do GARP. O DIANA aponta 22,83% contra 23,32% do GARP, diferença de 2,14%, no caso da placa de 1,0 m e 22,87% contra 23,20%, diferença de 1,42%, no caso da placa de 0,5 m. A Figura 5.13 mostra os resultados dos dois programas para a carga mobilizada pelo radier.

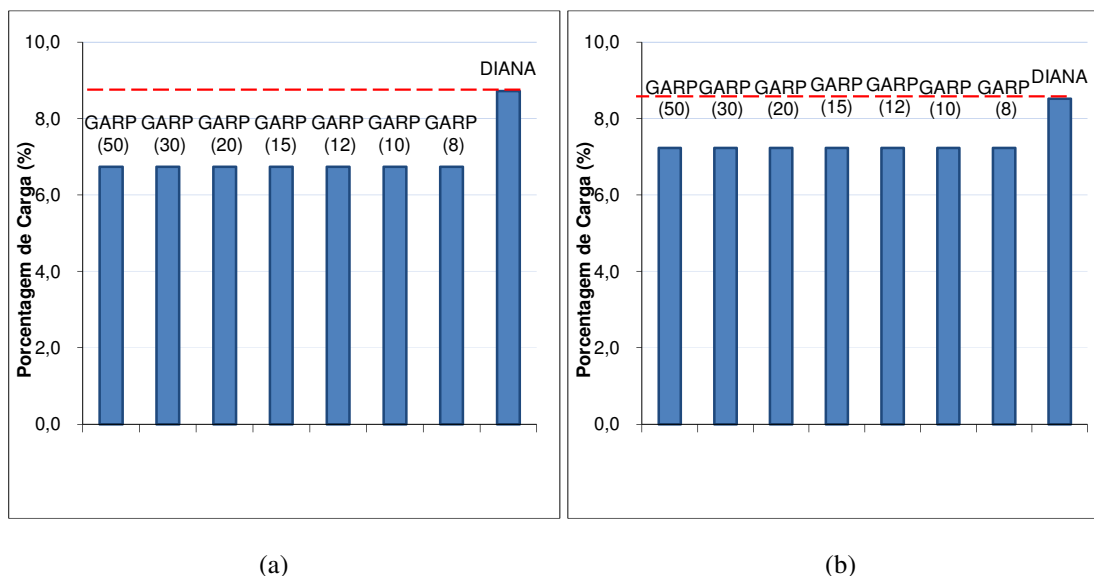


Figura 5.13- Carga mobilizada pelo radier: (a) Placa de 1,0 m de espessura ; (b) Placa de 0,5 m de espessura

Como no radier sobre 2 estacas, neste caso o DIANA apresentou a tendência de gerar valores de porcentagem de carga tomada pelo radier um pouco maiores que os valores do GARP, apesar dessa diferença não ser grande. A porcentagem de carga tomada pelo radier prevista pelo GARP para a placa de 1,0 m foi de 6,74% contra 7,07% do DIANA, diferença de 22,73%, e 7,23% contra 8,52% do DIANA, diferença de 15,14%, para a placa de 0,5 m de espessura.

Comparando os dois casos de espessuras diferentes, pode-se observar que a parcela de carga tomada por cada estaca, segundo o GARP, diminuiu de 22,32% no caso da placa de 1,0 m para 22,20% no caso da placa de 0,5 m. Já para o DIANA essa parcela aumentou de 22,83% para 22,87%. Mantendo a mesma tendência do caso do radier sobre 2 estacas.

No caso do radier, o GARP aumentou a parcela de carga de 6,74% para 7,23% da placa de 1,0 m para a placa de 0,5 m. No DIANA essa parcela diminuiu de 8,72% para 8,52%. O que também manteve a mesma tendência do caso do radier sobre 2 estacas.

5.2.2 Recalques Diferenciais

A seguir são mostrados os recalques na cota da base do radier, ao longo do eixo do mesmo. A Figura 5.14 ilustra o Plano e as coordenadas consideradas para os resultados de recalques diferenciais no radier.

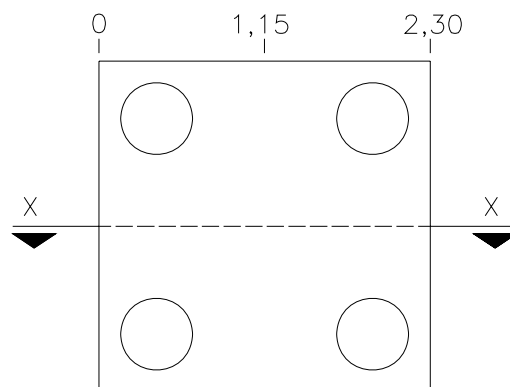


Figura 5.14- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 4 estacas

A Figura 5.15 mostra os recalques diferenciais ao longo do corte XX para o caso do radier estaqueado com placa de 1,0 m.

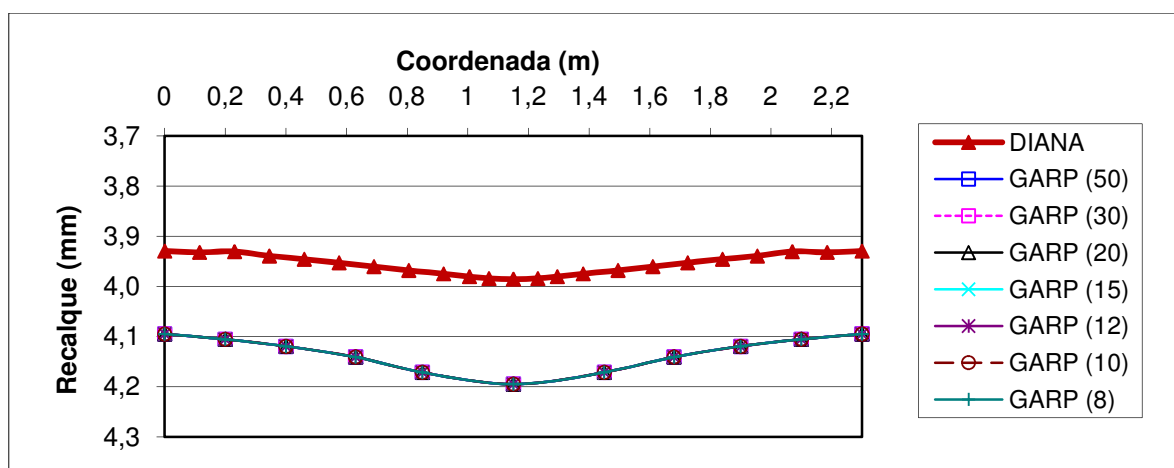


Figura 5.15- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 4 estacas (Placa de 1,0 m)

De acordo com a Figura 5.15, pode-se observar que o GARP gerou os mesmos resultados de recalque, nos diferentes pontos, para todos os valores de espaçamentos relativos.

O DIANA, como no caso do Radier sobre 2 estacas, originou recalques um pouco menores que o GARP, com diferenças máximas em torno de 5%.

A Figura 5.16 mostra os recalques diferenciais ao longo do Radier com placa de 0,5 m.

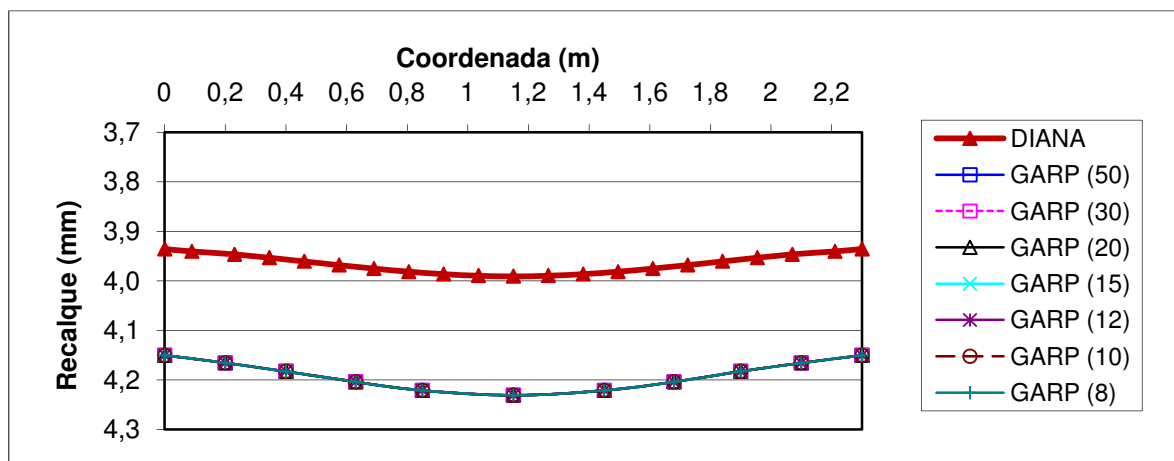


Figura 5.16- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 4 estacas (Placa de 0,5 m)

Segundo a Figura 5.16, a tendência dos casos anteriores é mantida, o DIANA determinou recalques um pouco menores que o GARP, com diferenças máximas de 5,7%.

Quando comparadas as duas placas, para este caso, nota-se que o DIANA gerou praticamente o mesmo recalque, tanto para a de 0,5 m quanto para a de 1,0 m. O que mostra que, apesar da placa de 0,5 m de espessura ser mais flexível que a placa de 1,0 m, o fato de aplicar a carga distribuída em toda a superfície do radier ameniza o efeito de aumento de recalque devido a flexibilidade da placa.

5.3 O RADIER SOBRE 9 ESTACAS

No Radier sobre 9 estacas foram simuladas as mesmas condições dos casos anteriores, com as duas espessuras das placas que foram, também, 0,5 m e 1,0 m. A geometria do Radier é mostrada na Figura 5.17, também admitindo que no caso da placa de 0,5 m a carga foi uniformemente distribuída em toda a superfície do bloco, portanto não apresenta o pilar no centro do radier. A numeração das estacas na Figura 5.17 foi propositalmente colocada dessa forma para facilitar a apresentação dos resultados das modelagens.

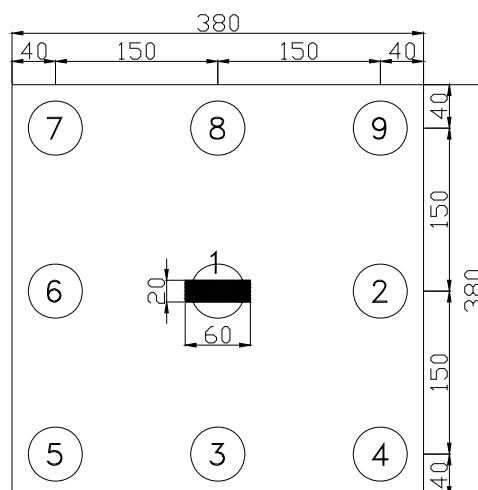


Figura 5.17- Radier sobre 9 estacas com o pilar no centro

A malha e as condições de contorno utilizadas na simulação deste caso no DIANA são mostradas na Figura 5.18. As mesmas apresentaram 63.250 nós e 42.046 elementos para o caso da placa de 1,0 m e 78.725 nós e 52.672 elementos para o caso da placa de 0,5 m.

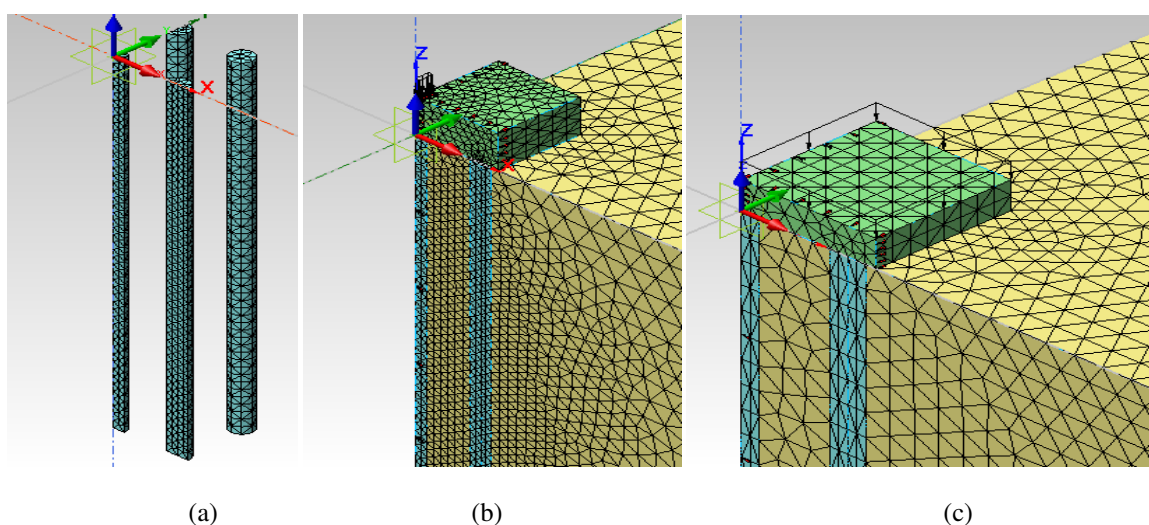


Figura 5.18- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 9 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,0 m de espessura); (c) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)

5.3.1 Carga Mobilizada Pelos Elementos

Como este caso apresenta uma quantidade maior de estacas que os anteriores, optou-se por não mostrar os resultados em gráficos de barras e sim em linhas, pois assim fica mais fácil a interpretação e posterior comparação entre os valores. E, apesar de não ter sentido físico a interpolação dos valores entre as cargas de cada elemento, a mesma foi feita com o intuito de

facilitar a verificação da proximidade entre os resultados gerados pelos dois programas. Para os casos posteriores, com maiores quantidades de estacas, a apresentação da carga nos elementos será feita dessa forma. Para a exposição dos resultados foi adotada a numeração das estacas conforme a Figura 5.17.

A Figura 5.19 apresenta os resultados para a carga mobilizada nos elementos, para o radier de 1,0 m de espessura.

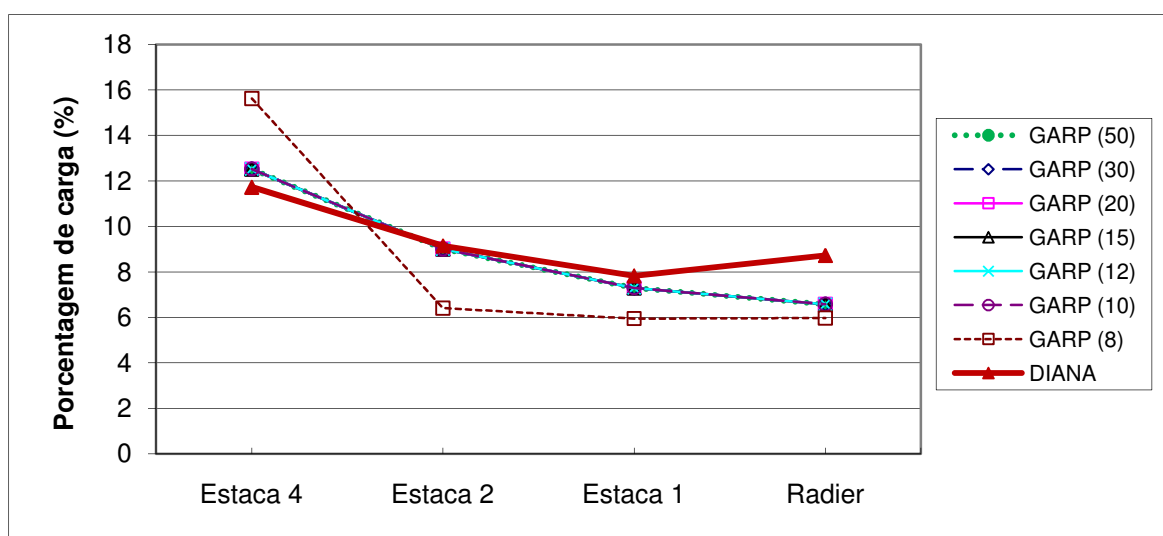


Figura 5.19- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 9 estacas (1,0 m de espessura)

A Figura 5.19 mostra que os resultados das cargas dos elementos, apresentada pelo GARP, seguiu a mesma tendência dos valores do DIANA com pequenas diferenças entre os resultados. A maior diferença foi com relação à carga tomada pelo Radier que, segundo o DIANA, foi de 8,72% e segundo o GARP ficou entre 5,97 e 6,58%, diferenças de 25,56 e 31,48%, respectivamente.

De acordo com a Figura 5.19 também observa-se que, neste caso, para valores de $s/D_{\text{máx}}$ maiores ou iguais a 10 os resultados foram iguais e mais próximos dos do DIANA. Os resultados, quando se considerou $s/D_{\text{máx}}=8$, foram discrepantes em relação aos demais resultados do GARP e suas diferenças em relação aos valores do DIANA foram maiores.

Conforme a Figura 5.20, o espaçamento relativo máximo $s/D_{\text{máx}}=8$ está fora da região que cobre todas as distâncias de interação entre as estacas e, para $s/D_{\text{máx}}$ a partir de 10, as distâncias de interação passam a ser totalmente cobertas. Portanto, para valores de $s/D_{\text{máx}}$ iguais a 8 ou menores, a interação entre as estacas do canto não ocorre, o que provoca uma

mudança de comportamento em relação aos resultados referentes aos demais espaçamentos relativos.

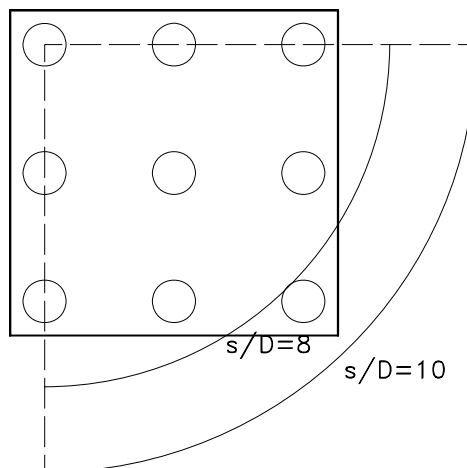


Figura 5.20- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 9 estacas

A Figura 5.21 apresenta os resultados para a carga mobilizada nos elementos, para o radier de 0,5 m de espessura.

