

DENISE VAZ DE CAMPOS

**DIMENSIONAMENTO DE BLOCOS SOBRE
ESTACAS UTILIZANDO O CONCEITO DE
RADIER ESTAQUEADO**

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

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Maurício Martines Sales, DSc

D0045G11

GOIÂNIA

2011

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

C198d	Campos, Denise Vaz de. Dimensionamento de blocos sobre estacas utilizando o conceito de radier estaqueado [manuscrito] / Denise Vaz de Campos. - 2011. 117 f. : il., figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. Maurício Martines Sales. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011. Bibliografia. Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas. 1. Blocos sobre estacas 2. Radier estaqueado 3. Métodos numéricos 4. Dimensionamento de blocos. I. Título. CDU: 624.155.1
-------	--

Aos meus pais, Hamilton e Edna que me ensinaram o valor do estudo e trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao prof. Maurício Martines Sales pelo incentivo em entrar no mestrado, continuar e orientar na dissertação, e por ter me ensinado a praticar a geotecnia.

Ao prof. Ademir Aparecido do Prado pela ajuda nos métodos numéricos e desenvolvimento do programa DIANA.

Aos professores da geotecnia, Carlos, Gilson, Lilian e Patrícia pelo conhecimento transmitido, amizade e apoio oferecido, e pela oportunidade de realizar o mestrado.

Aos colegas de curso pela amizade, ajuda e companheirismo.

A CAPES pela ajuda financeira.

Ao meu esposo Márcio, sempre presente, incentivando e acreditando no meu trabalho.

RESUMO

Tradicionalmente, o dimensionamento estrutural de blocos sobre estacas tem sido executado de forma simplificada, desconsiderando o efeito tridimensional da peça estrutural. Utilizar o conceito de radier estaqueado no cálculo enriquece o dimensionamento proporcionando um conhecimento dos esforços internos com base numa distribuição de reações mais realistas no bloco. O objetivo deste trabalho foi de verificar as diferenças no dimensionamento estrutural de blocos sobre estacas utilizando os métodos tradicionais e dois métodos numéricos, um baseado em elementos finitos e outro híbrido que combina elementos finitos com elementos de contorno. A principal comparação entre os métodos foi o momento interno gerado no bloco após a aplicação de carga vertical, por ser um dos principais parâmetros de dimensionamento da armação. No Brasil, os métodos manuais de dimensionamento mais utilizados são baseados na teoria das bielas ou teoria das vigas. O método das bielas e tirantes considera, no interior do bloco, na parte inferior, tensões de tração que são combatidas pela armação, e no método das vigas é calculado um momento interno encontrado pela reação das estacas e os braços de alavanca até a seção desejada e o bloco é dimensionado como uma viga. Os métodos numéricos apresentados utilizam o conceito de radier estaqueado no dimensionamento dos blocos. Nos métodos numéricos foram utilizados os programas DIANA e GARP, que fornecem os momentos internos em todo o bloco de forma tridimensional. E os resultados foram comparados com o método manual pela teoria das vigas. Foram simulados blocos com 2, 4, 9, 25, 64 e 81 estacas com cargas aplicadas de distintas formas para uma avaliação do efeito do tamanho dos blocos. Das comparações executadas observou-se que no método manual e nos métodos numéricos os momentos totais encontrados são muito próximos, porém com uma distribuição diferenciada ao longo das seções dos blocos, que se torna mais evidente à medida que se aumenta a quantidade de estacas por bloco. Para os métodos manuais no centro do bloco os momentos internos são inferiores aos dimensionados como radier estaqueado, necessitando de uma armação complementar nesta região.

Palavras-chave: Blocos sobre estacas. Radier estaqueado. Métodos numéricos. Dimensionamento de blocos.

ABSTRACT

The structural sizing pile caps on piles has traditionally been run in simplified manner, disregarding the three-dimensional effect of structural piece. Use the concept of piled cap in calculating enriches scalability providing an understanding of internal efforts on the basis of a distribution of more realistic reactions in the block. The goal of this work was to check the differences in structural sizing pile caps using traditional methods and two numerical methods, one based on finite elements and other hybrid that combines finite elements with elements of the boundary. The main comparison between methods was the internal moment generated in the block after the application of vertical load, for being one of the main parameters of scaling of the armature. In Brazil the scaling manual methods most used are based on the theory of rods or theory of beams. The method of connecting rods, and rods considers inside the block, at the bottom, tensile stress that are combated by frame, and method of the beams is calculated as an internal moment found by reaction of piles and the lever arms to the section you want, and then the block is sized like a beam. The numerical methods presented using the concept of piled raft in scale of blocks. In numerical methods have been used DIANA and GARP programs, which provide internal moments throughout the block of three-dimensional shape and thus were made a comparison with the manual method by the theory of beams. Were simulated blocks with 2, 4, 9, 25, 64 and 81 piles with loads applied in different ways for an assessment of the effect of the size of blocks, of the comparisons performed can be observed that in the manual method and numerical methods total found moments are very close, but with a differentiated distribution along the sections of the blocks, which becomes more apparent as it increases the amount of piles per block. For the manual methods in the center of the block the internal moments are inferior to scaled as piled raft, necessitating an additional frame in this region.

Keywords: Pile Caps. Piled raft. Numerical methods. Structural pile cap design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistemas de fundação: (a) Bloco sobre estacas, (b) Radier estaqueado (modificado - BEZERRA, 2003)	22
Figura 2.2 - Bloco sobre estacas (MUNHOZ, 2004)	23
Figura 2.3 - Esforços internos no bloco sobre estacas conforme analogia das bielas (MIGUEL, 2000)	24
Figura 2.4 – Contribuição do solo superficial no bloco sobre estacas (BEZERRA, 2003).....	25
Figura 2.5 – Diferentes abordagens de projeto: edificação 01 convencional e edificação 02 <i>creep piling</i> (modificado - RANDOLPH, 1994)	27
Figura 2.6 - Redução de recalque diferencial com estacas centrais (modificado - RANDOLPH, 1994)	28
Figura 2.7 – Tensão ao longo da profundidade das estacas I, II, III (canto, lateral e centro) para o grupo de 3 x 3 com bloco em contato com o solo nas curvas 1 e 3, e sem contato com o solo nas curvas 2 e 4 (modificado - OTTAVIANI, 1975)	31
Figura 2.8 – Comparação dos resultados em M.E.C. apresentados por Butterfield e Banerjee (1971a) e Kuwabara (1989) (RUSSO e VIGGIANI, 1997)	33
Figura 2.9 - Mecanismos de interação em radiers estaqueados (modificado – HAIN e LEE, 1978)	35
Figura 2.10 - Gráfico de momento versus número de estacas do Ed. Akasaka - SP. (modificado - POULOS, 1994)	39
Figura 2.11 - Momento máximo versus variação de natureza da carga e rigidez do radier (POULOS, 1998)	40

Figura 3.1 – Ângulo de escora entre bielas de compressão e tração (modificado – MORAES, 1976)	46
Figura 3.2 – Método da flexão, seção de referência (modificado - ALONSO, 1983)	46
Figura 4.1 – Tela do Fx+ for DIANA (modificado - TNO, 2008).	53
Figura 4.2 – Exemplo de saída gráfica do deslocamento do Fx+ for DIANA.....	53
Figura 4.3 – Exemplo de elemento do DIANA: (a) 5 lados, 6 nós, (b) 6 lados, 8 nós (modificado - TNO, 2008).....	54
Figura 4.4 – Exemplo de modelagem de $\frac{1}{4}$ de bloco sobre estacas: (a) bloco, estacas e domínio, (b) bloco e (c) bloco e estacas sem o solo.	55
Figura 4.5 – Vista em corte da estaca isolada e domínios; e em planta vista axissimétrica da estaca e domínio de uma estaca analisada por Ottaviani (1975).....	56
Figura 4.6 – Comportamento do recalque para estacas de 20m ($H/L = 1,5$).....	57
Figura 4.7 – Comportamento do recalque para estacas de 20m ($H/L = 4$).....	58
Figura 4.8 – Comportamento do recalque para estacas de 40m ($H/L = 1,5$).....	58
Figura 4.9 – Modelagem de um quarto de bloco, detalhe das estacas, e pilar (modificado – YAMASHITA, 1998).....	59
Figura 4.10 – Discretização da malha do solo aproximando do apresentado por Yamashita (1998).....	60
Figura 4.11 – Módulo de elasticidade do solo variando com a profundidade (modificado – YAMASHITA, 1998).....	61
Figura 4.12 – Bloco sobre 9 estacas com carga aplicada (modificado – POULOS <i>et al</i> , 2001).....	62
Figura 4.13 – Comportamento do momento interno do bloco sobre 9 estacas, para	

carga vertical.....	63
Figura 4.14 – Saída gráfica do GARP.....	65
Figura 4.15 – Comportamento do comprimento da estaca pelo recalque para uma estaca isolada.....	66
Figura 4.16 – Comportamento do comprimento da estaca pelo recalque para um grupo de 4 estacas.....	67
Figura 4.17 – Comportamento do espaçamento entre estacas pelo recalque para um bloco sobre 9 estacas com $L/D = 20$	67
Figura 4.18 – Comportamento do espaçamento entre estacas pelo recalque para um bloco sobre 9 estacas com $L/D = 40$	68
Figura 4.19 – Comportamento do momento interno do bloco sobre 9 estacas, para carga vertical.....	69
Figura 4.20 – Detalhe genérico dos blocos sobre estacas analisados.....	70
Figura 5.1 – Geometria do bloco sobre 2 estacas.....	73
Figura 5.2 – Momento M_y no eixo central (seção AA) para um bloco sobre 2 estacas....	75
Figura 5.3 – Armação inferior do bloco sobre 2 estacas.....	75
Figura 5.4 – Geometria do bloco sobre 4 estacas.....	76
Figura 5.5 – Momento M_y no eixo central (seção AA) para um bloco sobre 4 estacas....	77
Figura 5.6 – Momento M_y em diferentes seções para bloco sobre 4 estacas: (a) calculado pelo DIANA, (b) calculado pelo GARP.....	78
Figura 5.7 – Armação inferior do bloco sobre 4 estacas.	78
Figura 5.8 – Armação inferior do bloco sobre 4 estacas, pelo M.E.F., com diferentes armações.....	79

Figura 5.9 – Geometria do bloco sobre 9 estacas.....	79
Figura 5.10 – Carga nas estacas do bloco sobre 9 estacas.....	80
Figura 5.11 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 9 estacas.....	81
Figura 5.12 – Armação inferior no bloco sobre 9 estacas.....	82
Figura 5.13 – Momento em diferentes seções para bloco sobre 9 estacas, pelo DIANA..	83
Figura 5.14 – Momento em diferentes seções para bloco sobre 9 estacas, pelo GARP....	83
Figura 5.15 – Geometria do bloco sobre 25 estacas.....	84
Figura 5.16 – Momento M_y na seção AA para um bloco sobre 25 estacas.....	85
Figura 5.17 – Momento M_y em varias seções para um bloco sobre 25 estacas, pelo M.E.F.....	86
Figura 5.18 – Momento M_y em varias seções para um bloco sobre 25 estacas, pelo GARP.....	87
Figura 5.19 – Armação inferior no bloco sobre 25 estacas, pelo método manual e de elementos finitos.....	87
Figura 5.20 – Geometria do bloco sobre 64 estacas.....	88
Figura 5.21 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 64 estacas.....	90
Figura 5.22 – Diagrama do momento M_y em 4 seções para um bloco sobre 64 estacas, pelo DIANA.....	91
Figura 5.23 – Contorno do momento M_y para um bloco sobre 64 estacas, pelo GARP...	92
Figura 5.24 – Armação inferior no bloco sobre 64 estacas, para os métodos: (a) manual e (b) elementos finitos.....	93
Figura 5.25 – Aplicação da carga sobre o bloco de 64 estacas.....	94
Figura 5.26 – Carga nas estacas: (a) pelo GARP, (b) pelo DIANA.....	95

Figura 5.27 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 64 estacas, com 5 pilares.	96
Figura 5.28 – Diagrama do momento M_y em 5 seções para um bloco sobre 64 estacas, com 5 pilares, pelo DIANA.....	97
Figura 5.29 – Contorno do momento M_y para um bloco sobre 64 estacas, de 5 estacas, pelo GARP.....	97
Figura 5.30 – Armação inferior do bloco sobre 64 estacas e 5 pilares, pelo GARP.....	98
Figura 5.31 – Geometria do bloco sobre 81 estacas.....	99
Figura 5.32 – Momento M_y na seção AA, para um bloco sobre 81 estacas.....	100
Figura 5.33 – Momento M_y em 4 seções para um bloco sobre 81 estacas, pelo DIANA.	101
Figura 5.34 – Contorno do momento M_y para um bloco sobre 81 estacas, pelo GARP...	101
Figura 5.35 – Armação inferior no bloco sobre 81 estacas, método manual e M.E.F.....	102
Figura 5.36 – Comparação entre os resultados de recalques.....	103
Figura 5.37 – Porcentagem de carga transferida ao solo pelos métodos numéricos.....	104
Figura 5.38 – Comparação entre as maiores e menores cargas transferida para as estacas.....	105
Figura 5.39 – Comparação do momento total na seção AA (kN.m/m).....	106
Figura 5.40 – Comparação do momento máximo na seção AA (kN.m/m).....	107
Figura 5.41 – Peso de aço por bloco (Kg).....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Radier estaqueado na argila de Frankfurt: medido (M) e Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) (modificado - REUL; RANDOLPH, 2003).....	31
Tabela 2.2 – Recalques diferencial, máximo e médio do radier (modificado - KIM <i>et al.</i> , 2001).....	37
Tabela 2.3 – Momento fletor médio no radier (modificado - KIM <i>et al.</i> , 2001).....	37
Tabela 2.4 – Valores dos esforços e recalques obtidos nas diversas simulações (modificado - SALES <i>et al.</i> , 2002).....	41
Tabela 3.1 – Método das bielas: cálculo de armadura em blocos sobre estacas.....	48
Tabela 4.1 – Comparação do DIANA com resultados de outros autores.....	61
Tabela 4.2 – Dimensões particulares de cada caso.....	71
Tabela 5.1 – Carga por estaca no bloco sobre 25 estacas.....	84
Tabela 5.2 – Carga por estaca no bloco sobre 64 estacas.....	89
Tabela 5.3 – Carga por estaca no bloco sobre 81 estacas.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – Norma americana

cte - constante

DEFPIG – *Deformation Analysis of Piles Groups*

DIANA – *Displacement Method Analyser*

F.S. – Fator de Segurança

GARP – *Geotechnical Analysis of Rafts with Piles*

M.E.C. – Método de Elemento de Contorno

M.E.F. - Método de Elementos Finitos

M.N.A. – Medida não analisada

N.A. – Nível da água

NBR – Norma brasileira

S.R. – Seção de referência

TC – Comitê Técnico

UFG – Universidade Federal de Goiás

UNB – Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ - Ângulo de escora,

β_p – Proporção de carga transmitida para as estacas,

ν_c - Coeficiente de Poisson do concreto,

ν_s - Coeficiente de Poisson do solo,

a_b – Lado do pilar,

a, b – dimensões do pilar,

A, B – Largura do bloco,

A_s – Armação principal,

A_b – Seção transversal do pilar,

A_p – Seção transversal da estaca,

b_w – Largura do bloco na direção considerada,

C - Distância do eixo da estaca à face do bloco,

d_i – Distância de cada estaca ao centro de gravidade no eixo x ou y,

d, D – Diâmetro ou lado da estaca,

DV - Profundidade da camada de solo impenetrável ou domínio vertical,

DH - Domínio horizontal,

e – Espaçamento entre estacas,

E_c – Módulo de elasticidade do concreto,

E_s – Módulo de elasticidade do solo,

f_{yd} – Tensão de escoamento do aço,

f_{ck} - Tensão de ruptura do concreto simples,

f_{tk} – Tensão de tração característica do concreto,

G – Módulo cisalhante do solo,

h – Altura do bloco,

I_x, I_y – Momento de inércia do grupo de estacas nos eixos x e y respectivamente,

I_{xy} – Produto da inércia do grupo de estacas ao centro de carga,

I_{Mx}, I_{My} - Momento normalizado nos eixos x, y,

K – Rigidez relativa da estaca,

L - Comprimento das estacas,

M – Momento fletor na seção S,

$M_{x,y}$ – Momento no bloco na direção x, y respectivamente,

n_p – Número de estacas,

P – Carga vertical aplicada no bloco,

Q - Esforço cortante na seção S,

R – Carga aplicada no topo da estaca,

R_i – Reação na estaca i ,

s – Recalque,

T_x – Esforço de tração no bloco sobre as estacas,

x_i – Distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção x,

y_i – Distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção y,

w^0 – Recalque absoluto,

w – Recalque no topo da estaca,

Z – Esforço de tração no aço,

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	20
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS	22
2.1. BLOCO SOBRE ESTACAS	23
2.2. RADIER ESTAQUEADO	24
2.3. DEFINIÇÕES DE PROJETO	26
2.4. MÉTODOS NUMÉRICOS	29
2.4.1. Método de Elementos Finitos – M.E.F.	30
2.4.2. Método de Elementos de Contorno - M.E.C.	32
2.4.3. Método híbrido	34
2.5. RECALQUE EM RADIER ESTAQUEADO	36
2.6. CAPACIDADE DE CARGA DE RADIER ESTAQUEADO	38
2.7. MOMENTO INTERNO EM RADIER ESTAQUEADO	39
3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE BLOCOS SOBRE ESTACAS	43
3.1. CARGA NAS ESTACAS DE UM BLOCO	44
3.2. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES	47

3.3. TEORIA DAS VIGAS	49
3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS	50
4. METODOLOGIA	51
4.1. MÉTODO MANUAL	51
4.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	52
4.2.1. Procedimento de análise	52
4.2.2. Validação do programa Diana	55
4.3. MÉTODO HÍBRIDO	63
4.3.1. Procedimento de análise	64
4.3.2. Validação do programa Garp	65
4.4. BLOCOS PESQUISADOS	69
5. ANÁLISE NUMÉRICA	73
5.1. BLOCO SOBRE 2 ESTACAS	73
5.2. BLOCO SOBRE 4 ESTACAS	76
5.3. BLOCO SOBRE 9 ESTACAS	79
5.4. BLOCO SOBRE 25 ESTACAS	83
5.5. BLOCO SOBRE 64 ESTACAS	88
5.6. BLOCO SOBRE 81 ESTACAS	98
5.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	103

6. CONCLUSÕES	109
----------------------------	------------

REFERÊNCIAS	112
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A cada ano que passa há um crescimento vertical das edificações em todo o mundo, o maior edifício hoje é o Burj Khalifa, nos Emirados Árabes com 160 andares e 828m de altura, concluída em 2010 e com previsão de nova construção também em Dubai com 1.0km de altura.

No Brasil, o edifício mais alto é o Mirante do Vale em São Paulo, com 51 andares e 170m de altura, concluído em 1960. Goiânia é a cidade do Brasil onde está ocorrendo o maior crescimento de empreendimentos com altura acima 100m, sendo 74 novos com conclusão prevista até 2014, o maior em construção tem plano de atingir 147m de altura.

Juntamente com o aumento vertical das construções há uma diminuição da área de projeção das edificações, fazendo com que os pilares que chegam à fundação sejam cada vez maiores, em termos de dimensões geométricas e carregamento vertical e momentos, porém estes pilares ficam cada vez mais próximos uns dos outros.

Com o aumento das cargas dos pilares das edificações, as fundações também aumentam de tamanho, exigindo um melhor aproveitamento do solo, onde a fundação é apoiada, e da própria fundação. Em grandes fundações, devido ao espaço, vários pilares podem ser apoiados em uma única solução de fundação. Dentre as soluções possíveis e mais adotadas estão o uso de radier ou grandes grupos de blocos sobre estacas.

Não é novidade o uso de blocos sobre estacas como opção de fundação profunda ou de radier como fundação rasa. Há muitos anos utilizam-se estacas quando o solo a pouca profundidade não possui capacidade de suportar as cargas da estrutura.

O comportamento das estacas, por serem os elementos principais da fundação, vem sendo muito estudado, seja como estaca isolada, seja como grupo de estacas.

No caso de fundação em estaca é utilizado uma peça estrutural, o bloco. Os blocos por serem considerados um elemento estrutural com a função de transmitir a carga dos pilares para as estacas foram menos pesquisados, e seus estudos mais focados em pequenos grupos de estacas, porém nas últimas décadas o conceito do bloco sobre estacas vem se transformando e ganhando novo espaço nas pesquisas e projetos.

As mudanças começaram com o uso de fundações rasas em terrenos onde o solo superficial é resistente o suficiente para atender a capacidade de carga, mas os recalques absolutos ou diferenciais atingiam valores acima do permitido, então algumas estacas foram introduzidas nas sapatas ou radiers para reduzir os recalques. Este método foi denominado de radier estaqueado.

O radier estaqueado surgiu com a finalidade de reduzir recalques, e com o tempo, o termo foi extrapolando com a função de melhorar as fundações executadas com estacas.

Com uso de ferramentas numéricas na análise de radier estaqueado pode-se conhecer melhor a distribuição de carga entre as estacas, entre o radier e estacas, aperfeiçoar o projeto de estacas atuando na quantidade, posição, profundidade e diâmetro das estacas, trabalhar com a condição de recalque total e diferencial que mais satisfaz cada situação, obter um fator de segurança global conhecido, conhecer melhor o comportamento do bloco sobre as estacas e poder executar uma fundação de modo geral mais econômica ou no mínimo com maiores conhecimentos da real situação de cada elemento.

Neste trabalho, o enfoque principal será o momento interno gerado no bloco, o bloco sobre estacas será dimensionado conforme as formas simplificadas de cálculo e comparado com o conceito de radier estaqueado através do uso de ferramentas numéricas.

As comparações serão feitas entre os métodos manuais que há anos vem sendo utilizados, com um programa balizador de método de elemento finito (M.E.F.) – DIANA (Displacement Method Analyser), e um programa em método híbrido, muito utilizado na análise de radier estaqueado – GARP (Geotechnical Analysis of Rafts with Piles).

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é dimensionar um bloco sobre estacas avaliando o momento interno gerado, nas três formas, pelo método manual aproximado, pelo M.E.F. e pelo método híbrido

para diferentes quantidades de estacas no bloco e comparar se os métodos utilizados estão contra ou a favor da segurança e em que proporção.

Objetiva-se, ainda, estudar de que forma as armações de um bloco poderiam ser melhor aproveitadas considerando o real momento no bloco.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação foi estruturada de forma a dar uma visão abrangente para o leitor sobre os conceitos e métodos utilizados, e posteriormente como foi desenvolvida a pesquisa, os capítulos foram organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 1: Introdução:** uma breve abordagem do que será exposto no trabalho, incluindo os objetivos a alcançar.
- **Capítulo 2: Revisão bibliográfica:** descreve, de forma sucinta, um breve histórico a respeito de bloco sobre estacas e radier estaqueado, considerando os conceitos utilizados de cada abordagem.
- **Capítulo 3: Métodos de dimensionamento estrutural de blocos sobre estacas:** explica como é feito o dimensionamento estrutural de blocos sobre estacas de forma manual e numérica.
- **Capítulo 4: Metodologia:** descreve como foram utilizadas as ferramentas numéricas, a validação de cada método e apresenta os casos pesquisados.
- **Capítulo 5: Análise numérica:** análise dos casos avaliados. Mostra os resultados individuais e compara os blocos uns com os outros, com diferentes métodos de cálculo utilizado, manual ou simplificado, M.E.F. e método híbrido.
- **Capítulo 6: Conclusões:** conclusões e sugestões para futuros trabalhos

CAPÍTULO 2

FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

Nas classificações de tipos de fundações profundas estão as estacas e os tubulões. As primeiras geralmente necessitam de um bloco de coroamento na extremidade superior, como ligação entre a estrutura e a fundação. Neste trabalho foi evidenciado o uso de blocos sobre estacas em grandes grupos.

Os blocos sobre estacas são fundações compostas por duas estruturas separadas: o bloco de ligação e as estacas. As estacas têm sido tratadas isoladamente ou em grupo, com diversas formas de dimensionamento. Os blocos sobre estacas há muitos anos vêm sendo dimensionados de maneira simplificada pelo método manual.

O radier estaqueado é uma fundação composta também por um bloco e estacas, mas neste caso são considerados como um grupo único, considerando a interação entre todas as partes, ou seja, todos os componentes: radier, solo e estacas interagem entre si e atuam como um só elemento, ver Figura 2.1. O pré-dimensionamento do radier estaqueado pode ser feito de modo manual, mas concluído com ferramentas numéricas para obter maior precisão das interações.

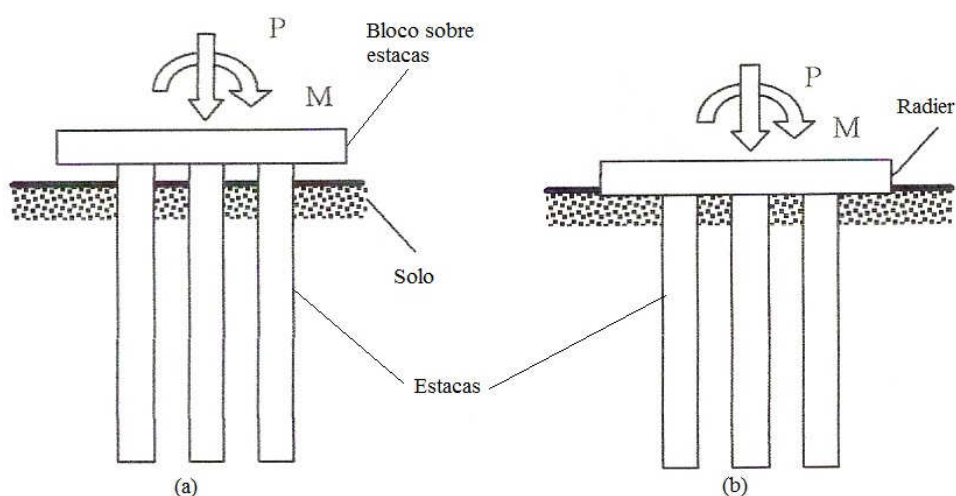


Figura 2.1 – Sistemas de fundação: (a) Bloco sobre estacas, (b) Radier estaqueado (modificado - BEZERRA, 2003).

O avanço das ferramentas computacionais trouxe aos engenheiros a condição de aperfeiçoar os métodos de cálculo de fundações sobre estacas, possibilitando conhecer de forma mais próxima da realidade como uma fundação pode ser mais segura e econômica, ou em outras palavras, saber a real distribuição de cargas, recalques, fator de segurança, tensões internas e determinar alternativas que possam diminuir custos.

Neste trabalho, os movimentos da fundação são definidos por:

- - Recalque: é o deslocamento total sofrido por qualquer ponto da fundação,
- - Recalque diferencial: diferença entre o maior e menor recalque previsto no bloco.

2.1. BLOCO SOBRE ESTACAS

Bloco sobre estacas é um elemento estrutural de ligação entre pilares e estacas, com a função de apenas transferir as cargas dos pilares para as estacas, como mostrado na Figura 2.2, de maneira que a soma das reações nas estacas seja a própria carga aplicada no bloco.

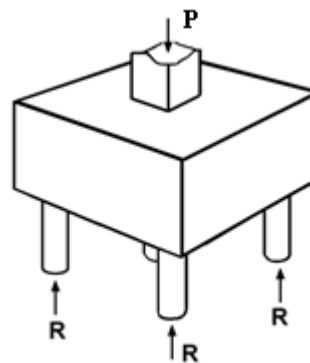


Figura 2.2 - Bloco sobre estacas (MUNHOZ, 2004).

Grande parte das pesquisas desenvolvidas a cerca do dimensionamento de blocos sobre estacas concentra-se na analogia das bielas e tirantes, teoria de viga, análise de resultados experimentais e análise numérica.

A analogia de bielas e tirantes vem de ensaios realizados por Blévoit e Frémy (1967) com mais de cem blocos, com diferentes arranjos de armadura, considerando a força centrada em blocos sobre duas, três e quatro estacas. O método considera no interior do bloco a idealização de uma treliça composta por barras tracionadas na horizontal que são resistidas pela armadura e tensão de compressão nas bielas que são resistidas pelo concreto, ver Figura 2.3.

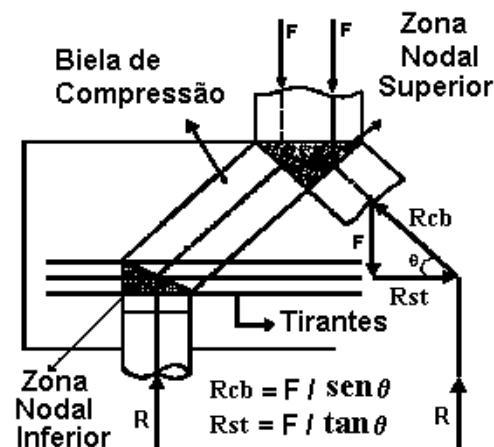


Figura 2.3 - Esforços internos no bloco sobre estacas conforme analogia das bielas (MIGUEL, 2000).

A teoria das vigas é aplicável a blocos flexíveis e o dimensionamento é feito como se fosse uma viga flexível. A armação depende dos diagramas de momento e cortante. Esta forma de cálculo é indicada, por exemplo, pela norma brasileira de estruturas NBR 6118 (2003) e pelo comitê europeu CEB (1970).

Recentemente no Brasil, alguns autores têm realizado para grupos de poucas estacas, trabalhos de análise experimental e numérica comparando com os métodos clássicos das bielas e vigas.

Um dos trabalhos foi o de Miguel (2000) que, em pesquisa realizada com uso de análise numérica e ensaios experimentais, trabalhou com método de elementos finitos para blocos sobre três estacas, sob força centrada e concluiu que o método desenvolvido por Blévoit e Fremy (1967) mostrou ser conservativo, indicando margem de segurança de 12%.

2.2. RADIER ESTAQUEADO

O termo radier estaqueado surgiu, conforme os autores Sousa e Cunha (2005) para especificar o sistema de fundação que envolve a associação de um elemento de fundação superficial (radier ou sapata) com uma estaca ou grupo de estacas, sendo ambas as partes responsáveis pelo desempenho da fundação tanto em relação à capacidade de carga como recalques.

Na metodologia de bloco sobre estacas despreza-se o contato do bloco com o solo, toda a carga é suportada apenas pelas estacas. No radier estaqueado todos os componentes: bloco,

estacas e solo são considerados como um conjunto, portanto a carga distribuída ao solo é transmitida pelo do radier e pelas estacas.

Os pioneiros a considerar a contribuição do solo superficial no bloco para um grupo de estacas foi Kishida e Meyerhof (1965). Para estacas mais espaçadas os autores consideravam que a capacidade de carga do sistema seria a soma da capacidade de carga do radier com a ponta das estacas. Para estacas pouco espaçadas a capacidade de carga seria a do grupo de estacas mais a contribuição apenas da parte do radier fora da projeção do grupo, conforme Figura 2.4.

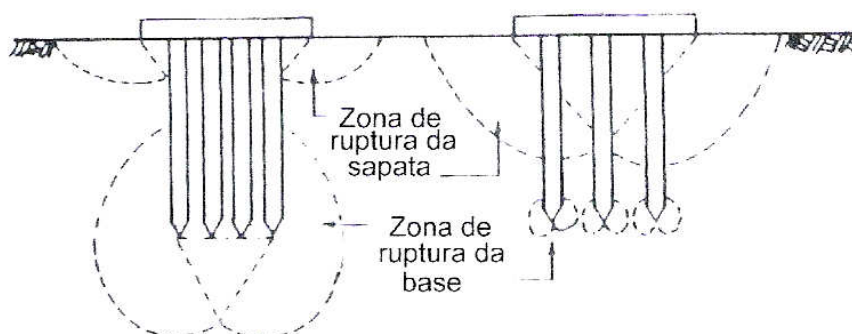


Figura 2.4 – Contribuição do solo superficial no bloco sobre estacas (BEZERRA, 2003).

A utilização do radier estaqueado depende das condições do solo de apoio do radier, que de acordo com as características será favorável ou não, conforme apresentado por Poulos (1991).

As características do solo abaixo do radier que definem as situações favoráveis ao emprego do radier estaqueado são:

- perfil de solo consistindo de argilas relativamente rígidas,
- perfil de solo consistindo de areias relativamente densas,
- não existir camadas moles abaixo da profundidade das estacas

E as características do solo que definem as situações desfavoráveis são:

- perfil de solo que contenham argilas moles próximo à superfície do terreno,
- perfil de solo que contenham areias fofas próximas a superfície,
- perfil de solo que apresentem efeitos de recalques por consolidação, sujeitos a movimentos de expansão devido a causas externas.

No Brasil, alguns autores pesquisando a linha de blocos sobre estacas, observaram a transferência de parte da carga aplicada ao solo pelo bloco, como é o caso de Carvalho (1994) que na linha experimental ensaiou blocos sobre duas, três e quatro estacas com força centrada em condições similares à obra e concluiu que a participação do solo no suporte de um bloco apoiado em estacas é em média 12% e o restante é distribuído entre as estacas.

2.3. DEFINIÇÕES DE PROJETO

Qualquer que seja o conceito adotado para o dimensionamento do bloco ou radier, a primeira fase do projeto consiste em avaliar a viabilidade e estimativa do número de estacas, com cálculos simples e sem uso do computador.

Na segunda fase de detalhamento, para o radier estaqueado, Poulos (1994) indica a busca pela 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) acrescenta a terceira fase de projeto com um detalhamento mais refinado do sistema e conclui que não é necessário um número elevado de estacas para reduzir os recalques, mas há na verdade um número ótimo em que se obtém uma boa redução nos recalques absolutos e diferenciais, e uma ótima redução nos esforços de momento e cortante na placa do radier.