Com base na Figura 5.21 observa-se que a previsão da carga nas estacas feita pelo GARP, para $s/D_{\text{máx}} \geq 10$, praticamente coincidiu com os valores do DIANA, as retas se sobrepuseram. O elemento que gerou diferença foi o Radier, 16,74%. Para $s/D_{\text{máx}}=8$ as diferenças foram maiores chegando a 23,58% para o Radier.

Neste caso, seguindo a tendência dos casos anteriores com menos estacas, o DIANA previu mais carga no radier que o GARP.

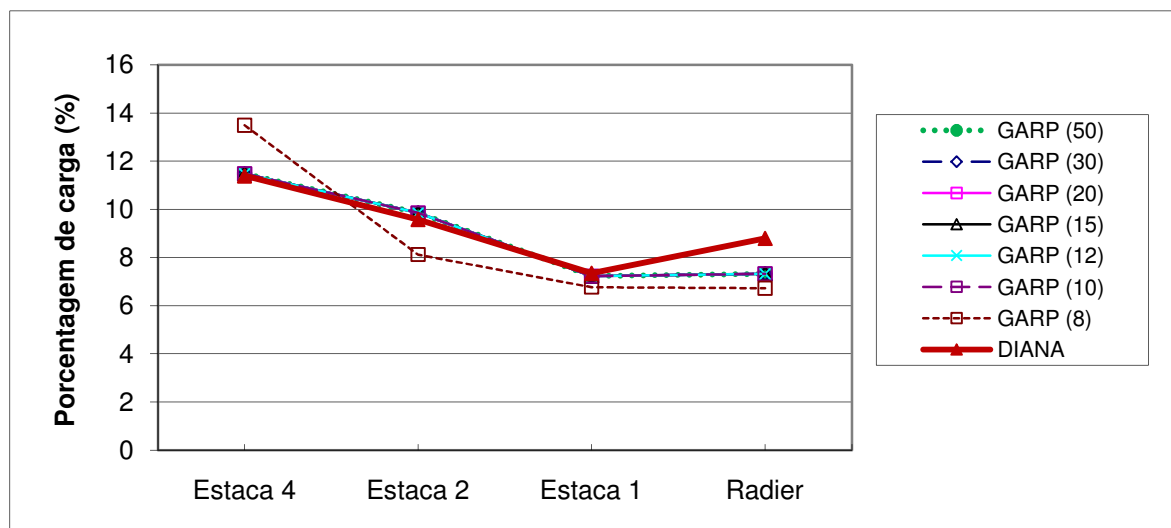


Figura 5.21- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 9 estacas (0,5 m de espessura)

Observa-se, também, que no caso da placa de 0,5 m de espessura os resultados do GARP foram mais convergentes em relação ao DIANA que os da placa de 1,0 m.

5.3.2 Recalques Diferenciais

A Figura 5.22 mostra o plano, referência para apresentação dos recalques diferenciais, que segue o mesmo padrão dos casos expostos anteriormente. Este plano cruza o eixo central do radier, também como nos outros casos. Os recalques diferenciais foram tomados na cota da base do radier

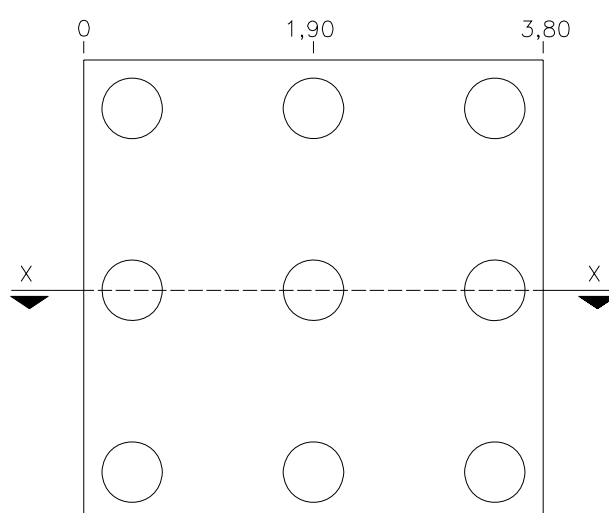


Figura 5.22- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 9 estacas

A Figura 5.23 apresenta os recalques ao longo do corte XX para o Radier com 1,0 m de espessura.

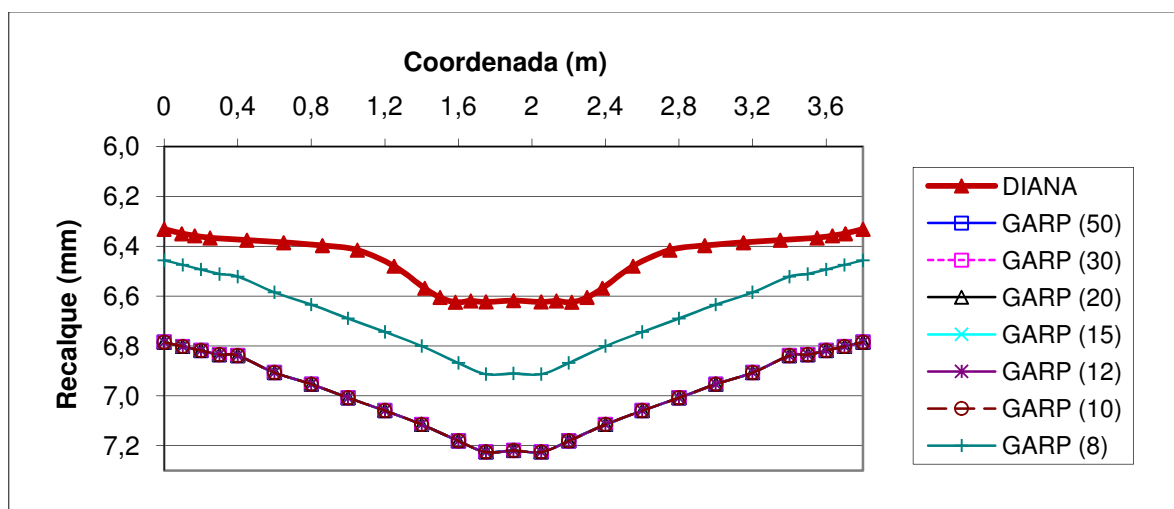


Figura 5.23- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 9 estacas (Placa de 1,0 m)

A Figura 5.23 mostra que a única série de valores dos resultados obtidos com o GARP que foram diferentes das demais foram os correspondentes a $s/D_{máx}=8$ e, seguindo uma tendência inversa do exposto para carga nos elementos, os resultados do GARP que mais se aproximaram dos valores do DIANA foram justamente os que consideram $s/D_{máx}=8$. As diferenças máximas ficaram em torno de 4,23%, para $s/D_{máx}=8$, e 8,33% para os demais espaçamentos relativos.

A Figura 5.24 mostra os recalques diferenciais para o caso da placa de 0,5 m de espessura.

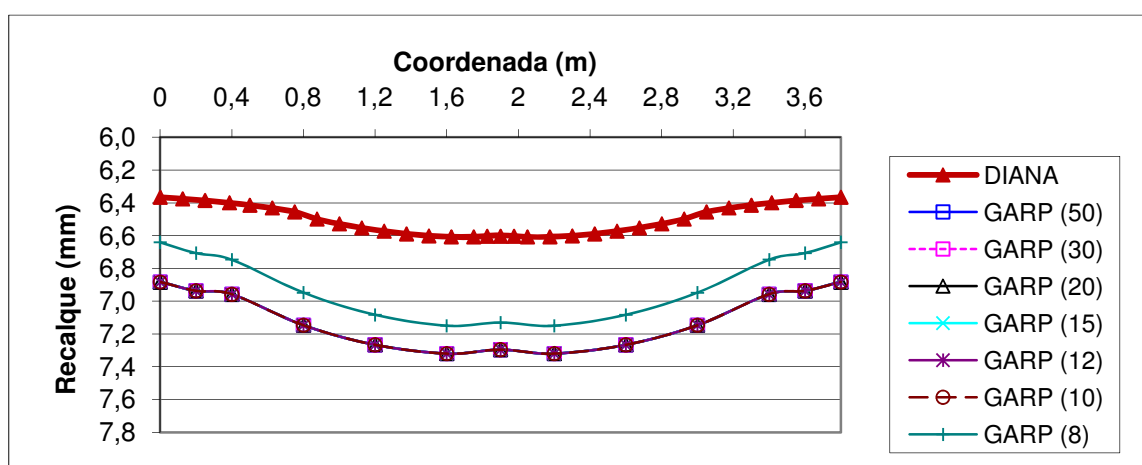


Figura 5.24- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 9 estacas (Placa de 0,5 m)

Os recalques da Radier com 0,5 m de espessura, apresentado na Figura 5.24, seguiram a mesma tendência da placa com 1,0 m de espessura. Os resultados referentes a $s/D_{\text{máx}}=8$ foram os que mais se aproximaram dos valores do DIANA, com diferenças de recalque no ponto central do Radier em torno de 7,41% e 9,50% para os demais valores de $s/D_{\text{máx}}$.

5.4 O RADIER SOBRE 25 ESTACAS

No Radier sobre 25 estacas foram simulados casos com duas diferentes espessuras para a placa, 1,5 m e 0,5 m. O carregamento foi aplicado exatamente igual aos casos anteriores. A Figura 5.25 mostra a geometria do radier estaqueado e numeração das estacas escolhida para apresentação dos resultados.

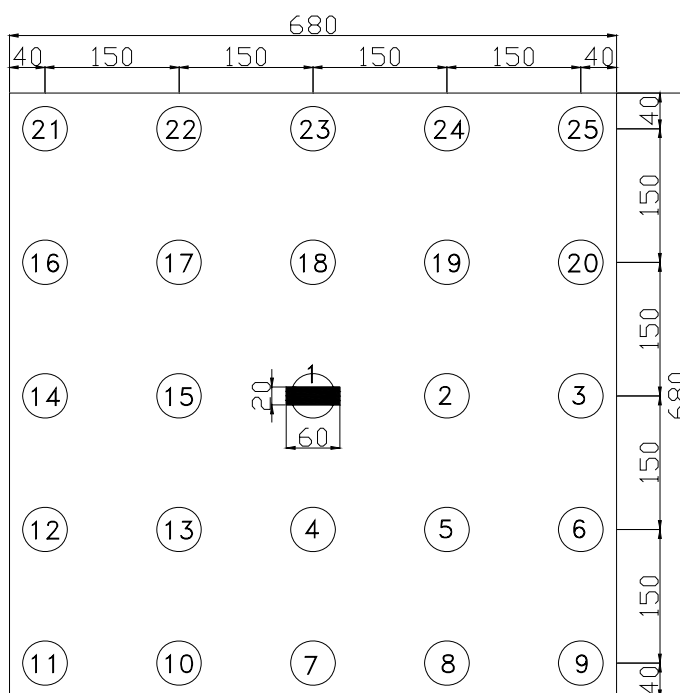


Figura 5.25- Radier sobre 25 estacas com o pilar no centro

A malha usada na simulação do radier sobre 25 estacas apresentou 113.444 nós e 78.349 elementos para o caso da placa de 1,5 m e 79.624 nós e 55.103 elementos no caso da placa de 0,5 m. A Figura 5.26 apresenta detalhes da malha e condições de contorno.

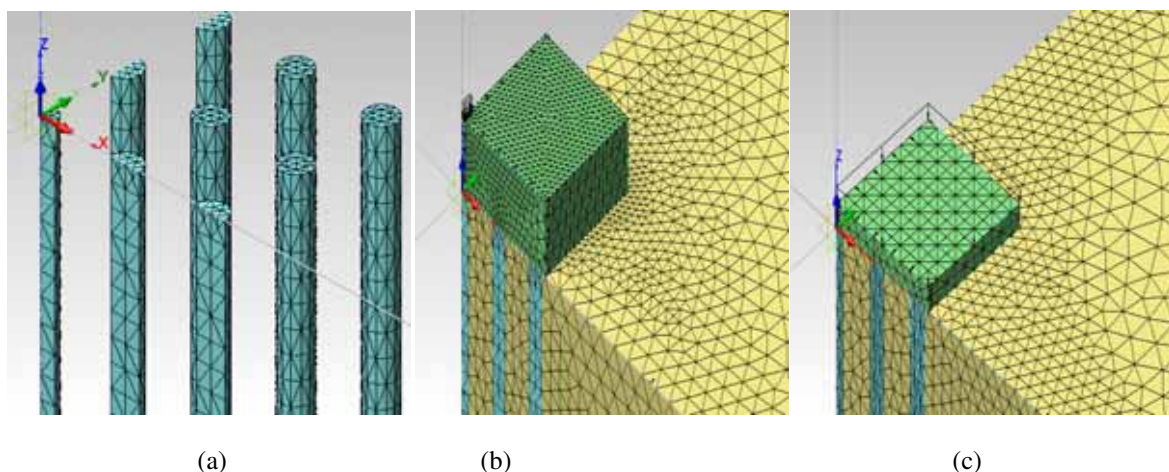


Figura 5.26- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 25 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,5 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)

5.4.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

Neste e nos casos posteriores, os valores de “porcentagens” negativas de carga nas estacas, determinados para os radiers mais rígidos, não tem significado matemático. A razão pela qual são colocados esses valores é o fato de que o GARP previu reações de tração nas estacas desses casos, assim, para que sejam comparados os valores determinados pelos dois programas pontualmente, optou-se por esta forma de apresentação para facilitar a interpretação e análise dos resultados.

São apresentadas as cargas nas estacas do canto, da diagonal e da borda do Radier, conforme Figura 5.26. A Figura 5.27 apresenta os resultados de carga mobilizada pelos elementos para o caso da placa de 1,5 m. Neste caso ocorreram reações de tração em algumas estacas, “porcentagens” negativas, para $s/D_{\text{máx}}$ menores que 15.

A Figura 5.27 mostra que, no GARP, para valores de $s/D_{\text{máx}}=20$ ou maiores, os resultados de carga nos elementos foram os mesmos e, para os demais espaçamentos relativos, houve resultados discrepantes. A Figura 5.28 apresenta as regiões de atribuição dos fatores de interação e ajudará a entender esse efeito

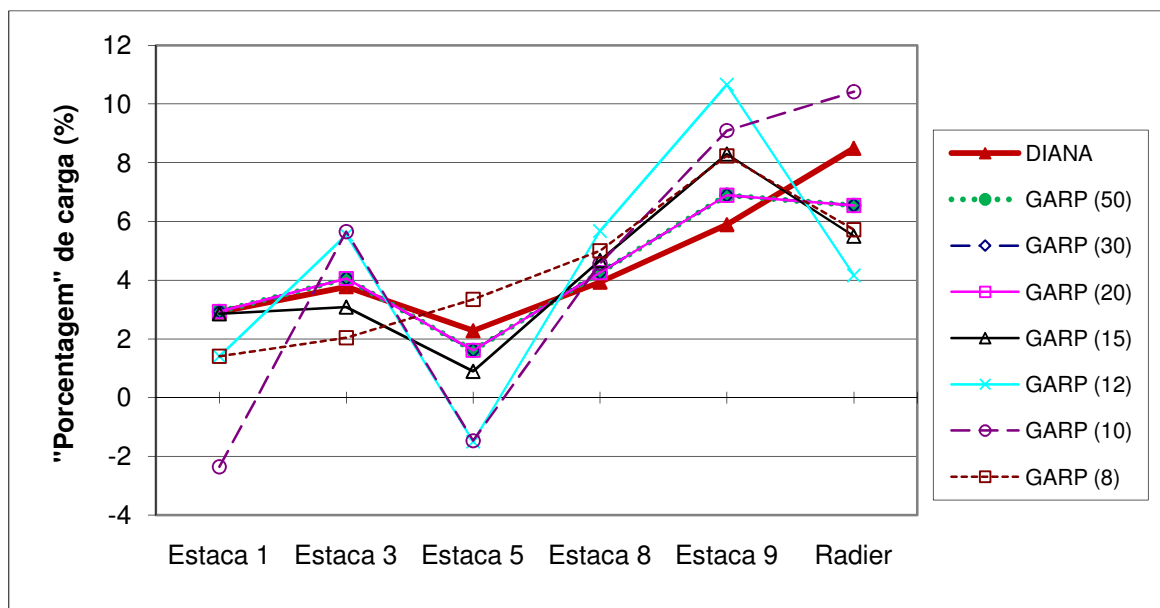


Figura 5.27- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 25 estacas (1,5 m de espessura)

Observa-se ainda, pela Figura 5.27, que as estacas 1 e 5 para os espaçamentos máximos de 10 e 12, apresentaram reações de tração segundo o GARP.