Já Randolph (1994) diferencia o projeto em três abordagens: abordagem convencional, *creep piling*, e controle de recalque diferencial, comparadas principalmente em termos de recalque.

- Abordagem convencional - nesse tipo de abordagem a fundação é projetada essencialmente como um grupo de estacas, com espaçamento regular das estacas em toda a área do radier, porém considerando que parte da carga é transmitida diretamente do radier para o solo, com distribuição da maior parte da carga para as estacas e o radier com a menor parte. O maior benefício é a redução do número de estacas.
- *Creep piling* - as estacas são projetadas para operar com a carga de trabalho de 70-80% da capacidade última e começam a ocorrer significantes deformações.

A Figura 2.5 mostra a diferença de recalque entre construções distintas, adotando as duas abordagens: projeto convencional e *creep piling*. A edificação 01 em projeto convencional

possui 211 estacas de 28m de comprimento, e a edificação 02 com o conceito de *creep piling* tem 104 estacas de 26m de comprimento, com um custo bem menor na segunda construção e pequena diferença de recalque entre as construções no decorrer do tempo.

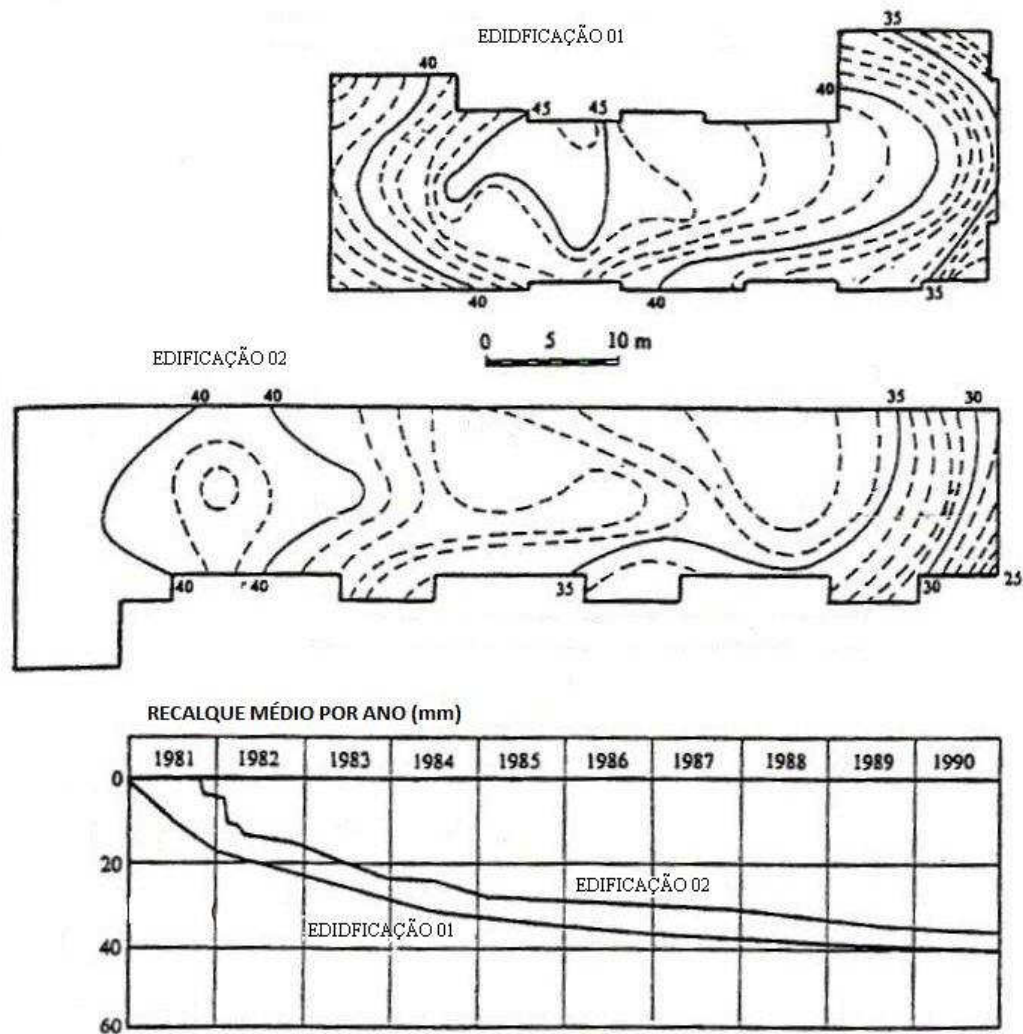


Figura 2.5 – Diferentes abordagens de projeto: edificação 01 convencional e edificação 02 *creep piling* (modificado - RANDOLPH, 1994).

- Controle de recalques diferenciais - as estacas são locadas estrategicamente com a função de reduzir o recalque diferencial, sem haver uma redução substancial do recalque médio total.

Os dois primeiros enfoques apresentados consideram uma distribuição uniforme das estacas sob o radier com o objetivo primário de limitar os recalques totais a níveis aceitáveis. Considerando que a carga estrutural seja uniformemente distribuída sobre a superfície do

radier, haverá uma tendência do radier não-estaqueado apresentar maiores recalques no seu centro.

A Figura 2.6 mostra que a adição de algumas poucas estacas na região central, possivelmente carregadas próximo de sua capacidade última, reduzirá essa tendência e minimizará os recalques diferenciais.

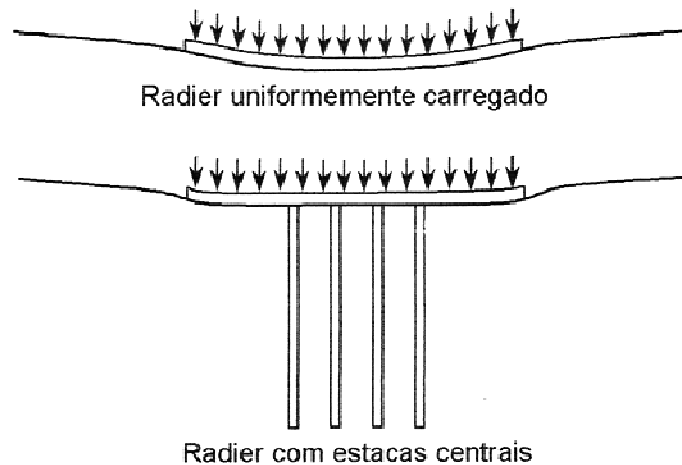


Figura 2.6 - Redução de recalque diferencial com estacas centrais (modificado - RANDOLPH, 1994).

A elaboração do projeto em estacas depende de algumas variáveis que podem influenciar em diferentes resultados na concepção final. As variáveis são, por exemplo: tipo da carga, altura do bloco, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, comprimento, diâmetro, espaçamento, locação das estacas. Os resultados diferenciados são: recalque, distribuição de carga, tensões internas.

Assim alguns autores pesquisaram de forma numérica ou experimental o comportamento do radier estaqueado.

Mandolini (2003) utiliza técnicas numéricas e analíticas para fazer uma estimativa mais realista da distribuição de carga em um radier estaqueado e afirma que não é simplesmente a soma algébrica da capacidade de carga do radier e das estacas e ainda dá dicas práticas de desenvolvimento do projeto:

- O aumento do número de estacas, geralmente é benéfico, mas nem sempre produz a melhor solução para a fundação. Existe um limite superior para o número de estacas

além do qual o aumento é inútil e prejudicial. Em projetos de blocos sobre estacas geralmente ultrapassa este limite,

- Indica inserir estacas uniformemente distribuídas sobre a área do radier com um comprimento L maior que a largura do radier para melhorar o recalque médio estacas em pequenos e médios raders,
- Um número relativamente pequeno de estacas distribuído estrategicamente por toda a área de radier melhora o desempenho do recalque diferencial,
- A altura do radier afeta o recalque diferencial e momentos, mas tem pequeno efeito na distribuição de cargas entre o radier e estacas ou no recalque máximo,
- A natureza da carga aplicada é importante para o recalque diferencial e momentos, mas geralmente é muito pequena a importância para recalque máximo ou distribuição de cargas entre radier e estacas.

2.4. MÉTODOS NUMÉRICOS

O estudo de um radier estaqueado compreende a interação entre os vários elementos que o compõe, interferindo nas cargas das estacas, momentos no radier e recalques. Fazer esta análise exige o uso de ferramentas mais elaboradas para aproximar as respostas da realidade e limitar o tempo de análise.

Alguns diferentes tipos de análise de fundação em radier estaqueado têm sido desenvolvidos, conforme cita Small (2001):

- Abordagens simples de placa sobre molas,
- Método de Elemento de Contorno,
- Técnica de Camadas Finitas,
- Análise de Diferenças Finitas ou Elementos Finitos simplificado,
- Análise de Elemento Finito Tri-dimensional.

E ainda pode ser adotado um método híbrido que mescla mais de um método numérico.

Os mais utilizados para fundações em bloco sobre estacas ou radier estaqueado, são o método de elemento de contorno, método de elementos finitos e métodos híbridos. Segue algumas aplicações de pesquisadores em cada método:

2.4.1. Método de Elementos Finitos – M.E.F.

Utilizado como referência em novas formulações da engenharia, o método de elementos finitos, tem resultados bastante confiáveis. Simula-se o domínio semi-infinito aplicando condições de contorno a grandes distâncias, resultando em um grande número de elementos, nós e equações.

Pelo método de elementos finitos, Ottaviani (1975) comparou o recalque em função do módulo de elasticidade do solo e estacas e a distribuição de cargas entre as estacas, para uma estaca isolada e grupo de estacas de 3 x 3 e 5 x 3. Algumas das suas observações foram:

- O autor confirma que o recalque é bem maior para um grupo de estacas que para estacas isoladas,
- O recalque para grupo de estacas examinado depende da profundidade da camada de solo compressível, abaixo das estacas, o que não é verificado para estacas isoladas,
- A presença do bloco sobre as estacas causa uma distribuição não uniforme de cargas ao longo das estacas do grupo. Estacas internas são muito menos carregadas que as da periferia do grupo,
- Considerando que o bloco esteja em contato com o solo, ou seja, conceito de radier estaqueado, permite não só transmitir parte da carga diretamente para o solo, que aumenta com a diminuição da razão do módulo de elasticidade do concreto pelo módulo de elasticidade do solo, como modifica consideravelmente o mecanismo de transferência da carga das estacas para o solo, como mostrado na Figura 2.7.

Reul e Randolph (2003) compararam através de análises numéricas em M.E.F. no programa ABAQUS com medidas em campo, a fundação de três obras reais: Westend 1, Messeturm e Torhaus der Messe. A comparação entre o recalque total, o recalque diferencial e a carga distribuída para as estacas mostram uma conformidade razoavelmente boa, porém o M.E.F. geralmente mostra uma proporção maior da carga distribuída para as estacas que a medida em campo. A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre os recalques medidos em campo com os previstos pelo método dos elementos finitos.

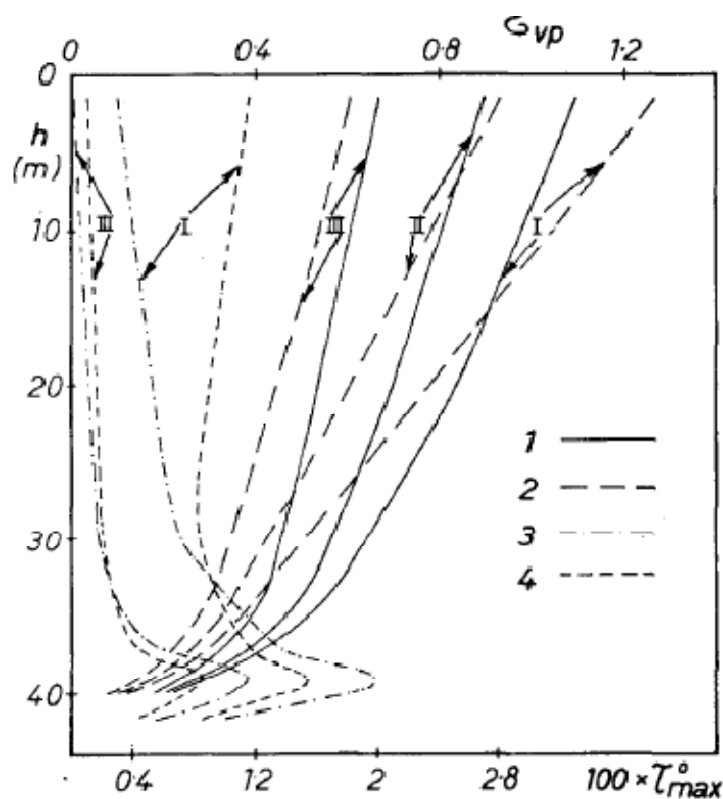


Figura 2.7 – Tensão ao longo da profundidade das estacas I, II, III (canto, lateral e centro) para o grupo de 3 x 3 com bloco em contato com o solo nas curvas 1 e 3, e sem contato com o solo nas curvas 2 e 4 (modificado - OTTAVIANI, 1975).

Tabela 2.1 – Radier estaqueado na argila de Frankfurt: medido (M) e Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) (modificado - REUL; RANDOLPH, 2003).

Obra	Recalque centro (mm)			Recalque diferencial (mm)		
	M	M.E.F		M	M.E.F.	
		Radier estaqueado	Radier		Radier estaqueado	Radier
Messeturm	144	174	278	46	30	39
Torhaus der Messe	124	96	189	MNA	7	14
Westend 1	120	109	184	MNA	87	141

MNA – medida não analisado

O estudo de bloco sobre estacas foi desenvolvido por Munhoz (2004) em M.E.F. para um número reduzido de estacas, avaliou blocos com até cinco estacas verificando o fluxo de

tensão predominante para as estacas logo abaixo do pilar, constatou que para blocos de até quatro estacas o método das bielas é coerente e o modelo mais simples de aplicar, mas para bloco de cinco estacas a altura para manter o ângulo de inclinação da biela é muito alto e o bloco se caracterizará por viga parede e o custo elevado não fica viável.

Ramos (2007) estudou numericamente através de M.E.F., no programa ANSYS, o comportamento de bloco sobre dez estacas com alturas de 80, 115 e 200cm e conclui: as reações nas estacas variam conforme a altura do bloco. Para as alturas estudadas quanto maior a altura dos blocos melhor se percebeu uma tendência de uniformização das reações nas estacas, ou seja, bloco mais alto, mais rígido, a situação mais crítica considera estacas apoiadas em solo do tipo indeformável, chegando-se a reação da estaca com diferenças acima de 200%, e nos solos deformáveis as estacas na região central do bloco foram as mais solicitadas.

2.4.2. Método de Elementos de Contorno - M.E.C.

No método de elementos de contorno é discretizado somente o contorno do domínio e a análise fica reduzida em uma dimensão. A solução é obtida de um conjunto de integrais de equações de Mindlin. A heterogeneidade e não linearidade do solo e interface estaca/solo são consideradas de maneira aproximada. Possui o tempo de análise menor que no M.E.F. por gerar um sistema de equações menor.

Dentre os primeiros trabalhos utilizando o método de elemento de contorno na análise de radier estaqueado destacam-se os de Butterfield e Banerjee (1971a, 1971b) nos quais os autores comentaram que o bloco em contato com o solo pouco reduz os recalques e que em espaçamentos convencionais as cargas transmitidas para as estacas sofrem pequenas alterações.

Kuwabara (1989) chegou a várias conclusões após analisar numericamente raders estaqueados em um solo homogêneo, semi-espaço elástico e isotrópico, quando aplicado em um grupo de estacas idênticas dispostas em uma configuração quadrada:

- A proporção entre os recalques imediato e total é menor em raders estaqueados do que em blocos de estacas (sem contato com o solo), mas o efeito do radier é pequeno exceto para grupos com estacas curtas,

- A distribuição vertical de carga ao longo do comprimento da estaca é pouco afetada pela presença do radier, exceto na parte superior do fuste onde a carga é reduzida pela presença do mesmo. A carga transferida pela ponta da estaca em grupos de estacas é maior que em estacas individuais,
- A pressão de contato no radier é relativamente uniforme na área ao redor das estacas,
- A presença do radier em contato com o solo implica numa diminuição das tensões cisalhantes no terço superior do fuste da estaca e consequentemente a rigidez desta também se reduz pela perda de atrito no seu fuste.

Por Butterfield e Banerjee (1971a, 1971b) e Kuwabara (1989) serem referência em método de elemento de contorno, Russo e Viggiani (1997) compararam os resultados dos dois autores, conforme mostra a Figura 2.8, e observaram uma proximidade boa entre o recalque obtido pelos dois autores e uma discrepância entre a distribuição de cargas explicada pela diferenças de parâmetros adotados. Comentam ainda que os resultados em termos de distribuição de carregamento entre estacas e radier e carregamento distribuído entre as estacas tende a ser de preferência mais disperso que aqueles em termos de recalque.

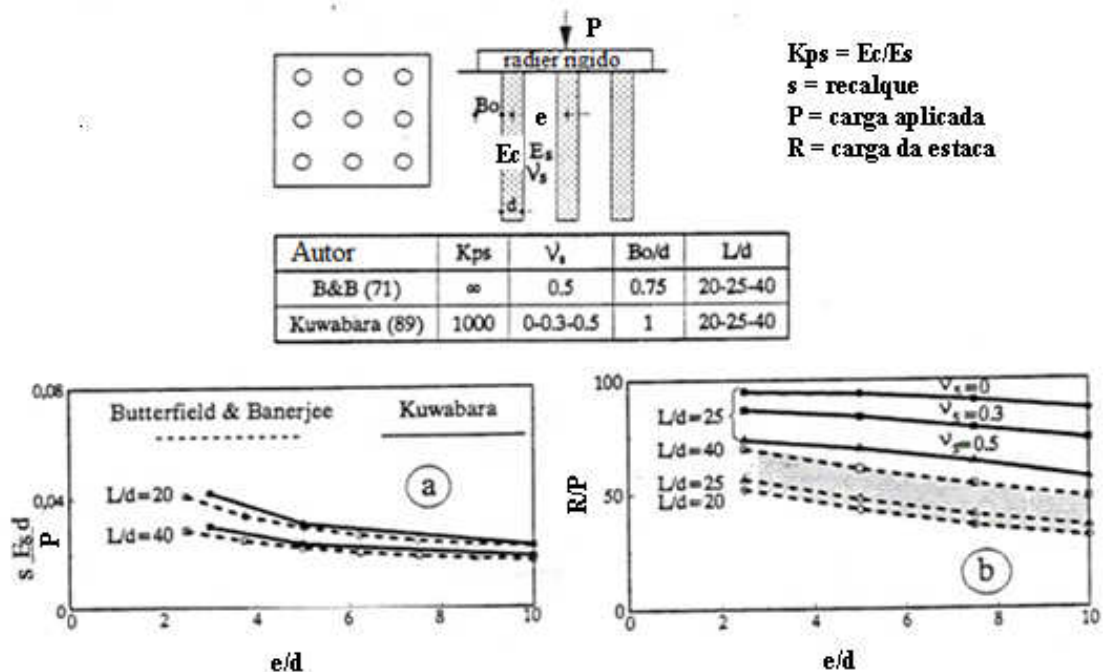


Figura 2.8 – Comparação dos resultados em M.E.C. apresentados por Butterfield e Banerjee (1971a) e Kuwabara (1989) (modificado – RUSSO e VIGGIANI, 1997).

No Brasil, Mendonça e Paiva (2000), através do método de elemento de contorno, apresentaram uma formulação para análise estática de radiers estaqueados na qual todas as interações entre o radier e as estacas são simultaneamente consideradas. Nesta investigação o radier é considerado como uma placa delgada matematicamente descrita por equações integrais enquanto o solo é considerado como um semi-espaço homogêneo, isotrópico e elástico linear representado por equações integrais baseadas na solução de Mindlin (1936).

A interface radier solo é dividida em elementos triangulares, admitindo-se uma variação linear das pressões de contato através de cada elemento. Os resultados obtidos foram os recalques e a rigidez global da fundação. Comparações feitas entre os resultados numéricos obtidos nessa formulação com outros apresentados na literatura mostram uma boa concordância entre eles, sendo as diferenças justificadas pelas distintas modelagens da interface radier estacas solo adotadas em cada caso.

2.4.3. Método híbrido

O método híbrido consiste na aplicação de distintos métodos numéricos em conjunto, buscando tirar vantagem de cada método. Geralmente, na análise de um radier estaqueado, o radier é analisado pelo M.E.F. e a interação entre as estacas e o solo pelo método das camadas finitas, ou método de elemento de contorno.

Hain e Lee (1978) analisaram através de um método numérico híbrido simplificado que incorpora através da superposição de fatores de interação entre os elementos da fundação, o método dos elementos finitos na análise do radier e o método dos elementos de contorno na análise do conjunto solo/estacas. A Figura 2.9 mostra a interação entre estaca-estaca, radier-estaca, estaca-radier e radier-radier. A demonstração de interação entre os componentes da fundação se tornou um modelo clássico apresentado em vários trabalhos posteriores.

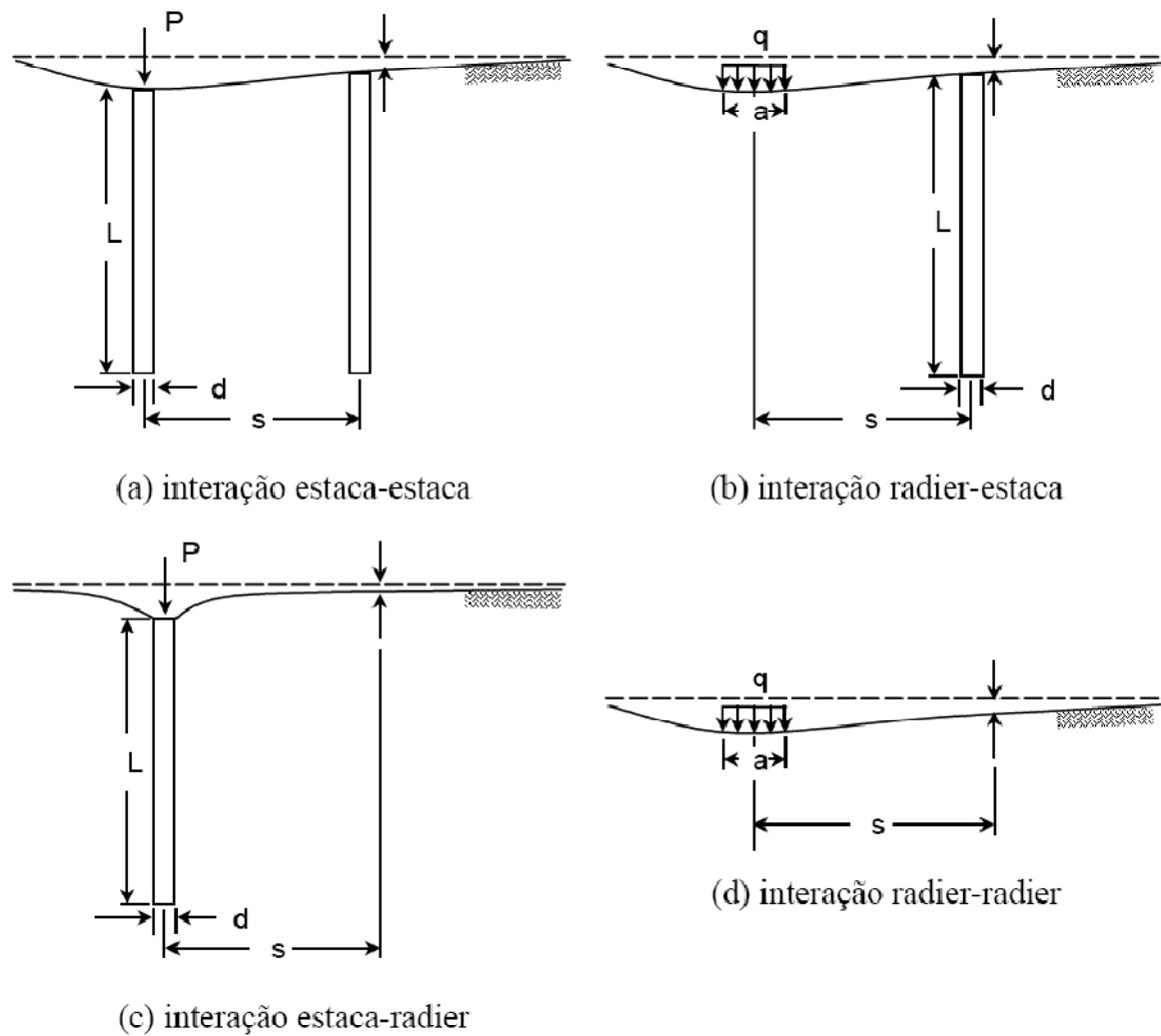


Figura 2.9 - Mecanismos de interação em radiers estaqueados (modificado – HAIN e LEE, 1978).

Os autores Russo e Viggiani (1997) compararam dois programas, o NAPRA desenvolvido em M.E.F. para cálculo da placa e as estacas consideradas como molas não lineares e suas interações, e o HyPR também modelado em M.E.F. para o cálculo da placa e as estacas consideradas como uma série de molas interligadas. Depois compararam o NAPRA com testes em centrífuga.

Na comparação entre os dois programas os resultados encontrados mostraram uma boa aproximação em termos de recalque e distribuição de cargas principalmente em placas rígidas. E comparando o NAPRA com os testes em centrífuga os resultados de recalque e carga têm uma boa aproximação, com melhor precisão para análise não linear.

Através do método híbrido, com o uso do programa GARP, os autores Sales *et al* (2010) pesquisaram o comportamento, medição e previsão do radier estaqueado em solos argilosos quando existir escavações profundas e concluíram:

- O método simplificado apresenta bons resultados de recalque e distribuição da carga, e os detalhes de valores individuais de carga nas estacas e momento interno no radier requer uma análise mais complexa,
- As estruturas que utilizam a compensação na fundação têm significativa redução de recalque e aumento da eficácia do radier,
- A previsão do comportamento da fundação depende do processo executivo da escavação do subsolo e do sistema de medida de recalques,
- Ressaltam a importância da interação entre a estrutura e a fundação para obter valores mais próximos da realidade,
- O recalque e a distribuição da carga é influenciado pelo nível da água, e portanto o monitoramento do N.A. é um importante,
- O limite de interação máximo entre estacas de 15 vezes o diâmetro das estacas mostraram bons resultados.

2.5. RECALQUE EM RADIER ESTAQUEADO

As sapatas ou radiers em muitos casos é uma solução viável técnica e economicamente para muitas fundações, porém pode gerar um recalque maior que o desejado. Nestes casos a inserção de algumas estacas ao radier pode resolver este problema.

Os projetos convencionais de grupo de estacas são baseados essencialmente na capacidade de carga e não avalia o recalque como ponto fundamental no uso das estacas.

O conceito de estacas atuando no bloco como redutoras de recalque iniciou com Burland *et al* (1977) com a sugestão de utilização de poucas estacas e grandes espaçamentos. Neste caso ao projetar pergunta-se quantas estacas seriam necessárias para obter um recalque aceitável, diferentemente do método tradicional onde procura-se saber quantas estacas serão necessárias para a capacidade de carga da fundação.

Kim *et al.* (2001) apresentaram uma técnica de otimização somente com a redistribuição das estacas com o objetivo de reduzir os recalques diferenciais de um radier estaqueado,

utilizando um radier de 20m x 20m e 1.0m de espessura, composto de 25 estacas de 20m de comprimento e 60cm de diâmetro. Os recalques diferenciais, conforme a Tabela 2.2, foram consideravelmente reduzidos pela configuração ótima das estacas e os recalques médios aumentaram significativamente, o que mostra que o radier tende a se deslocar como um corpo rígido e melhora tanto em relação à estrutura quanto ao radier.

Tabela 2.2 – Recalques diferencial, máximo e médio do radier (modificado - KIM *et al.*, 2001).

Exemplo	Configuração inicial (mm)		Configuração ótima (mm)		Redução no máximo recalque diferencial %
	Recalque diferencial	Recalque médio	Recalque diferencial	Recalque médio	
carga uniformemente distribuída	3,2	16,5	0,2	17	94
linhas de carga distribuída	13,2	17	2,2	20,6	83
cargas concentradas	14,9	16,7	3,3	18,9	78

Na Tabela 2.3 mostra-se o momento fletor médio para o mesmo radier e observa-se uma redução na ordem de 50%, o que é favorável no caso da redução dos recalques diferenciais.

Tabela 2.3 – Momento fletor médio no radier (modificado - KIM *et al.*, 2001).

Exemplo	Configuração inicial (kN.m/m)	Configuração ótima (kN.m/m)	Redução (%)
carga uniformemente distribuída	134	67	50
linhas de carga distribuída	554	221	60
cargas concentradas	429	245	43

Lima (2007) estuda a otimização do radier estaqueado em função do custo, limitando o recalque, ele dimensiona um bloco sobre estacas em diversas configurações: variando o número e posição das estacas, o tipo de carregamento, o perfil do solo, o diâmetro das estacas e a geometria do radier. Conclui que dependendo da variável que se pretende reduzir, por exemplo, custo ou recalque diferencial, existem diferentes posições de estaqueamento ótimo, comenta também que as formas manuais de definir posição das estacas podem levar o projetista a caminhos incertos.

O autor ainda exemplifica que para o carregamento concentrado quando se desejava reduzir o recalque de 40mm para 20mm o custo da fundação poderia aumentar em 83%, enquanto que no carregamento uniforme este aumento foi de 48%

2.6. CAPACIDADE DE CARGA DE RADIER ESTAQUEADO

Quando se dimensiona um bloco utilizando o conceito de radier estaqueado a capacidade de carga do radier e de cada uma das estacas sofre alterações, como pesquisado anteriormente.

Poulos (1998) afirma que o modo convencional de dimensionamento de blocos sobre estacas considerando toda a carga para as estacas é muito conservativo e antieconômico e indica a possibilidade da utilização de toda a capacidade de carga de algumas ou todas as estacas, como uma versão mais severa do conceito *creep piling*, desde que garantido o fator de segurança global da fundação.

Sales (2000) demonstra que após a primeira estaca do grupo atingir sua capacidade máxima de carga ocorre uma redistribuição da carga excedente entre as demais estacas e a sapata até que a última estaca atinja seu limite de carga. A partir deste ponto o comportamento global será alterado, as estacas suportarão uma carga aproximadamente constante e o acréscimo de carga será suportado pela sapata.

Utilizando o programa GARP, na simulação desta segunda etapa do comportamento da fundação, o emprego de um “limite de escorregamento” por Sales (2000) foi muito mais eficiente do que o tradicional procedimento de simplesmente limitar a carga máxima atuante na estaca.

Cunha e Cordeiro (2009) avaliaram, utilizando o conceito de radier estaqueado, o reforço de um bloco sobre seis estacas, em que uma das estacas de canto ficou defeituosa. Concluíram que ocorre uma migração de cargas no interior do bloco, antes e depois do reforço, com um aumento ou redução de cargas de cada estaca.

Para o caso estudado de seis estacas com inserção de uma única estaca, Cunha e Cordeiro (2009) relataram que quanto mais próxima a nova estaca ficar da defeituosa, e aplicada nos estágios iniciais de carregamento, melhor o comportamento global do grupo de estacas.

2.7. MOMENTO INTERNO EM RADIER ESTAQUEADO

Poulos (1994) exemplifica através do programa GARP o método de cálculo para um radier estaqueado no Ed. Akasaka, São Paulo, em que é estudado a variação da quantidade de estacas e os efeitos no coeficiente de segurança das estacas e global, recalque máximo, momento no radier em x, em y e torção, a porcentagem de carga para as estacas e radier, e o percentual de capacidade de carga para cada estaca. A Figura 2.10 mostra que momento máximo diminui com o aumento do número de estacas, mas torna-se aproximadamente constante com 13 estacas.

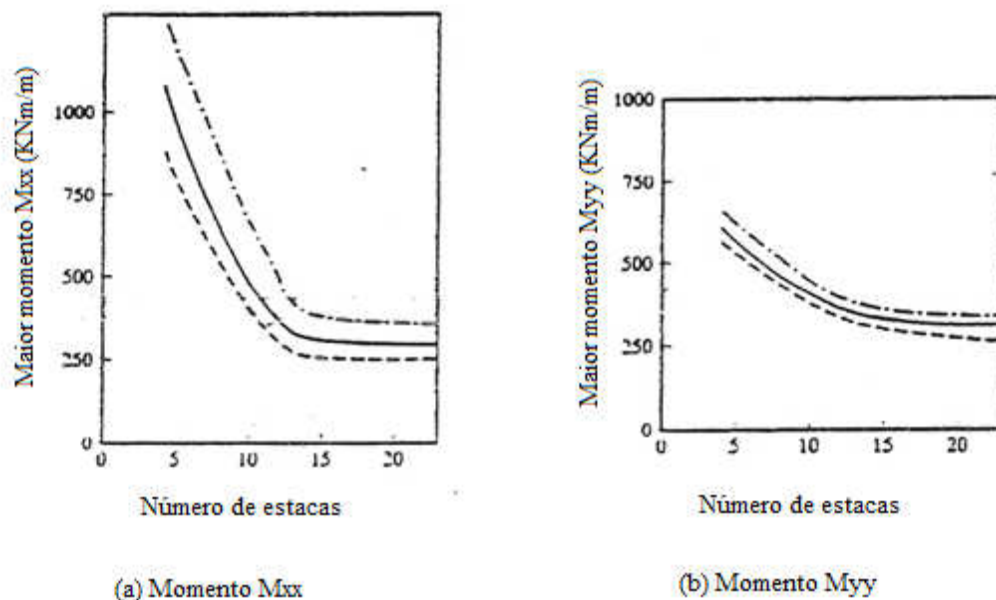


Figura 2.10 - Gráfico de momento versus número de estacas do Ed. Akasaka-SP. (modificado - POULOS, 1994).