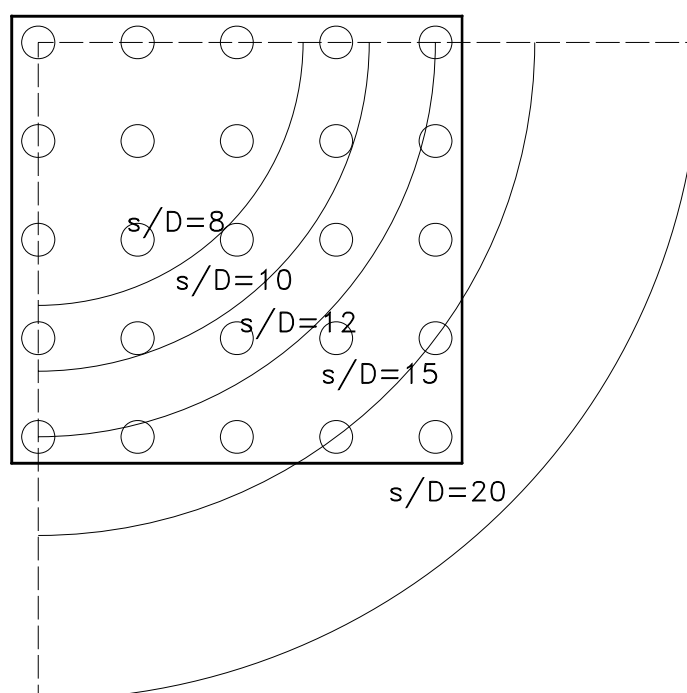


Figura 5.28- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 25 estacas

De acordo com a Figura 5.28 a região com $s/D_{\text{máx}}=20$ ou maiores, cobre todas as distâncias de interação entre as estacas e para os menores limites máximos de interação assumidos

(menores que $s/D_{\text{máx}}=20$), algumas estacas ficam de fora da área de cobertura. Por isso, para valores correspondentes a $s/D_{\text{máx}} < 20$, o programa GARP gerou valores diferentes para as reações nos radiers e estacas.

Ainda com base na Figura 5.27, observa-se que os espaçamentos relativos que determinaram melhores resultados em relação ao DIANA, mantendo uma coerência em todas as estacas, foram os de 20 ou maiores, com diferenças máximas de 22,94% justamente no radier. Os valores de $s/D_{\text{máx}}$ menores que 20 originaram resultados com maiores diferenças em relação aos do DIANA.

A Figura 5.29 apresenta as reações nos elementos para o radier com 0,5 m de espessura.

A Figura 5.29 mostra ainda que, para o radier com 0,5 m de espessura, também para valores de $s/D_{\text{máx}}=20$, $s/D_{\text{máx}}=30$ e $s/D_{\text{máx}}=50$ os resultados foram iguais, mantendo a tendência do caso anterior.

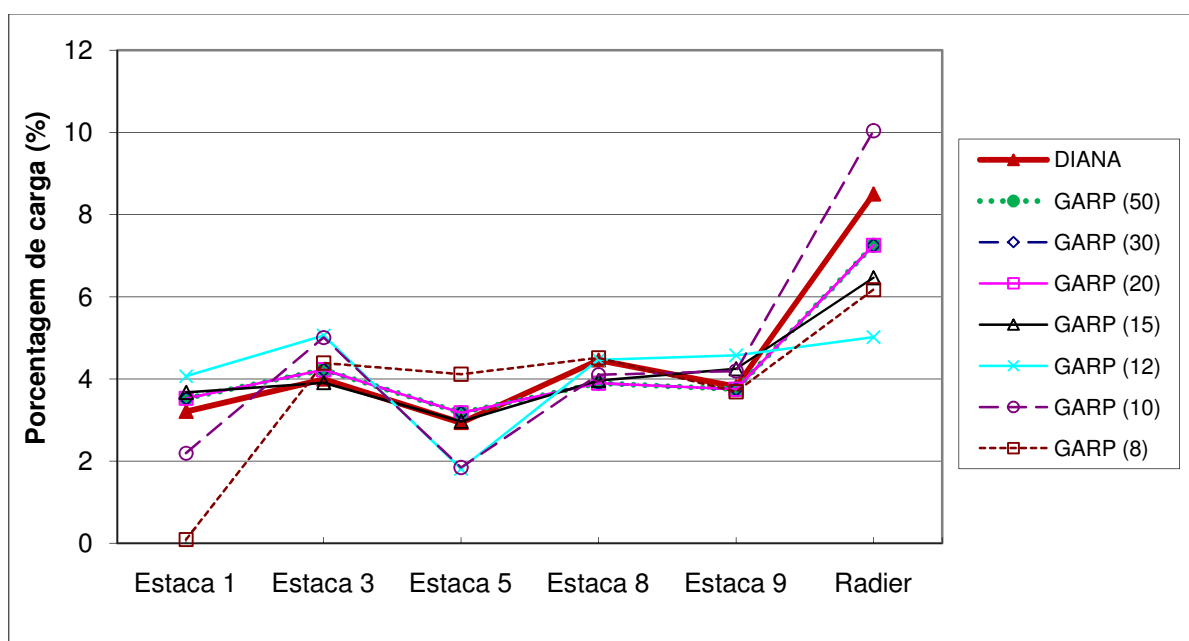


Figura 5.29- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 25 estacas (0,5 m de espessura)

Os resultados do GARP para esse caso (placa com 0,5 m) apresentaram maior convergência em relação ao DIANA quando comparado com o caso da placa rígida e carga concentrada. Isso pode ser atribuído ao fato de que no caso da placa mais flexível, nenhuma estaca do grupo apresentou reação de tração, o que gerou resultados mais favoráveis por parte do GARP. E os espaçamentos relativos máximos que originaram resultados mais próximos,

praticamente para todas as estacas e Radier, foram os de $s/D_{\text{máx}}=20$ ou maiores, com diferença máxima, também no radier, de 14,70%.

Como nos casos anteriores, o DIANA previu que a carga tomada pelo radier foi maior que a prevista pelo GARP, tanto para a placa rígida quanto para a flexível.

5.4.2 Recalques Diferenciais

A Figura 5.30 mostra o plano de referência e as coordenadas utilizadas para apresentação dos recalques ao longo do eixo central do Radier sobre 25 estacas.

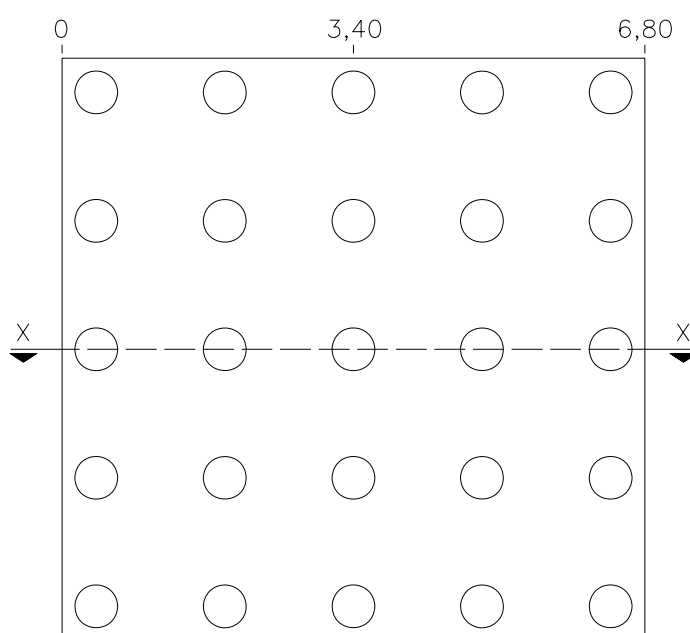


Figura 5.30- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 25 estacas

A Figura 5.31 mostra os recalques ao longo do corte XX no radier com espessura de 1,5 m.

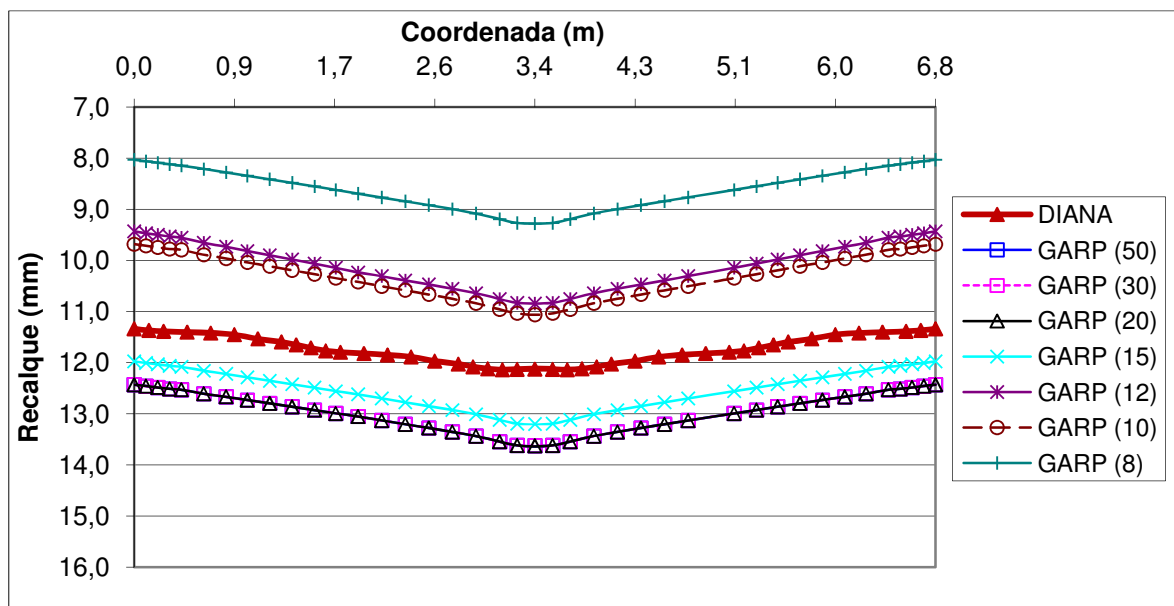


Figura 5.31- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 25 estacas (Placa de 1,5 m)

De acordo com a Figura 5.31 todas as curvas do GARP tiveram praticamente o mesmo formato da curva do DIANA e os resultados do GARP, para os recalques correspondentes a série de valores de $s/D_{\text{máx}}$ maiores que 15, foram iguais. Para esses espaçamentos relativos os recalques calculados pelo GARP foram bem superiores aos do DIANA.

Para valores correspondentes a $s/D_{\text{máx}}$ igual a 15, os recalques do GARP foram ligeiramente superiores aos originados pelo DIANA sendo, inclusive, os que mais se aproximaram, neste caso, dos resultados do DIANA com diferenças máximas de 8,11%.

Para os limites inferiores a 15 para $s/D_{\text{máx}}$, os resultados de recalques calculados pelo GARP foram valores menores que os do DIANA e com maiores diferenças.

Um fato não esperado para esse caso foi o que aconteceu para os espaçamentos relativos de 10 e 12 no GARP. Era esperado que os recalques calculados para o espaçamento de 12 fossem maiores que os gerados para o espaçamento de 10 e isso não ocorreu. Uma possível explicação para esse fato foi que, para esses valores de espaçamento, o GARP apontou algumas estacas no grupo com reações de tração. Estacas sujeitas a carga de tração presentes em um grupo, quanto mais interação com as outras, mais diminuem os recalques das mesmas e isso pode comprometer os resultados esperados.

A Figura 5.32 apresenta os recalques diferenciais para o radier flexível (espessura de 0,5 m).

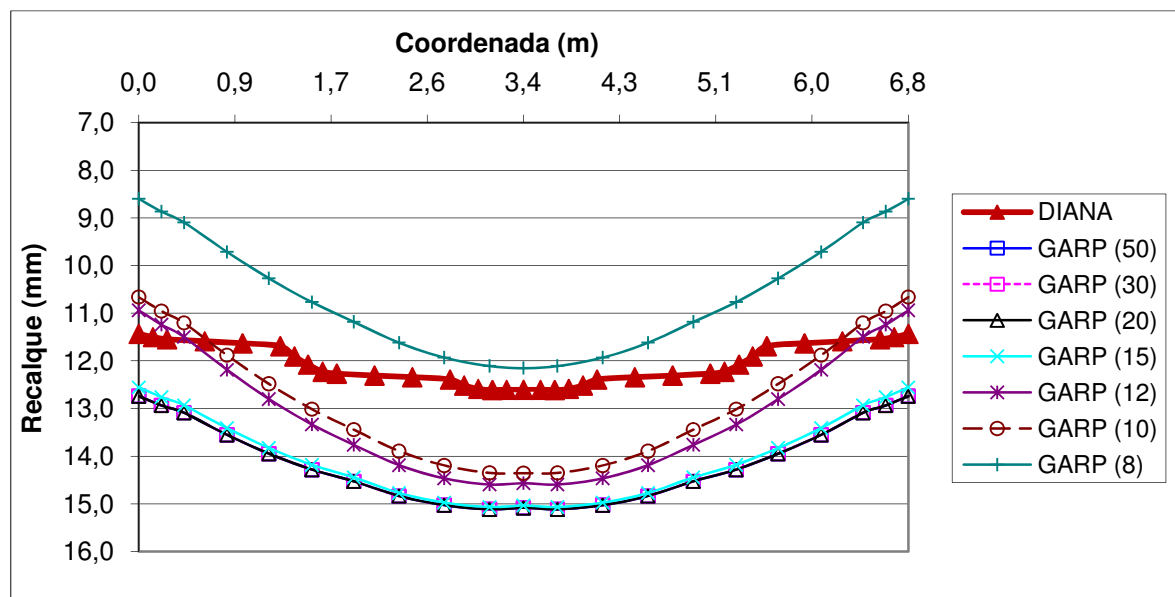


Figura 5.32- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 25 estacas (Placa de 0,5 m)

Como apontado na Figura 5.32, as curvas de recalque do GARP foram bem mais acentuadas (com maiores curvaturas) que a curva do DIANA, com valores bem maiores principalmente na região central do Radier.

O fato do eixo de referência para resultados de recalques (Figura 5.30) coincidir com uma linha de estacas, fez com que a curva do DIANA para o radier com 25 estacas fosse menos “suave”. Isto acontece devido à maior flexibilidade do radier e presença de pontos de apoio (estacas) ao longo do eixo. Já o tamanho dos elementos utilizados no GARP não permitiu esta precisão e a curva acabou sendo suavizada pela continuidade natural da malha. Nos outros casos, mostrados anteriormente, com a placa mais flexível e menores quantidades de estacas como, por exemplo, no radier com 4 estacas, esse efeito não ocorreu. As curvas de recalques nos raders com 2 e 9 estacas, que também apresentam o eixo central do radier coincidente com a linha de estacas, tiveram um acontecimento semelhante, porém menos acentuado.

Quando foi atribuída a espessura de 0,5 m ao radier todas as estacas passaram a estar sujeitas a reações de compressão. Com isso, quanto maior foi o espaçamento relativo máximo maior foi o recalque calculado pelo GARP.

Como no caso da placa com 1,5 m de espessura, para espaçamentos maiores que 15, os recalques gerados pelo GARP foram iguais e maiores que os do DIANA. Para $s/D_{\text{máx}}$ igual a 15 os recalques foram ligeiramente menores que os para espaçamentos maiores e ainda maiores que os do DIANA. Para $s/D_{\text{máx}}$ de 10 e 12 os recalques foram, ainda, um pouco

maiores que os do DIANA. E o espaçamento relativo máximo que gerou recalques que mais se aproximaram dos valores do DIANA foi o de 8, com valores ligeiramente menores, com diferenças máximas de 3,64%.

5.5 O RADIER SOBRE 36 ESTACAS

No Radier sobre 36 estacas, assim como no Radier sobre 25 estacas, foram simuladas dois casos com espessuras diferentes da placa, 1,5 e 0,5 m. O carregamento que foi aplicado foi exatamente igual aos demais casos, 500 kN por estaca. A Figura 5.33 mostra a geometria do Radier de 1,5 m de espessura e numeração das estacas escolhida para apresentação dos resultados.

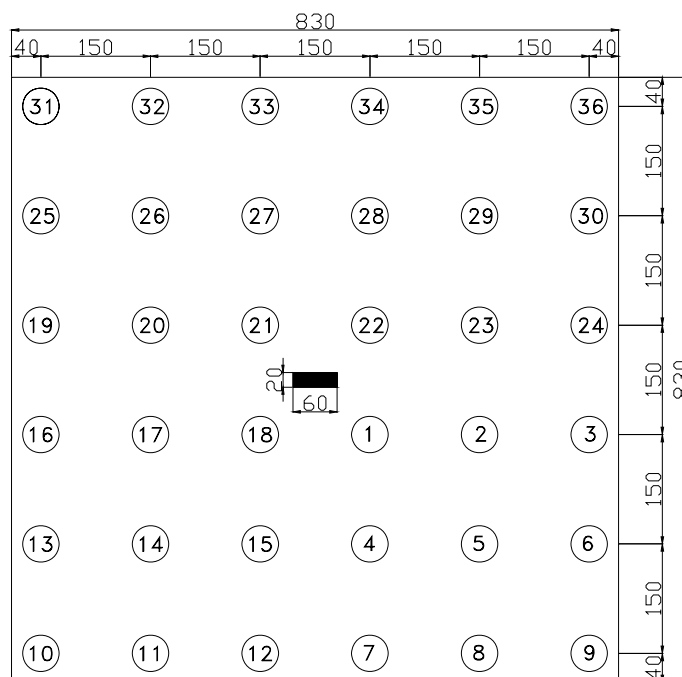


Figura 5.33- Radier sobre 36 estacas com o pilar no central

As malhas desse caso apresentaram 119.341 nós e 83.801 elementos para a placa de 1,5 m de espessura e 77.093 nós e 53.340 elementos para a placa de 0,5 m. A Figura 5.34 apresenta detalhes da malha e condições de contorno usadas na simulação das duas espessuras de placa.