O momento máximo no interior do radier depende, entre outros fatores, do número de estacas, do tipo de carga aplicada e da espessura do radier, conforme mostra Poulos (1998) na Figura 2.11. Na figura 2.11a onde se compara o momento máximo com o tipo de carga aplicada, ele utiliza um radier de 50cm de espessura e carga total da fundação de 12MN, e na figura 2.11b compara o momento máximo com o número de estacas, variando a espessura do radier e utilizando uma carga concentrada de 10MN.

Nos dois casos estudados Poulos (1998) conclui que o momento máximo para carga concentrada é substancialmente maior que para cargas uniformes e quanto maior a espessura do radier, menor o recalque diferencial e maior o momento máximo, conforme mostrado na Figura 2.11.

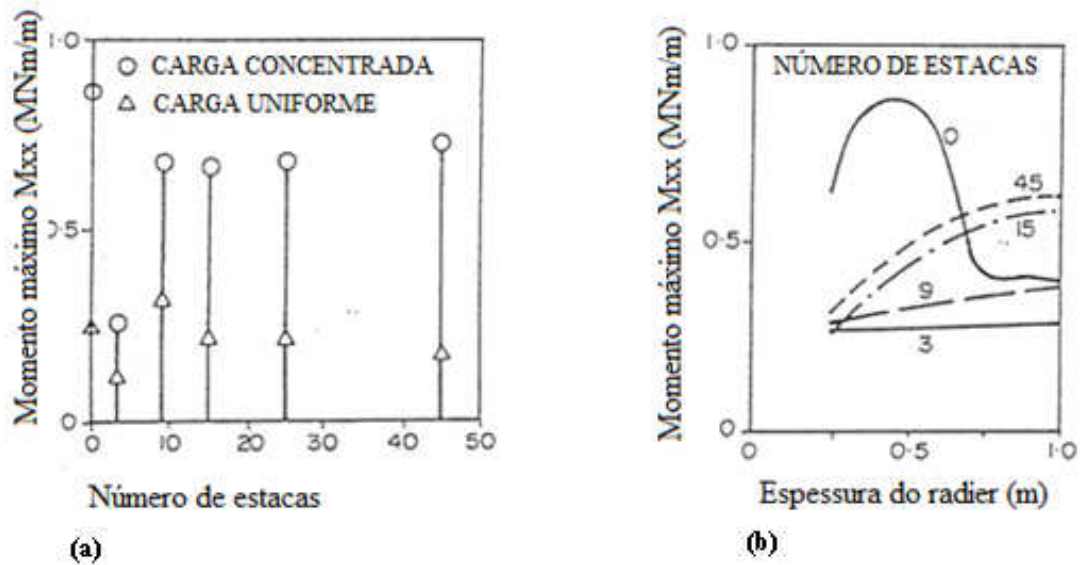


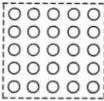
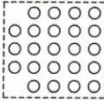
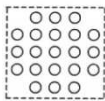
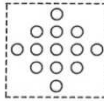
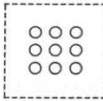
Figura 2.11 - Momento máximo versus (a) variação de natureza da carga e (b) número de estacas (modificado - POULOS, 1998).

Cunha *et al.* (2000) estudaram através de radier estaqueado uma obra na Yugoslávia com fundação somente em radier que apresentou grandes recalques, variou a quantidade e comprimento das estacas e concluiu que o acréscimo de algumas estacas reduz o recalque, que quando estacas são curtas de 8m o recalque para 24 ou 8 estacas praticamente não altera. Os momentos máximos diminuem com a redução de 24 para 16 estacas, mas aumentam com a redução de 16 para 8 estacas.

Bezerra (2003) utilizando o programa APRAFR baseado no método de camadas finitas variou os parâmetros de entrada, tais como coeficiente de Poisson do solo e rigidez relativa, que é a razão entre o módulo de elasticidade da estaca pelo do solo, e em uma situação de otimização do radier concluiu que a redução de momentos fletores no radier é obtida pela locação das estacas nas regiões mais carregadas onde os recalques são maiores.

Outro caso pesquisado foi relativo a um bloco sobre estacas de uma obra real, dimensionado de forma tradicional, pelo método manual, em que Sales *et al.* (2002) calcularam através de ferramentas numéricas, como um radier estaqueado, o mesmo bloco alterando a quantidade de estacas, partiram da quantidade de estacas original, 25, e foram retirando algumas estacas para ver o comportamento do grupo, observaram, conforme mostra a Tabela 2.4, o efeito no fator de segurança, nos recalques, nos momentos gerados no interior dos blocos e a distribuição de carga entre as estacas e radier.

Tabela 2.4 – Valores dos esforços e recalques obtidos nas diversas simulações (modificado - SALES *et al.*, 2002).

Número de estacas	25	23	21	13	9	0
						
Carga nas estacas (%)	91,29	88,93	87,58	76,01	64,03	0,00
Carga no solo (%)	8,71	11,07	12,42	23,99	35,97	100,00
Carga média estacas (kN)	1603,4	1697,7	1831,4	2567,5	3123,8	-
Carga máxima estacas (kN)	3077,8	3550,5	3420,4	5156,8	4558,3	-
Carga mínima estacas (kN)	982,2	960,9	1060,3	1528,8	2140,1	-
Momento Mx máx (kN m)	2202	2074	1902	1450	1157	1836
Momento My máx (kN m)	4515	3536	3508	2713	3149	4214
Recalque máximo (mm)	7,60	8,29	8,13	9,51	11,00	15,47
Recalque mínimo (mm)	5,40	5,18	5,75	6,15	6,27	7,54
Recalque diferencial (mm)	2,20	3,11	2,38	3,36	4,73	7,93
F.S. do grupo de estaca	3,42	3,14	2,87	1,78	1,23	-
F.S. global	5,52	5,24	4,97	3,88	3,33	2,10

Estes autores mostraram que à medida que foram retirando as estacas até ficar somente o radier, a porcentagem de carga distribuída ao solo através do radier e os recalques máximo, aumentam; que os momentos máximos tendem a diminuir.

Observa-se na Tabela 2.4 que o fator de segurança do grupo de estacas atinge um valor menor que dois para os casos com 13 e 9 estacas, um fator limitante no método tradicional de cálculo de bloco sobre estacas, mas o fator de segurança global nestes casos ainda seria superior a 3, mostrando que a fundação como um todo suportaria adequadamente a carga.

A escolha de qual a melhor opção de fundação a adotar entre as sugeridas na Tabela 2.4 depende dos requisitos impostos pelo projeto, observando o melhor custo benefício. Sales *et al* (2002) comentam que se só o recalque máximo de 10mm fosse o critério de escolha, uma alternativa com 13 estacas (aproximadamente a metade do empregado) atenderia a este

requisito e ainda com momentos internos menores que os do bloco original. O Fator de segurança global seria atendido, embora algumas estacas ficassem com carga próxima ao limite último.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE BLOCOS SOBRE ESTACAS

O bloco sobre estacas tradicionalmente é conceituado como uma estrutura que liga os pilares às estacas da fundação. Portanto, dimensionados estruturalmente através de métodos de transferência de cargas, com cálculos simples e de fácil aplicação manual, sem a consideração do contato do bloco com o solo que não poderia contribuir para a diminuição dos esforços nas estacas.

Utilizar o conceito de radier estaqueado no dimensionamento significa que o bloco juntamente com as estacas comporia um só elemento e o grupo todo transferiria carga ao solo. Neste caso, o sistema é mais complexo e necessita de ferramentas numéricas para identificar as tensões internas no bloco e assim dimensionar estas peças.

O dimensionamento estrutural dos blocos sobre estacas pode ser feito conforme indicação de várias normas: a americana ACI-318 (1994), norma brasileira de estruturas NBR 6118 (2003) ou outra norma de outros países. A norma brasileira de estruturas não demonstra como deve ser calculada a armação dos blocos, mas indica as opções de concepção estrutural existentes.

Independentemente do método adotado, o processo de dimensionamento de bloco sobre estacas se inicia pela escolha do tipo de estaca e suas características geométricas de seção transversal, e profundidade. As estacas são dimensionadas para satisfazer a capacidade de carga solicitada, dentro do fator de segurança indicado pela norma de fundações NBR 6122 (2010). O processo de definição das estacas no projeto pode ser feito conforme mencionado no capítulo 2, desta dissertação.

Para definir a locação das estacas é indicado que o centro de estaqueamento coincida com o centro de carga do pilar ou pilares, adotando o espaçamento mínimo entre elas. Moraes (1976) indica que para estacas escavadas ou moldadas *in loco* o espaçamento deverá ser maior ou

igual a três vezes o diâmetro da estaca e para estacas pré-moldadas do tipo cravadas o espaçamento deveria ser maior ou igual a duas vezes e meia o diâmetro das estacas.

3.1. CARGA NAS ESTACAS DE UM BLOCO

A parcela de carga para cada estaca projetada é baseado na superposição de efeitos da força vertical e dos momentos atuantes, somando separadamente a contribuição de cada parcela, conforme Alonso (1983).

$$R_i = \frac{P}{n_p} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \quad (3.1)$$

Onde:

- R_i – reação na estaca i ,
- P – carga vertical aplicada,
- n_p – número de estacas,
- M_x e M_y – momento aplicado no bloco na direção x , y respectivamente,
- x_i – distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção x ,
- y_i – distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção y .

A equação 3.1 é válida para eixos x e y coincidindo com o centro de inércia, e estacas idênticas e verticais.

No caso de radier estaqueado, Poulos (2000) mostra que a parcela de carga vertical é proporcional a carga transmitida às estacas, devido à distribuição de carga ao bloco e estacas, e os momentos recebem a influência do momento de inércia do grupo de estacas, conforme mostrado nas equações 3.2, 3.3, 3.4.

Os momentos da equação 3.2 não são os mesmos adotados no Brasil, que utiliza a regra da mão direita, corresponde a notação utilizada na Austrália, em que o M_x (Austrália) = M_y (Brasil) e M_y (Austrália) = $-M_x$ (Brasil).

$$R_i = \frac{P\beta_p}{n_p} \pm \frac{M_x^* x_i}{I_y} \pm \frac{M_y^* y_i}{I_x} \quad (3.2)$$

$$M_x^* = \frac{M_x - M_y I_{xy}/I_x}{1 - I_{xy}^2/(I_x I_y)} \quad (3.3)$$

$$M_y^* = \frac{M_y - M_x I_{xy}/I_y}{1 - I_{xy}^2/(I_x I_y)} \quad (3.4)$$

Onde:

- R_i – reação na estaca i ,
- P – carga vertical aplicada,
- β_p – proporção de carga transmitida para as estacas,
- I_x, I_y – momento de inércia do grupo de estacas nos eixos x e y respectivamente,
- I_{xy} – produto da inércia do grupo de estacas ao centro de carga,
- M_x e M_y – momento aplicado no bloco na direção x , y respectivamente, convenção da Austrália,
- n_p – número de estacas,
- x_i – distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção x ,
- y_i – distância do ponto de aplicação do momento até a estaca i na direção y .

A norma brasileira de estruturas classifica os blocos em rígidos ou flexíveis, para determinar o tipo de cálculo de dimensionamento que deverá ser adotado. Esta classificação depende da relação entre a altura do bloco e a distância das estacas ao pilar.

No bloco rígido o comportamento estrutural se caracteriza por:

- Trabalho à flexão nas duas direções, mas com trações essencialmente concentradas nas linhas sobre as estacas;
- Cargas transmitidas do pilar para as estacas essencialmente por bielas de compressão, de forma e dimensões complexas;

- Trabalho ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruptura por tração diagonal, e sim por compressão das bielas.

No bloco flexível, deve ser realizada uma análise mais completa, desde a distribuição dos esforços nas estacas, dos tirantes de tração, até a necessidade da verificação da punção.

Nos casos de blocos rígidos normalmente emprega-se a analogia das bielas e tirante e para os blocos flexíveis a teoria das vigas.

O bloco é considerado rígido, segundo Moraes (1976), conforme a relação do ângulo de escora $45^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$, (ver Figura 3.1) ou, em outras palavras, conforme Alonso (1983) com a relação $0.5 \leq a/d \leq 1$, (ver Figura 3.2).

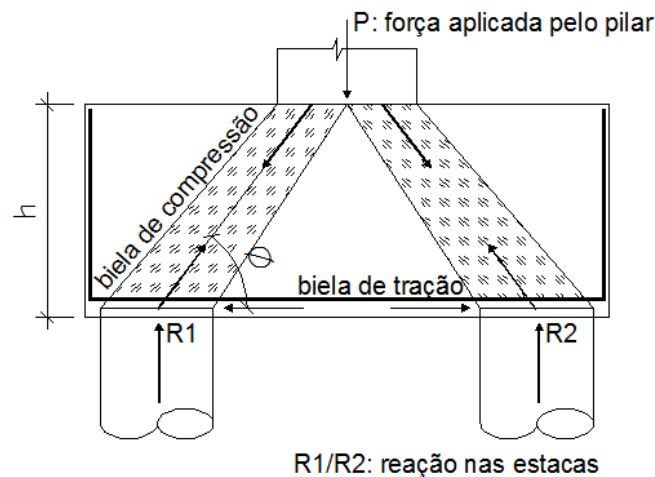


Figura 3.1 – Ângulo de escora entre bielas de compressão e tração (modificado – MORAES, 1976).

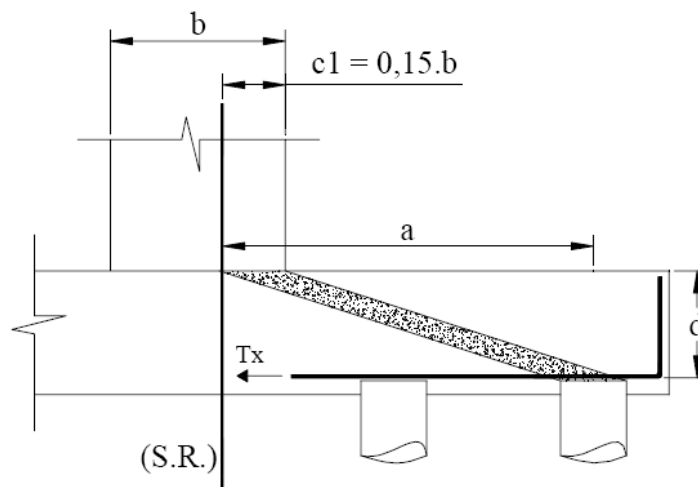


Figura 3.2 – Método da flexão, seção de referência (modificado - ALONSO, 1983).

3.2. MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES

O Método das Bielas é utilizado para blocos rígidos, considerando no interior do bloco uma treliça espacial composta por barras tracionadas situadas logo acima do arrasamento das estacas, e barras comprimidas inclinadas, chamadas bielas com extremidades junto da região de apoio dos pilares (NBR 6118, 2003).

As forças de tração que atuam nas barras horizontais da treliça são resistidas pela armadura, as forças de compressão nas bielas são resistidas pelo concreto. O método consiste no cálculo da força de tração e na verificação da tensão de compressão nas bielas (MORAES, 1976).

A armadura principal (A_s) é calculada pela força de tração no aço, conforme a equação 3.5.

$$A_s = \frac{1.4Z}{f_{yd}} \quad (3.5)$$

Onde:

- A_s – armação principal,
- Z – esforço de tração no aço,
- f_{yd} – tensão de escoamento do aço.

A Tabela 3.1 mostra, para blocos variando de duas a cinco estacas, como deve ser feita a verificação de compressão máxima na biela junto ao pilar e na biela junto à estaca, e mostra a força de tração no aço, segundo o tipo de armação.

Para blocos com 6 ou mais estacas, o processo pode ser generalizado. Consiste em traçar dois eixos ortogonais x e y passando pelo centro de gravidade. O esforço de tração no aço é dado pela equação 3.6, que é a relação entre o momento e a altura do bloco.

$$Z = \frac{P}{n_p h} \sum di \quad (3.6)$$

Onde:

- di – distância de cada estaca ao centro de gravidade no eixo x ou y.

Tabela 3.1 – Método das bielas: cálculo de armadura em blocos sobre estacas.

N. estacas	Verificação de compressão		Força de tração no aço
	Na biela junto ao pilar	Na biela junto à estaca	
2 Estacas	$\frac{P}{A_b \sin^2 \phi} \leq 0.85 f_{ck}$	$\frac{P}{2A_p \sin^2 \phi} \leq 0.85 f_{ck}$	$Z = \frac{P(2e - a_b)}{8h}$
3 Estacas	$\frac{P}{A_b \sin^2 \phi} \leq 1.06 f_{ck}$	$\frac{P}{3A_p \sin^2 \phi} \leq 1.06 f_{ck}$	$Z = \frac{P(e - \frac{a_b}{2})}{9h}$ -armação segundo os lados
4 Estacas	$\frac{P}{A_b \sin^2 \phi} \leq 1.28 f_{ck}$	$\frac{P}{A_p \sin^2 \phi} \leq 1.28 f_{ck}$	$Z = \frac{P(2e - a_b)}{8h}$ -armação em malha
5 Estacas	Repetir bloco sobre 4 estacas, substituindo P por $4P/5$		

Onde:

- P – carga vertical aplicada,
- Z – esforço de tração no aço,
- ϕ ângulo de escora (Figura 3.1),
- e – espaçamento entre estacas,
- A_b – seção transversal do pilar,
- A_p – seção transversal da estaca,
- a_b – lado do pilar,
- h – altura do bloco,
- f_{ck} – tensão de ruptura do concreto simples.

Deve-se também verificar a tensão de tração do concreto na região da ferragem pela equação 3.7.

$$\frac{\gamma R_i}{b_w h} \leq 2f_{tk} \quad (3.7)$$

Onde:

- $\gamma = \gamma_f \gamma_c \cong 1.96$,
- R_i – reação na estaca i ,
- h – altura do bloco,
- b_w – largura do bloco na direção considerada.
- f_{tk} – tensão de tração característica do concreto.

Com relação aos blocos sobre três estacas, Blévy e Frémy (1967) utilizaram diferentes tipos de arranjo de armadura: armadura segundo os lados, unindo as estacas, acrescida de malha; armaduras dispostas nas medianas passando pela projeção do pilar; combinação entre as armaduras segundo os lados e medianas; e armadura em malha.

Para modelos de blocos sobre quatro estacas estudaram cinco tipos de arranjos de armadura: armadura segundo os lados do bloco com acréscimo de malha de distribuição; armadura em cinta com acréscimo de malha de distribuição; armadura segundo as diagonais; combinação entre armaduras segundo as diagonais e cintas; e armadura em malha.

3.3. TEORIA DAS VIGAS

Para blocos flexíveis o dimensionamento é feito baseado na Teoria das Vigas. Neste caso, a armação dos blocos é calculada como nas vigas através dos diagramas de momento fletor e esforço cortante.

O momento fletor e cortante em uma seção S são obtidos pelas equações 3.8 e 3.9.

$$M = \sum R_i d_i \quad (3.8)$$

$$Q = \sum R_i \quad (3.9)$$

Onde:

- R_i – carga na estaca,
- M – momento fletor na seção S,

- Q - esforço cortante na seção S ,
- d_i – distância de cada estaca ao centro de gravidade no eixo x ou y .

De forma geral, tanto para blocos rígidos quanto flexíveis, as armações principais são posicionadas na parte inferior do bloco, pois são as que resistem à tração, porém ainda há diversas indicações para acréscimo de armação nos blocos tanto na região superior, como malha de distribuição e pele, que não foi estudado nesta pesquisa.

3.4. MÉTODOS NUMÉRICOS

A NBR 6118 (2003), quando se refere a bloco, diz que podem ser utilizadas análise linear, a análise plástica ou a análise não linear. As análises podem ser realizadas com o emprego de procedimento numérico adequado. Conforme apresentado no capítulo 2, existem alguns métodos disponíveis para cálculo de radier estaqueado e vários são os softwares disponíveis para aplicação, basta definir o método desejado para aplicar: elementos finitos, elementos de contorno, diferenças finitas ou outros como a união de mais de um método.

Nos métodos numéricos é possível obter, com um pouco mais de tempo e esforço computacional, maior quantidade de dados de saída que nos métodos manuais. Entre os dados de saída, por exemplo, estão uma melhor precisão das cargas nas estacas, momento fletor em vários pontos do bloco e de forma tridimensional, diferente dos métodos manuais que o momento é dado de forma homogênea, geralmente a partir de esforços de tração para depois se transformar em momento.

A aplicação dos métodos numéricos nos projetos de fundações pode melhorar a qualidade dos blocos sobre estacas em vários aspectos. Neste trabalho o foco foi a armação principal dos blocos sobre estacas, o que na prática significa determinar a melhor área de aço e disposição no bloco sobre estacas. Portanto o engenheiro calculista com o auxílio de uma ferramenta numérica pode garantir projetos com melhores desempenhos que adotar métodos simplificados para todos os casos de blocos sobre estacas.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

O dimensionamento de blocos sobre estacas pode ser feito de maneira simplificada, pelo método manual, em qualquer de suas aplicações ou de forma numérica utilizando o conceito de radier estaqueado.

Neste trabalho foram feitas algumas análises em blocos hipotéticos semelhantes aos praticados nas obras, partindo de uma geometria tradicional de métodos manuais. Os blocos foram dimensionados estruturalmente de três diferentes formas, uma de forma manual, e duas considerando o conceito de radier estaqueado.

A grandeza utilizada como comparação foi o momento gerado no interior do bloco que é a grandeza responsável, juntamente com a altura e f_{ck} do concreto, pela quantidade de aço necessária para armar o bloco.

Dentre os métodos existentes para calcular bloco sobre estacas, utilizando o conceito de radier estaqueado, foram escolhidos dois programas para abordar o assunto: um no método de elementos finitos, por ser uma ferramenta completa e considerado mais preciso; o segundo um software específico para radier estaqueado baseado nos métodos híbridos, que vem sendo bastante utilizado em pesquisas na UFG e UnB.

4.1. MÉTODO MANUAL

Como visto no capítulo 3, o dimensionamento da área de aço necessária para armar um bloco pode ser feito pelo método das bielas e tirantes, determinando o esforço de tração interno, ou pela teoria das vigas, traçando diagramas de momento fletor e esforço cortante nas seções desejadas.

Como não há grandes diferenças entre os métodos manuais, adotou-se neste trabalho a teoria das vigas como processo de dimensionamento manual, para se comparar os momentos internos nos blocos obtidos nos métodos numéricos.

Na Teoria das Vigas, o momento fletor calculado é dado para toda a largura do bloco. Para efeito de comparação foi transformado em momento por metro linear, dividindo o momento encontrado pela largura do bloco.

4.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Na avaliação pelo método dos elementos finitos foi escolhido o *software* DIANA (*Displacement Method Analyser*), que é um programa baseado no método dos deslocamentos desenvolvido pela TNO (2008) para atender principalmente problemas de engenharia civil, possuindo uma vasta biblioteca de modelos avançados para análise do comportamento do solo e do concreto.

De acordo com Melo (2009), o programa inclui aplicações tridimensionais, axissimétricas, no estado plano de tensões e deformações, análises lineares, não-lineares, viscoelásticas, térmicas, dinâmicas, fluidas, com interações e contatos entre elementos, dentre outras.

4.2.1. Procedimento de análise

O DIANA conta com um pré e pós-processador que roda no sistema operacional Windows, o Midas Fx+ for DIANA, ilustrado na Figura 4.1. No pré-processador para um radier estaqueado os dados de entrada são:

- Definição da geometria,
- Natureza e aplicação das cargas no bloco,
- Condições de contorno,
- Propriedades físicas e mecânicas dos materiais,
- Definição da malha de elementos finitos podendo ser gerada de forma manual ou automática.

No pós-processador se visualizam os resultados da análise de tensões, deslocamentos, deformações, reações de apoio, etc., fornecidos nos nós selecionados em forma de tabelas ou ilustradas conforme mostra a Figura 4.2, possibilitando escolher o local exato dos dados de saída, por exemplo: deslocamento no topo da estaca, deslocamento na base da estaca ou alguma faixa lateral do fuste, conforme solicitação para dados de saída.

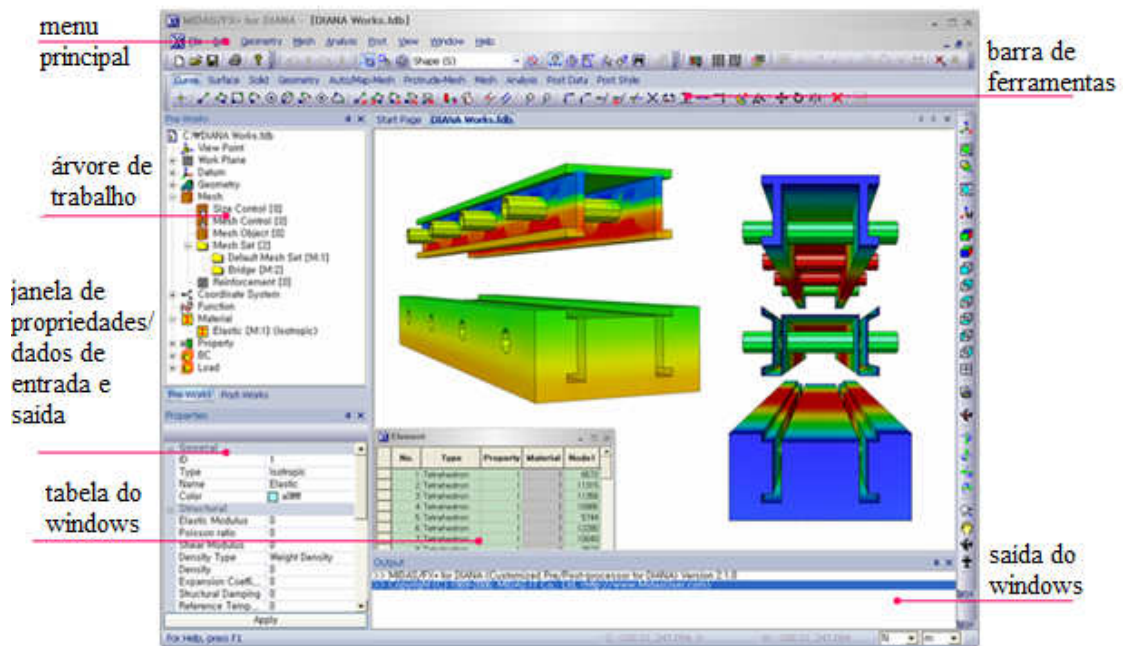


Figura 4.1 – Tela do Fx+ for DIANA (modificado - TNO, 2008).

Após carregar o pré-processador com os dados de entrada ocorre o processamento pelo programa DIANA, e a busca no pós-processador dos resultados.

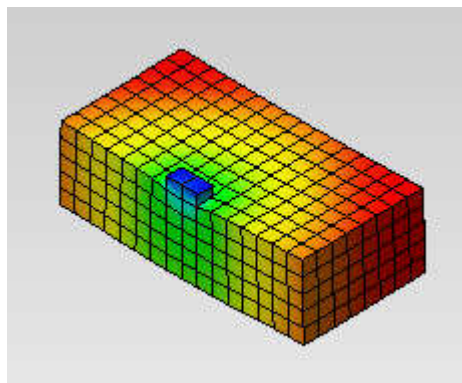


Figura 4.2 – Exemplo de saída gráfica do deslocamento do Fx+ for DIANA.

No M.E.F. o que define cada elemento é a geometria, dada em termos das coordenadas dos pontos nodais interligados por nós ao longo de seus lados por funções de interpolação e as propriedades do material tal como, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, utilizados nesta pesquisa.

Para se obter seções transversais ao longo do bloco com a face regular, optou-se por usar malha de elementos cúbicos, sendo a maioria dos elementos de 6 lados e 8 nós e além desses,

no solo para ampliação da malha foi necessário utilizar alguns elementos cúbicos de 5 lados e 6 nós, do tipo mostrado na Figura 4.3, de análise linear.

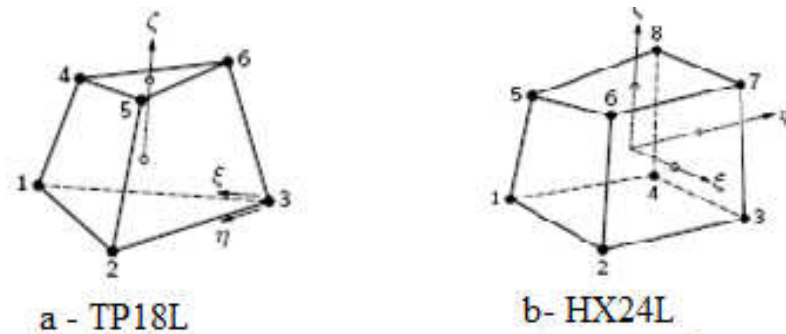


Figura 4.3 – Exemplo de elemento do DIANA: (a) 5 lados, 6 nós, (b) 6 lados, 8 nós (modificado - TNO, 2008).

Bittencourt *et al* (2011) compararam, em termos de recalque, a melhor aproximação na substituição de seções de estacas circulares por quadradas e concluíram que tanto pelo perímetro quanto pela área foram eficazes na aproximação, porém a de mesma área transversal conduz a resultados mais satisfatórios.

Em função dos elementos cúbicos as estacas de seção circular foram substituídas por estacas quadradas, considerando para o cálculo do lado do quadrado o valor correspondente a média entre a área do círculo e o perímetro da estaca circular.

As estacas utilizadas nos blocos foram de 50cm de diâmetro quando circulares e no M.E.F. quadradas de 41,8cm de lado. Para se utilizar elementos de mesmas dimensões nos blocos e estacas, os elementos foram definidos com tamanhos de 20,9cm x 20,9cm e altura de 20cm. As cargas foram aplicadas na face superior do bloco, em uma área pré-definida.

O programa DIANA oferece opção de análise linear ou não linear, nesta pesquisa todos os casos avaliados foram feitos de forma linear.

A Figura 4.4 ilustra uma modelagem típica utilizada, a disposição dos componentes e a aplicação da carga para $\frac{1}{4}$ de bloco sobre estacas, em (a) o bloco completo, (b) zoom na região do bloco e solo mais próximo e (c) do bloco e parte das estacas sem o solo.

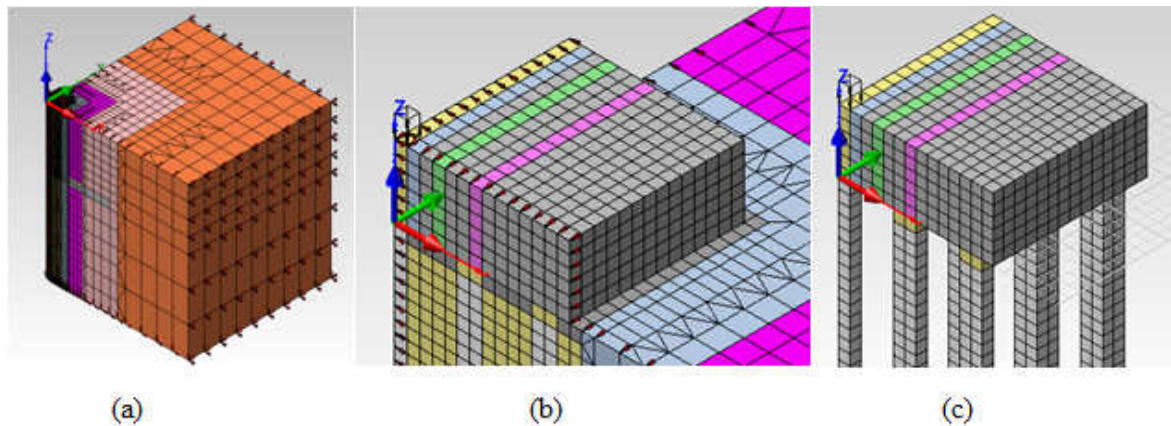


Figura 4.4 – Exemplo de modelagem de ¼ de bloco sobre estacas: (a) bloco, estacas e domínio, (b) bloco e (c) bloco e estacas sem o solo.

Os momentos internos, na seção transversal desejada, foram obtidos na face inferior do bloco pela somatória dos esforços horizontais em cada nó desta seção multiplicados pelo braço de alavanca, assim os momentos são dados por nó na seção em questão.

Para igualar as unidades os momentos foram divididos pela largura de influência do elemento em cada nó, ou seja, para cada nó considerou-se metade da largura dos elementos contíguos.

4.2.2. Validação do programa Diana

Caso de uma Estaca Isolada – OTTAVIANI (1975).

Um exemplo de uma estaca isolada foi descrito na literatura por Ottaviani (1975), utilizando o programa UNIVAC 1108, de Método de Elementos Finitos, para estacas carregadas verticalmente, em meios homogêneos linearmente elásticos, utilizando elementos axissimétricos e tridimensionais para reduzir o número de elementos e demanda computacional.

Os resultados são apresentados através de gráficos comparando a rigidez relativa K com o recalque absoluto (ver equação 4.1 e 4.2) tomando o recalque no topo da estaca, e a carga atuante na estaca.

$$K = \frac{E_c}{E_s} \quad (4.1)$$

Onde:

- K – rigidez relativa da estaca,
- E_c – módulo de elasticidade do concreto,
- E_s – módulo de elasticidade do solo.

$$w^0 = \frac{E_c w D}{R} \quad (4.2)$$

Onde:

- w^0 – recalque absoluto (adimensional),
- w – recalque no topo da estaca,
- D – dimensão do lado da estaca quadrada,
- R – carga aplicada no topo da estaca.

A Figura 4.5 ilustra o exemplo analisado por Ottaviani (1975) de uma estaca isolada considerada sem bloco e com as seguintes propriedades: estaca quadrada de 1,0m de lado, domínio horizontal de 13m da face da estaca, o módulo de elasticidade do concreto é de 20.000MPa, coeficiente de Poisson do concreto ν_c 0,25, o solo é homogêneo com coeficiente de Poisson ν_s 0,45.

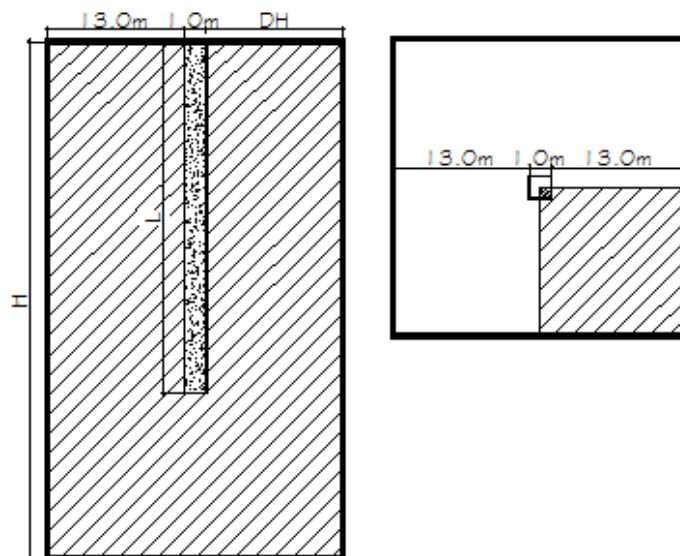


Figura 4.5 – Vista em corte da estaca isolada e domínios; e em planta vista axissimétrica da estaca e domínio de uma estaca analisada por Ottaviani (1975).

Os resultados originais foram comparados com os resultados obtidos por Sales (2000), no programa Allfine, de M.E.F., rodado em simetria axial 2D, e por Bittencourt; Lima (2009) no programa Flex-PDE, e agora com o DIANA.

Foram avaliados três casos variando o comprimento da estaca e domínio vertical. As estacas foram inseridas em um solo homogêneo e os gráficos representam a variação da rigidez relativa pelo recalque em termos de carga.

A Figura 4.6 mostra o caso de uma estaca isolada de 20m de comprimento e domínio vertical de 30m ($H/L = 1,5$), os resultados estão bem próximos com recalque um pouco maior no resultado de Ottaviani (1975).

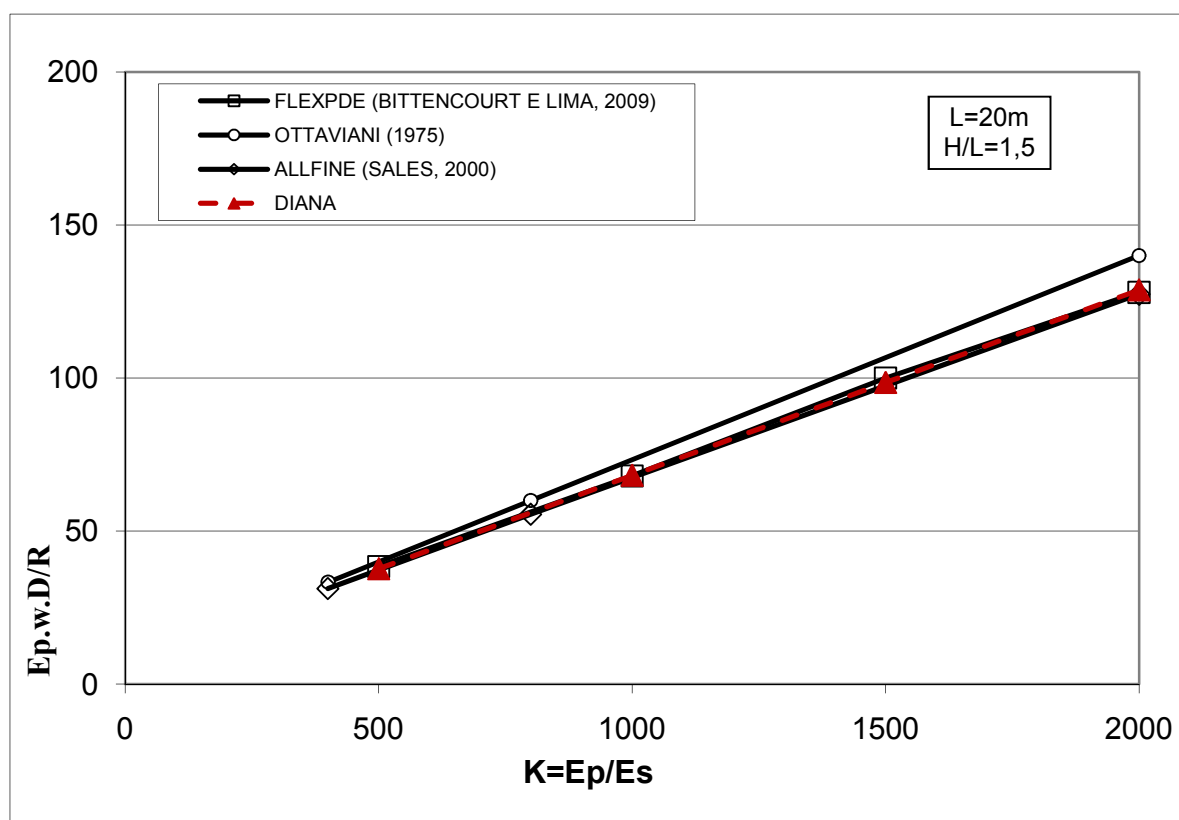


Figura 4.6 – Comportamento do recalque para estacas de 20m ($H/L = 1,5$).

A Figura 4.7 ilustra as comparações de uma estaca isolada de 20m de comprimento e domínio vertical de 80m ($H/L = 4$), os resultados de recalque estão bem próximos, sendo que o DIANA atingiu valores um pouco maiores.

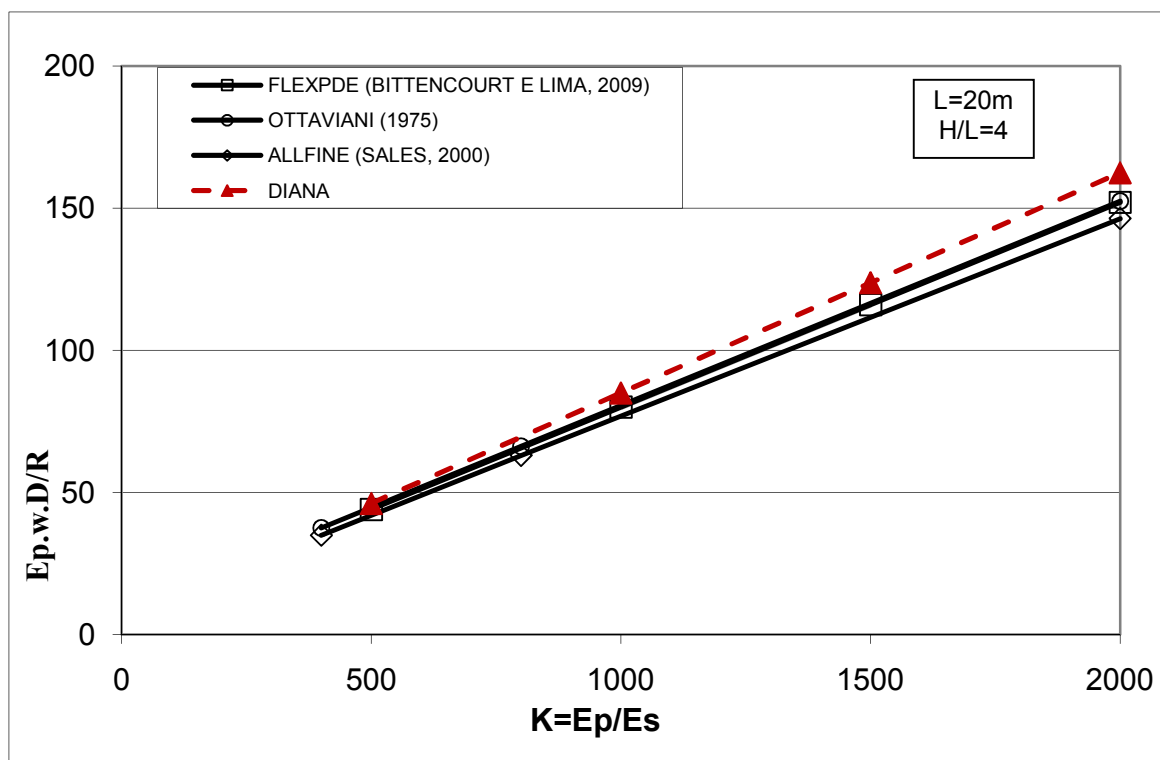


Figura 4.7 – Comportamento do recalque para estacas de 20m ($H/L = 4$).

A Figura 4.8 ilustra as comparações de uma estaca isolada de 40m de comprimento e domínio vertical de 60m ($H/L = 1,5$), os resultados em todas as análises praticamente se sobrepõem, indicando uma boa concordância entre os programas.

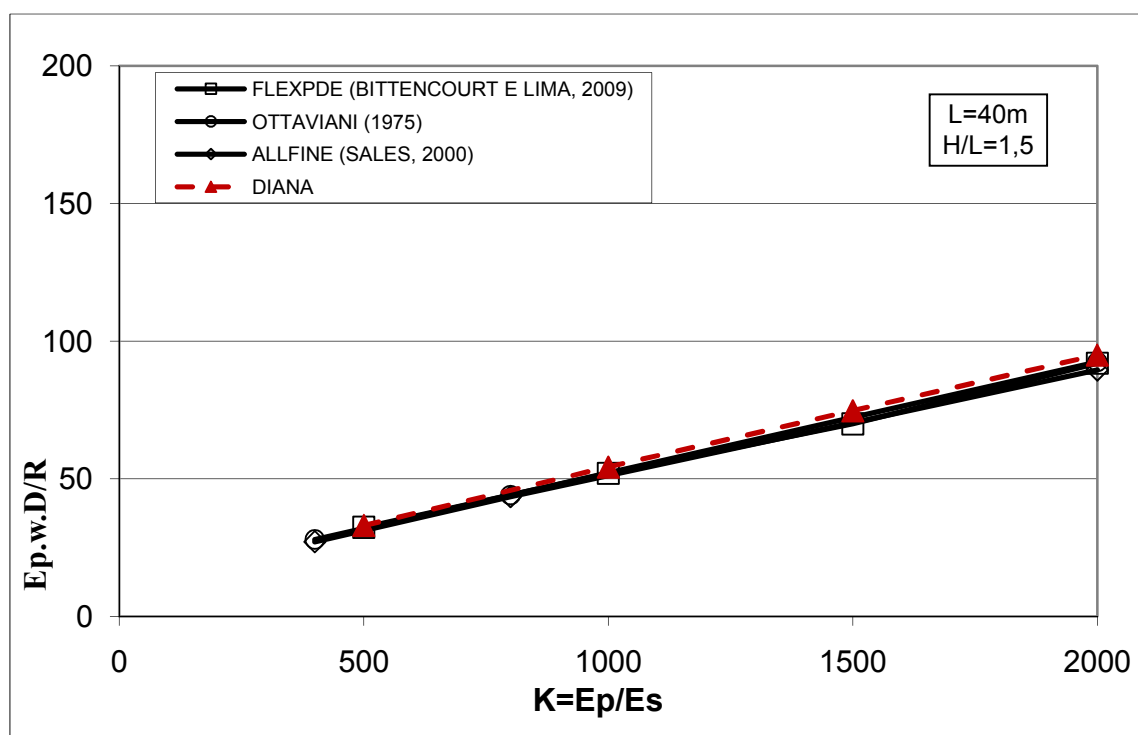


Figura 4.8 – Comportamento do recalque para estacas de 40m ($H/L = 1,5$).

De maneira geral, nas três comparações realizadas para uma estaca isolada, os resultados encontrados foram bem próximos dos publicados, com prováveis diferenças devido ao refinamento da malha.

Caso de um Bloco sobre 16 Estacas – ISSMGE TC-18.

Outra comparação feita empregou um exemplo proposto pelo comitê técnico (TC-18) da ISSMGE, descrita por Yamashita (1998), a vários pesquisadores de todo mundo para comparar os resultados.

Yamashita (1998) faz uma análise tridimensional pelo Método dos Elementos Finitos representados por elementos hexaédricos de oito nós. Devido à simetria foi modelado apenas um quarto do problema. O domínio horizontal a partir da face do radier foi 60m (2L) e o domínio vertical, a partir da face inferior do bloco, de 90m (3L)

O modelo consiste em um radier estaqueado com 16 estacas, com carga vertical de 80MN. As estacas foram modeladas como linear elástico com seção inscrito em um círculo de 1,0m de diâmetro dividida em oito fatias, ver Figura 4.9, com 30m de profundidade, e espaçamento de 3,0m entre cada estaca. As dimensões do radier são 11,0 x 11,0m, altura de 2,0m, o módulo de elasticidade do concreto é de 35.000MPa, o coeficiente de Poisson $\nu_c = 0,16$.

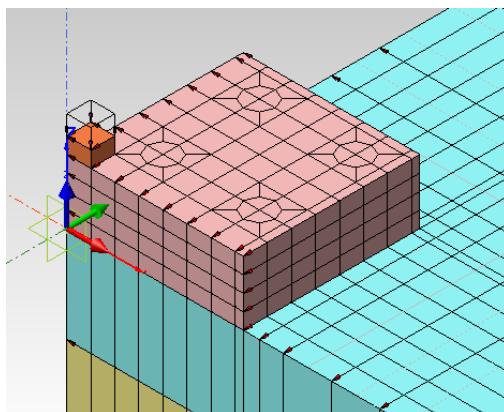


Figura 4.9 – Modelagem de um quarto de bloco, detalhe das estacas, e pilar (modificado – YAMASHITA, 1998).

O solo é considerado elasto-plástico, não é homogêneo, possui coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,1$ e o módulo de elasticidade varia com a profundidade.

A Figura 4.10 mostra a discretização da malha utilizada no solo. Para cada faixa de elemento do solo, foi utilizada a média do módulo de elasticidade encontrada na Figura 4.11, que aumenta conforme cresce a profundidade.

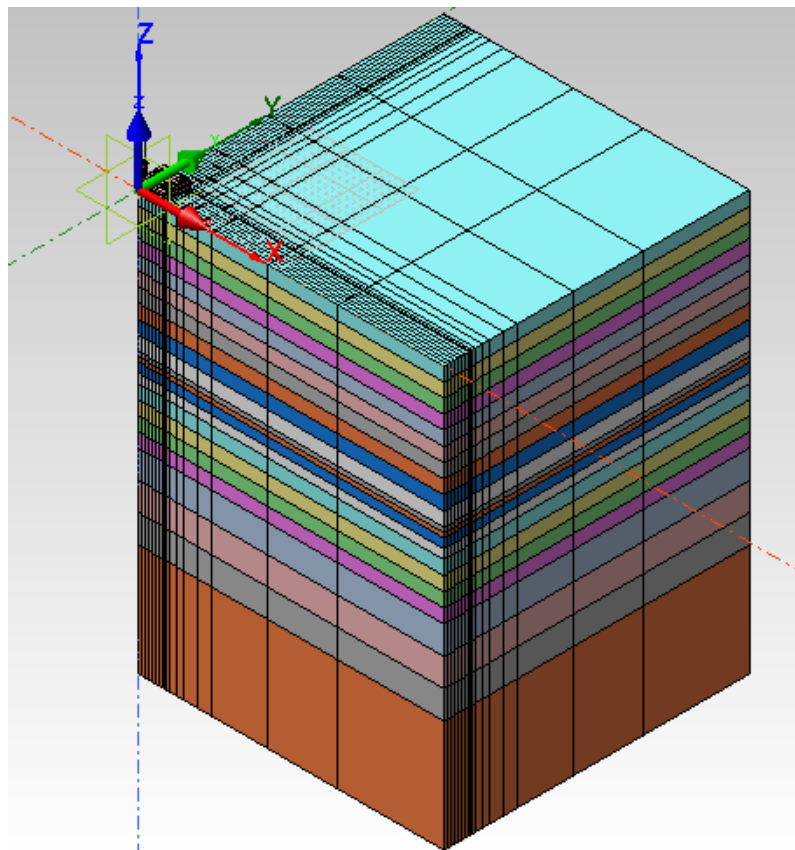


Figura 4.10 – Discretização da malha do solo aproximando do apresentado por Yamashita (1998).

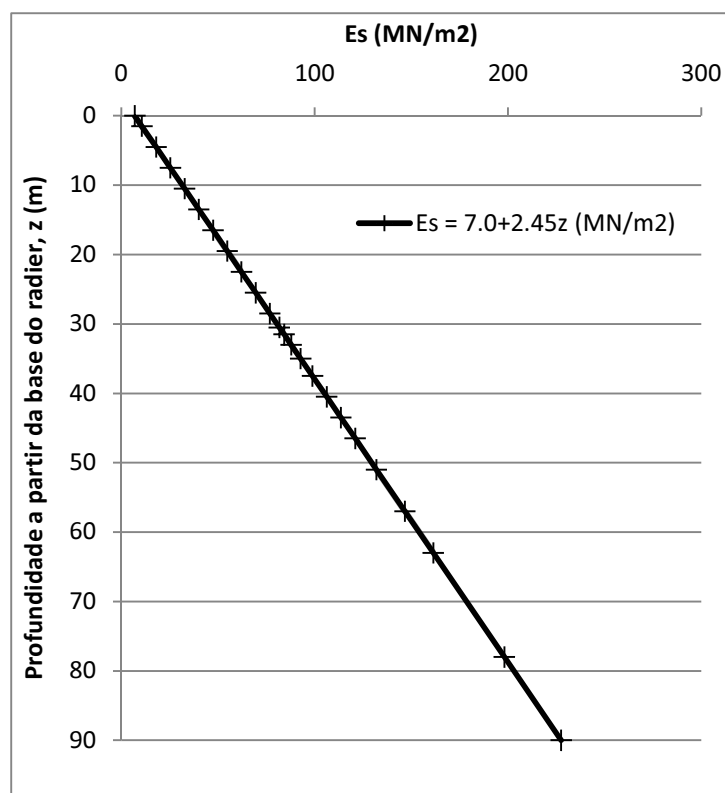


Figura 4.11 – Módulo de elasticidade do solo variando com a profundidade (modificado – YAMASHITA, 1998).

Comparando os resultados encontrados com os de Yamashita (1998) e outros autores, pode-se observar pela Tabela 4.1 que a diferença de recalque encontrado está na casa dos 5%, e o percentual de carga nas estacas de 3%, portanto com proximidade muito boa.

Tabela 4.1 – Comparação do DIANA com resultados de outros autores.

Programa / Método / Autor	Recalque (mm)	% de carga nas estacas
MEF / Yamashita	28,6	97,6
Allfine / MEF/ Sales (2000)	27	95
Diana /MEF / Souza (2010)	31	Não informa
Diana / MEF	30,15	98,12

Devido à proximidade das estacas, o percentual de cargas nas estacas está dentro do previsto. Sales (2000) apresenta previsões, para este mesmo problema, realizadas por outros autores empregando métodos híbridos. Os resultados com estas diferentes ferramentas encontraram recalque superiores a 10mm em relação aos mostrados na Tabela 4.1. Os programas utilizados pelos outros autores foram HyPR, com placas modeladas pelo M.E.F. e as estacas

consideradas como uma série de molas interligadas, KURP, de método aproximado, e o GARP, com placa modelada pelo M.E.F. sobre molas considerando a interação dos elementos.

Caso de um Bloco sobre 9 Estacas – POULOS et al (2001).

Poulos *et al* (2001) analisou um bloco sobre estacas usando um programa de elementos finitos. Foi examinado um bloco sobre nove estacas em 3D, usando apenas um quarto do problema devido à dupla simetria.

O solo possui módulo de elasticidade de 20MPa, coeficiente de Poisson de 0,4 e a 65m de profundidade o estrato é considerado indeslocável. O radier e estacas possuem módulo de elasticidade de 20.000MPa e coeficiente de Poisson de 0,2, o radier tem 3,9m de lado e 0,3m de altura, as estacas tem 15m de profundidade e são quadradas com 0,3m de lado a distância entre cada estaca, de eixo a eixo é de 1,5m.

A carga aplicada foi de 100kPa nas duas áreas mostradas na Figura 4.12, resultando um total de 36kN, os elementos são cúbicos de 15cm de lado.

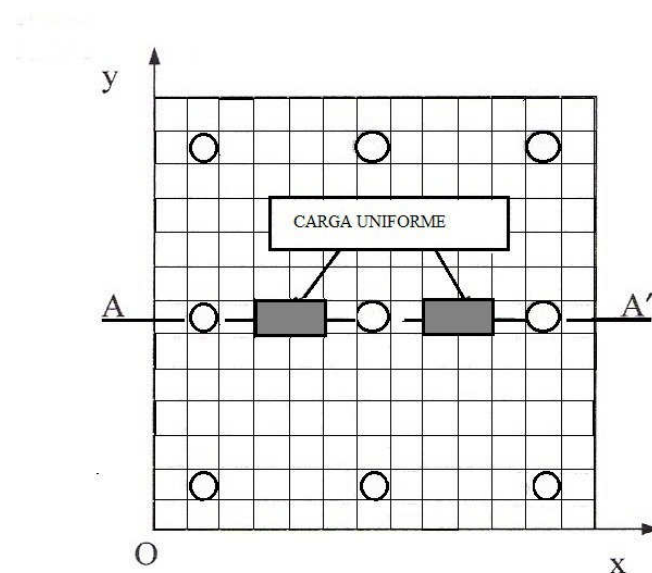


Figura 4.12 – Bloco sobre 9 estacas com carga aplicada (modificado – POULOS *et al*, 2001).

Os momentos obtidos na seção AA foram apresentados em função do momento normalizado $I_{Mx} = M_x/P$ e $I_{My} = M_y/P$ pela distância normalizada x/B . A comparação entre o resultado original e o obtido pelo DIANA está na Figura 4.13. Todos os momentos seguem a

convenção do artigo original, onde o M_x corresponde ao M_y da convenção brasileira e o M_y corresponde ao M_x do Brasil.

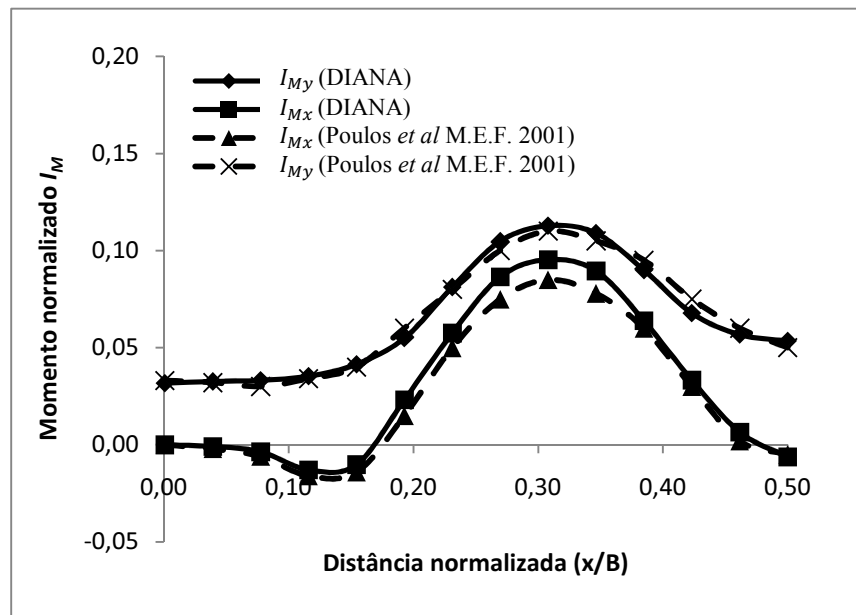


Figura 4.13 – Comportamento do momento interno do bloco sobre 9 estacas, para carga vertical.

Os resultados apresentados estão dentro de uma faixa de precisão muito boa, com uma pequena diferença na projeção do pilar, quando o DIANA apresenta momento normalizado um pouco acima do artigo original.

4.3. MÉTODO HÍBRIDO

O *software* GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles) é um programa de método híbrido que usa o M.E.F. para análise do radier e o M.E.C. para análise do conjunto estaca-solo utilizando a teoria da elasticidade.

O programa foi desenvolvido inicialmente por Poulos em 1994, sofrendo algumas alterações ao longo dos anos, como a proposta por Sales em 2000 denominando-o GARP 7.0; por Small; Poulos em 2007 na versão GARP 8.0.

Small e Poulos (2007) explicam que os elementos usados para o radier possuem 8 nós isoparamétricos, elemento de casca para cálculo do momento e tensão cisalhante no radier. O programa roda no sistema operacional do windows e possui interface gráfica bastante amigável. A malha pode ser gerada, cargas aplicadas e estacas locadas com o mouse.

O programa GARP pode considerar para a análise do radier estaqueado as seguintes condições:

- Heterogeneidade do solo, considerando camadas estratificadas como entrada de dados,
- Limite de tensão (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, etc.,
- 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.

4.3.1. Procedimento de análise

No GARP os dados de entrada inicial são:

- As coordenadas x e y da malha a ser utilizada do bloco, estacas e pilares, definindo locação do radier;
- Informação da carga pontual, distribuída e momentos nos eixos x e y;
- Altura do radier;
- Propriedades das estacas: comprimento, diâmetro, rigidez, fatores de interação, máxima tensão de compressão e tração, fatores de interação, módulo de elasticidade da estaca e do solo indeslocável;
- Propriedades do solo: módulo de elasticidade por camadas, coeficiente de Poisson, tensão máxima de compressão e tração no solo abaixo do radier.

A rigidez das estacas e os fatores de interação podem ser calculados pelo GARP de forma aproximada pelo método de Randolph (1994) ou alimentados no programa por valores previamente calculados. Optou-se por calculá-los com o auxílio do programa DEFPIG – *Deformation analysis of Piles Group*, um programa baseado no M.E.C. (Poulos, 1980).

São informações de dados de entrada para o DEFPIG: comprimento, diâmetro, módulo de elasticidade e momento de inércia da estaca; coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade horizontal e vertical do solo, profundidade da camada de solo indeslocável, distância de interação dado pelo fator s/d .

Após processamento do programa, os dados de saída do GARP, em forma gráfica ou listada, (ver Figura 4.14), são: recalque em todos os nós do radier, momento transversal, longitudinal, e torsor em cada nó do radier, pressão de contato abaixo do radier e a carga vertical em cada estaca.

O momento interno é um dado de saída com unidade por metro linear, compatível com os demais métodos utilizados.



Figura 4.14 – Saída gráfica do GARP.

4.3.2. Validação do programa Garp

Caso de uma estaca isolada, e bloco sobre 4 e 9 estacas – BUTTERFIELD e BANERJEE (1971).

A análise dos blocos sobre estacas foi feita por Butterfield e Banerjee (1971a) pelo M.E.C., eles analisaram o comportamento do recalque na face superior dos blocos e a distribuição de cargas entre estacas e blocos, neste trabalho foi feita uma comparação somente com o recalque.

Em todos os casos foi adotado para o solo o módulo de elasticidade de 9MPa, módulo cisalhante do solo de 3MPa, coeficiente de Poisson de 0.50, domínio vertical de cinco vezes o comprimento da estaca. Para as estacas e blocos foi adotado módulo de elasticidade de

18.000MPa, coeficiente de Poisson 0,20, as estacas têm diâmetro de 20cm, os blocos altura de 50cm. Os resultados são apresentados em gráficos em função do comprimento da estaca L e do espaçamento entre estacas.

A Figura 4.15 mostra o gráfico da variação do recalque absoluto em relação ao comprimento da estaca, para um bloco de 50cm de lado, sobre uma estaca isolada. Percebe-se uma boa proximidade entre os resultados originais e os obtidos pelo GARP.

O recalque absoluto é dado pela razão entre a carga aplicada e os parâmetros G (módulo cisalhante do solo), w (recalque) e D (diâmetro da estaca).

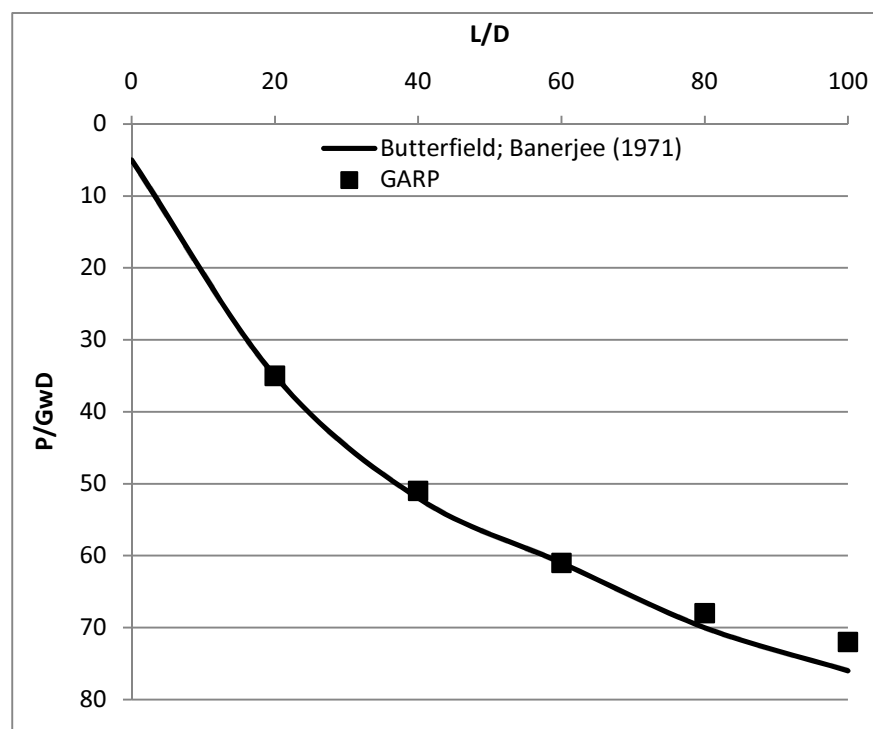


Figura 4.15 – Comportamento do comprimento da estaca pelo recalque para uma estaca isolada.

A Figura 4.16 mostra o gráfico do comportamento carga x recalque, para um bloco sobre 4 estacas, variando o comprimento da estaca. Percebe-se uma boa proximidade entre os resultados originais e os obtidos pelo GARP.

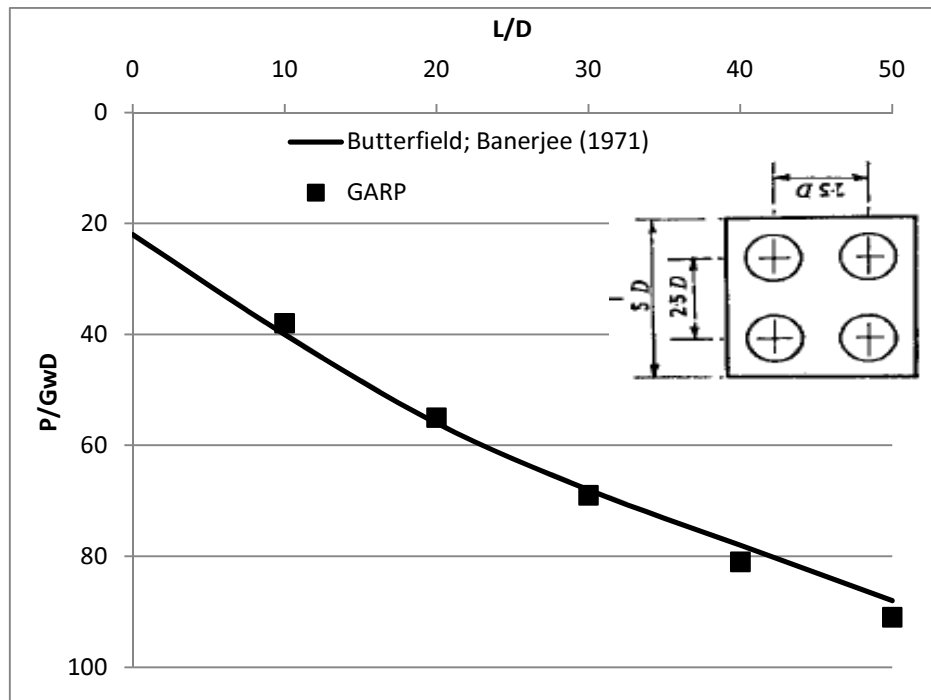


Figura 4.16 – Comportamento do comprimento da estaca pelo recalque para um grupo de 4 estacas.

O comportamento do recalque absoluto pela variação do espaçamento entre as estacas é analisado para um bloco sobre 9 estacas nas Figuras 4.17 e 4.18, com a relação L/D respectivamente de 20 e 40. Observa-se uma boa proximidade entre os valores originais e os obtidos no GARP.