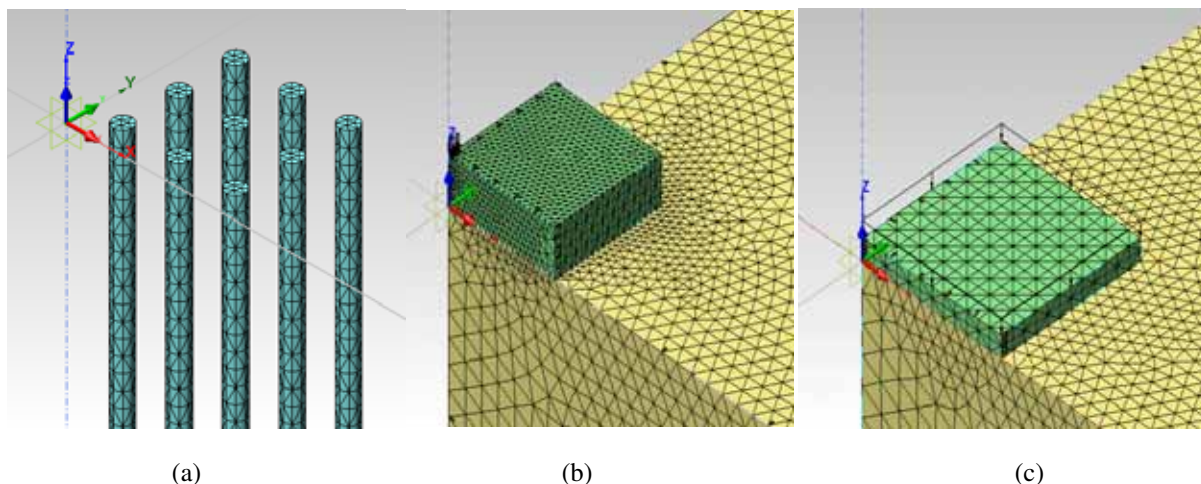


Figura 5.34- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 36 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 1,5 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)

5.5.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

A Figura 5.35 apresenta a carga mobilizada pelos elementos no caso o Radier com espessura de 1,5 m. Do mesmo modo que no caso anterior, foram apresentadas estacas com “porcentagens” negativas, ou seja, submetidas à reações de tração.

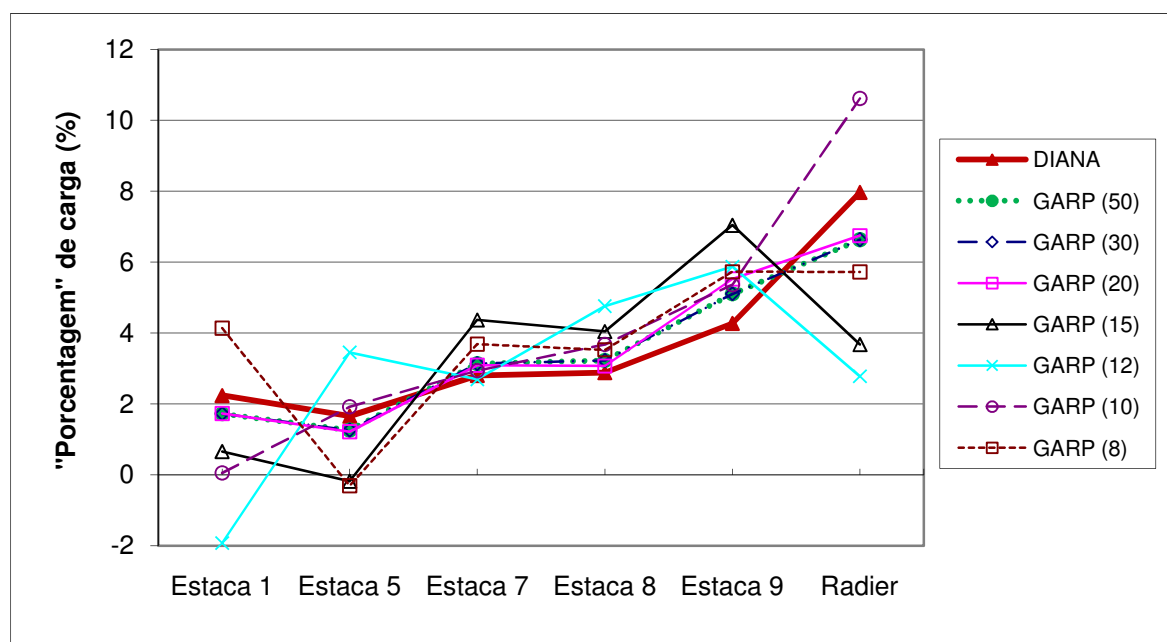


Figura 5.35- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas (1,5 m de espessura)

Como observado na Figura 5.35, a carga apresentada pelo GARP com espaçamentos relativos de 30 e 50 foram iguais e os que mais se aproximaram do previsto pelo DIANA com

diferenças máximas 16,78%. Para os demais espaçamentos limites os valores foram discrepantes, com muita divergência entre eles e com o próprio DIANA.

Pode-se observar que, para este grupo, a incidência de estacas submetidas a reações de tração é bem maior que nos casos anteriores para o radier mais rígido. A Figura 5.35 mostra que as estacas 1 e 5 estão tracionadas para alguns $s/D_{\text{máx}}$.

A Figura 5.36 mostra os limites de espaçamentos relativos considerados na análise feita pela estaca do canto.

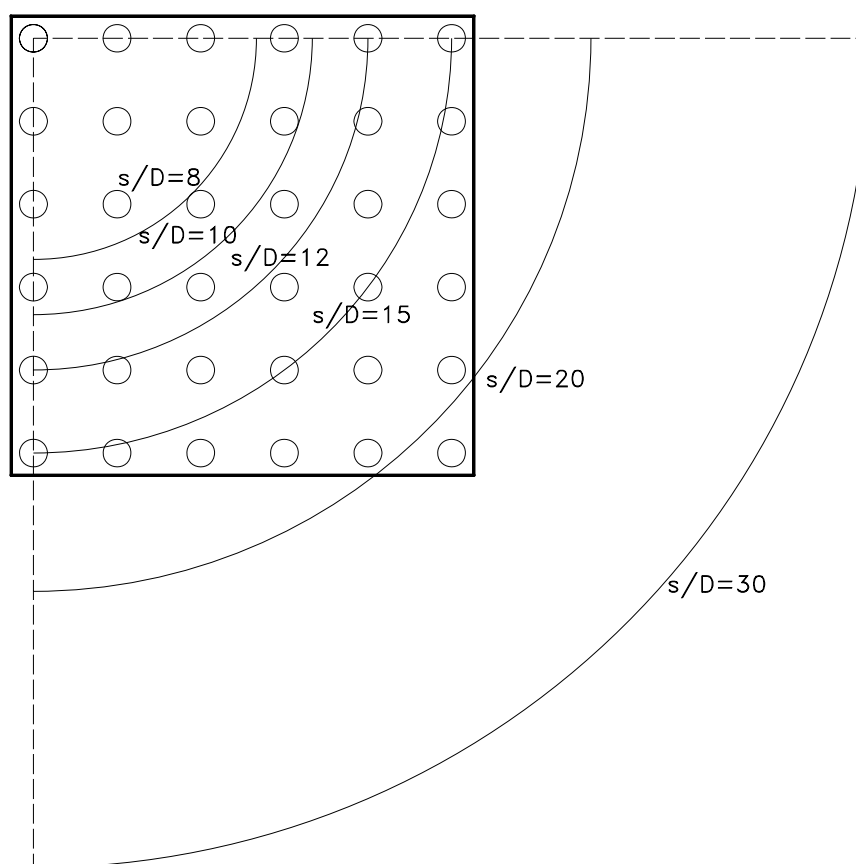


Figura 5.36- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 36 estacas

Conforme apresentado na Figura 5.36, até o espaçamento relativo máximo de 20 as estacas não estão totalmente cobertas para atribuição dos fatores de interação e os espaçamentos de 30 e 50 já estão na região que engloba todas as estacas, por isso que os resultados foram iguais para esses dois últimos. Para $s/D_{\text{máx}}=20$, apenas a estaca do outro canto não está na zona de cobertura logo seus resultados, tanto para carga nos elementos quanto para recalques,

foram apenas um pouco diferentes dos espaçamentos de 30 e 50. Para os demais espaçamentos relativos os resultados para carga nos elementos deram muito diferentes, visto que, todos apresentam muitas estacas fora da zona de cobertura.

A Figura 5.37 mostra os resultados da previsão de carga nas estacas e radier para o caso da placa de 0,5 m de espessura.

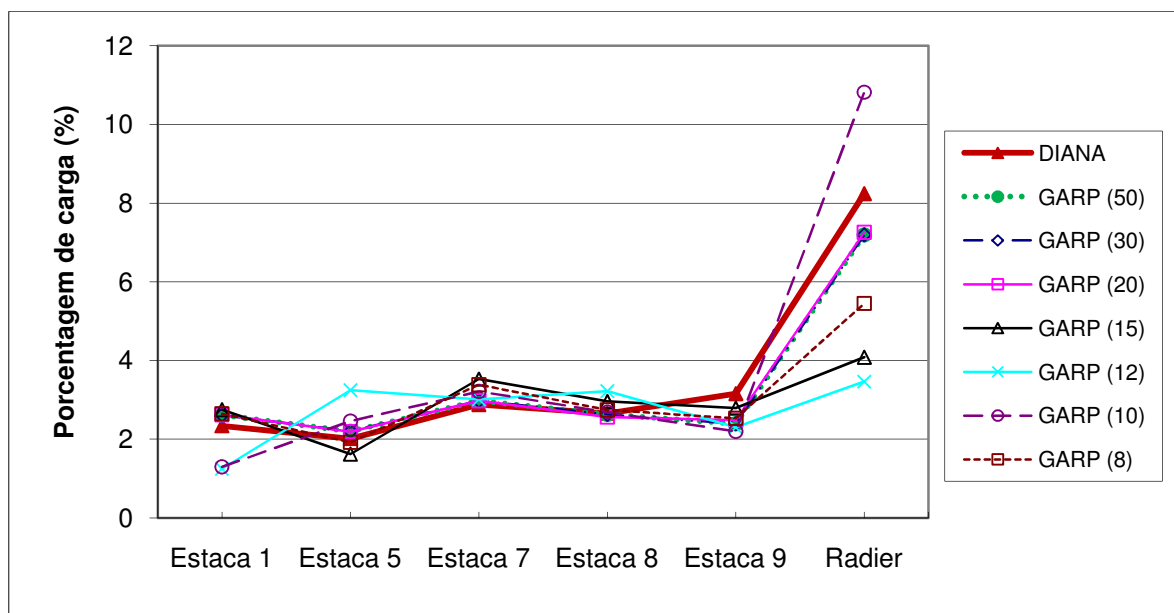


Figura 5.37- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas (0,5 m de espessura)

Os resultados no caso do radier de 0,5 m de espessura com estacas submetidas a reações de compressão, mostrado na Figura 5.37, tiveram uma acurácia maior do GARP em relação ao DIANA, para todos os espaçamentos relativos. Os resultados que mais se aproximaram dos do DIANA foram para grandes espaçamentos relativos de 30 e 50, com diferença máxima de 12,70%. Para os demais espaçamentos limites os resultados oscilaram bastante ao longo de todas as estacas e radier.

Cabe destacar que, também para este caso, o DIANA previu mais carga no radier que o GARP, tanto para a placa de 1,5 m quanto para a de 0,5 m.

5.5.2 Recalques Diferenciais

O plano adotado como referência para apresentação dos recalques do radier é o mesmo adotado para os casos anteriores, ou seja, corta o eixo central do radier. A Figura 5.38 mostra o plano e as coordenadas usadas nesse caso.

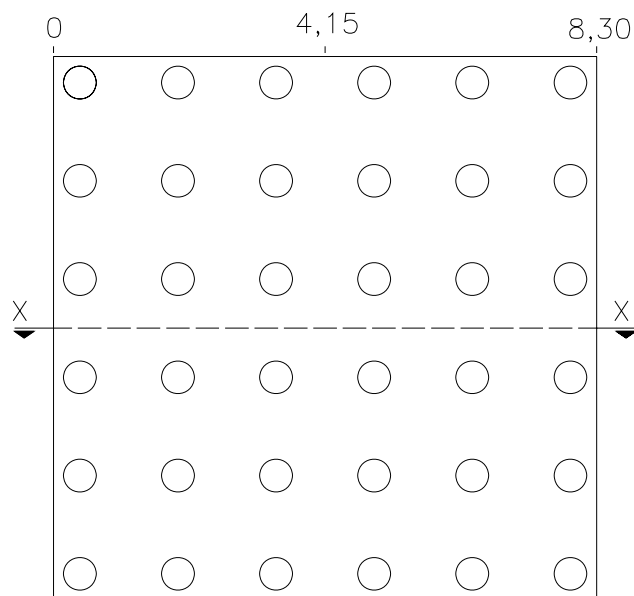


Figura 5.38- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais (radier sobre 36 estacas)

A Figura 5.39 apresenta os recalques diferenciais ao longo do corte XX para o radier sobre 36 estacas com 1,5 m de espessura.

Na Figura 5.39, os recalques previstos pelo GARP ao longo do radier em referência foram iguais para espaçamentos relativos de 30 e 50 e, para $s/D_{\text{máx}}=20$, os valores foram bem próximos aos citados. Nota-se que, para esses três espaçamentos relativos, os recalques foram superiores aos calculados pelo DIANA, com diferenças máximas de 13,93%.

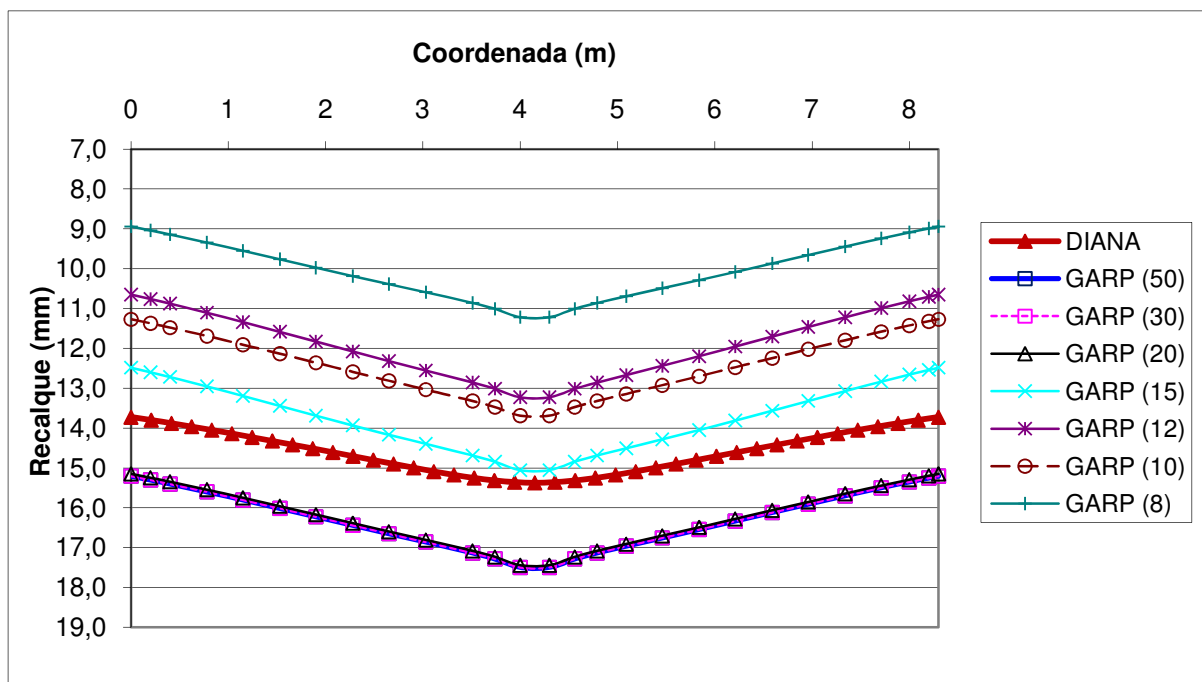


Figura 5.39- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas (Placa de 1,5 m)

Para o espaçamento relativo máximo de 15 no GARP, a diferença em relação ao DIANA foi bem pequena, 1,95% no ponto central do radier. Esse espaçamento foi o que mais se aproximou do DIANA, com valores inferiores de $s/D_{\text{máx}}$, os recalques foram menores.

Cabe destacar, também, que nesse caso era esperado que o espaçamento relativo máximo de 12 originasse recalques maiores que o espaçamento de 10 e isso não ocorreu. O fato que pode explicar esse evento é o mesmo do caso anterior (25 estacas), pois os resultados apontavam algumas estacas submetidas à reações de tração.

A Figura 5.40 apresenta os recalques ao longo do corte XX no radier de 0,5 m de espessura.

De acordo com a Figura 5.40 observa-se que as curvas previstas pelo GARP, para todos os espaçamentos relativos, tiveram maiores curvaturas quando comparadas com a curva do DIANA.