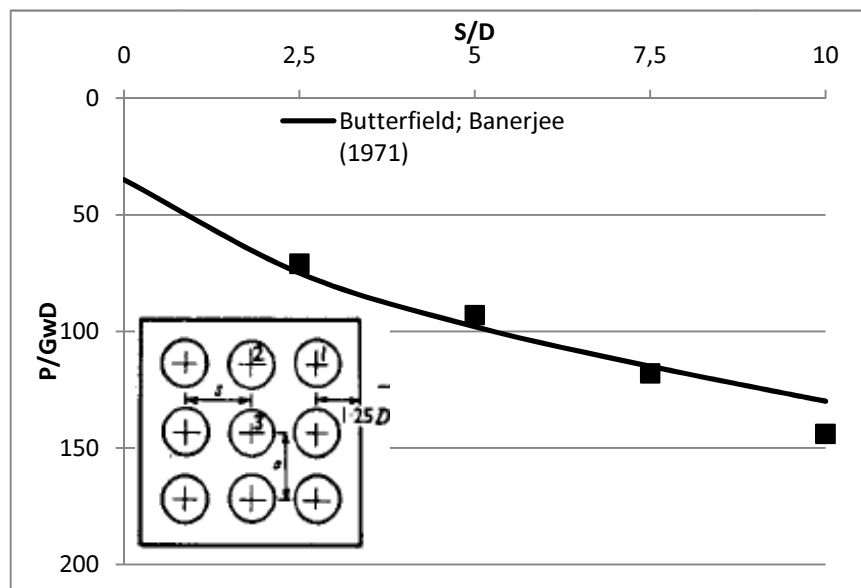


Figura 4.17 – Comportamento do espaçamento entre estacas pelo recalque para um bloco sobre 9 estacas com $L/D = 20$.

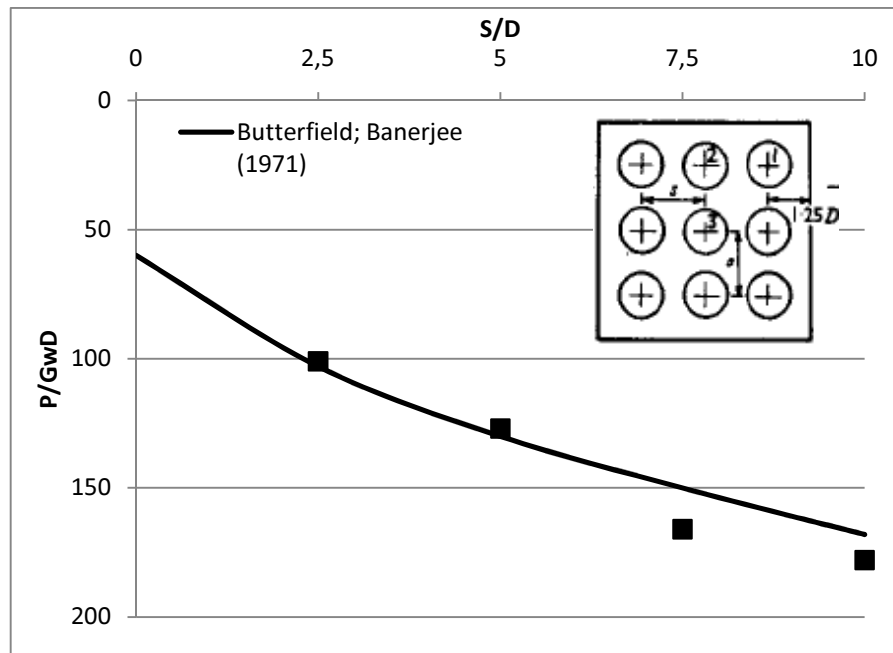


Figura 4.18 – Comportamento do espaçamento entre estacas pelo recalque para um bloco sobre 9 estacas com $L/D = 40$.

Caso de um bloco sobre 9 estacas – POULOS et al (2001).

Na validação do programa DIANA foi realizada uma comparação com os momentos obtidos por Poulos *et al* (2001), no bloco sobre 9 estacas da Figura 4.12, as duas análises foram realizadas em programas baseados no método dos elementos finitos e apresentaram resultados bem próximos.

Para avaliar o desempenho do programa GARP na previsão de momentos foi utilizado o mesmo exemplo, embora sendo um método híbrido. Os resultados dos momentos obtidos, na seção AA, estão demonstrados na Figura 4.19, pode-se observar uma mesma tendência de curvatura do gráfico, mas um pequeno distanciamento entre os valores de momento, que se deve provavelmente aos diferentes métodos computacionais utilizados.

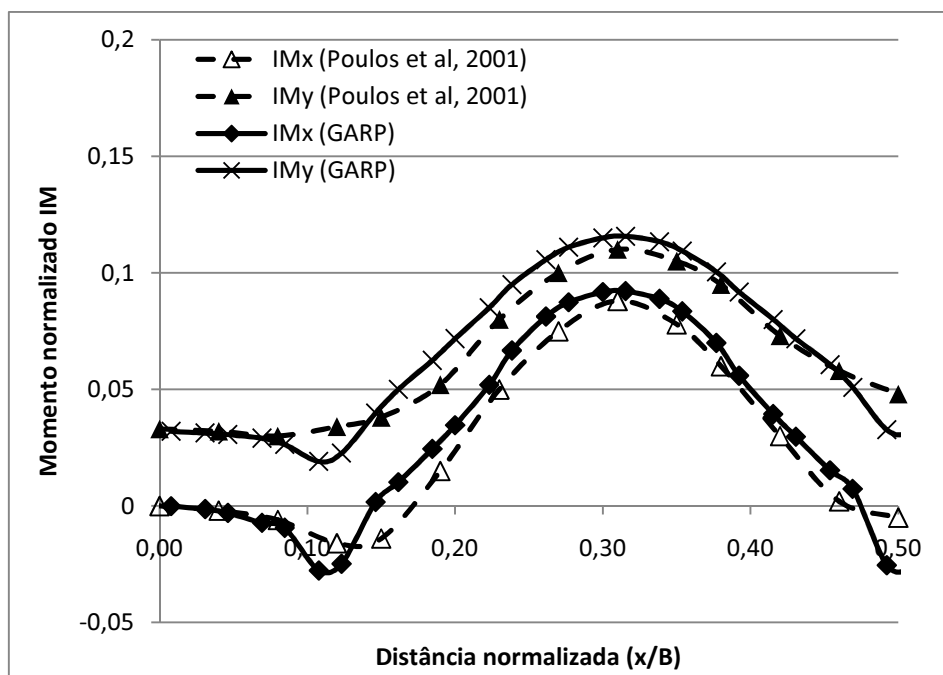


Figura 4.19 – Comportamento do momento interno do bloco sobre 9 estacas, para carga vertical.

4.4. BLOCOS PESQUISADOS

Os blocos para a pesquisa foram escolhidos variando a quantidade de estacas, iniciando com 2 e 4 estacas por bloco, muito utilizado e pesquisado pelo método manual, depois passando para 9, 25, 64 e 81 estacas, os grandes blocos vem apresentando uso freqüente nas obras atuais e são tratados de forma genérica no método manual.

A variação da quantidade de estacas também serviu para comparar os casos e observar se há uma proporção lógica nas diferenças e semelhanças de cálculo.

A geometria dos blocos foi definido como é usual em bloco sobre estacas pelo método manual, sem considerar as otimizações que podem ser adotadas quando dimensionado como radier estaqueado.

A Figura 4.20 mostra, de forma genérica, o modelo de bloco utilizado nos dimensionamentos, realçando a diferença mostrada em planta para o programa DIANA. As estacas foram consideradas quadradas para facilitar a modelagem, mas em todas as situações a distância entre o centro das estacas é o mesmo de 1,254m.

Na vista do DIANA está hachurado um quarto do bloco, pois a modelagem foi feita somente para esta região do bloco abrangendo os domínios horizontais do solo, devido à dupla simetria.

Os eixos x, y, z que aparecem nas tabelas foram convencionados conforme a vista em planta do DIANA e o eixo z ortogonal saindo do papel.

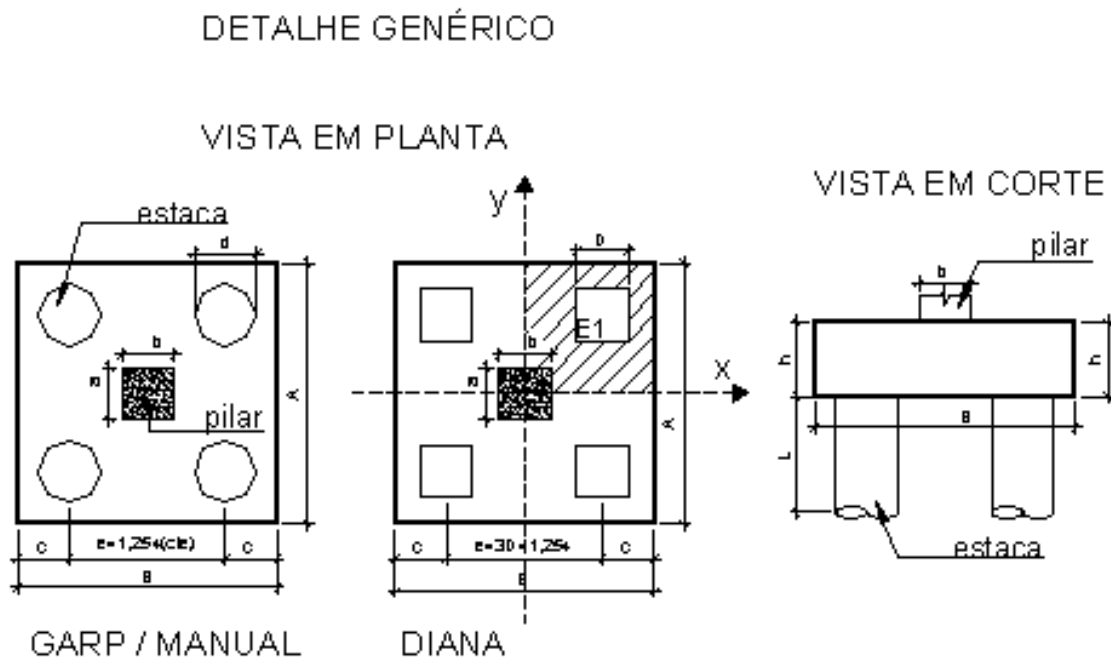


Figura 4.20 – Detalhe genérico dos blocos sobre estacas analisados.

As características geométricas que se repetem em todos os blocos são:

- Profundidade das estacas: $L = 10\text{m}$,
- Estacas redondas de $\phi = 50\text{cm}$ de diâmetro no GARP e método manual. Para o DIANA foi utilizado estacas quadradas de lado $D = 41,8\text{cm}$ que corresponde a média entre a área de projeção e perímetro da estaca de diâmetro de 50cm ,
- Distância do eixo da estaca à face do bloco: $C = 41,8\text{cm}$,
- Espaçamento entre estacas: $e = 2,508d = 1,254\text{m}$ (GARP e manual), $e = 3,0D$ (DIANA),
- Profundidade da camada de solo impenetrável ou domínio vertical, considerado da face a partir da face inferior do bloco: $DV = 32\text{m}$.

Para obter uma modelagem da malha no interior do bloco quadrada, a dimensão 41,8cm da correspondente a largura da estaca quadrada, foi a medida de referência, utilizando-se metade desta dimensão 20,9cm como largura das malhas dos blocos em planta, e assim o espaçamento entre estacas, distância do eixo da estaca à face do bloco são valores múltiplos desta medida.

Os demais parâmetros que se repetem em todos os blocos são:

- Módulo de elasticidade do concreto: $E_c = 28.000 \text{ MPa}$,
- Coeficiente de Poisson do concreto: $\nu_c = 0,2$,
- Módulo de elasticidade do solo: $E_s = 50 \text{ MPa}$,
- Coeficiente de Poisson do solo: $\nu_s = 0,3$,
- Solo considerado homogêneo,
- Carga aplicada: vertical de 500kN vezes o número de estacas,
- Tensão de ruptura do concreto simples: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ e 30 MPa .

A Tabela 4.2 mostra as dimensões particulares de cada caso.

Tabela 4.2 – Dimensões particulares de cada caso.

Quant. de estacas	Domínio horizontal DH (m) *	Altura do bloco h (cm)	Dimensões do bloco A x B (m)	Dimensões do pilar a x b (cm)
2 (2x1)	29,05	60	0,836 x 2,09	41,8 x 41,8
4 (2x2)	29,05	80	2,09 x 2,09	41,8 x 41,8
9 (3x3)	28,42	100	3,344 x 3,344	41,8 x 41,8
25 (5x5)	27,17	120	5,852 x 5,852	41,8 x 41,8
64 (8x8) **	48,70	160	9,614 x 9,614	83,6 x 83,6
81 (9x9)	48,07	200	10,868 x 10,868	83,6 x 83,6

*O domínio horizontal é dado a partir da face do bloco que assim como o domínio vertical é utilizado no M.E.F. para definir as condições de contorno.

**Para o bloco de 64 estacas foram consideradas 3 situações diferentes de aplicação de carga, a primeira conforme a Tabela 4.2 com um pilar centrado, a segunda com carga distribuída em toda a face superior do bloco e a terceira com mais de um pilar.

A altura dos blocos foi adotada baseada na média encontrada em projetos aplicados na prática.

Os pilares foram considerados quadrados para facilitar as modelagens, exceto no bloco com 64 estacas e 5 pilares que foi um caso particular com diferentes pilares.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises numéricas e também as simplificadas, de cada caso estudado. Serão comparados os resultados do dimensionamento estrutural de cada peça, ressaltando a armação inferior de cada bloco, posicionamento e quantidade, e o comportamento do conjunto bloco estaca à medida que ocorre a variação da quantidade de estacas.

Os blocos foram apresentados somente em uma direção, devido a dupla simetria de todos os blocos, com exceção do bloco sobre 2 estacas que mesmo não sendo axissimétrico também foi estudado somente em uma direção, a principal.

5.1. BLOCO SOBRE 2 ESTACAS

A Figura 5.1 mostra a vista em planta e corte da geometria adotada para o bloco sobre 2 estacas. A carga adotada foi de 1.000kN, aplicada uniformemente distribuída no pilar (ver dimensões na Tabela 4.2) situado no centro do bloco, o que corresponderia a uma tensão de 5.723kPa. O solo foi considerado homogêneo, conforme características descritas no item 4.4

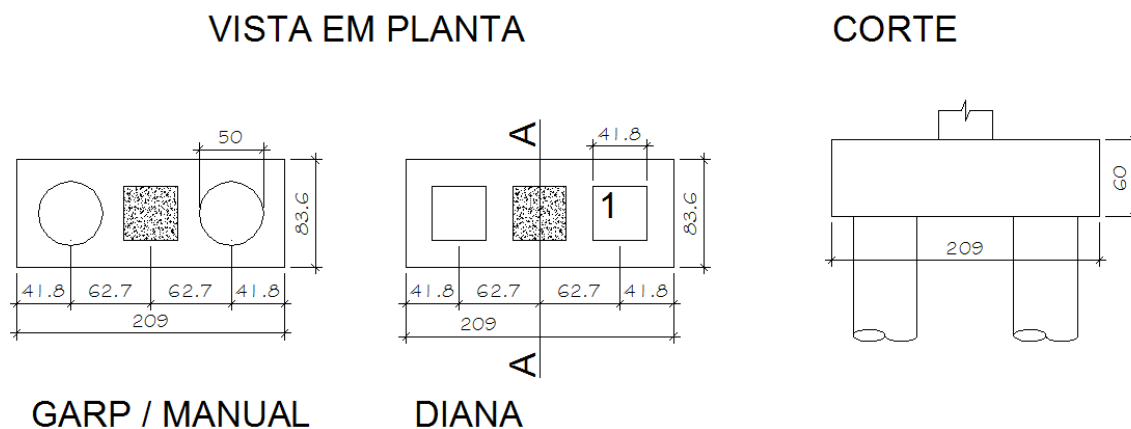


Figura 5.1 – Geometria do bloco sobre 2 estacas.

Na análise pelo método manual todas as estacas têm a mesma carga, pois não há momento, como a contribuição do solo é desprezada a carga em cada estaca é a carga aplicada no pilar dividido pela quantidade de estacas, no caso 500kN.

Nas análises numéricas o solo contribui na capacidade de carga do conjunto, mas devido a simetria as cargas seriam iguais nas duas estacas, porém com valores abaixo do método manual. No DIANA cada estaca suportaria 458kN e no GARP 466kN e, portanto o percentual de carga que o solo resiste é de 8,23% no DIANA e 6,80% no GARP.

Como os blocos estudados foram geometricamente definidos como bloco sobre estacas, o espaçamento entre as estacas adotado foi o mínimo, e mesmo utilizando o conceito de radier estaqueado a porcentagem de carga que o solo deverá suportar são valores pequenos, menores que 10%.

Nas duas análises numéricas o recalque máximo foi de 2,8mm, localizado abaixo do pilar, e o recalque diferencial de 0,2mm, comprovando uma boa calibração entre as ferramentas numéricas.

Pelo método manual o momento M_y na seção AA é obtida conforme a equação 3.8, proveniente da multiplicação da reação da estaca pelo braço de alavanca, resultando no momento total da seção de forma uniforme, sem discriminar a variação de momentos na seção.

Nas análises numéricas os resultados de momento são obtidos pontualmente ou por metro linear. Para efeito de comparação o momento obtido no método manual foi dividido pela largura do bloco e com isso todos os momentos ficam com a mesma unidade, por metro linear.

A Figura 5.2 mostra uma comparação entre o momento M_y na seção AA pelos 3 métodos e pode-se observar neste caso que o método manual é mais conservador, porém muito próximo dos demais. O momento total, obtido pela área do gráfico compreendida entre o eixo y e os valores de M_y traçados, se aproxima muito nos métodos numéricos, DIANA e GARP, e é um pouco maior no método manual.

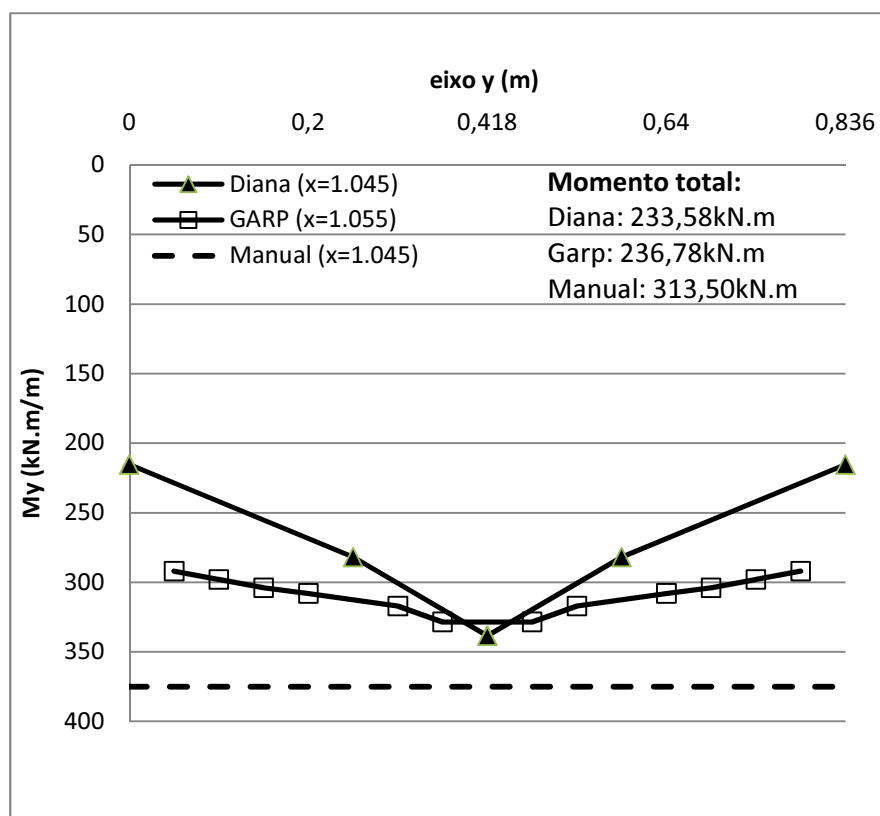


Figura 5.2 – Momento M_y no eixo central (seção AA) para um bloco sobre 2 estacas.

Nos métodos numéricos pode-se capturar o efeito tridimensional da peça, onde o momento varia na seção, e a peça pode ser dimensionada conforme o momento em cada posição, como se fossem várias vigas lado a lado, porém devido às dimensões reduzidas do bloco sobre duas estacas é mais prático adotar o momento máximo em toda a seção para se calcular a armação da peça.

A armação inferior é calculada a partir do momento máximo e foi distribuída uniformemente em toda a seção, como representado na Figura 5.3, o que ilustra a diferença encontrada pelo momento em cada análise.

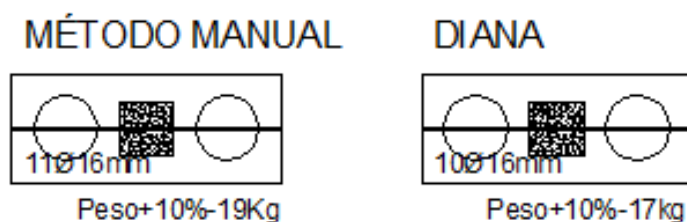


Figura 5.3 – Armação inferior do bloco sobre 2 estacas.

Para o caso apresentado de bloco sobre duas estacas verificou-se o método manual com um cálculo um pouco mais conservador, porém pela praticidade, rapidez e fácil utilização seu emprego é viável, sem prejuízo da funcionalidade do bloco.

5.2. BLOCO SOBRE 4 ESTACAS

A Figura 5.4 mostra a vista em planta e corte da geometria adotada para o bloco sobre 4 estacas. A carga adotada foi de 2000kN, aplicada uniformemente distribuída no pilar situado no centro do bloco, que corresponde a uma tensão de 11.446kPa.

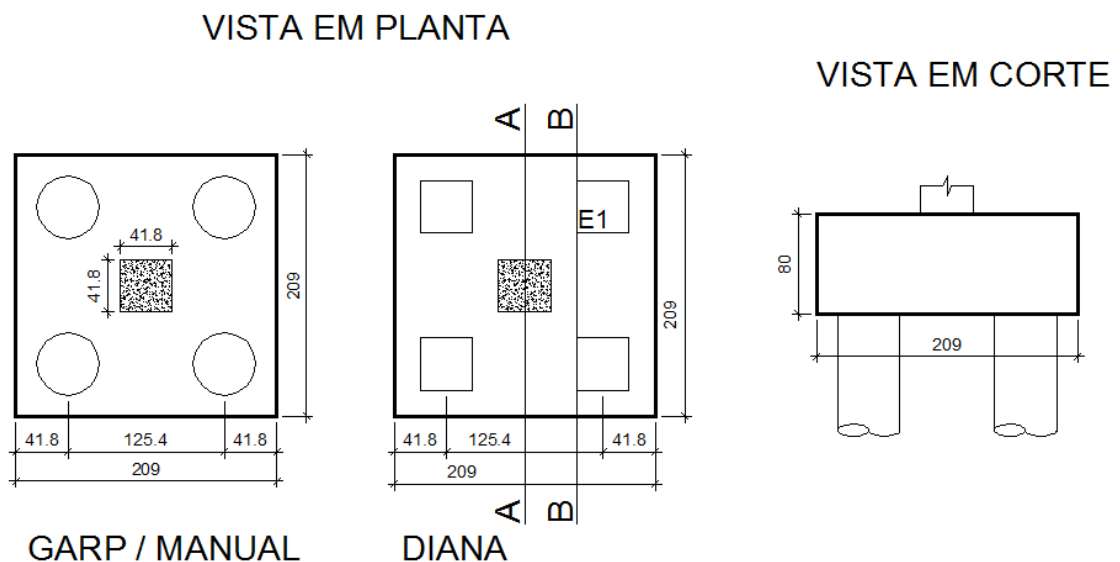


Figura 5.4 – Geometria do bloco sobre 4 estacas.

A carga em cada estaca em todos os métodos é a mesma devido à simetria, porém com valores diferentes devido à distribuição entre o solo e estacas. No método manual é de 500kN, no DIANA de 458kN e no GARP de 470kN.

O percentual de carga resistida pelo solo no DIANA foi de 8,15% e no GARP de 6,04%, que são considerados valores próximos.

O recalque máximo e diferencial respectivamente no DIANA foi de 4,34mm e 0,13mm e no GARP de 4,46mm e 0,18mm, valores também muito próximos entre os programas.

A variação de momento e o momento total na seção AA são mostrados na Figura 5.5, onde fica mais evidente, neste caso, para os métodos numéricos um pico do momento máximo no centro do bloco e uma diminuição significativa na periferia.

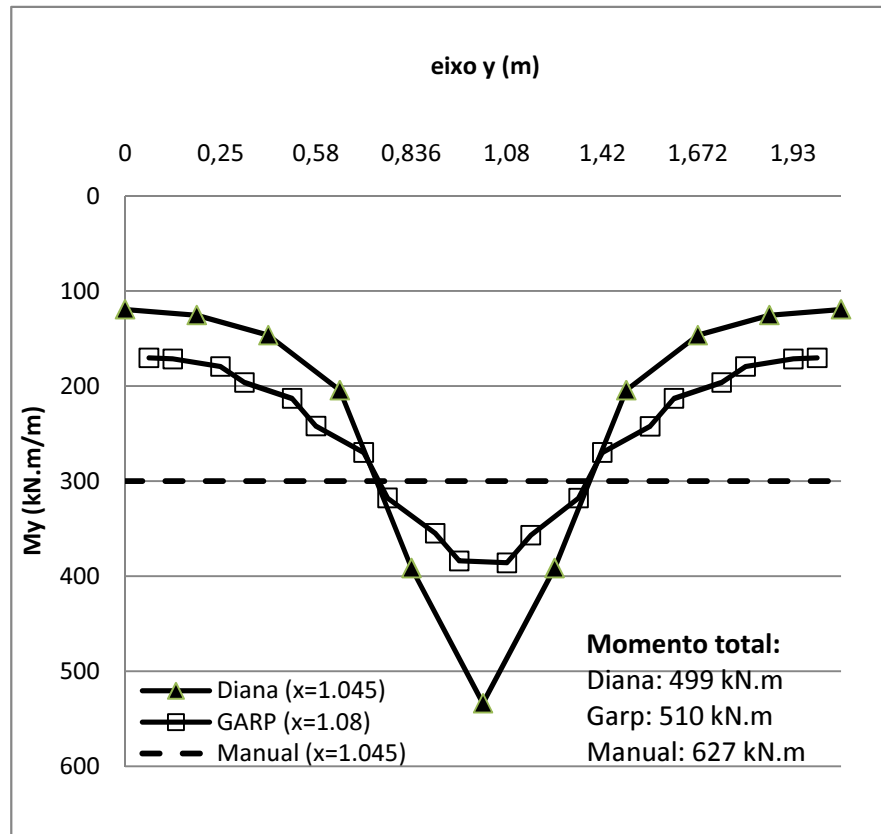


Figura 5.5 – Momento My no eixo central (seção AA) para um bloco sobre 4 estacas.

No bloco sobre 4 estacas a largura do bloco ainda não é muito grande para justificar uma armação diferenciada no pico do momento, porém se observa a necessidade de uma armação maior no centro, segundo os métodos numéricos.

Na Figura 5.6, é mostrado o momento My em duas versões diferentes. No Diana é ilustrado no gráfico o momento em duas seções distintas. No Garp, uma vista superior de linhas de contorno dos momentos. Pode-se perceber que o momento é maior no centro e à medida que se aproxima da periferia vai diminuindo.

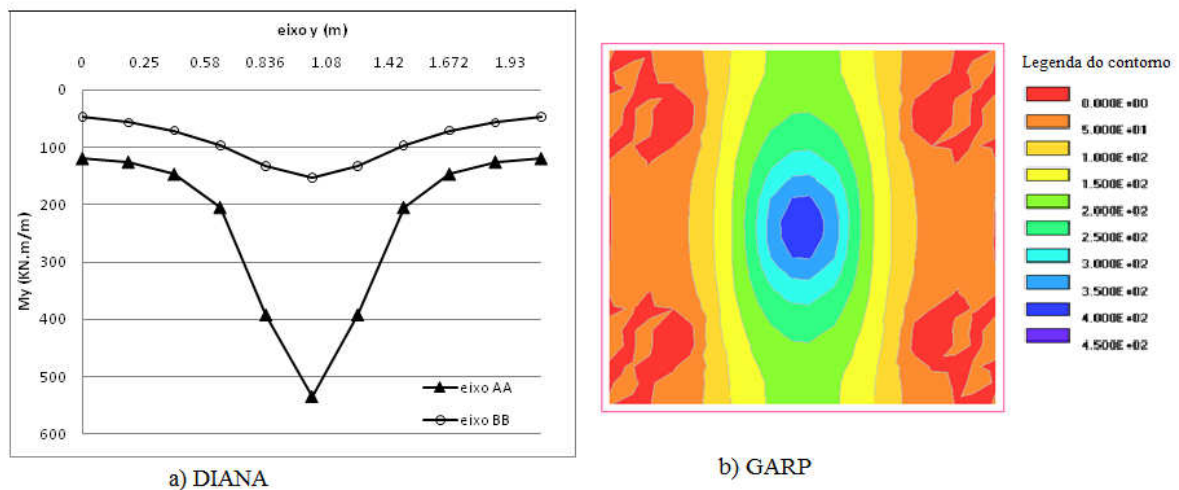


Figura 5.6 – Momento M_y em diferentes seções para bloco sobre 4 estacas: (a) calculado pelo DIANA, (b) calculado pelo GARP.

A Figura 5.7 mostra a armação inferior do bloco dimensionado para o momento máximo, em toda a seção, pelos métodos: manual e elementos finitos. A armação do bloco foi distribuída com espaçamento uniforme, porém o bloco foi dividido em 3 regiões para visualização da armação na periferia e centro. A armação muito maior no cálculo do DIANA é justificada pelo momento máximo ser 1,8 vezes maior que no método manual.

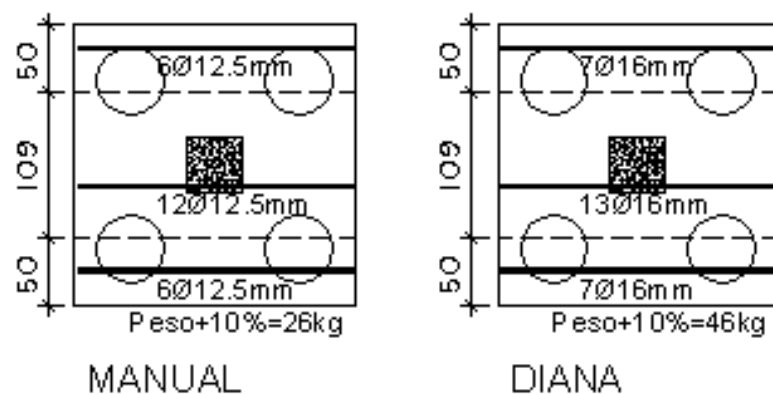


Figura 5.7 – Armação inferior do bloco sobre 4 estacas.

Caso o bloco seja dimensionado com armação diferenciada, no centro para o momento máximo e nas extremidades para um momento menor, seguindo a variação do momento fletor, a armação do DIANA mostrada na Figura 5.8 pode diminuir a armação na periferia e manter a armação somente no centro, na região mais necessitada, o que reduz o peso de aço do bloco, porém durante a execução aumenta a mão de obra de separar as regiões com armações diferentes.

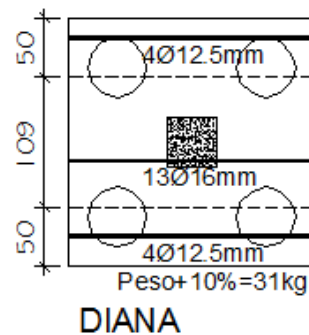


Figura 5.8 – Armadura inferior do bloco sobre 4 estacas, pelo M.E.F., com diferentes armações.

A solução no DIANA da Figura 5.8 induz a melhores resultados que na uniformização dos momentos da Figura 5.7, com menor peso de aço e melhor distribuição das barras de aço. No método manual apesar de se utilizar menor quantidade de aço, apresenta uma falta de aço no centro do bloco que pode levar a problemas estruturais.

5.3. BLOCO SOBRE 9 ESTACAS

A Figura 5.9 mostra a vista em planta da geometria adotada para o bloco sobre 9 estacas, com estacas circulares adotado no método manual e GARP, e a modelagem utilizada no DIANA. A carga adotada foi de 4.500kN, aplicada uniformemente distribuída no pilar situado no centro do bloco, correspondendo a uma tensão de 25.754kPa. A altura do bloco é de 100cm e o solo homogêneo, conforme citado no item 4.4.

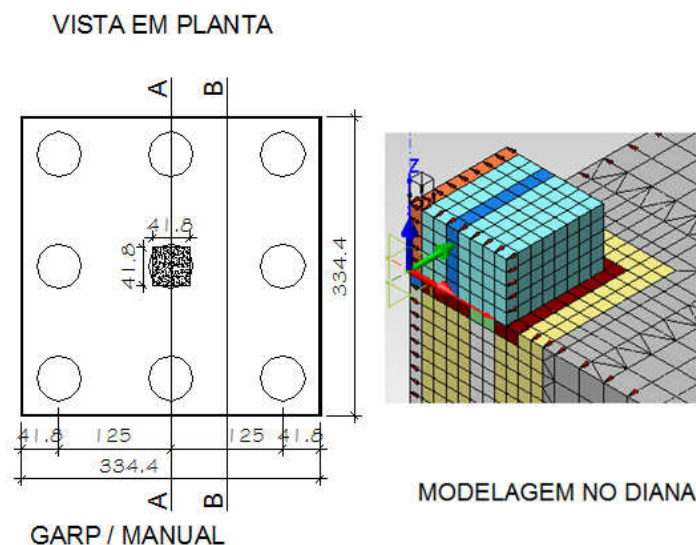


Figura 5.9 – Geometria do bloco sobre 9 estacas.