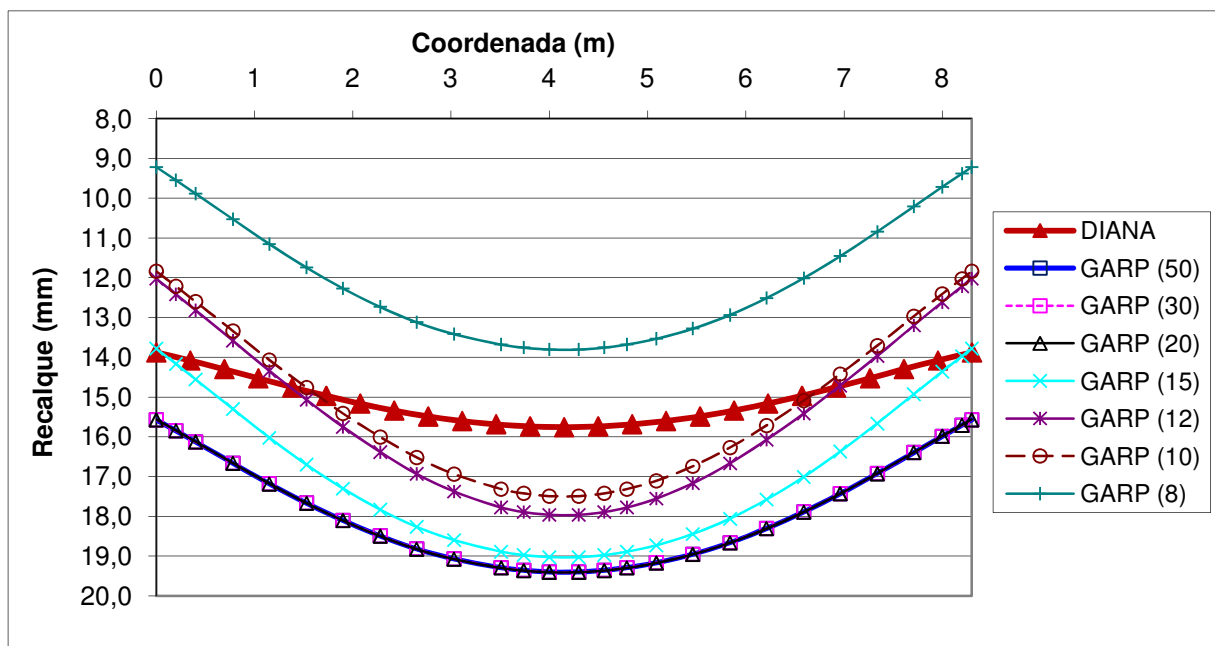


Figura 5.40- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas (Placa de 0,5 m)

A Figura 5.40 destaca também que no GARP, como no caso do radier sobre 36 estacas com 1,5 m, os espaçamentos relativos de 30 e 50 originaram o mesmo resultado para os recalques e o espaçamento de 20 ficou bem próximo destes dois. O espaçamento relativo máximo de 10 foi o que mais se aproximou dos valores do DIANA, com diferença no centro do radier de 11,06%.

5.6 O RADIER SOBRE 64 ESTACAS

Assim como os demais casos, o radier sobre 64 estacas foi simulado considerando duas espessuras diferentes para a placa. A placa mais rígida foi simulada com 2,0 m e a placa flexível continuou com 0,5 m, mantendo o mesmo critério. A Figura 5.41 apresenta a geometria do radier com o pilar central e a numeração adotada para as estacas na análise.

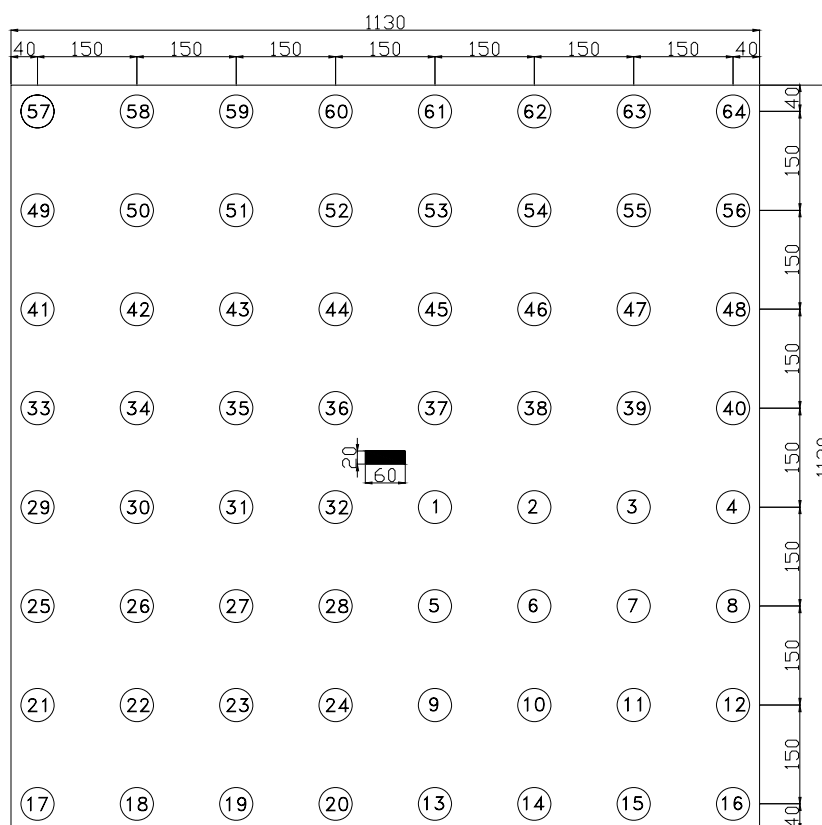


Figura 5.41- Radier sobre 64 estacas com o pilar no central

A malha utilizada na simulação com o DIANA, para esse caso, apresentou 170.675 nós e 123.000 elementos para a placa de 2,0 m de espessura e 105.403 nós e 74.462 elementos para a placa de 0,5 m. A Figura 5.42 apresenta detalhes das malhas e condições de contorno utilizadas nas simulações.

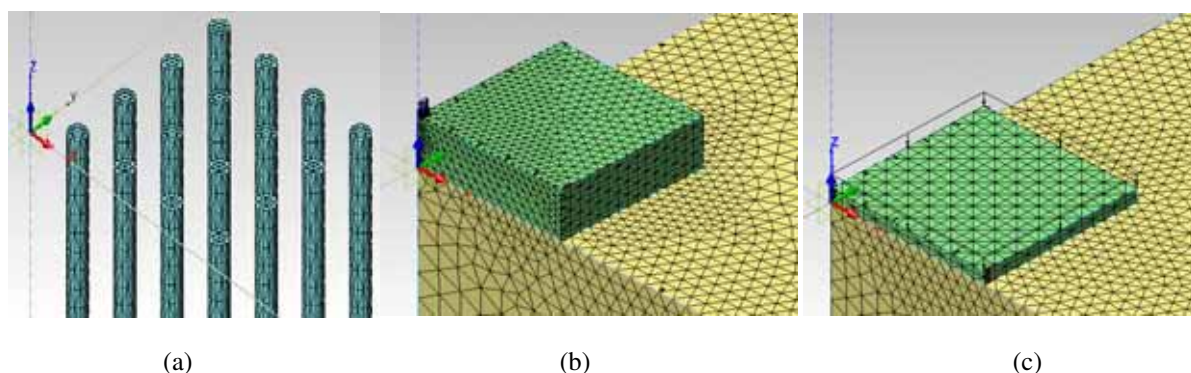


Figura 5.42- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 64 Estacas: (a) Detalhe da malha das estacas; (b) Ampliação da vista próxima ao radier (placa com 2,0 m de espessura); (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 0,5 m de espessura)

5.6.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

A Figura 5.43 apresenta a carga nas estacas da diagonal e da borda no caso de 2,0 m de espessura. Como nos casos anteriores, com 25 e 36 estacas, as “porcentagens” negativas correspondem a estacas sujeitas a reações de tração.

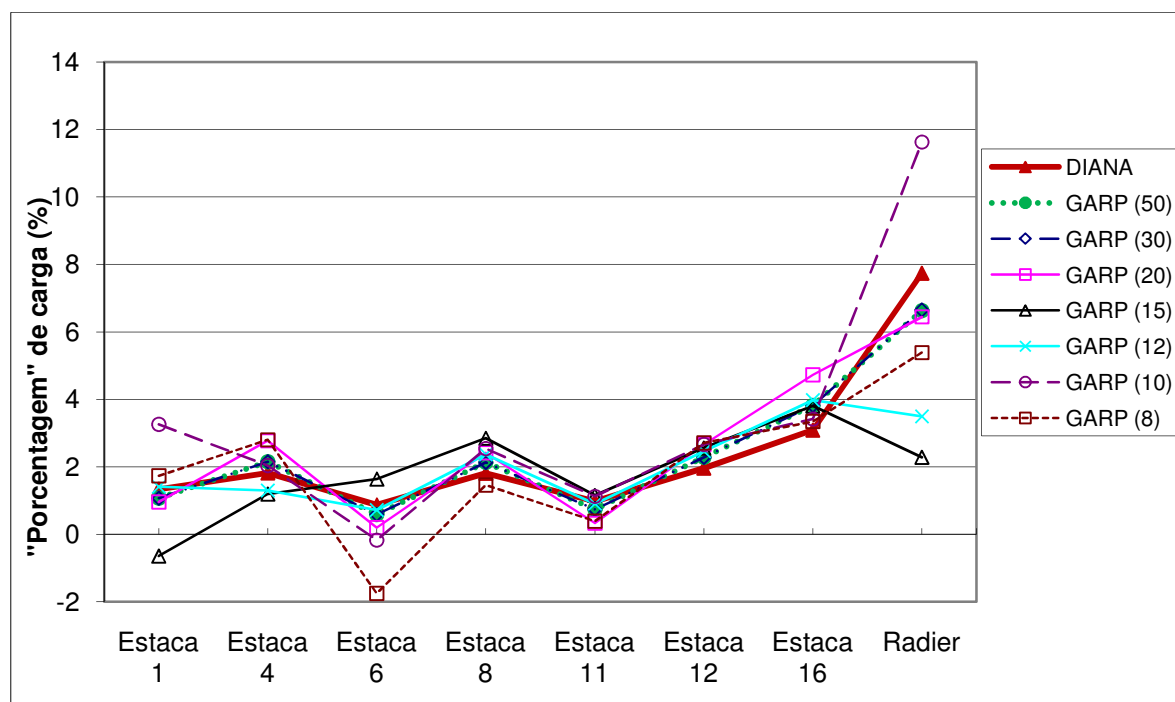


Figura 5.43- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 64 estacas (2,0 m de espessura)

Conforme mostrado na Figura 5.43, a carga nas estacas e radier referente aos espaçamentos relativos de 50 e 30 foram iguais e, conforme mostra a Figura 5.44, somente estes dois espaçamentos estão dentro da região de atribuição dos fatores de interação que cobre todas as estacas do grupo, os demais espaçamentos relativos geraram resultados diferentes.

Ainda de acordo com a Figura 5.43, observa-se que as estacas 1 e 6, segundo o GARP, estão submetidas à cargas de tração em alguns casos.

Os espaçamentos relativos do GARP que originaram valores mais coerentes em relação aos resultados do DIANA foram justamente os dois maiores, 50 e 30. A maior diferença para estes valores limites de s/D foi referente ao radier, com discrepância de 14,30%.

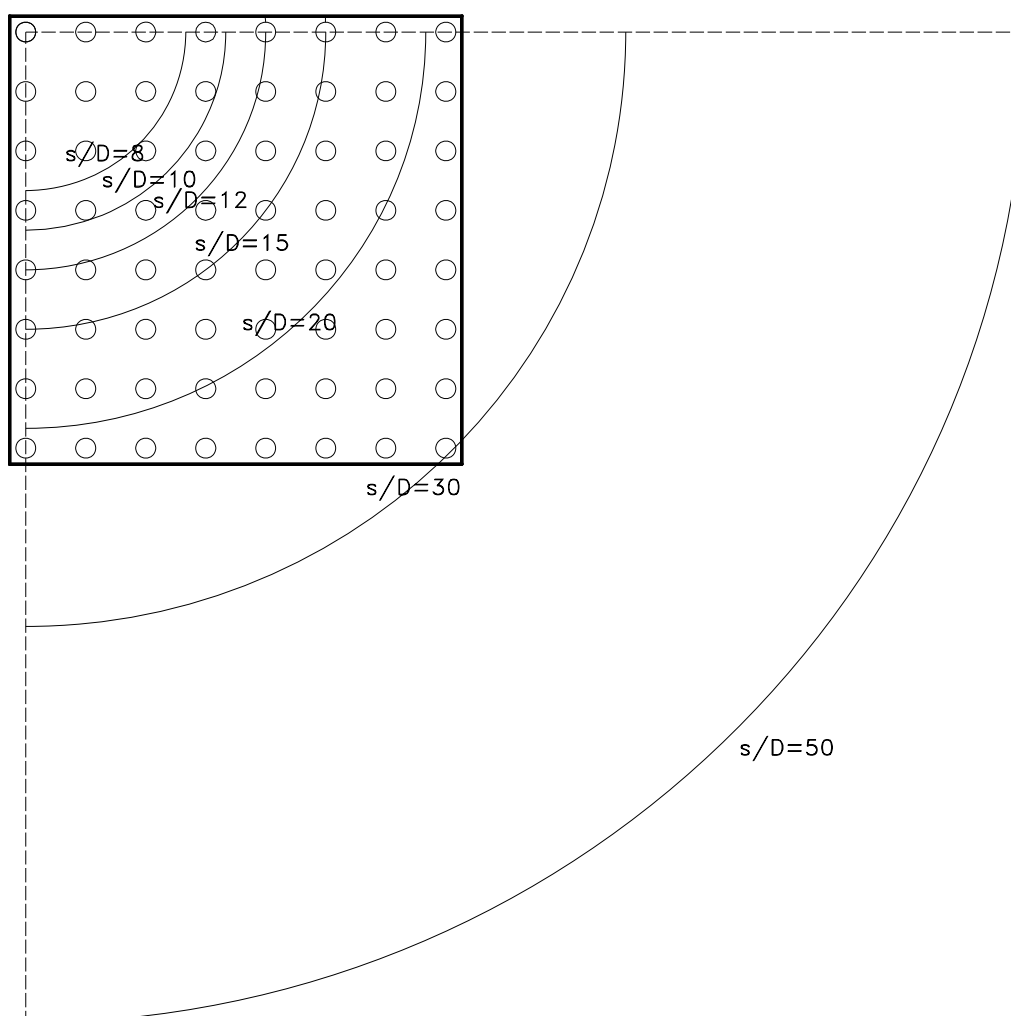


Figura 5.44- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 64 estacas

Neste caso houve um número grande de estacas submetidas a reações de tração segundo o GARP. De acordo com este programa, para espaçamentos relativos de 15, 10 e 8, as estacas 1, 3 e 6, respectivamente, estavam submetidas a cargas de tração.

A Figura 5.45 apresenta a carga nas estacas e radier para a placa flexível com 0,5 m de espessura.

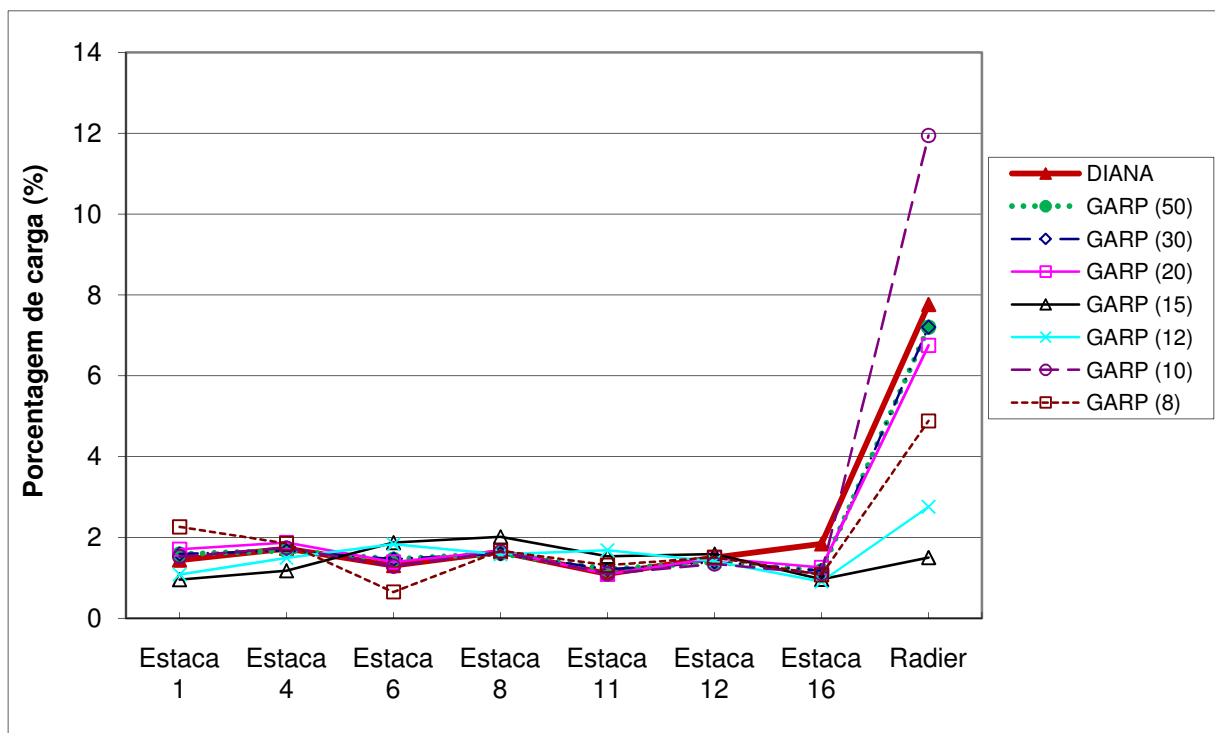


Figura 5.45- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 64 estacas (0,5 m de espessura)

Para este caso as diferenças entre os valores do GARP e do DIANA foram menores que no caso do radier de 2,0 m de espessura, ou seja, os valores das cargas nas estacas e radier, previstas pelos dois programas, tiveram seus resultados mais convergentes, um em relação ao outro.

Como observado para o caso com a placa de 2,0 m, os valores do GARP referentes aos espaçamentos relativos de 30 e 50 foram iguais. Estes foram, inclusive, os que se mantiveram mais coerentes em relação aos valores do DIANA ao longo de todas as estacas e radier analisados, com maiores diferenças para o radier de apenas 7,2%. Os valores relativos a $s/D_{\text{máx}}=20$ foram bem próximos dos com $s/D_{\text{máx}}=30$ e $s/D_{\text{máx}}=50$ e tiveram, também, pequenas diferenças em relação ao M.E.F.

O fato dos resultados referentes ao espaçamento relativo máximo de 20 apresentar pequenas diferenças em relação aos maiores não se apresentou como óbvio, uma vez que muitas estacas deste caso se apresentam na região entre 20 e 30 diâmetros. Assim, o esperado seria que estas diferenças fossem um pouco maiores.

As diferenças para os demais espaçamentos relativos no GARP foram um pouco maiores em relação ao DIANA, apesar de terem sido também pequenas.