A carga em cada estaca pelo método manual é a mesma 500kN, porém nos métodos numéricos devido à interação entre as estacas, nota-se uma distribuição desigual, sobrecarregando mais as estacas do canto, conforme mostrado na Figura 5.10.

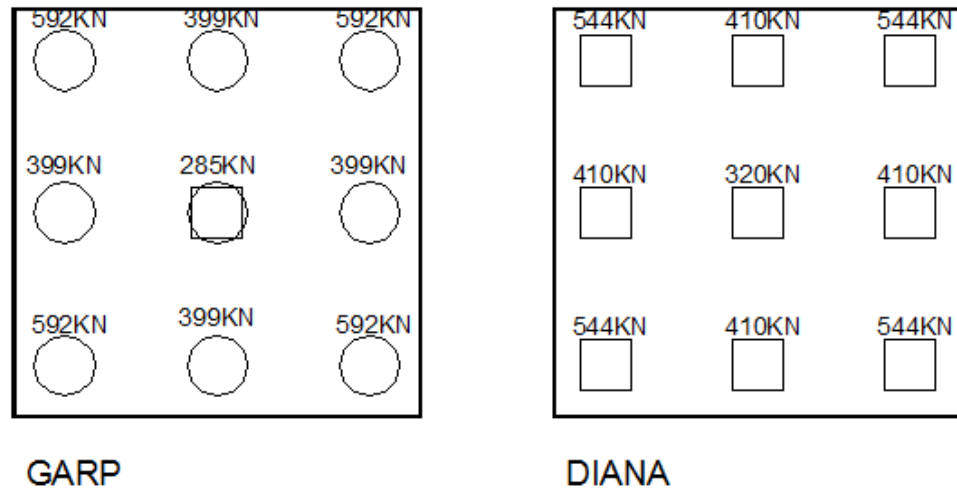


Figura 5.10 – Carga nas estacas do bloco sobre 9 estacas.

O percentual de carga resistida pelo solo sob o bloco no DIANA foi de 7,93% e no GARP de 5,60%, que ainda são considerados valores próximos.

O recalque máximo e diferencial respectivamente no DIANA foi de 7,58mm e 0,71mm e no GARP de 7,73mm e 0,53mm, ressaltando que os maiores recalques ocorrem no centro do bloco e diminuindo a medida que se afasta para a extremidade.

A variação de momento e o momento total, área sob o gráfico, na seção AA são mostrados na Figura 5.11. Percebe-se que o momento total é praticamente o mesmo nas três análises e que o momento para a seção estudada é considerada uniforme no método manual, mas no método numérico o momento abaixo do pilar e redondezas atingiu valores até 80% maiores que na periferia.

Como o momento total é praticamente o mesmo nas 3 análises, pode-se dizer que a área de aço necessária em qualquer um dos métodos seria praticamente a mesma se para o cálculo utilizasse a média, porém ao armar o bloco por seções conforme os diagramas de momento apresentados ocorre uma diferença no peso total e quantidade de aço.

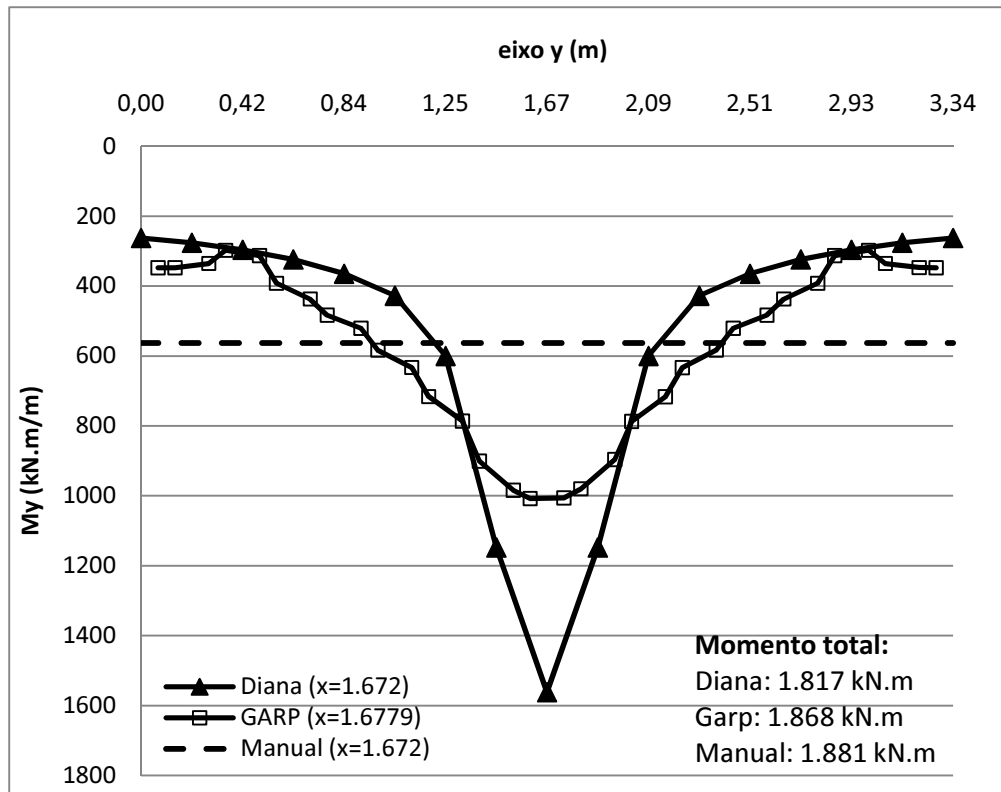


Figura 5.11 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 9 estacas.

No bloco sobre 9 estacas a largura do bloco de 3,344m é grande o suficiente para justificar uma armação diferenciada no decorrer da seção selecionada, separando em faixas próximas de 1,0m, o que pode gerar uma melhor distribuição da armação, mais coerente com a realidade.

A Figura 5.12 mostra a armação inferior do bloco sobre 9 estacas dimensionado pelo método simplificado e pelo DIANA. O bloco foi separado em três seções para efeito de comparação: região central, onde ocorre o momento máximo, e as periferias considerando o momento menor, conforme o diagrama de momento.

Observa-se que armar o bloco baseado somente nas condições do método manual, em que o momento é considerado um único em toda a seção indica seções superarmadas nas periferias e subarmadas no centro da peça.

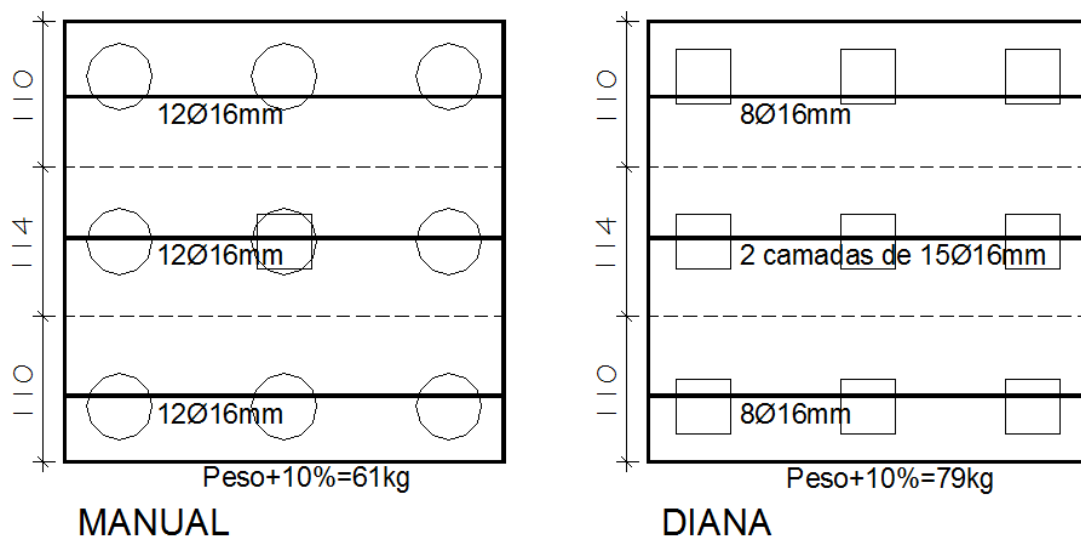


Figura 5.12 – Armadura inferior no bloco sobre 9 estacas.

No bloco sobre 9 estacas, começa a ocorrer mudanças bruscas em relação ao bloco de 4 estacas, acentuando-se as diferenças entre os métodos numéricos e o simplificado. O recalque aumenta bruscamente, a distribuição de carga entre as estacas se torna mais nítida, devido às dimensões, a armadura dos blocos pode ser executada considerando os momentos pontuais e não a média, verifica-se a necessidade de uma armadura mais concentrada no centro do bloco para se evitar prejuízos com uma armadura mediana.

Nas Figuras 5.13 e 5.14, é mostrado o momento M_y em duas versões diferentes. Primeiro no Diana é ilustrado no gráfico o momento em duas seções distintas e no Garp uma vista superior de linhas de contorno do momento.

Pode-se perceber que o momento é maior no centro e à medida que se aproxima da periferia vai diminuindo ao longo da seção estudada AA, e também perpendicular a esta seção. Então para os blocos maiores pode-se reforçar a armadura somente no trecho desejado, com armadura da segunda camada da Figura 5.12 disposta somente no centro do bloco sem precisar ter a largura do bloco, pode ser somente da extensão do momento com o acréscimo de ancoragem em função dos valores no gráfico de momentos, acrescentando um comprimento de ancoragem para cada lado.

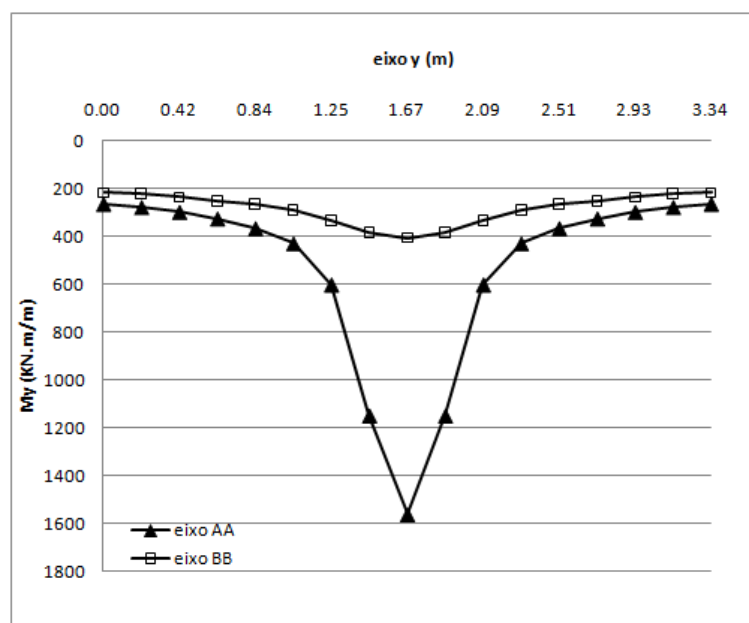


Figura 5.13 – Momento em diferentes seções para bloco sobre 9 estacas, pelo DIANA.

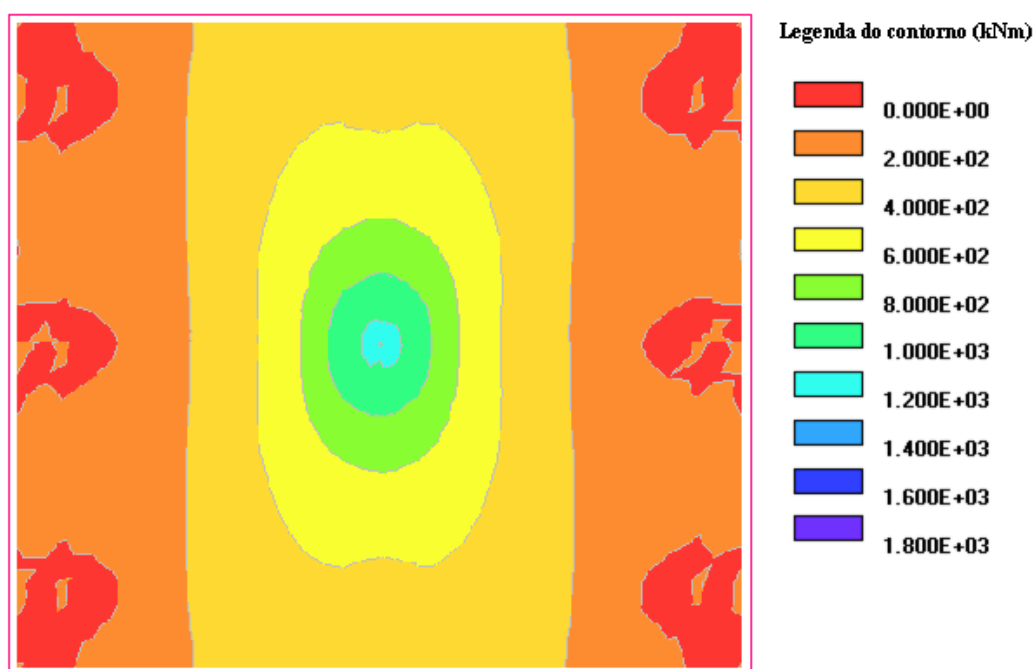


Figura 5.14 – Momento em diferentes seções para bloco sobre 9 estacas, pelo GARP.

5.4. BLOCO SOBRE 25 ESTACAS

A Figura 5.15 mostra a vista em planta da geometria adotada para o bloco sobre 25 estacas, adotado no método manual e GARP, diferenciando do DIANA apenas por este ter estacas

quadradas no mesmo eixo das estacas circulares. A carga adotada foi de 12.500kN aplicada uniformemente distribuída no pilar situado no centro do bloco, o que corresponde a uma tensão de 71.541kPa. O solo é homogêneo, a altura do bloco é 120cm, e as dimensões mostradas na Figura 5.15 estão arredondadas, os valores exatos estão no item 4.4.

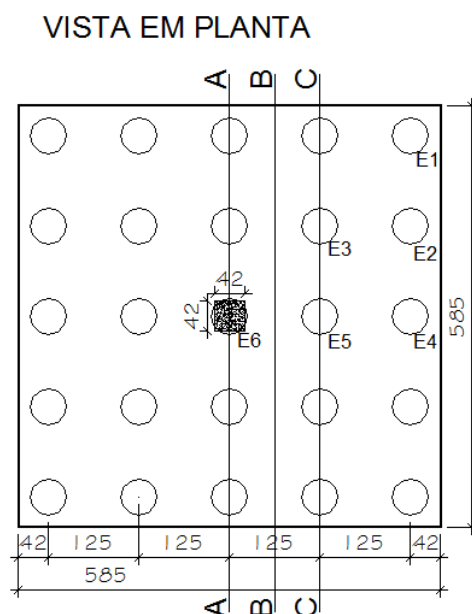


Figura 5.15 – Geometria do bloco sobre 25 estacas.

A carga em cada estaca pelo método manual é a mesma (500kN), porém nos métodos numéricos, assim como ocorreu com o bloco sobre 9 estacas, há uma distribuição desigual, com os valores mostrados na Tabela 5.1 para as estacas de E1 a E6, e que devido a simetria se repete nas demais estacas. Nota-se que a variação de carga nas estacas chega a mais de 50%, prevalecendo como estaca mais carregada a do canto – E1.

Tabela 5.1 – Carga por estaca no bloco sobre 25 estacas.

MÉTODO\ESTACA	E1	E2	E3	E4	E5	E6
DIANA (kN)	712	485	304	468	325	427
GARP (kN)	850	529	209	511	216	445

O percentual de carga resistida pelo solo no DIANA foi de 7,59% e no GARP de 5,40%.

O recalque máximo e diferencial respectivamente no DIANA foi de 15,08mm e 2,69mm e no GARP de 15,67mm e 2,42mm, ressaltando que os maiores recalques ocorrem no centro do bloco e diminuindo a medida que se afasta para a extremidade.

Nota-se claramente um salto no recalque máximo do caso de bloco sobre 9 estacas para o bloco sobre 25 estacas, de 7,58mm para 15,08mm, 2,77 vezes maior, e o recalque diferencial também cresce de 0,71mm para 2,69mm, 3,8 vezes maior, esta diferença é encontrada devido a maior interação entre estacas, devido a um maior número delas.

A variação de momento e o momento total na seção AA são mostrados na Figura 5.16. A situação do momento total se repete neste caso, onde é praticamente o mesmo nas três análises. O momento para a seção estudada é considerada uniforme no método manual, mas no método numérico o momento no centro do bloco atinge valores bem superiores que no restante do bloco.

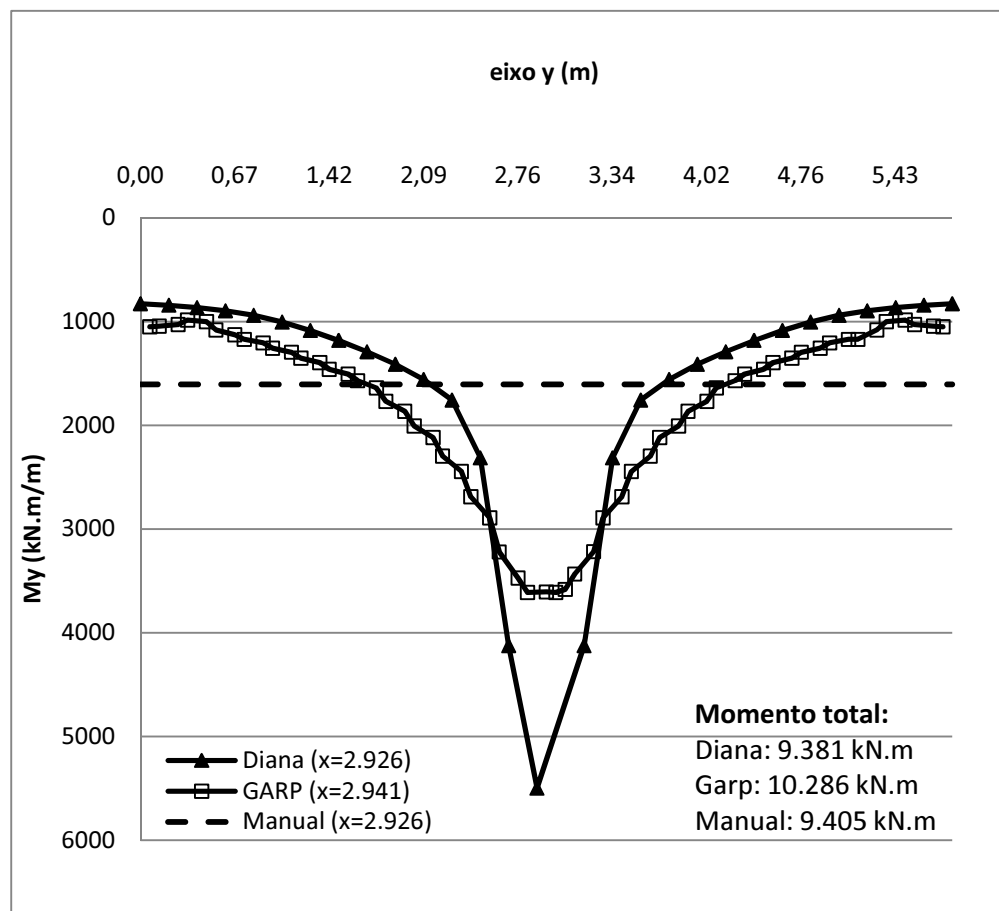


Figura 5.16 – Momento M_y na seção AA para um bloco sobre 25 estacas.

A variação do momento também ocorre em relação a outras seções traçadas no mesmo sentido. As Figuras 5.17 e 5.18 mostram estas diferenças e como o momento na região central do bloco é bem maior. No DIANA, por exemplo, o momento máximo na seção AA é 5.498kN.m/m e na seção BB, distante 62,7cm o momento máximo é 1.889kN.m/m, 2,9 vezes menor.

Na seção CC, 125,4cm de distância da seção AA o momento é praticamente o mesmo em toda a seção variando de 720kN.m/m para 520kN.m/m. Considerando que a largura total do bloco é de 585,2cm, em metade do bloco, nas regiões periféricas, os momentos foram uniformes e com valores absolutos atingindo metade do obtido no método manual (1607kN.m/m), o que significa diminuição de armação nesta região.

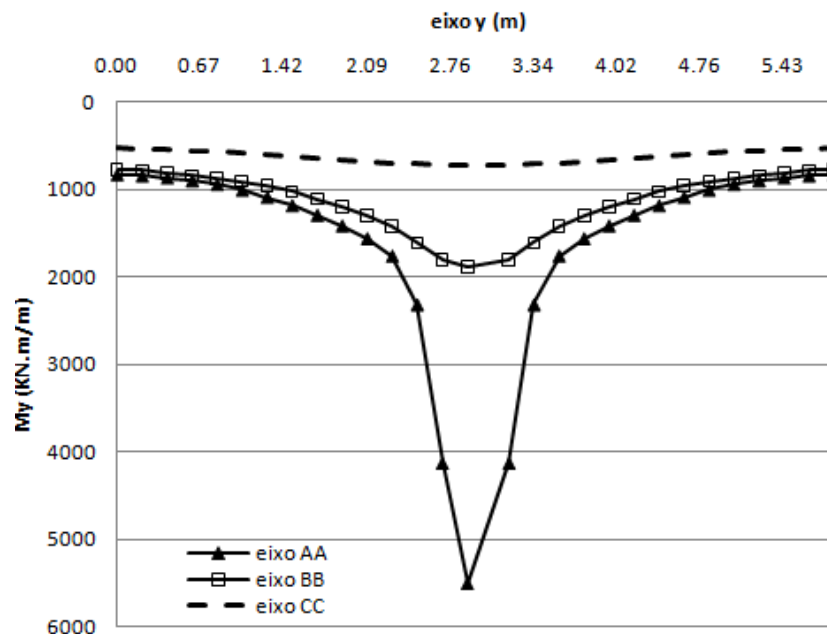


Figura 5.17 – Momento My em varias seções para um bloco sobre 25 estacas, pelo M.E.F.

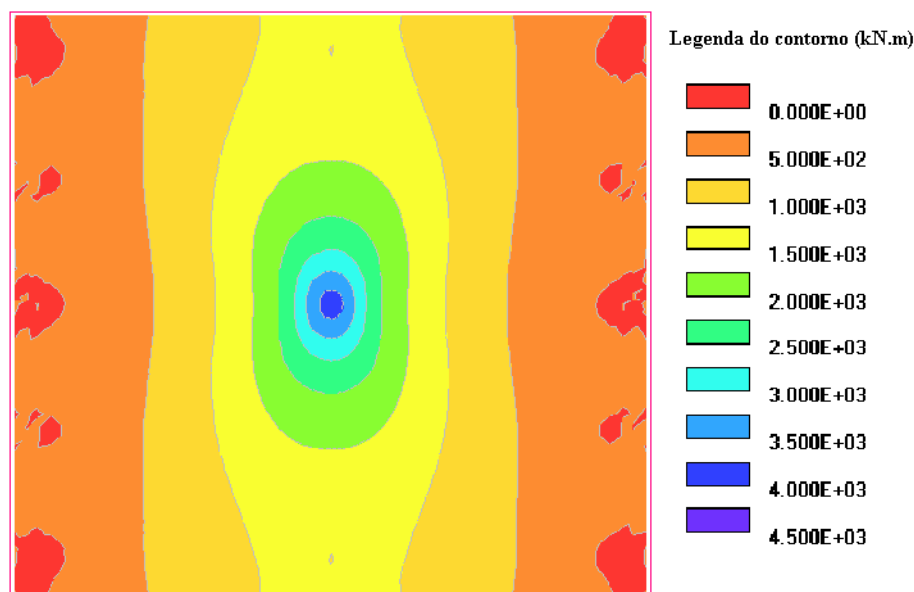


Figura 5.18 – Momento M_y em varias seções para um bloco sobre 25 estacas, pelo GARP.

Devido ao tamanho do bloco e momento muito mais acentuado no centro do bloco, o dimensionamento estrutural pode ser feito com a junção dos resultados de momento obtido em várias seções e, além de reforçar a armação no centro do bloco, esta armação pode ter comprimentos diferentes disposta conforme a necessidade.

A Figura 5.19 mostra a armação inferior do bloco sobre 25 estacas dimensionado pelos métodos manual e M.E.F., com f_{ck} de 30MPa. O bloco foi dividido em cinco seções iguais para melhor comparação entre os resultados, em cada seção foi adotado o maior momento M_y .

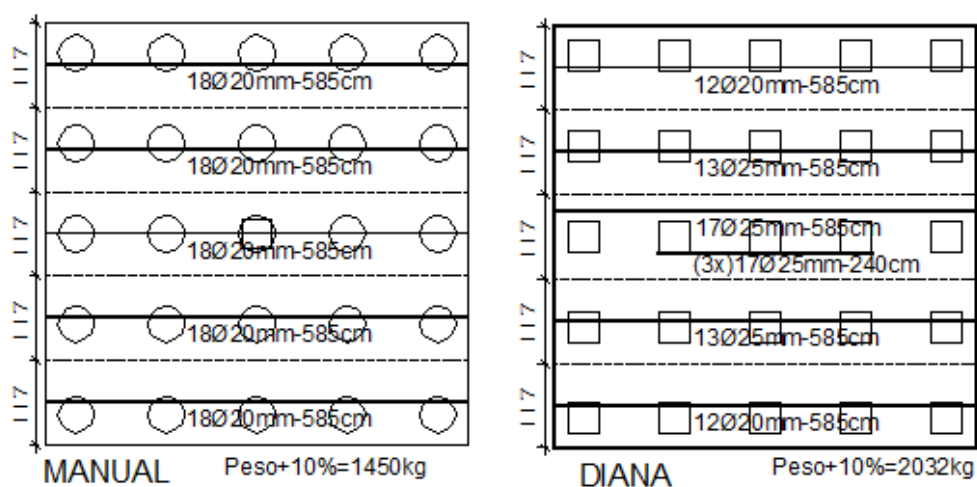


Figura 5.19 – Armação inferior no bloco sobre 25 estacas, pelo método manual e de elementos finitos.

O peso indicado para cada situação é referente ao comprimento indicado na figura, considerando armação somente na base do bloco, sem gancho, porém com trespasse nas armações da segunda camada.

Comparando o dimensionamento da armação de cada seção, para cada método, observa-se que na primeira seção mais periférica o método manual tem uma quantidade de aço superior à obtida no M.E.F., sugerindo uma seção superarmada, e inversamente na seção central uma quantidade de aço muito menor, sugerindo uma seção subarmada.

5.5. BLOCO SOBRE 64 ESTACAS

(i) Bloco sobre 64 estacas com carga vertical aplicada no pilar centrado e aplicada em toda superfície do bloco

A Figura 5.20 mostra a vista em planta da geometria adotada para o bloco sobre 64 estacas, adotado no método manual e GARP, diferenciando do DIANA apenas por este ter estacas quadradas no mesmo eixo das estacas circulares, com seção transversal equivalente.

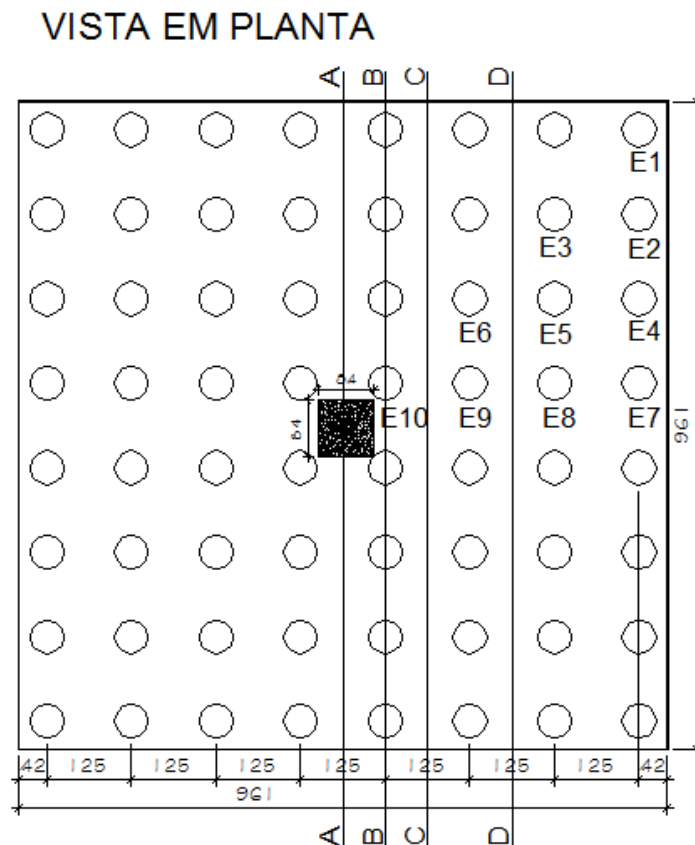


Figura 5.20 – Geometria do bloco sobre 64 estacas.

Foram simuladas duas situações distintas, uma com carga concentrada e a outra com carregamento uniformemente distribuído. A carga adotada foi de 32.000kN, uma aplicada no pilar situado no centro do bloco e outra distribuída sobre todo o bloco, sendo que o método manual não diferencia a condição de aplicação da carga.

A carga em cada estaca pelo método manual é a mesma 500kN, porém nos métodos numéricos assim como nos casos anteriores há uma distribuição desigual, com os valores mostrados na Tabela 5.2 para as estacas de E1 a E10 e que, devido à simetria, se repete nas demais estacas.

Tabela 5.2 – Carga por estaca no bloco sobre 64 estacas.

MÉTODO\ESTACA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
DIANA carga concentrada (kN)	957	610	314	565	294	299	569	310	350	499
GARP carga concentrada (kN)	1413	1074	693	663	239	-359	776	405	-260	146
DIANA carga distribuída (kN)	1222	734	324	640	262	206	620	253	199	192
GARP carga distribuída (kN)	1656	1222	768	709	229	-472	815	394	-420	-160

A distribuição de cargas entre as estacas ocorre de forma bem desigual nos dois métodos numéricos e nas duas formas de aplicação da carga, mas em todas as situações as maiores cargas estão nas estacas periféricas. As estacas de canto em algumas simulações chegam a receber cargas 3 vezes maiores que a média do grupo e há estacas centrais com tração na simulação do GARP.

O percentual de carga resistida pelo solo no DIANA foi de 6,68% para carga concentrada e 7,90% para carga distribuída e no GARP de 3,90% para carga concentrada ou distribuída, ainda menor que no caso com 25 estacas.

O recalque máximo e diferencial, para cargas concentradas, respectivamente no DIANA foi de 26,37mm e 5,80mm e no GARP de 23,40mm e 7,73mm, ressaltando que os maiores recalques ocorrem no centro do bloco e diminuindo a medida que se afasta para a extremidade. O recalque diferencial para cargas distribuídas é bem menor, no DIANA foi

1,30mm, com recalque máximo de 23,03mm, e no GARP é 3,50mm, com recalque máximo de 19,69mm.

Com o uso de cargas distribuídas não diminuiu significativamente o recalque máximo, que ficou dentro da média do recalque em todo o bloco, entretanto o recalque diferencial foi um valor muito inferior que para carga concentrada aplicada no centro do bloco.

A variação de momento e o momento total para carga concentrada na seção AA são mostrados na Figura 5.21. Os momentos totais para carga concentrada são próximos para o método manual e DIANA, aumentando no GARP. O momento ao longo da seção estudada para carga distribuída é praticamente uniforme, mas para carga concentrada nos métodos numéricos o momento no centro do bloco atinge valores bem superiores que no restante do bloco.

Pode-se observar, nos métodos de elementos finitos ou método híbrido, que o momento total dado pela área do gráfico no caso de carga distribuída (9.258kN.m no Diana e 19.465 kN.m no Garp) é bem menor que para cargas concentradas (39.078kN.m no Diana), fruto de uma melhor distribuição dos esforços no interior do bloco.

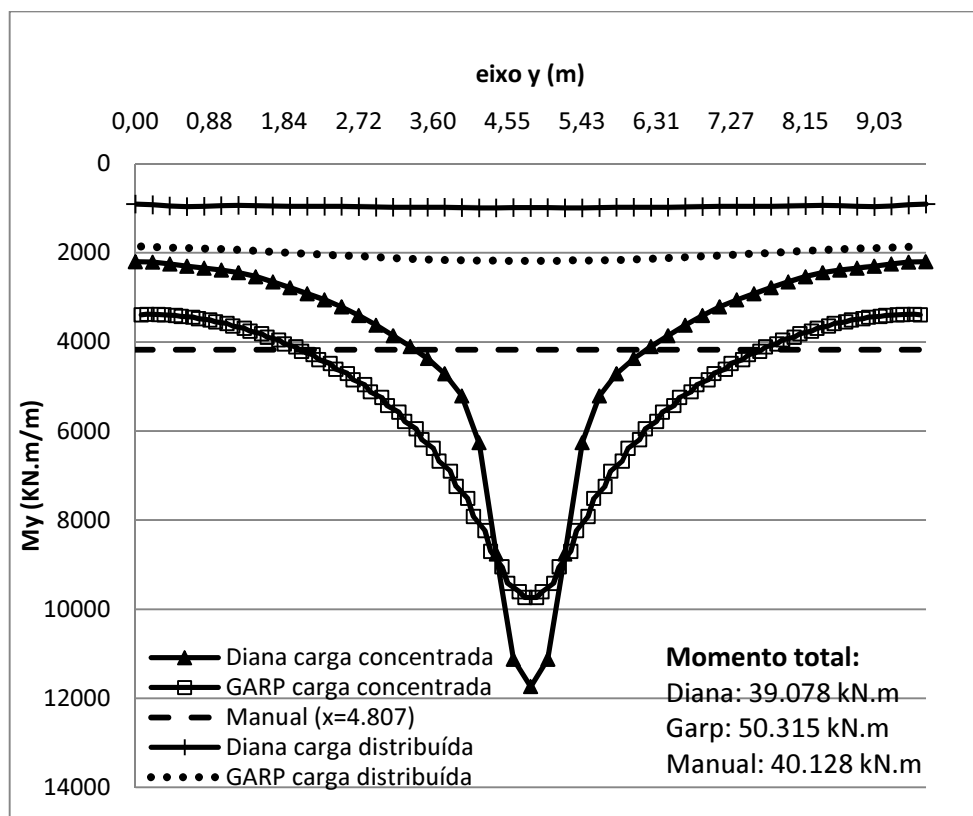


Figura 5.21 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 64 estacas.