Também seguindo a tendência dos casos anteriores, neste, as cargas tomadas pelo radier previstas pelo DIANA foram superiores às do GARP, tanto para o caso da placa de 2,0 m quanto para a placa de 0,5 m de espessura.

5.6.2 Recalques Diferenciais

O plano usado como referência para a verificação dos recalques diferenciais ao longo do radier sobre 64 estacas cruza o eixo central do radier. A Figura 5.46 mostra as coordenadas de referência e o plano considerado.

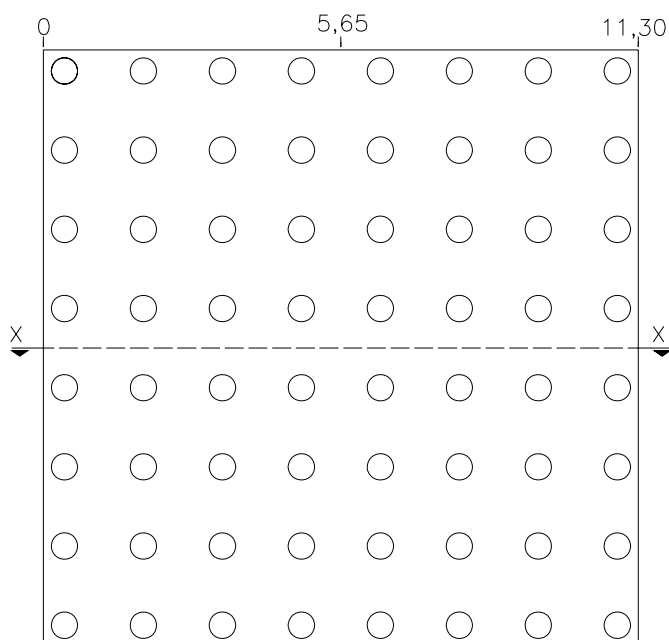


Figura 5.46- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 64 estacas

A Figura 5.47 apresenta os recalques ao longo do radier sobre 64 estacas para o caso com a espessura de 2,0 m para a placa.

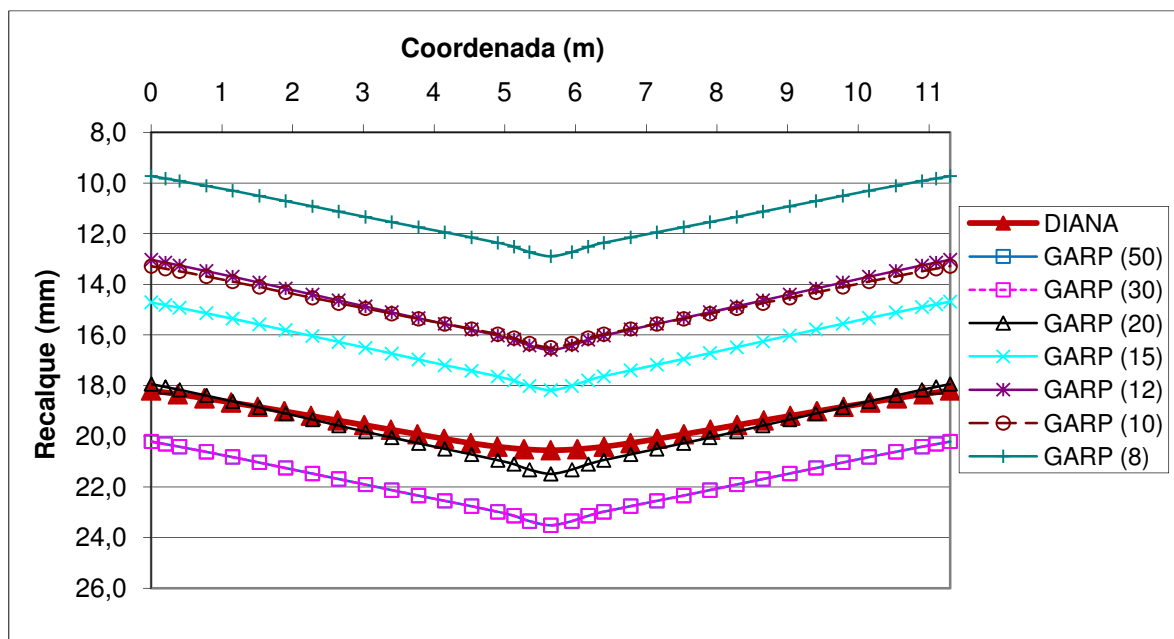


Figura 5.47- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 64 estacas (Placa de 2,0 m)

Na Figura 5.47, o formato das curvas do GARP e do DIANA são praticamente iguais e, seguindo a mesma tendência da carga mobilizada nas estacas e radier, os valores de recalque no GARP para espaçamentos relativos de 30 e 50 foram iguais. Estes dois espaçamentos indicaram recalques maiores que os do DIANA e a diferença máxima ficou em 14,47% no centro do radier.

A curva do GARP que mais se aproximou do DIANA foi para $s/D_{\text{máx}}=20$, com pequena diferença na região central (4,57%). Os recalques das bordas do radier foram praticamente os mesmos nos dois programas para esse espaçamento relativo máximo.

Para os valores menores de $s/D_{\text{máx}}$ no GARP, os respectivos valores de recalques foram menores e com razoável discrepância em relação aos do DIANA.

Cabe destacar que no GARP, a ocorrência de algumas estacas submetidas à reação de tração para o espaçamento relativo máximo de 10, fez com que este gerasse valores de recalques maiores que os referentes ao espaçamento relativo máximo de 12, o que não era esperado, se todas as estacas estivessem submetidas a reações de compressão. Isso poderá ser verificado na Figura 5.48 que mostra os recalques do radier flexível com estacas submetidas somente a compressão. Assim, o que geralmente se espera do GARP é que quanto maior a região de atribuição dos fatores de interação, ou seja, maior o $s/D_{\text{máx}}$, maiores os recalques calculados por esse programa.

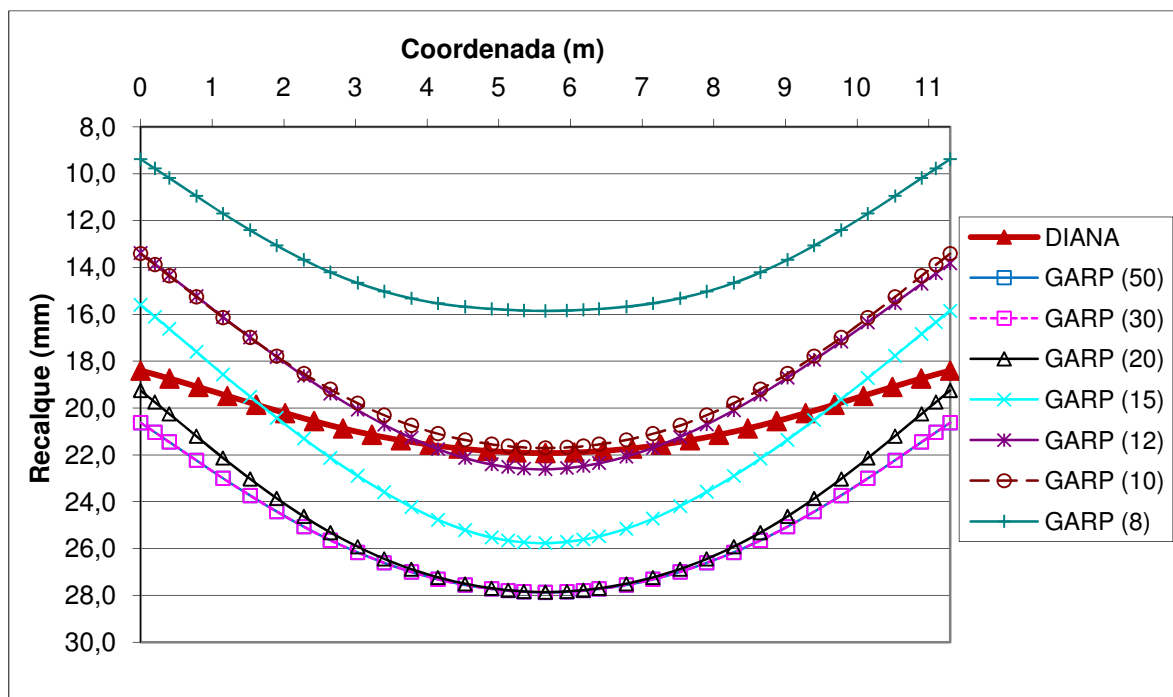


Figura 5.48- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 64 estacas (Placa de 0,5 m)

De acordo com a Figura 5.48 o formato das curvas do GARP foram um pouco diferentes do da curva do DIANA. As curvas do GARP tiveram concavidades mais acentuadas (maiores curvaturas).

O GARP mostrou que os valores relativos aos espaçamentos de 30 e 50 foram iguais e os referentes à curva de 20 foram levemente diferentes em relação a esses dois. Para o espaçamento de 20 as diferenças foram pequenas nas bordas (4,59%) e maiores na região central do radier aonde chegou a 27,10%.

As duas curvas que mais se aproximaram dos valores do DIANA na borda do radier foram as referentes aos espaçamentos relativos máximos de 12 e 10, sendo que esta última teve diferença bem pequena na região central (1,01%). Nas bordas a curva que mais se aproximou do M.E.F. foi a de $s/D_{\text{máx}}=20$. Na média, o melhor espaçamento relativo máximo neste foi o de 15.

5.7 O RADIER SOBRE 100 ESTACAS

No caso do radier sobre 100 estacas foram consideradas duas espessuras na análise, a primeira de 2,0 m (placa um pouco mais rígida) como no caso do radier sobre 64 estacas e a segunda de 0,5 m (placa flexível) como os demais casos. A Figura 5.49 apresenta a geometria do radier

convencional com pilar central e a numeração adotada nas análises. Cabe lembrar que a diferença da geometria entre os dois radies de espessuras diferentes está no fato de que o de 0,5 m de espessura não apresenta o pilar central e a carga é uniformemente distribuída em toda a superfície do mesmo.

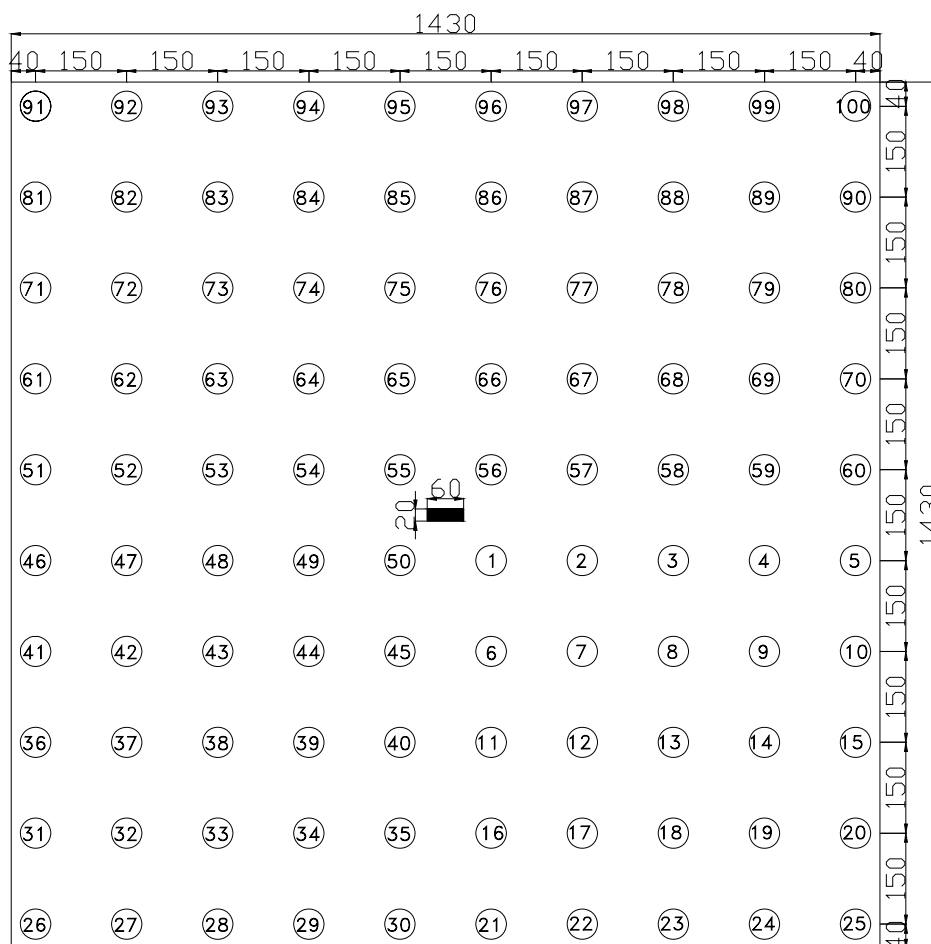


Figura 5.49- Radier sobre 100 estacas com o pilar no central

A malha utilizada nas análises apresentou 255.617 nós e 182.762 elementos para o caso da placa de espessura 2,0 m e 189.207 nós e 138.131 elementos para o caso da placa de 0,5 m. A Figura 5.50 mostra a configuração das malhas utilizadas.

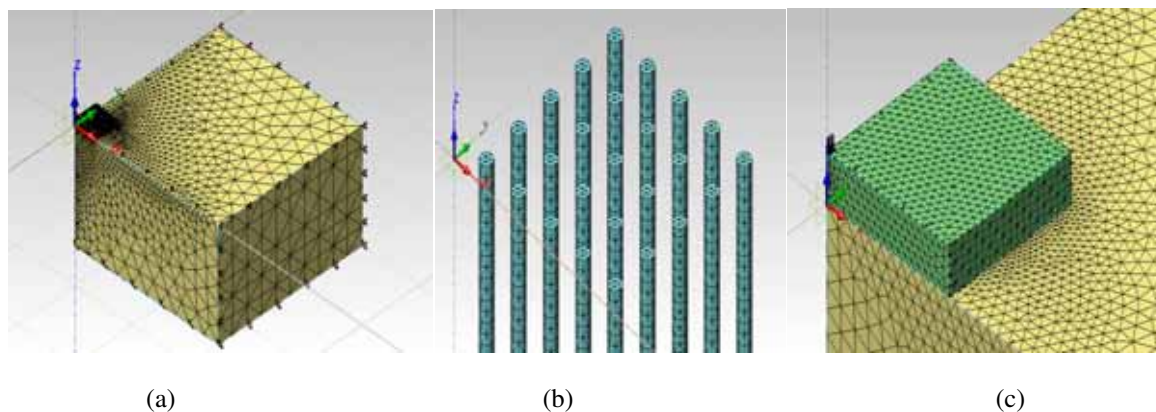


Figura 5.50- Detalhe das malhas utilizadas na modelagem do radier com 100 Estacas: (a) Vista geral; (b) Detalhe da malha das estacas; (c) ampliação da vista próxima ao radier (placa com 2,0 m de espessura)

5.7.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

A seguir, serão apresentados os resultados de carga mobilizada pelos elementos do caso do radier sobre 100 estacas. Serão mostrados os resultados para os dois casos de espessura das placas, 2,0 m e 0,5 m. A numeração das estacas está de acordo com a Figura 5.49. Como nos casos anteriores de 25, 36 e 64 estacas com a placa mais rígida, neste também houve algumas estacas com reações de tração. Assim, serão mostradas “porcentagens” negativas para essas estacas, porém isso foi feito apenas para uma melhor visualização e comparação dos resultados dos dois programas.

A Figura 5.51 apresenta a carga mobilizada pelos elementos no radier mais rígido, com 2,0 m.

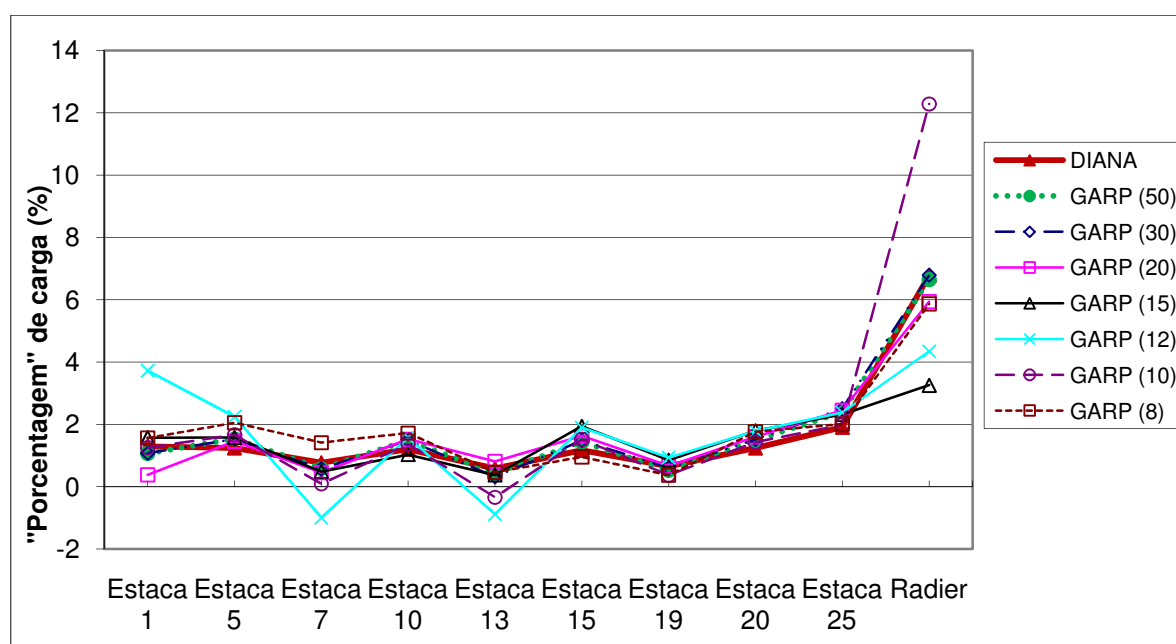


Figura 5.51- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 100 estacas (2,0 m de espessura)

A Figura 5.51 destaca que, para todos os valores de espaçamento relativos máximos no GARP, os resultados das cargas nos elementos foram diferentes. Isso pode ser imputado ao fato de que apenas o espaçamento relativo máximo de 50 cobre todas as distâncias de atribuição de fatores de interação entre as estacas, conforme a Figura 5.52, os demais deixam algumas estacas de fora da região. A Figura 5.51 mostra, também, que os piores resultados do GARP, quando comparados com o DIANA, foram para baixos valores de $s/D_{\text{máx}}$ (menores que 20). Nota-se que as estacas 7 e 13, em alguns casos, estão submetidas à reações de tração.

Para espaçamentos relativos de 30 e 50, os resultados foram bem próximos dos do DIANA, até mesmo para o radier. A máxima diferença de carga nas estacas, quando comparadas às respostas dos dois programas, foi de 24,76% e no radier foi de 1,96%. Para os demais espaçamentos as diferenças foram maiores.

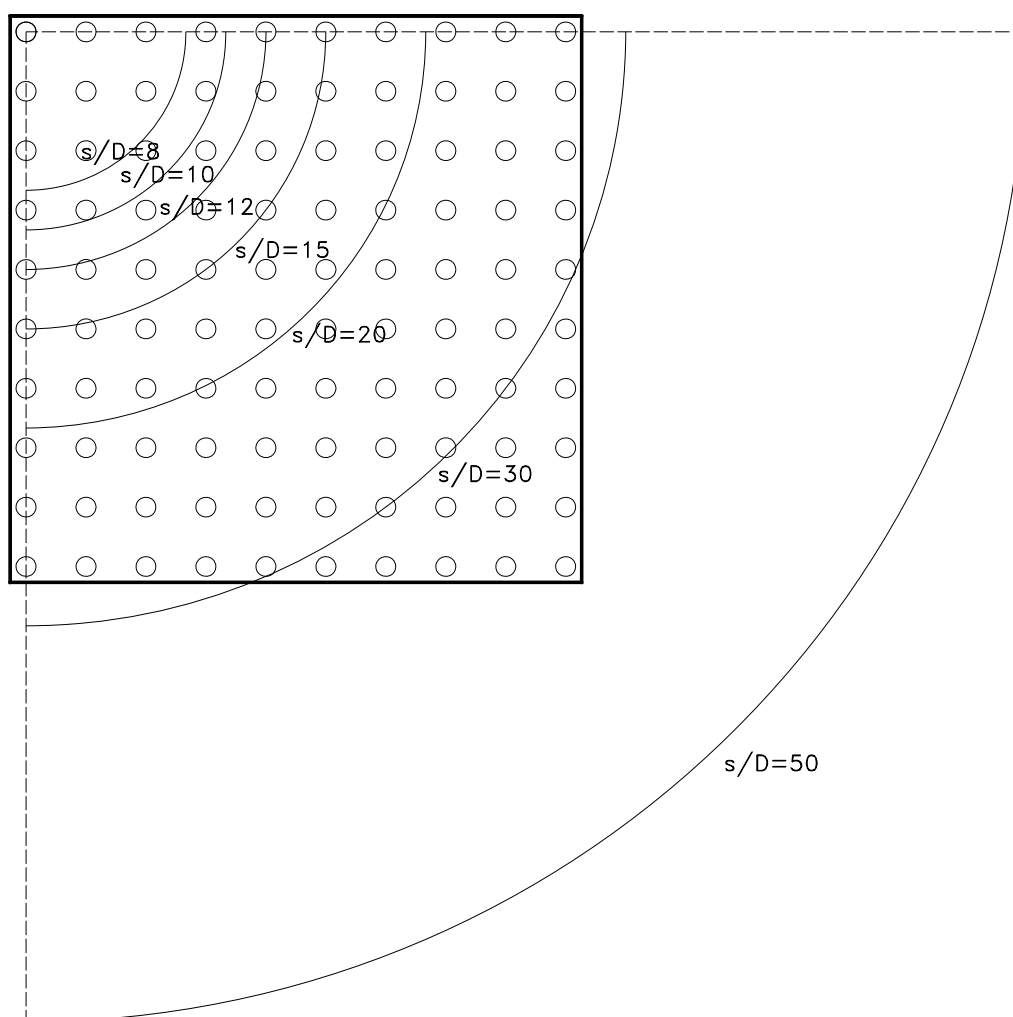


Figura 5.52- Região de atribuição de valores de fatores de interação no programa GARP para o radier sobre 100 estacas

Cabe destacar também, que os resultados do GARP para espaçamentos menores que 15 geraram reações de tração em algumas estacas e isso modifica todo o comportamento esperado do conjunto.

A Figura 5.53 apresenta a carga tomada pelos elementos no radier com 0,5 m de espessura (radier flexível).

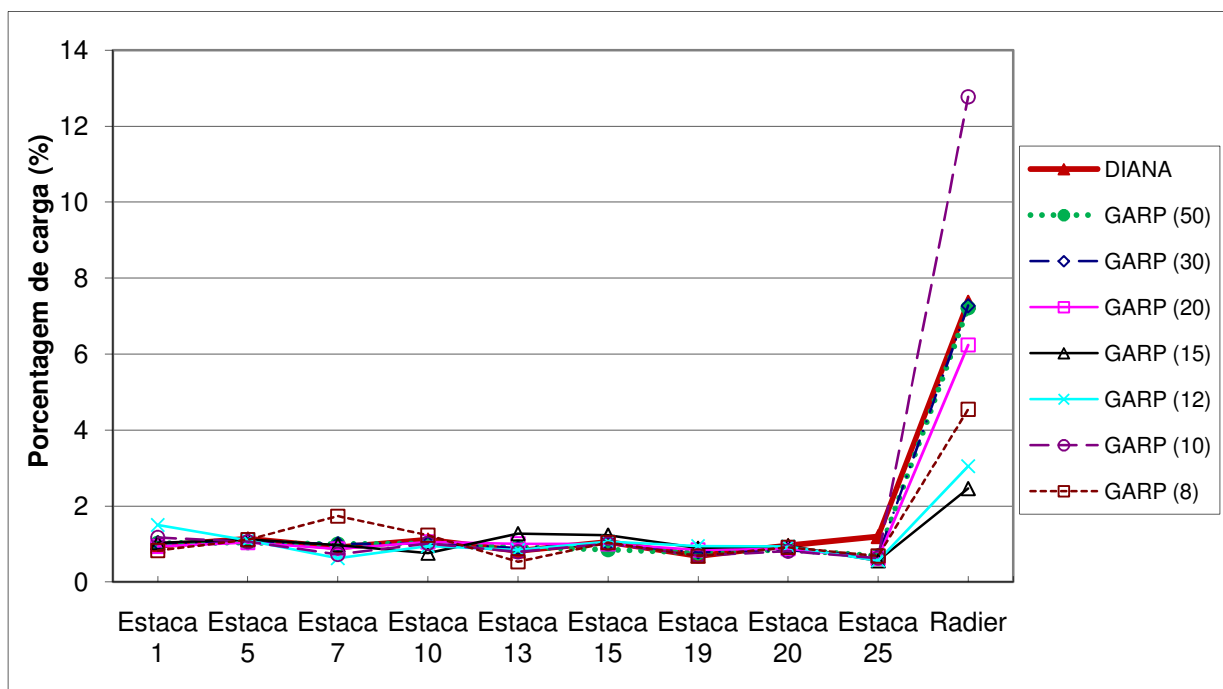


Figura 5.53- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 100 estacas (0,5 m de espessura)

Como observado na Figura 5.53 os resultados do GARP foram mais convergentes em relação aos do DIANA, quando comparado com o caso do radier rígido.

A Figura 5.53 mostra ainda que os resultados do GARP referentes a maiores espaçamentos relativos, 30 e 50, foram os mais próximos dos resultados do DIANA ao longo de todos os elementos analisados e, os resultados do GARP para espaçamentos relativos pequenos, foram os que deram maiores diferenças em relação ao DIANA, principalmente para o espaçamento relativo máximo de 8 que, pela Figura 5.52, 92 estacas estariam fora de sua região de atribuição de fatores de interação.

No que diz respeito ao radier, os maiores espaçamentos relativos causaram diferenças pequenas em relação ao DIANA, por exemplo, para $s/D_{\text{máx}}=50$ a diferença foi de apenas 2,06%.

A maior diferença para a carga tomada pelo radier no GARP foi para $s/D_{\text{máx}}=10$, com 73,30% em relação ao valor previsto pelo DIANA.

5.7.2 Recalques Diferenciais

Seguindo o mesmo padrão dos casos anteriores, o plano usado para apresentação dos recalques é o que cruza o eixo central do radier, conforme Figura 5.54.

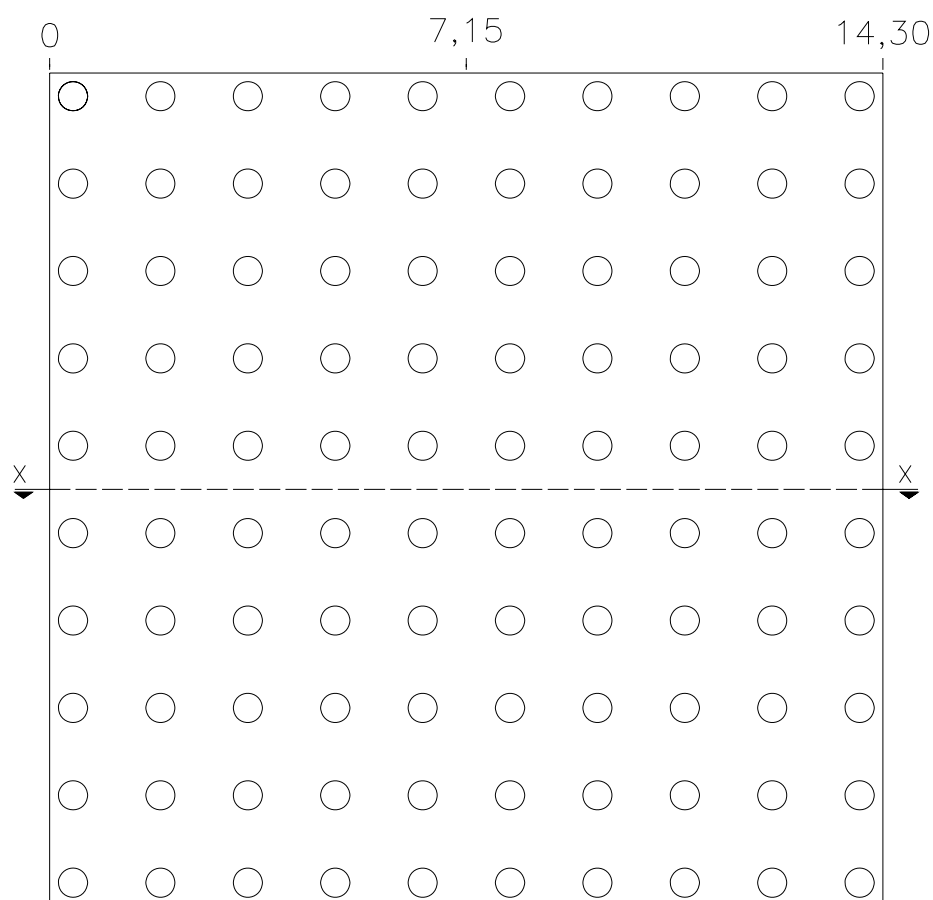


Figura 5.54- Plano de referência e coordenadas consideradas para resultados de recalques diferenciais no radier sobre 100 estacas

A Figura 5.55 apresenta os recalques diferenciais ao longo do radier sobre 100 estacas com espessura de 2,0 m (radier rígido).

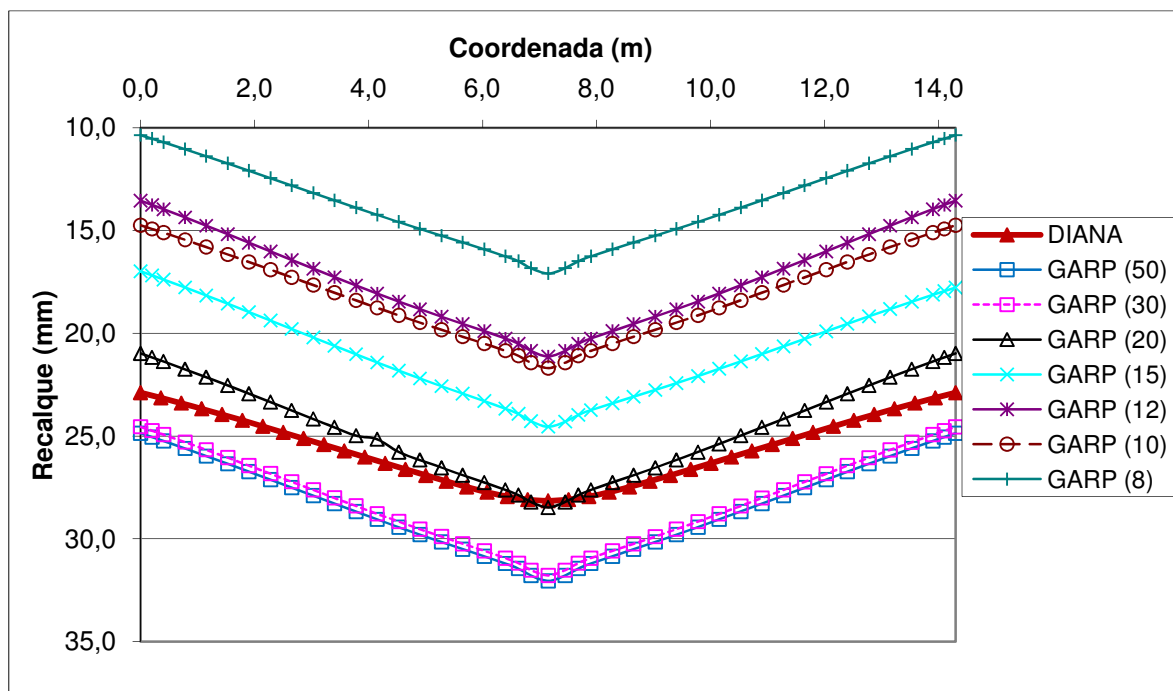


Figura 5.55- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 100 estacas (Placa de 2,0 m)

A Figura 5.55 mostra que, para $s/D_{\text{máx}}$ de 30 e 50, os recalques encontrados pelo GARP foram maiores que os do DIANA, com diferenças de 12,94% no centro do radier. O espaçamento relativo máximo do GARP que mais se aproximou dos valores do DIANA foi o de 20, com diferenças de 8,35% nas laterais (coordenada 0 e 14,30 m) e 1,15% no centro do radier (coordenada 7,15 m). Os demais espaçamentos relativos geraram recalques bem menores que os do DIANA.

Pode ser observado, também pela Figura 5.55 que as curvas GARP 12 e GARP 10 se invertessem, enquanto que o esperado fosse o contrário, pelo que já foi comentado anteriormente.

A Figura 5.56 exhibe os resultados para o caso da placa de 0,5 m (radier flexível).

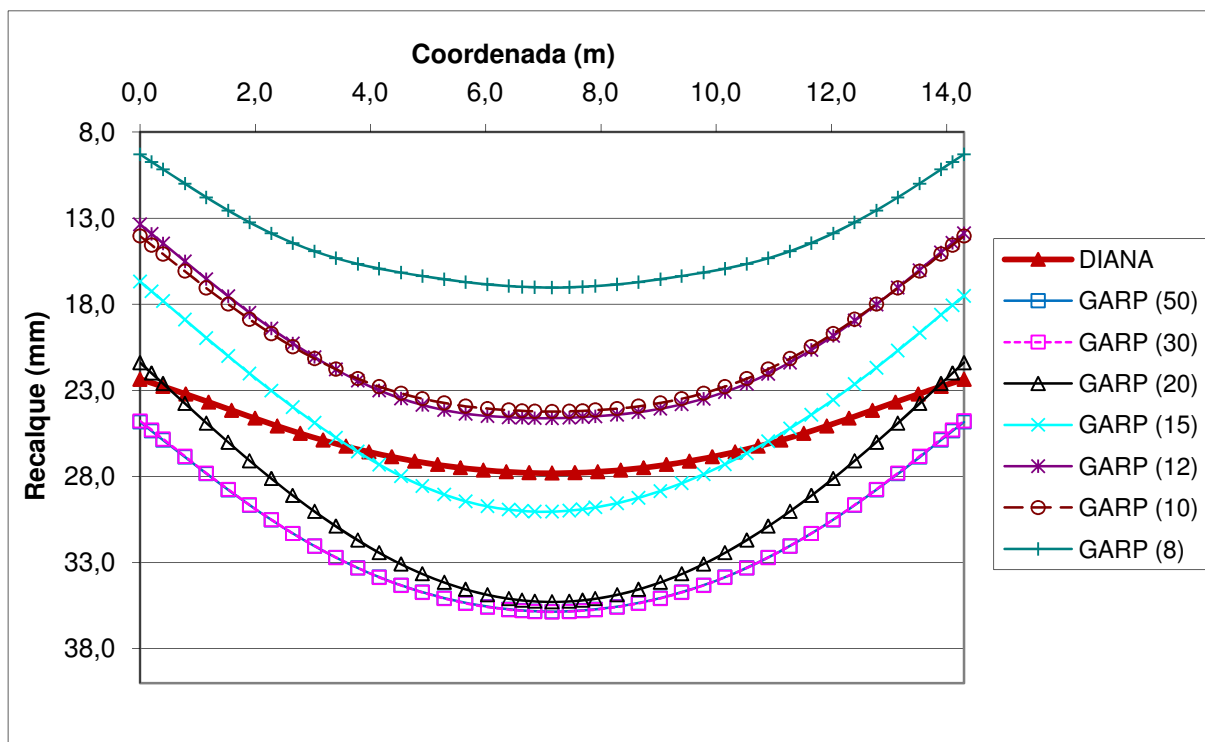


Figura 5.56- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 100 estacas (Placa de 0,5 m)

A Figura 5.56 aponta que as curvas previstas pelo GARP continuaram com maiores recalques diferenciais entre a borda e o centro que as do DIANA, seguindo a tendência dos casos anteriores com menos estacas.