A Figura 5.22 mostra a variação de momento M_y , no caso de carga concentrada obtida pelo DIANA com o diagrama de momentos em quatro seções e a Figura 5.23 o contorno do momento M_y obtida pelo GARP, para uma melhor visualização da posição da armação dos blocos.

Embora com valores diferentes de momento nas Figuras 5.22 e 5.23, que apresentam o resultado de programas diferentes, mostram na região central do bloco um elevado valor de momento e a tendência de diminuição do momento na seção AA, chegando a ter um momento aproximadamente 5 vezes maior no centro que na ponta do bloco. Nas demais seções paralelas a AA, o momento máximo diminui muito, e ao mesmo tempo se mantém praticamente uniforme, sem grandes picos de momento. Na seção CC, por exemplo, distante da seção AA de 1,25m o momento máximo é aproximadamente três vezes maior que na seção AA, e ao longo da seção CC a variação é menor que 2 vezes.

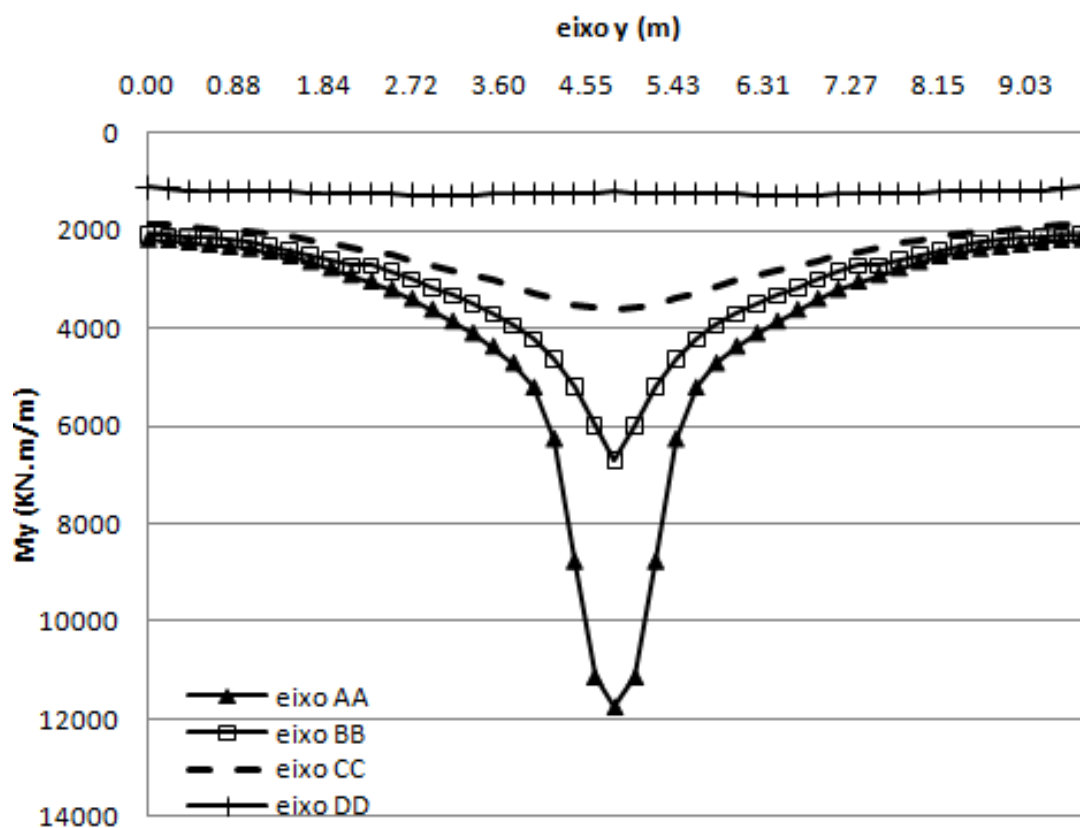


Figura 5.22 – Diagrama do momento M_y em 4 seções para um bloco sobre 64 estacas, pelo DIANA.

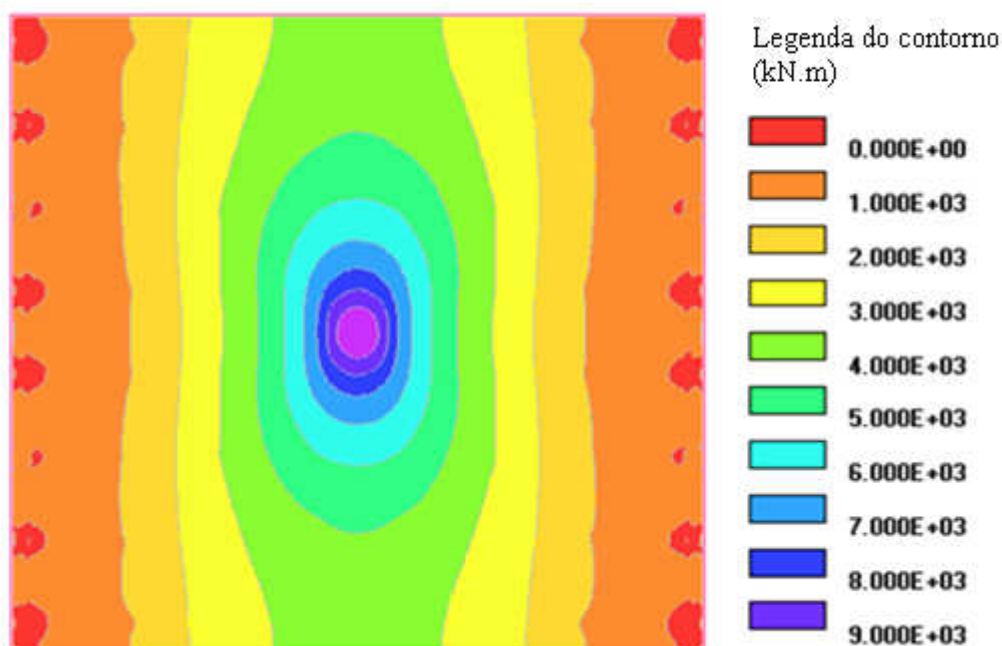


Figura 5.23 – Contorno do momento M_y para um bloco sobre 64 estacas, pelo GARP.

Assim, como no bloco sobre 25 estacas, o bloco foi dimensionado dividindo o bloco em 5 partes iguais, para efeito de comparação, somente para carga concentrada, conforme detalhado na Figura 5.24, com f_{ck} adotado de 30MPa.

O peso indicado para cada situação é referente ao comprimento indicado na figura, considerando armação somente na base do bloco, sem gancho, porém com ancoragem nas armações a partir da segunda camada.

Os pesos de aço no programa DIANA e método manual, são praticamente os mesmos, porém a armação no M.E.F. é mais concentrada no centro, e na periferia do bloco a ferragem é mais leve.

O modo de distribuir a armação no método manual se comparado com os elementos finitos sugere um excesso de aço nas bordas do bloco e pouca armação no centro do bloco.

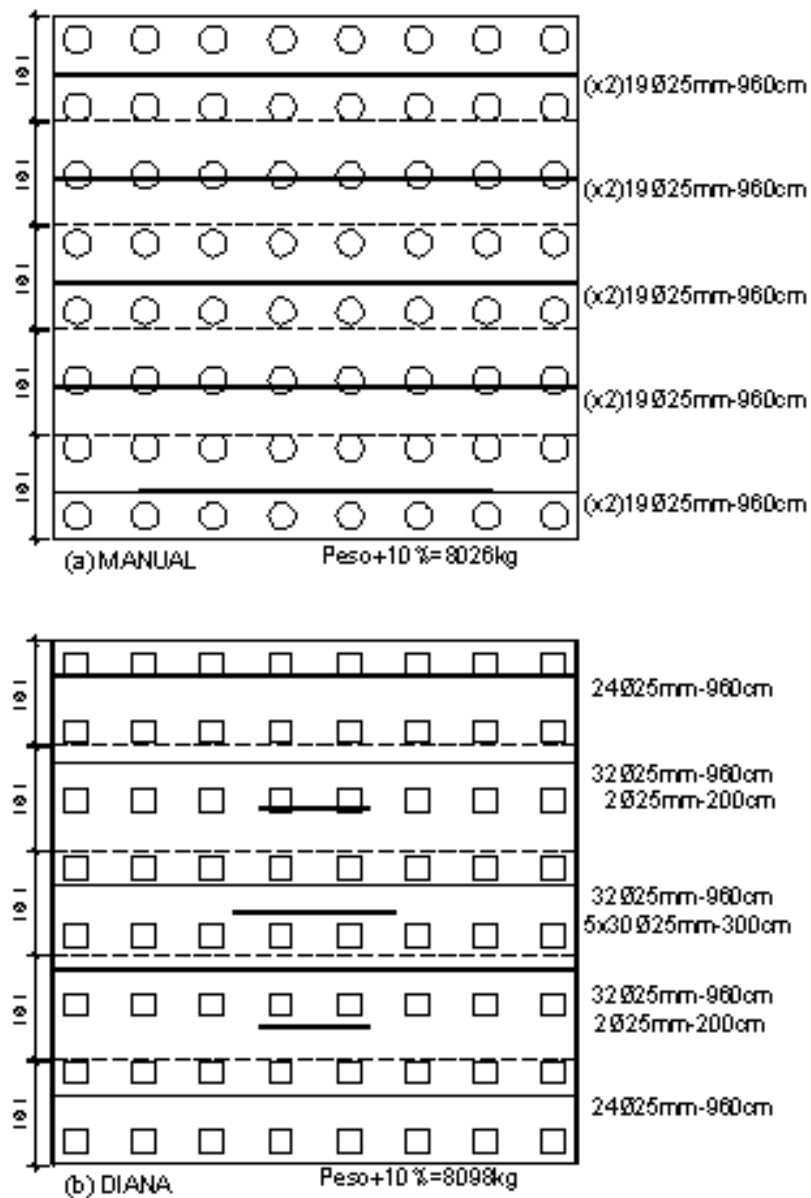


Figura 5.24 – Armação inferior no bloco sobre 64 estacas, para os métodos: (a) manual e (b) elementos finitos.

(ii) Bloco sobre 64 estacas com 5 pilares simétricos

Neste item foi simulado o mesmo bloco de 64 estacas, de mesmas dimensões e propriedades do concreto e do solo que no anterior, com a diferença de aplicação de carga. A Figura 5.25 mostra a vista em planta da aplicação da carga no bloco. A carga total aplicada foi a mesma (32.000kN), porém distribuída entre os cinco pilares, com tensões correspondentes de 9.157kN/m².

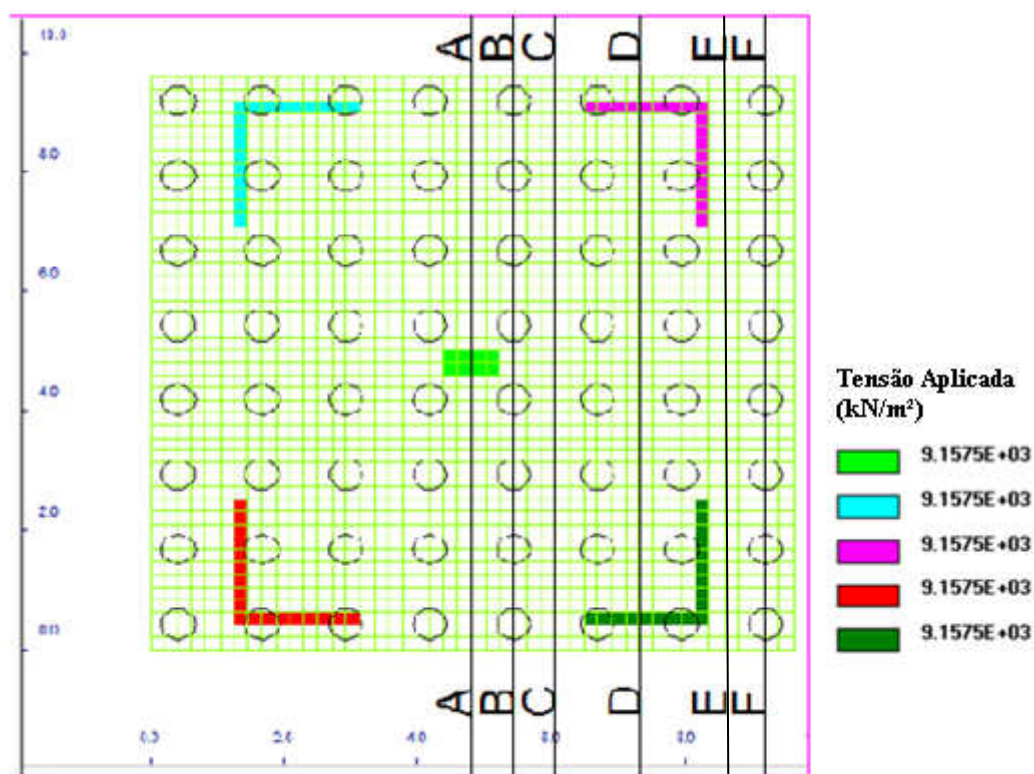


Figura 5.25 – Aplicação da carga sobre o bloco de 64 estacas.

Nos métodos manuais, quando existe mais de um pilar por bloco, soma-se a carga de todos os pilares e esta é aplicada no centro de gravidade do grupo de pilares. Para o caso estudado, o centro de gravidade do bloco coincide com o dos pilares, então para o método manual não há diferença de resultados para carga aplicada no centro do bloco, uniformemente distribuída em toda superfície do bloco ou entre cinco pilares.

Portanto, a carga das estacas para método manual é a mesma 500kN. Porém nos métodos numéricos, assim como nos casos anteriores há uma distribuição desigual, com os valores mostrados na Figura 5.26 para as 16 estacas do primeiro quadrante e que devido à simetria se repete nas demais estacas.

A distribuição de cargas entre as estacas ocorre de forma bem desigual nos dois métodos numéricos, mas os dois métodos numéricos concordam que as maiores cargas estão nas estacas periféricas. Ainda com a simulação de diferentes locações de pilares há estacas centrais com tração na simulação do GARP e as estacas do canto recebem cargas muito maiores que as centrais.

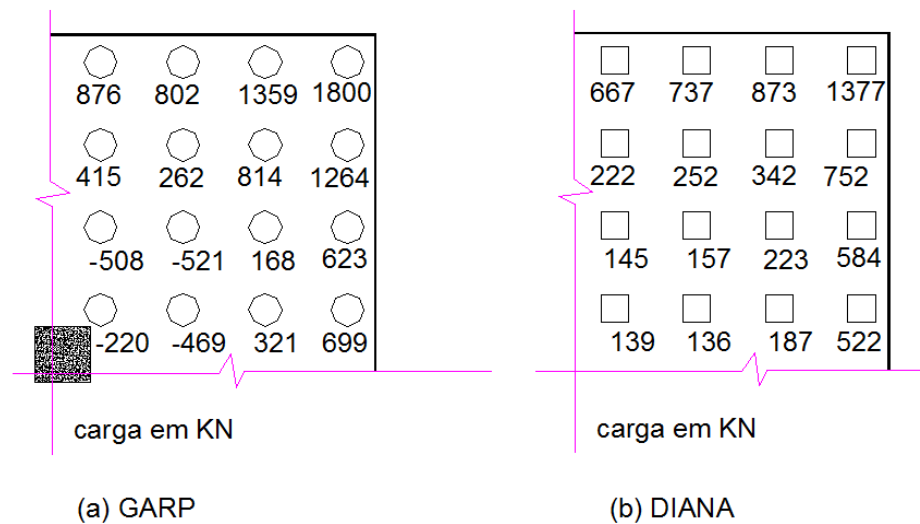


Figura 5.26 – Carga nas estacas: (a) pelo GARP, (b) pelo DIANA.

O percentual de carga resistida pelo solo no DIANA foi de 8,58% e no GARP de 3,94%, praticamente o mesmo valor que nas outras situações de aplicação de carga.

O recalque máximo e diferencial, respectivamente, no DIANA foi de 22,80mm e 1,00mm e no GARP de 18,70mm e 2,12mm, mostrando que, para uma maior distribuição de aplicação de carga o recalque fica mais uniforme, diminuindo o recalque diferencial.

A Figura 5.27 mostra a variação de momento e o momento total na seção AA, o momento total para o método manual continua o mesmo que nas demais distribuições de aplicação da carga, mas no GARP e DIANA se diferencia devido à distribuição de carga entre as estacas, o que representou um valor maior no GARP devido à concentração de carga nas estacas da periferia.

Neste caso em particular, no método manual, os valores de momento: total, máximo e o próprio diagrama de momentos, possuem valores muito superiores aos métodos numéricos, o que indica um maior consumo de aço para combater o momento.

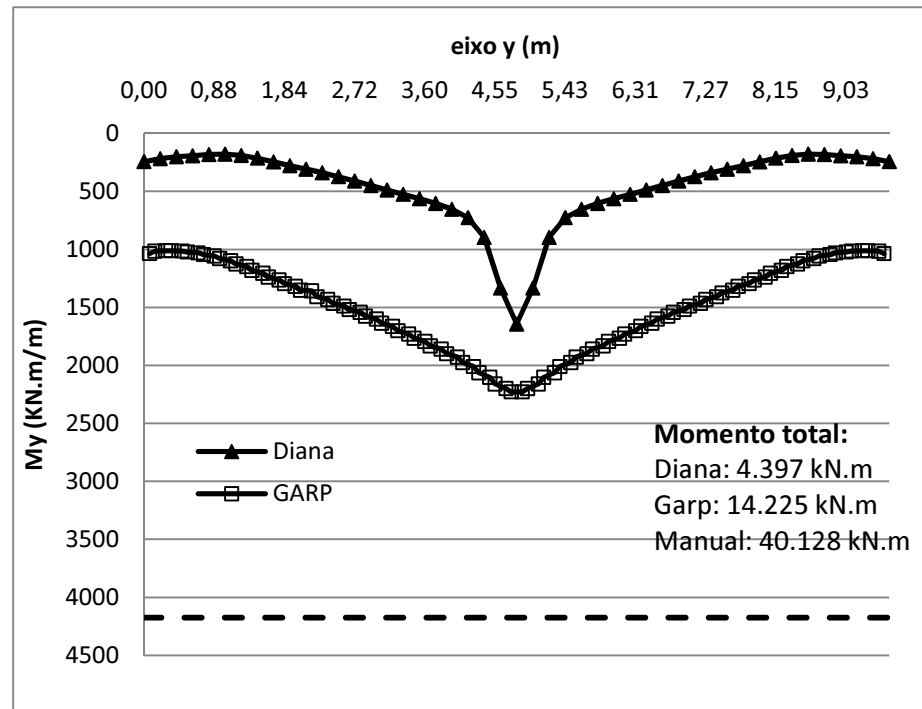


Figura 5.27 – Momento M_y no eixo AA para um bloco sobre 64 estacas, com 5 pilares.

A variação do momento M_y nas seções diversas pelo DIANA é apresentada na Figura 5.28 e o contorno do momento M_y encontrado no GARP é ilustrado na Figura 5.29. O momento varia em todas as seções não sendo possível seguir uma linha de predominância de maiores momentos, pois depende da locação aplicação das cargas, o que torna o caso particular e não pode ser generalizado.

Para efeito de comparação com o método manual, a Figura 5.30 mostra a armação deste bloco segundo o GARP, e mesmo neste caso com variação de momento em todas as seções é possível, com uma distribuição da armação seguindo os maiores momentos em cada trecho, diminuir o peso de aço empregado.

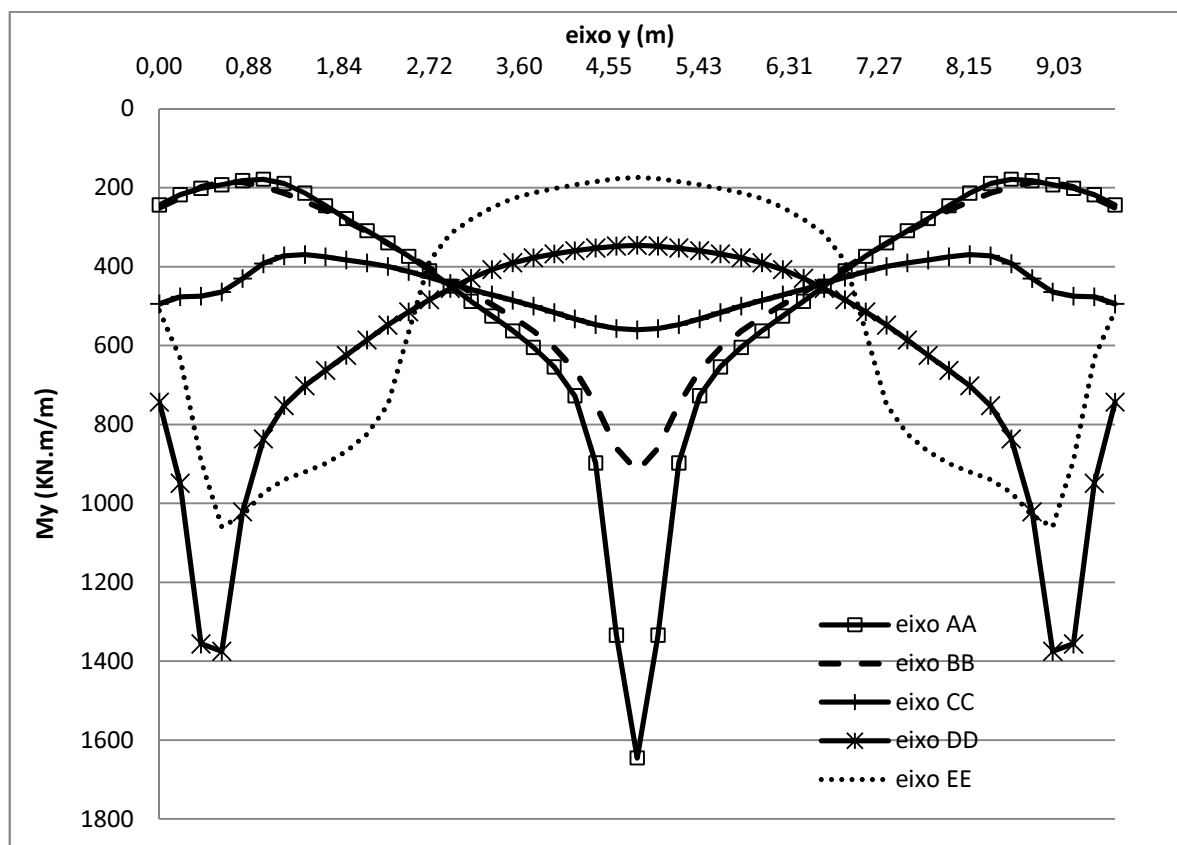


Figura 5.28 – Diagrama do momento My em 5 seções para um bloco sobre 64 estacas, com 5 pilares, pelo DIANA.

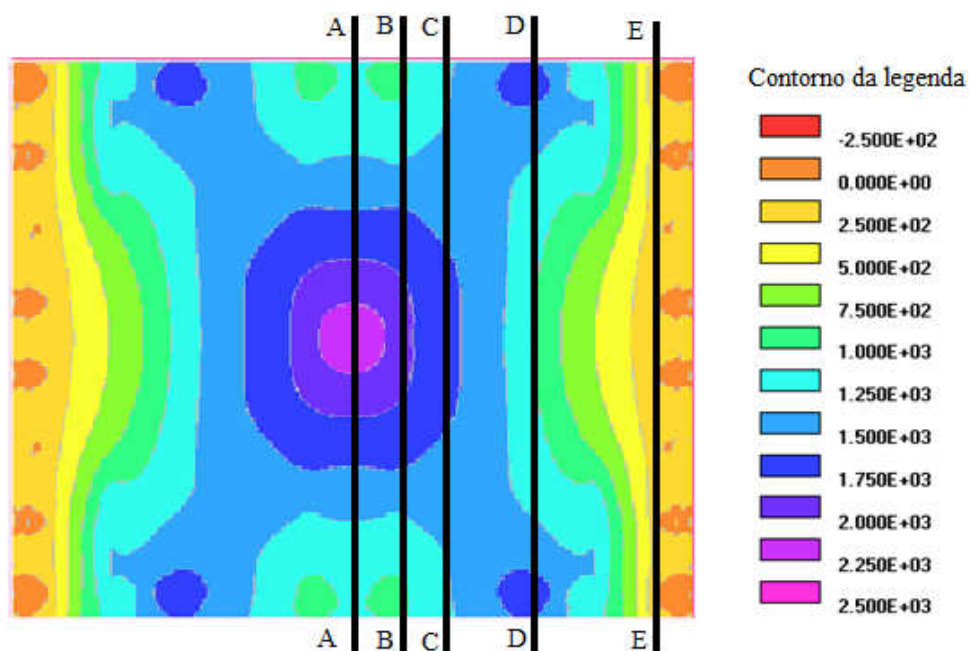


Figura 5.29 – Contorno do momento My para um bloco sobre 64 estacas, de 5 estacas, pelo GARP.

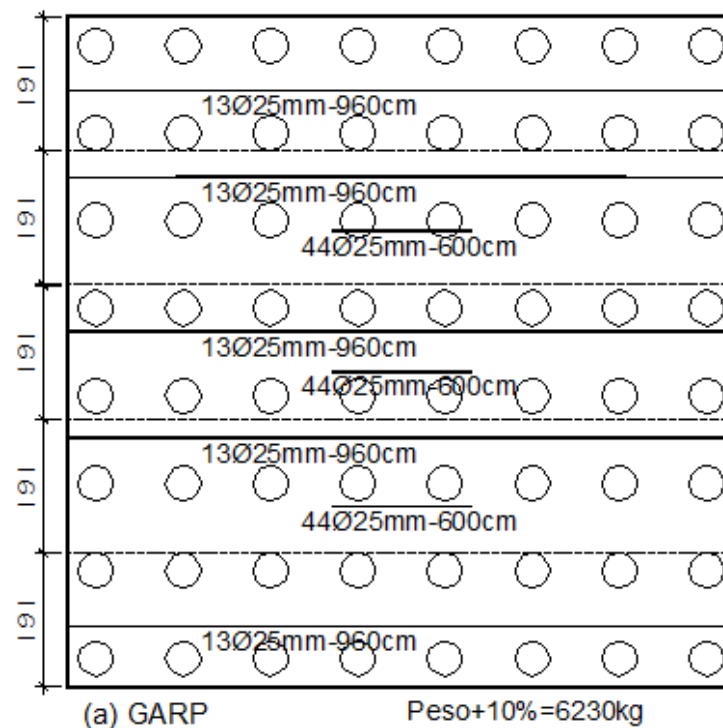


Figura 5.30 – Armadura inferior do bloco sobre 64 estacas e 5 pilares, pelo GARP.

5.6. BLOCO SOBRE 81 ESTACAS

A Figura 5.31 mostra a vista em planta da geometria adotada para o bloco sobre 81 estacas, adotado no método manual e GARP, diferenciando do DIANA apenas por este ter estacas quadradas no mesmo eixo das estacas circulares. A carga adotada foi de 40.500kN aplicada uniformemente distribuída no pilar situado no centro do bloco, que corresponde a uma tensão de 57.948kPa.

A carga em cada estaca pelo método manual foi a mesma 500kN, porém nos métodos numéricos, assim como ocorreu nos blocos anteriores, há uma distribuição desigual, conforme valores mostrados na Tabela 5.3 para as estacas de E1 a E15 e que devido a simetria se repete nas demais estacas.

Nota-se na estaca mais crítica E1 que a carga atinge valores até três vezes maior que a média aplicada no bloco, e nas estacas centrais para o GARP ocorre até esforços de tração devido a forma aproximada de considerar as interações entre as estacas.

O percentual de carga resistida pelo solo no DIANA foi de 6,60% e no GARP de 3,73%.

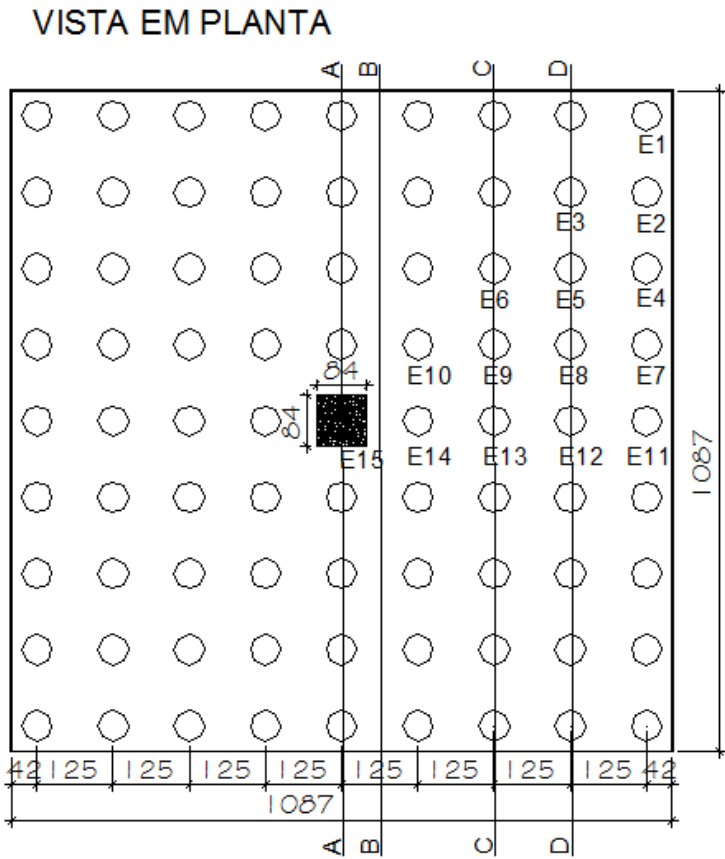


Figura 5.31 – Geometria do bloco sobre 81 estacas.

Tabela 5.3 – Carga por estaca no bloco sobre 81 estacas.

ESTACA	DIANA (kN)	GARP (kN)	ESTACA	DIANA (kN)	GARP (kN)
E1	1163	1858	E9	274	171
E2	712	1053	E10	335	-871
E3	335	222	E11	620	865
E4	631	1315	E12	296	102
E5	287	497	E13	288	456
E6	253	970	E14	388	-385
E7	620	612	E15	486	-766
E8	291	-287			

O recalque máximo e diferencial respectivamente no DIANA foi de 29,22mm e 5,71mm e no GARP de 23,92mm e 6,68mm, ressaltando que os maiores recalques ocorrem no centro do bloco e diminuindo a medida que se afasta para a extremidade.

A variação de momento e o momento total na seção AA são mostrados na Figura 5.32. O momento para a seção estudada é considerada uniforme no método manual, mas nos métodos numéricos o momento no centro do bloco atinge valores bem superiores que no restante do bloco.

O momento total do DIANA e manual foram muito próximos, porém mais elevado no GARP, devido à maior concentração de carga na periferia.

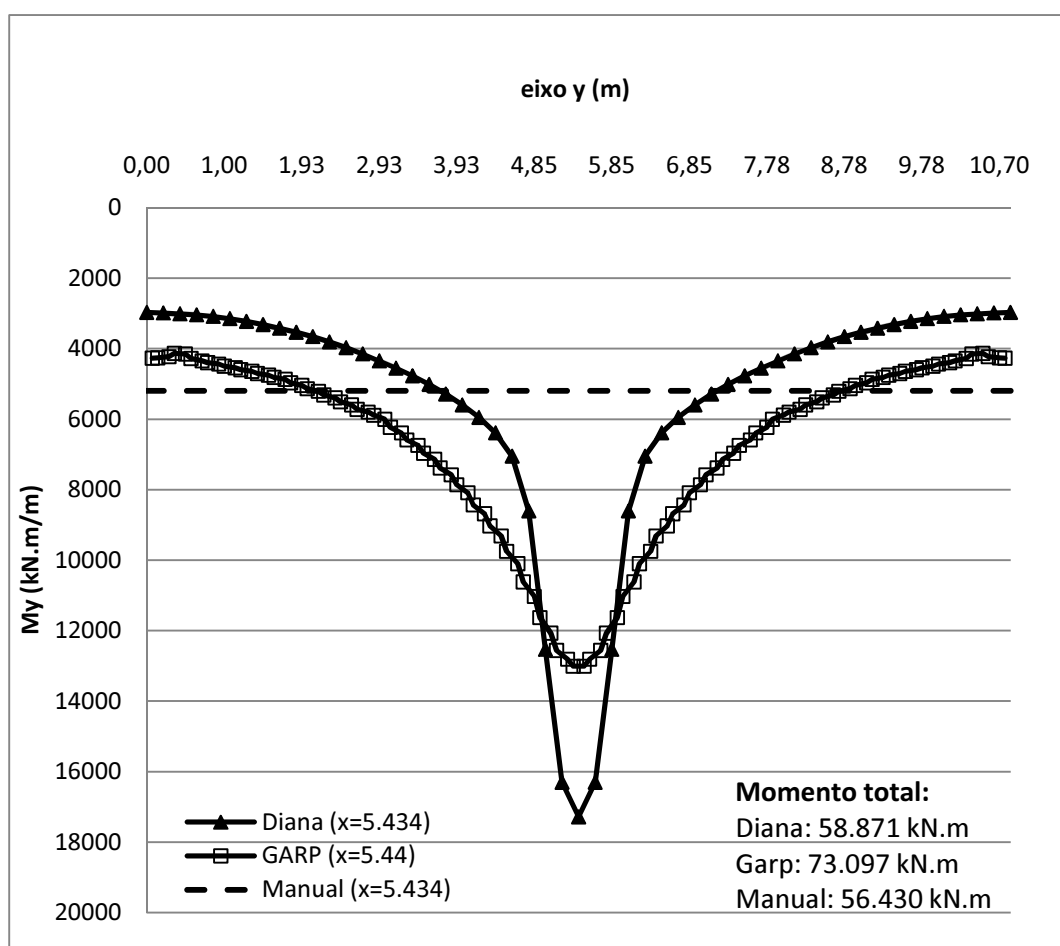


Figura 5.32 – Momento My na seção AA, para um bloco sobre 81 estacas.