Com relação aos resultados apresentados na Figura 5.56, as curvas GARP 50, GARP 30 e GARP 20 mostraram recalques superiores aos do DIANA, com diferenças máximas de 28,92%. A curva que mais se aproximou do DIANA foi o GARP 15, com diferenças no centro do Radier de 8,04%. As demais curvas apresentaram valores menores de recalques em relação ao DIANA.

5.8 O RADIER SOBRE 36 ESTACAS EM SOLO ESTRATIFICADO

Para verificar a influência de diferentes módulos de elasticidade das camadas ao longo do perfil de solo associado ao efeito do “limite máximo de interação” na resposta do programa GARP em comparação com o DIANA, foi analisado o caso do radier sobre 36 estacas, 1,5 m de espessura (radier mais rígido) e com a mesma geometria proposta para o caso de solo homogêneo, mostrado na Figura 5.33. A Figura 5.57 apresenta o perfil de solo estudado.

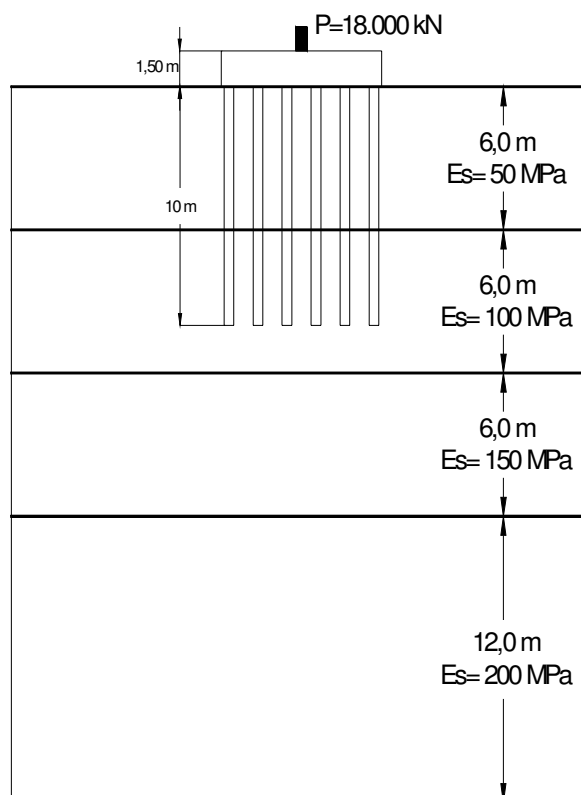


Figura 5.57 – Perfil de solo estratificado estudado

A malha utilizada no DIANA foi composta de 103.915 nós e 69.168 elementos. A Figura 5.58 mostra a malha e condições de contorno estudadas na análise.

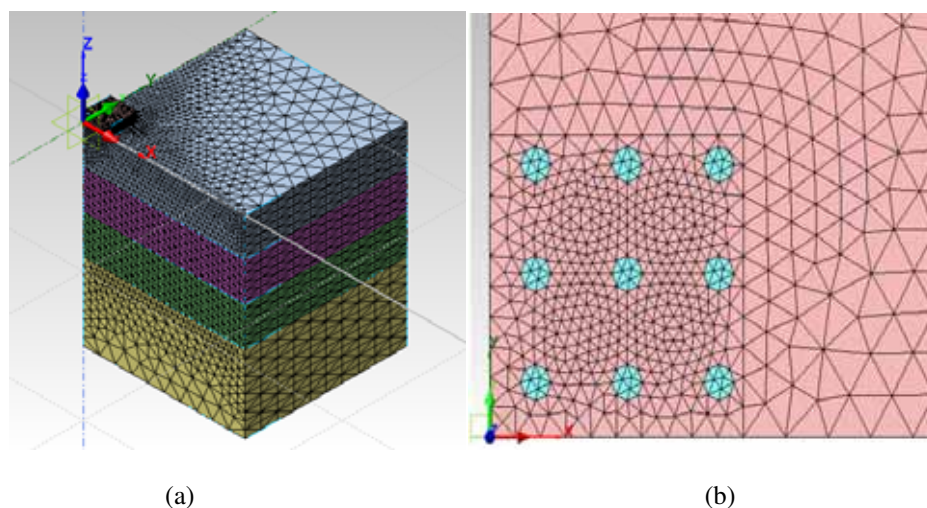


Figura 5.58- Detalhe da malha utilizada na modelagem do radier com 36 estacas em solo estratificado: (a) Vista geral; (b) Ampliação da malha próxima às estacas

5.8.1 Carga Mobilizada pelos Elementos

As cargas mobilizadas pelos elementos do caso do radier sobre 36 estacas em solo estratificado são apresentadas na Figura 5.59.

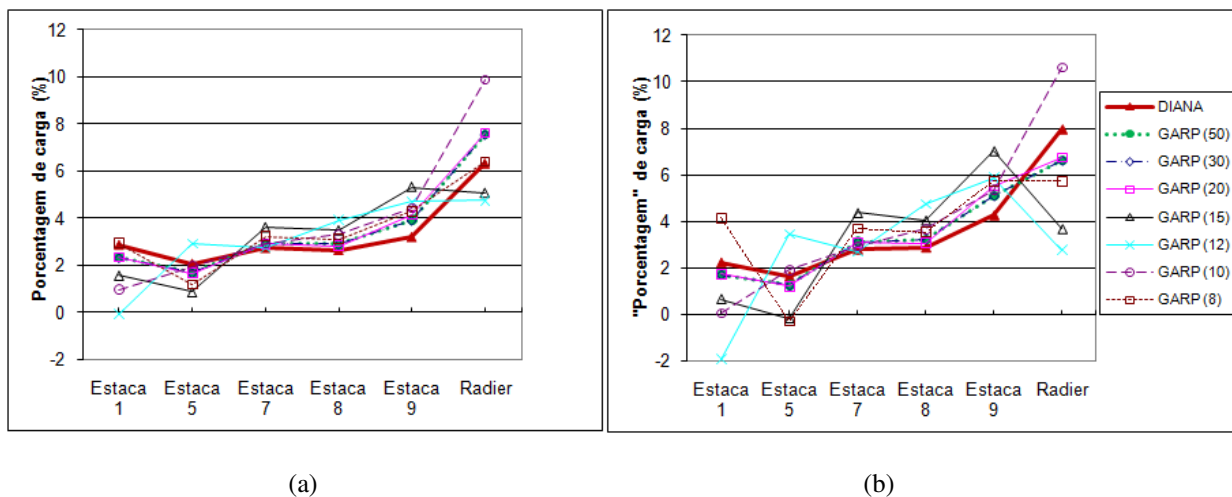


Figura 5.59- Carga mobilizada pelos elementos no radier sobre 36 estacas: (a) radier em solo estratificado; (b) radier em solo homogêneo

Como observado na Figura 5.59 (a), seguindo o mesmo padrão da placa sobre 36 estacas em solo homogêneo (Figura 5.59 (b)), as cargas mobilizadas pelas estacas e radier para espaçamentos relativos máximos de 30 e 50 no GARP foram iguais e mantiveram uma constância de proximidade em relação aos valores do DIANA ao longo de todos os elementos, apesar de terem dado diferenças um pouco maiores alguns pontos, como no caso da carga no radier em que o GARP previu uma carga 19,37% maior que o previsto pelo DIANA, o que seguiu uma tendência diferente dos casos em solo homogêneo. Para o espaçamento relativo máximo de 20, as diferenças em relação aos resultados referentes aos de 30 e 50 foram bem pequenas. Nota-se, também pela Figura 5.59, que os resultados de carga no GARP foram mais convergentes entre si e geraram menores diferenças em relação ao DIANA ao longo de praticamente todos os elementos.

Os demais resultados, relativos aos outros valores de s/D_{\max} , não mantiveram um equilíbrio ao longo de todos os elementos mensurados, se aproximando em alguns pontos até mais do que os resultados dos maiores espaçamentos relativos (50, 30 e 20), mas em outros pontos deram discrepâncias bem maiores.

5.8.2 Recalques Diferenciais

Para exposição dos recalques diferenciais foi usado o mesmo plano do Radier sobre 36 estacas em solo homogêneo, Figura 5.38. A Figura 5.60 apresenta os recalques diferenciais, calculados pelos dois programas para este caso.

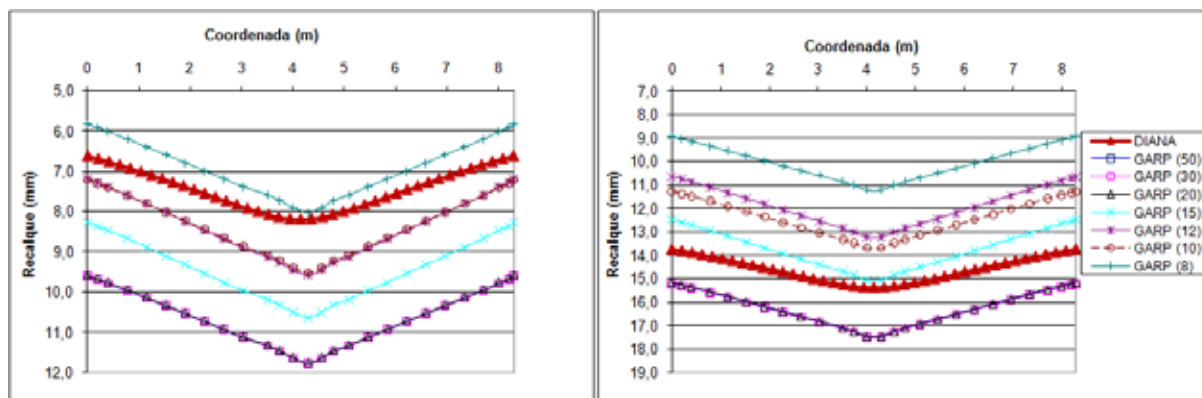


Figura 5.60- Recalques diferenciais ao longo do radier sobre 36 estacas: (a) radier em solo estratificado; (b) radier em solo homogêneo

Nota-se, pela Figura 5.60, que o radier em solo estratificado teve menores recalques devido ao fato de que a rigidez do solo aumenta com a profundidade.

Ainda de acordo com a Figura 5.60, todas as curvas do GARP tiveram o mesmo formato da curva do DIANA.

As curvas do GARP com $s/D_{\text{máx}} \geq 20$ tiveram os mesmos resultados, pelos motivos já discutidos no caso do radier sobre 36 estacas em solo homogêneo. As curvas referentes aos espaçamentos relativos máximos maiores ou iguais a 10 tiveram maiores recalques que os previstos pelo DIANA no radier em solo estratificado. Já no radier em solo homogêneo, os espaçamentos relativos máximos maiores que 20 geraram recalques maiores que os do DIANA.

Para os maiores espaçamentos relativos (50, 30 e 20) no GARP, as diferenças máximas em relação ao DIANA foram grandes, 43% no radier em solo estratificado.

O espaçamento relativo máximo que gerou resultados mais próximos dos valores do DIANA foi o GARP 8, com diferença máxima de 2,70%. Para o radier em solo homogêneo a curva GARP 15 foi a que mais se aproximou dos valores do DIANA, com diferença de apenas 1,95%.

5.9 COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO DOS DOIS PROGRAMAS

Alguns exemplos de tempo de processamento são mostrados, para se ter uma noção da ordem de grandeza da diferença de tempos gastos nas análises pelos dois programas. Todos os casos utilizados no problema são referentes ao radier mais rígido.

A máquina utilizada para as simulações apresentou as seguintes configurações:

- ◆ Processador: Intel Core 2 Duo, 2,53 GHz;
- ◆ Memória (RAM): 4 GB;
- ◆ Sistema operacional: Windows 7, 64 Bits;
- ◆ Entre outros componentes.

O programa GARP foi processado em uma máquina virtual, ambiente que simula o Windows XP de 32 bits, uma vez que este programa não foi concebido para um sistema operacional de 64 bits. O fato de esse programa ter sido processado em máquina virtual diminuiu o desempenho do mesmo, visto que, quando se usa esse artifício os recursos de hardware não são totalmente disponibilizados.

A Tabela 5.1 apresenta os tempos de processamento de alguns casos nos dois programas.

Tabela 5.1- Tempos de processamento de alguns casos

Caso	Tempo de processamento	
	DIANA	GARP
Radier com 2 estacas	3min 19s	3s
Radier com 25 estacas	1h 18min 01s	25s
Radier com 100 estacas (domínio lateral 50m)	26h 12min 07s	10min 39s
Radier com 100 estacas (domínio lateral 25m)	18h 40min 02s	

De acordo com a Tabela 5.1, no caso com 100 estacas, o fato de se reduzir o domínio lateral do problema reduz bastante o tempo de processamento enquanto que, na precisão dos resultados, observou-se no capítulo 3 que o ganho não foi relevante (1,06% de diferença).

A diferença de tempo de processamento entre o GARP e o DIANA, conforme com a Tabela 5.1, é muito grande. No caso com 100 estacas, quando se utilizou o programa híbrido,

conseguiu-se reduzir o tempo de processamento de 18h 40min 02s para apenas 10min 39s, o que torna o uso deste programa bastante atraente quando a questão é tempo.

5.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado que no GARP, quando as regiões de atribuição dos fatores de interação ($s/D_{\text{máx}}$) cobrem todas as estacas, os seus resultados de recalques e carga nos elementos são sempre iguais.

No GARP, em termos de carga nas estacas e radier, foi observado que para grandes valores de espaçamentos relativos ($s/D_{\text{máx}}$), os quais delimitam as regiões de atribuição dos fatores de interação que englobam todas as distâncias entre estacas, os resultados gerados foram os mais coerentes em termos de cargas ao longo de todas as estacas e raders analisados, com algumas diferenças em alguns deles, mas no geral manteve uma boa regularidade.

Pequenos valores de $s/D_{\text{máx}}$, quando muitas estacas ficavam fora da região de atribuição dos fatores de interação (no radier com 2 e 4 estacas os resultados foram perfeitos), resultaram em valores não esperados de carga nas estacas quando comparado com os resultados do DIANA e com o próprio GARP para grandes espaçamentos relativos máximos.

Em todos os casos em solo homogêneo, o DIANA previu mais carga suportada pelo radier que o GARP para grandes espaçamentos.

Os resultados do GARP para carga nos elementos em todos os casos do raders mais flexíveis (0,5 m de espessura) foram mais convergentes em relação ao DIANA que os valores dos casos do radier mais rígido (espessuras de 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m).

Em todos os raders estaqueados, os recalques calculados pelo GARP para grandes espaçamentos relativos máximos foram maiores que os calculados pelo DIANA.

Nos casos de radier flexível, o GARP determinou curvas de recalque mais acentuadas (maior curvatura) que as do DIANA.

Com relação aos recalques nos casos dos raders rígidos no GARP quando comparados com os do DIANA, foi observado que:

- ◆ Para os raders com 2 e 4 estacas, todos os valores de $s/D_{\text{máx}}$ originaram os mesmos resultados;

- ◆ Para o radier com 9 estacas, o espaçamento relativo máximo de 8 foi o que determinou os melhores resultados;
- ◆ Para os radiers com 25 e 36 estacas, os melhores resultados foram os referentes ao $s/D_{\text{máx}}$ igual a 15;
- ◆ Nos radiers de 64 e 100 estacas, os melhores resultados foram os de espaçamento relativo máximo igual a 20.

Para os recalques nos radiers flexíveis (0,5 m de espessura) calculados pelo GARP, quando comparados com os do DIANA, observou-se que:

- ◆ Para os radiers com 2 e 4 estacas, todos os valores de $s/D_{\text{máx}}$ implicaram nos mesmos resultados;
- ◆ Para os radiers com 9 e 25 estacas, o espaçamento relativo máximo de 8 foi o que originou os melhores resultados;
- ◆ Para os radiers de 36 e 64 estacas, o melhor espaçamento relativo máximo foi o de 10;
- ◆ Para o radier sobre 100 estacas, o espaçamento com melhores resultados foi o de 15.

Os resultados do DIANA foram capazes de mostrar, no radier mais flexível com 25 estacas, que o fato do eixo de referência para recalques coincidir com uma linha de estacas faz com que a curva de recalques diferenciais se torne menos “suave” e apresente alguns pontos de inflexão, presentes nas regiões mais próxima das estacas. O tamanho dos elementos utilizados no GARP não permitiu a mesma precisão e a curva acabou sendo suavizada pela continuidade natural da malha. Nos radiers maiores esse efeito não ocorreu, pois o eixo de referência não mais coincide com a linha de estacas.

Outra diferença de resultados que pode ser mencionada para o caso do radier em solo estratificado foi a relação $s/D_{\text{máx}}$ que originou resultados mais próximos dos do DIANA. Enquanto que no caso de solo homogêneo, com o mesmo número de estacas, o melhor espaçamento relativo máximo foi de 15, o do caso com solo estratificado foi o de 8.

Para cargas distribuídas e no caso do solo estratificado, necessitou-se de menores limites de s/D para se alcançar melhores previsões de recalque em relação à cargas concentradas e solo homogêneo, respectivamente.

Para cargas concentradas, os valores de s/D que englobavam de 40-70% das estacas produziram melhor resultado de recalque. Para carga distribuída, os limites de s/D englobando de 25-40% das estacas apresentaram melhores resultados.