A variação do momento também ocorre em relação a outras seções traçadas no mesmo sentido, estas diferenças são mostradas nas Figuras 5.33 através dos diagramas de momento obtidos com o uso do programa DIANA e Figura 5.34 que ilustra o contorno do momento

obtido pelo programa GARP. Nas seções afastadas do centro ocorre uma variação muito pequena do momento ao longo da seção.

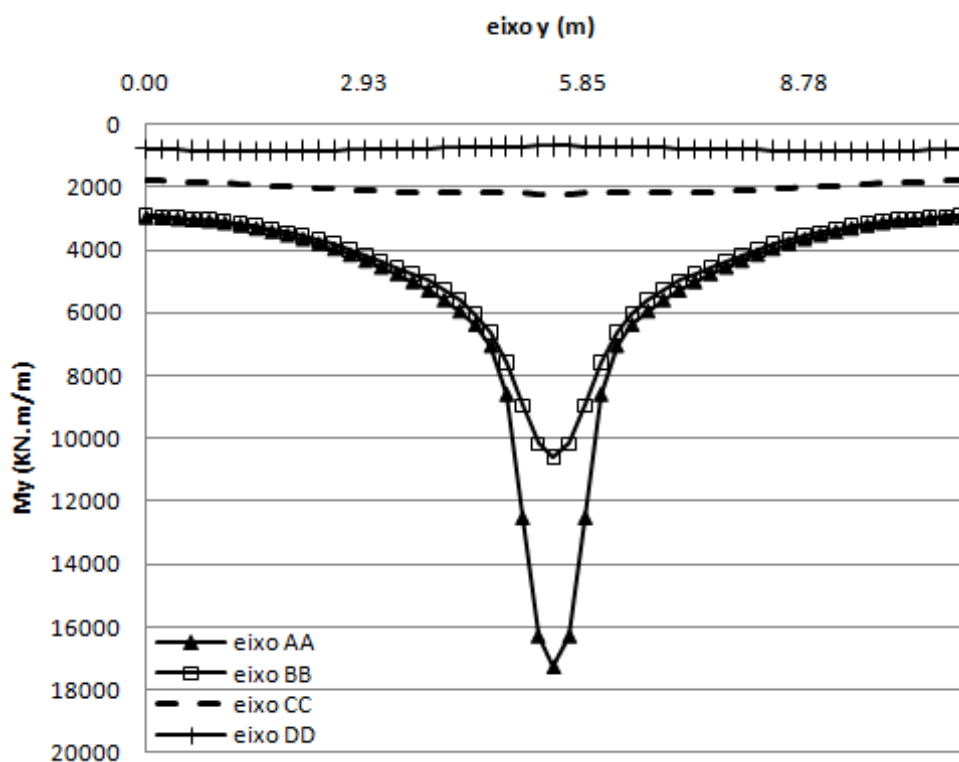


Figura 5.33– Momento M_y em 4 seções para um bloco sobre 81 estacas, pelo DIANA.

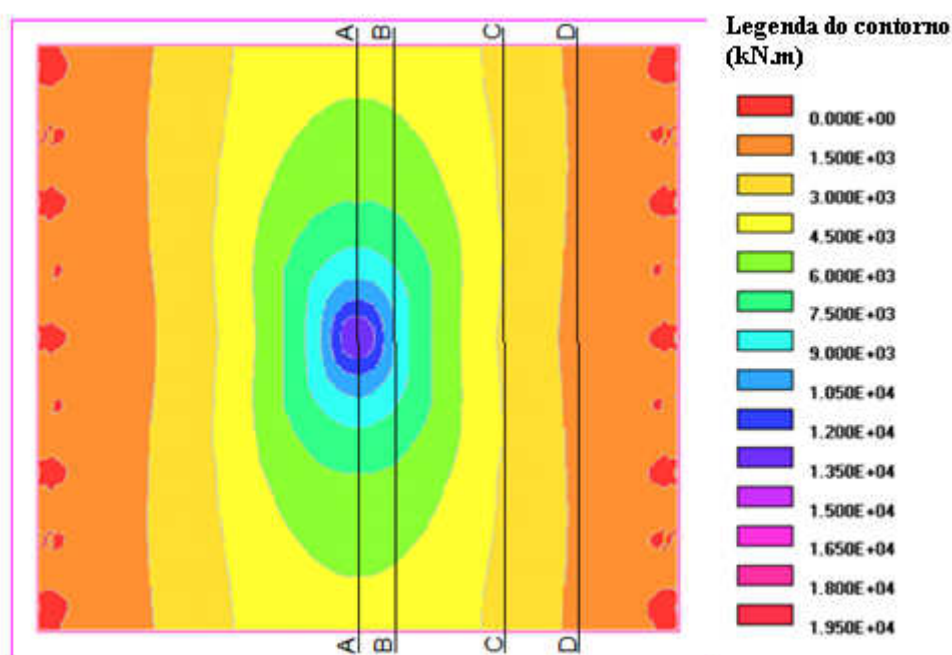


Figura 5.34 – Contorno do momento M_y para um bloco sobre 81 estacas, pelo GARP.

A Figura 5.35 mostra a armação inferior do bloco sobre 81 estacas dimensionado pelos métodos manual e elementos finitos, com f_{ck} de 30MPa. O bloco foi dividido em cinco seções iguais para melhor comparação entre os resultados e em cada seção foi adotado o maior momento M_y .

Assim como no caso anterior nos métodos numéricos os maiores momentos estão situados no centro do bloco, necessitando de mais armação nesta região do que o previsto pelo método manual, e para a periferia prevê menores momentos que no método simplificado, diminuindo a quantidade e aço nesta outra região.

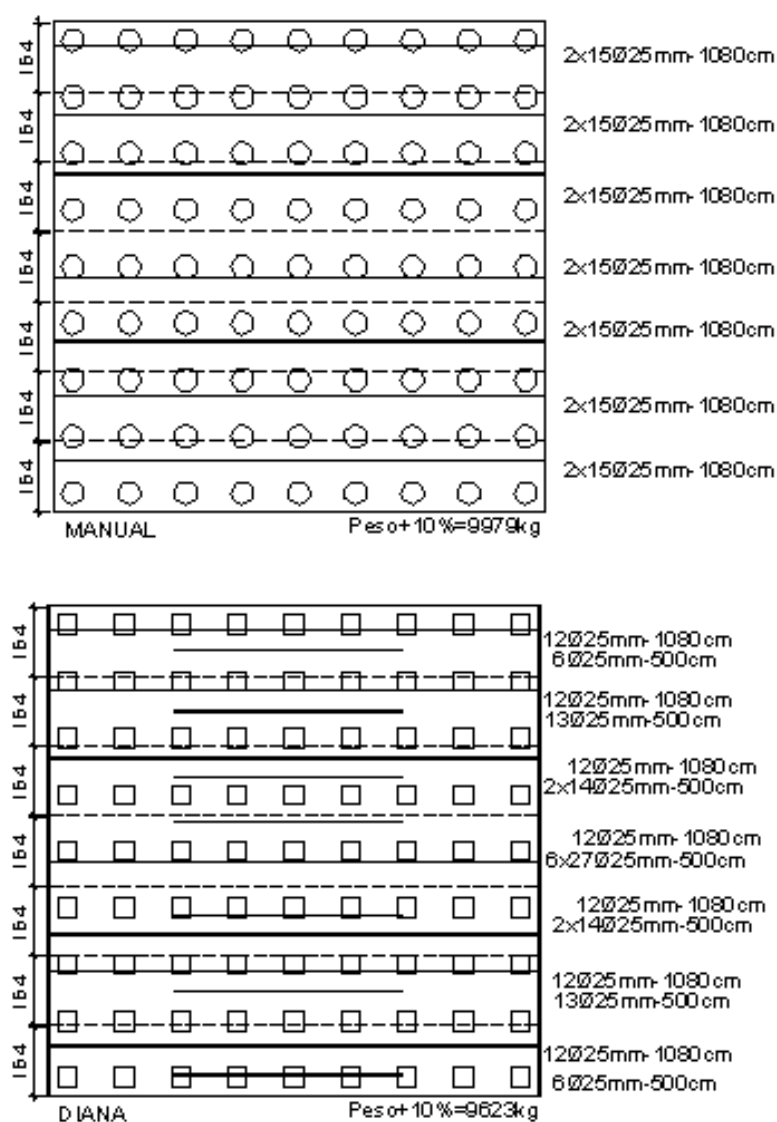


Figura 5.35 – Armação inferior no bloco sobre 81 estacas, método manual e M.E.F..

A distribuição da armação no DIANA seguindo o diagrama de momentos, neste caso obteve um menor consumo de aço, mesmo com o pico de momento (17.284kN.m/m) atingindo um valor 3,3 vezes maior que no método manual (5.192kN.m/m)

5.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Em todos os casos foram expostos individualmente os resultados encontrados de recalque máximo; diferencial; porcentual de carga transferida para o solo; a carga solicitada para cada estaca do bloco; a variação do momento e o momento total na seção central AA; a distribuição de momento M_y ao longo do eixo x ; um possível detalhamento de armação de cada bloco por método e consequentemente o peso de aço para cada caso.

Neste item será feito uma comparação destes resultados anteriormente obtidos, para os casos de carga vertical aplicada no pilar situado no centro do bloco.

Os recalques máximo e diferencial foram calculados somente nos métodos numéricos e em ambos os programas os valores aumentam conforme cresce a quantidade de estacas no bloco, a Figura 5.36 confirma os resultados esperados.

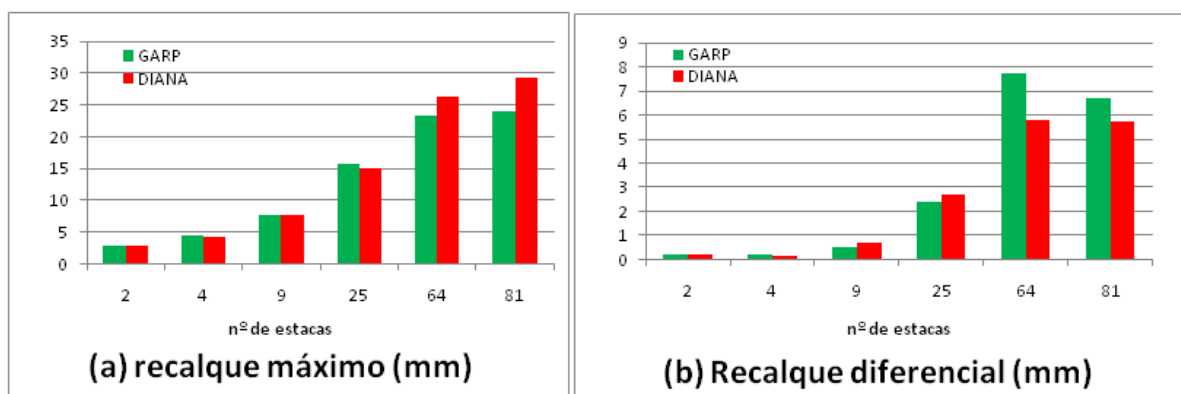


Figura 5.36 – Comparação entre os resultados de recalques.

Os recalques foram medidos no topo dos blocos, e em todos os casos o recalque máximo ocorre abaixo do pilar e o mínimo nos cantos, decorrente da carga estar concentrada no pilar que se situa no centro do bloco.

Os recalques máximo e diferencial nos dois programas tiveram valores bem próximos, principalmente para os blocos menores, confirmando o desempenho do programa GARP. Os valores absolutos aumentam com a quantidade de estacas para uma mesma carga média por

estaca devido ao efeito do grupo de estacas, que quanto maior o número de estacas maior o recalque apresentado.

O percentual de carga aplicada que é transferida diretamente ao solo pelo bloco diminui a medida que aumenta o número de estacas, tendência esta encontrada por outros autores, como Sales et al (2002), e demonstrada na Tabela 2.4. Quanto maior o número de estacas, o conjunto de estacas fica mais rígido em relação ao bloco e, portanto absorve mais carga.

Na Figura 5.37 observa-se que o método híbrido encontrou um percentual menor que o M.E.F., porém há coerência entre os métodos quanto a tendência de decréscimo da carga.

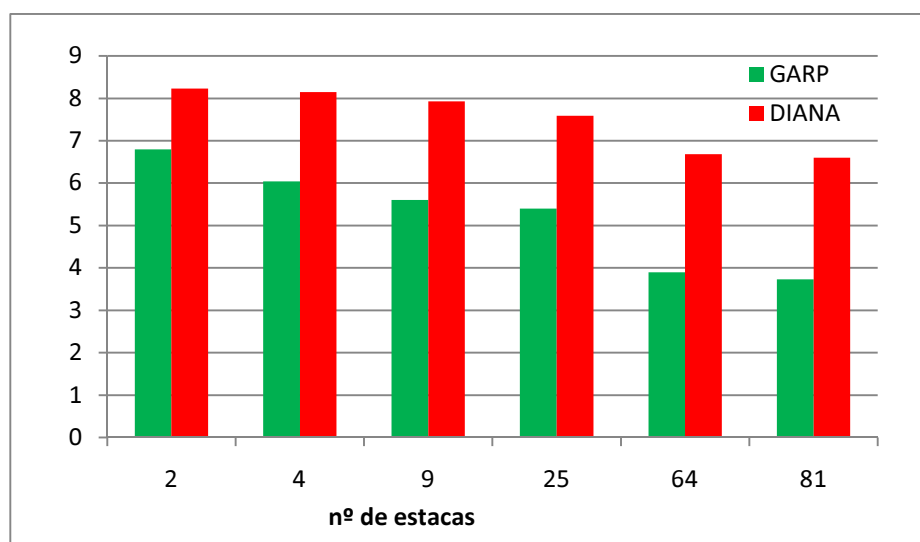


Figura 5.37 – Porcentagem de carga transferida ao solo pelo bloco, pelos métodos numéricos.

Para os blocos estudados com mesmo espaçamento entre as estacas e carga média por estacas, pode-se dizer que à medida que se aumenta a quantidade de estacas por bloco cresce o percentual de carga transferida para as estacas. Nos blocos menores, com até 4 estacas, as cargas de cada estaca são as mesmas, mas a partir do bloco sobre 9 estacas, as do canto, nos métodos numéricos, recebem carga muito maiores que as do centro do bloco.

A distribuição de carga entre as estacas, para blocos com mais de 25 estacas, não apresentou boa proximidade entre os programas, resultando em cargas bem diferentes em cada estaca, tanto para as maiores cargas quanto para as menores cargas nas estacas, conforme mostrado na Figura 5.38.

Dentre as estacas que absorveram maior carga há um aumento uniforme da relação entre a carga obtida pelo DIANA e método manual, iniciando com cargas praticamente iguais e à

medida que há um aumento do número de estacas até 81 por bloco esta relação chega a ser maior que duas vezes, no GARP chegou a ser 3 vezes. As estacas que receberam as menores cargas, de 9 a 81 estacas por bloco, na simulação com o Diana, ficaram com aproximadamente metade da carga média (método manual).

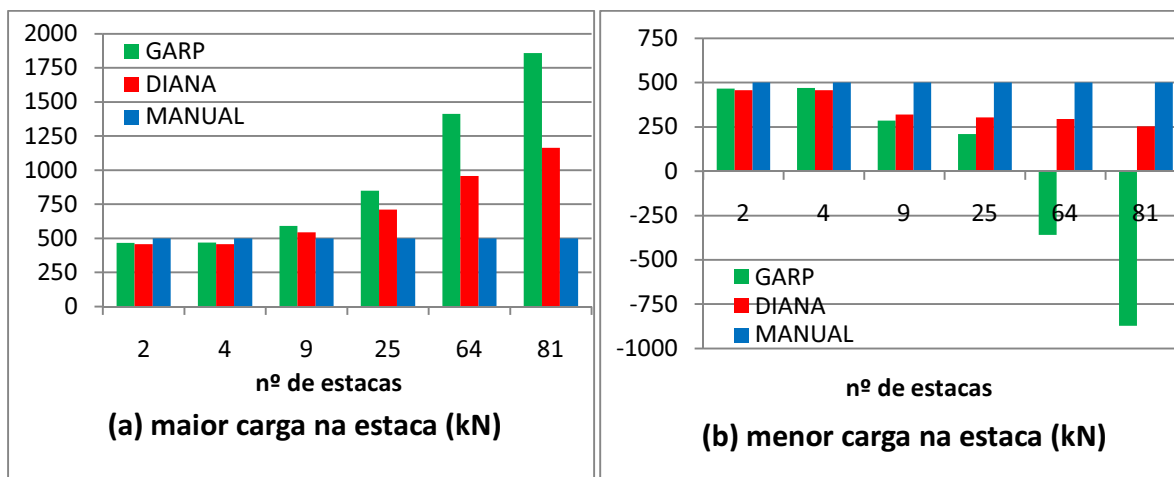


Figura 5.38 – Comparação entre as maiores e menores cargas transferida para as estacas.

A Figura 5.39 mostra uma comparação entre o momento total na seção AA (centro de cada bloco no eixo y), em escalas diferentes, entre os métodos estudados. Observa-se que há uma proximidade entre todos os métodos, melhor definida entre o DIANA e método manual e uma pequena variação apresentada pelo GARP apenas para blocos com 64 e 81 estacas.

No GARP a distância máxima de interação entre os componentes do radier interfere muito na distribuição da carga entre as estacas e isto altera o momento total. Souza (2010) estudou a simplificação em como considerar o limite de interação. No DIANA, a interação não é controlada, ou seja, tem a interação até o infinito, só que considerando as estacas intermediárias. O GARP simplifica a interação duas a duas estacas, sem considerar nenhuma outra entre elas. Para adotar uma simplificação que contorne o problema, foi sugerido por Souza (2010), limitar a distância de interação e concluiu que blocos rígidos de até 9 estacas o espaçamento relativo pouco interferiu na convergência dos resultados, para 25 e 36 estacas o espaçamento relativo é de 15 e para 64 e 100 estacas de 20 (distância eixo a eixo entre estacas dividida pelo diâmetro da estaca).

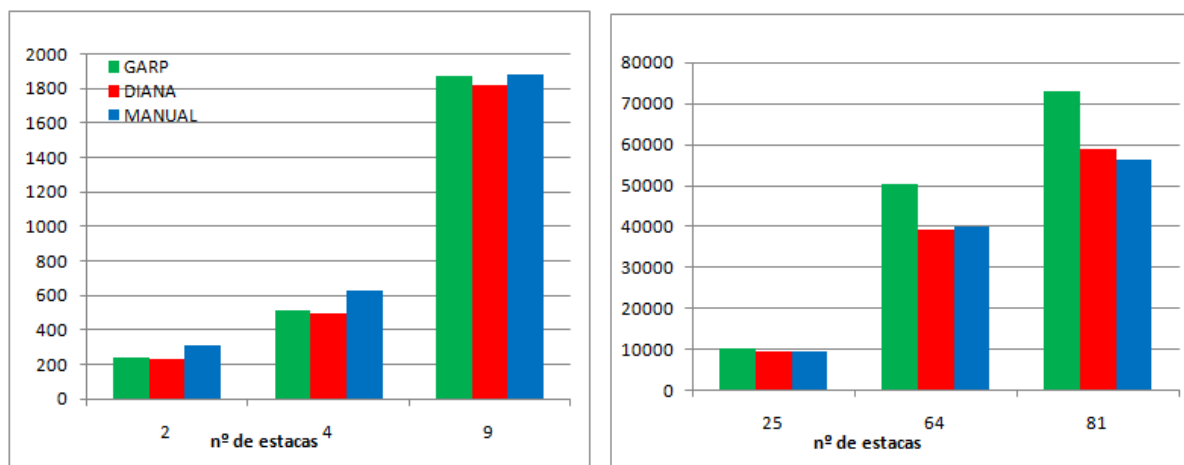


Figura 5.39 – Comparação do momento total na seção AA (kN.m/m).

Para o dimensionamento estrutural utilizando o momento total, se fosse desprezado o efeito tridimensional da peça como no método manual, a armação dos blocos seria a mesma, porém como os métodos numéricos fornecem o diagrama de momentos em cada seção, ou momento pontual, então o dimensionamento pode ser feito conforme os momentos máximos.

Em todos os blocos estudados, o diagrama dos momentos na seção proposta no centro do bloco apresentou um pico elevado abaixo do pilar, no centro do bloco, sendo mais elevada no programa DIANA, se estendendo no máximo até as estacas circunvizinhas ao pilar, para os casos estudados de cargas concentradas. Nas extremidades dos blocos, ao contrário, os valores obtidos pelos métodos numéricos ficaram abaixo da média do método manual.

A Figura 5.40 mostra uma comparação entre os momentos máximos para cada caso estudado de carga concentrada, a partir de 9 estacas por bloco os momentos máximo são muito mais elevados para os métodos numéricos que para o manual, estes momentos coincidem com o centro do bloco, necessitando reforçar o método manual nesta região, para igualar com o conceito de radier estaqueado.

Nos detalhamentos de armação dos blocos analisados foi feito uma subdivisão na planta dos blocos e quando armados pelo método manual, com armação uniforme, ficaram com pouco aço em comparação com os métodos numéricos no centro do bloco e aço em excesso na periferia dos blocos.

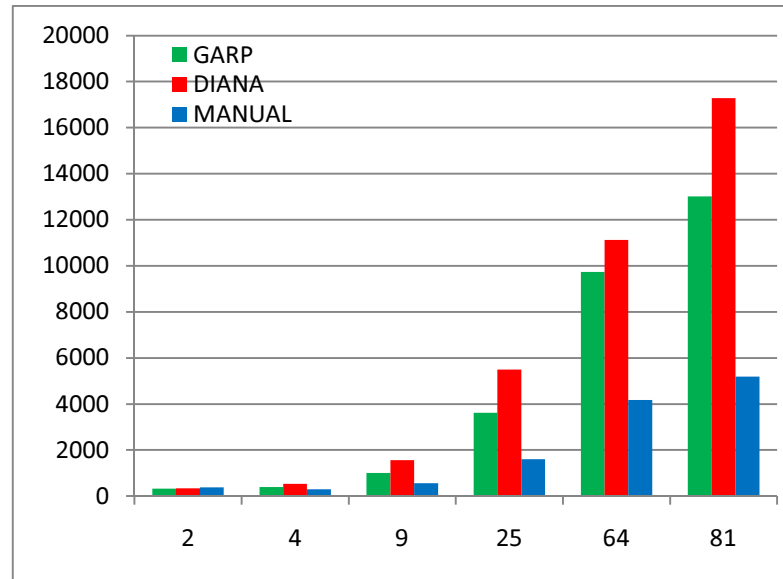


Figura 5.40 – Comparação do momento máximo na seção AA (kN.m/m).

O peso total de aço por bloco pode apresentar pequenas alterações, pois depende da forma que o projetista posiciona a armação. Depende também da quantidade de seções disponíveis ao longo do bloco com diagramas de momento, pois quanto mais informações em cada seção pode-se diminuir ou aumentar o tamanho das barras de aço utilizadas nas áreas de reforço, que neste trabalho foram localizadas no centro.

A Figura 5.41 mostra a variação de peso de aço por bloco, com escalas diferentes para 2 a 9 estacas, e para 25 a 81 estacas. Relembrando que somente foi considerada a armação inferior do bloco e sem ganchos, observa-se que não houve grande variação entre o peso de aço total por bloco obtido em cada método, porém o detalhamento entre o método simplificado e o numérico é bem diferente devido a variação do momento ao longo da seção.

A comparação realizada com o bloco 9 não distribui o aço conforme cada trecho e sim para o momento máximo, motivo pelo qual o seu resultado destoa dos demais desta figura.

De uma forma geral o peso total de aço empregado não variou muito, pois são proporcionais ao momento total na seção.

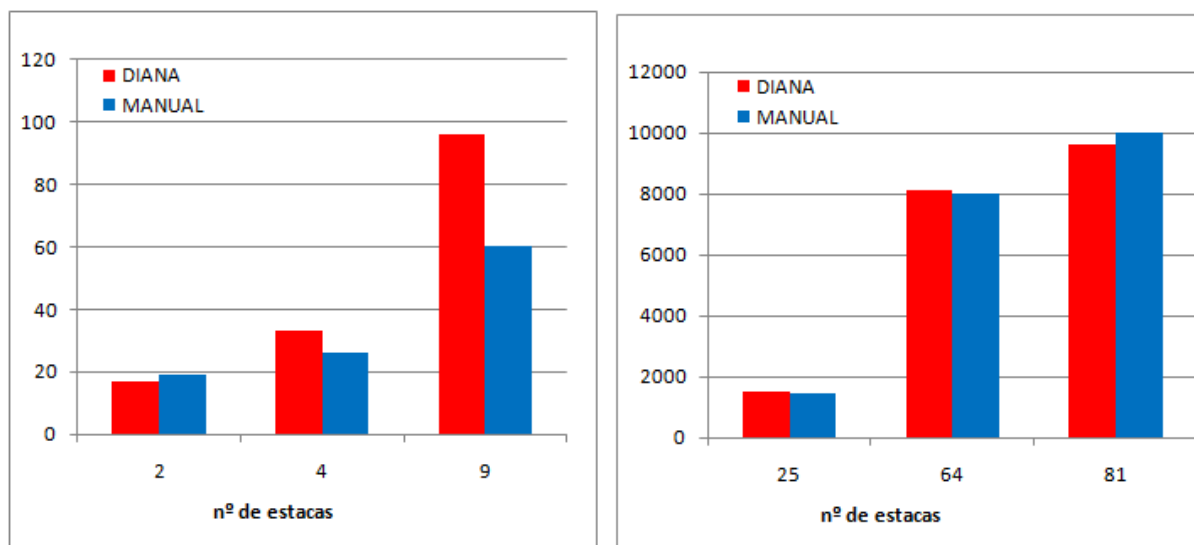


Figura 5.41 – Peso de aço por bloco (Kg).

Os resultados numéricos indicaram a necessidade de se distribuir desigualmente a armação, aplicando mais aço onde necessário não implicou em aumento de custo.

CONCLUSÕES

Das publicações e trabalhos apresentados anteriormente por outros autores entende-se que os blocos com até 4 estacas podem ser facilmente calculados de forma simplificada sem a necessidade de ferramentas computacionais, apresentando resultados rápidos e valiosos.

Os métodos de cálculo manual, para bloco sobre estacas, simplificam a peça estrutural em cada uma das direções obtendo momento ou esforços de tração internos como base de dados para o dimensionamento estrutural do bloco.

Dos casos propostos e analisados, a principal comparação realizada foi o momento gerado no interior do bloco na seção localizada no seu centro, para a aplicação de uma carga concentrada no centro do bloco, e concluiu-se que:

- O momento total é praticamente o mesmo nos três métodos de cálculo utilizado havendo uma pequena variação que pode ser atribuída ao método de cálculo,
- Os blocos com até 4 estacas têm um comportamento muito semelhante, sem grandes variações de momento. Nos blocos de 9 a 25 estacas ocorreu uma grande variação entre o momento máximo e o mínimo dentro da seção central para os métodos numéricos, atribuída a possibilidade de encontrar os momentos em cada ponto da seção para análises com ferramentas numéricas,
- Nos grandes blocos, dimensionados como radier estaqueado, nota-se uma maior variação de momento máximo e mínimo na seção central, sendo que de uma forma geral, os maiores momentos são localizados no centro do bloco e possuem valores muito superiores aos dimensionados pelo método manual. E os momentos mínimos são localizados na periferia do bloco e com valores bem inferiores aos obtidos no método manual,
- Nos blocos com grande variação de momento ao longo da seção, a distribuição da armação poderia ser adotada, conforme o momento máximo por trecho da seção. Nos dimensionamentos do bloco como radier estaqueado pode ser utilizada uma armação mais reforçada no centro do bloco e reduzir a armação na região periférica, não implicando em alteração de custos, mas em uma redistribuição da armação, que varia conforme a distribuição de momentos.

Para os blocos de casos particulares de carga distribuída e aplicação de carga em mais de um pilar, com mesma geometria adotada nos blocos de carga concentrada, notou-se:

- Para cargas uniformemente distribuídas em todo o bloco, os momentos internos tendem a se uniformizar dentro da seção central com valores que podem ser bem menores que os encontrados nos métodos manuais. Nestes casos, a adoção do dimensionamento estrutural pelo conceito de radier estaqueado pode reduzir bastante os custos do bloco.

Comparando somente os resultados obtidos pelos métodos numéricos, conclui-se que:

- Os resultados obtidos nos dois programas mostram as mesmas tendências, em relação a recalques, distribuição de cargas e momento, com alguns picos de momento máximo maior no DIANA do que no GARP,
- Os recalques máximo e diferencial tendem a aumentar à medida que os blocos ficam maiores e com mais estacas,
- Em blocos com os pequenos espaçamentos usados na prática, o percentual de cargas transferidas ao solo diretamente pelos blocos tende a diminuir com o aumento do número de estacas,
- As estacas localizadas no canto do bloco são as mais sobrecarregadas, com valores mais elevados que a média, e as estacas centrais ficam “aliviadas” com cargas menores que a média.

Ainda há muito que pesquisar sobre este assunto, segue algumas sugestões de continuidade deste trabalho:

- Analisar os mesmos casos com a aplicação de momentos sobre o bloco além da carga vertical,
- Avaliar os blocos com análises não lineares, para os materiais “solo” e “concreto”,
- Ampliar a quantidade de casos estudados procurando uma forma generalizada de dimensionamento para grandes blocos,
- Variar as propriedades do solo, características das estacas e geometria dos blocos, para avaliar as maiores influências no comportamento do momento,
- Realização de análises de caráter experimental com grandes blocos apoiados no solo,

- Acompanhamento de medições de controle de grandes blocos realizados em obras reais.

REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003, 170p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010, 91p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318M**: Building code requirements for reinforced concrete. Detroit - USA, 1994.

ALONSO, U.R. **Exercícios de fundações**. São Paulo, ed: Edgard Blucher, 1983.

BEZERRA, J.E. **Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações**. 2003. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

BITTENCOURT, D.M.A.; LIMA, B.E.A. **Análise dos Fatores de Interação em Radier Estaqueado**: Comparação entre Duas Abordagens Numéricas. 2009. 136 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BITTENCOURT, D.M. A.; DOEHLER, T.A.; SALES, M.M.. Análise da Influência do tipo seção transversal no comportamento de estacas isoladas via modelagem numérica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA, 2011, Brasília.

BLÉVOT, J., FRÉMY, R. **Semelles sur pieux. Annales d’Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics**. Paris, v.20, p. 223-295, 1967.

BURLAND, J.B.; BROMS, B.B.; MELLO, V.F.B. Behavior of foundation and structures. *In*: PROCEEDINGS 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1977, Tokyo, v. 2, p. 495-546.

BUTTERFIELD, R.; BANERJEE, P. K. The problem of pile group-pile cap interaction. **Geotechnique**, London, v 21, n. 2, p. 135-142, 1971a.

BUTTERFIELD, R. e BANERJEE, P. K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups. **Geotechnique**, v. 21, n. 1, p. 43-60, 1971b.

CARVALHO, I.H. **Análise experimental de blocos sobre grupos de estacas escavadas de pequeno diâmetro**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

CEB-FIP: COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON: Recommandations particulières au calcul et à l'exécution des semelles de foundation. Bulletin D'Information. Paris, 1970.

CUNHA, R.P.; SOARES, J.M.; MOTA, N.M.B.. Otimização de um projeto de fundações, através do uso de radier estaqueado. *In*: SIMPÓSIO INTERAÇÃO ESTRUTURA-SOLO EM EDIFÍCIOS, 2000, São Carlos. v.1.

CUNHA, R.P.; CORDEIRO, A.F. Comportamento pós reforço de grupos de fundação com uma única estaca defeituosa. *In*: XV JORNADAS GEOTÉCNICAS DE LA INGENIARÍA COLOMBIANA, 2009, Universidade de los Andes, Facultad de Ingeniería – Sociedad Colombiana de Ingenieros.

HAIN, S.J.; LEE, I.K. The analysis of flexible raft-pile systems. **Geotechnique**, London, v. 1, 28, p. 65-83, 1978.

KIM, K.N.; LEE, S.; KIM K.; CHUNG C.; KIM M.M.; LEE, H.S. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. **Computers and Geotechnics**, v. 28, p. 235-253, 2001.

KISHIDA, H; MEYERHOF, G.G.. Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. *In*: PROC. 6TH ICSMFE, 1965, Toronto, v. 2, p. 270-274.

KUWABARA, F. An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 1, 29, p. 82-92, 1989.

LIMA, B. S. **Otimização de Fundações Estaqueadas**. 2007. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MANDOLINI, A. Design of pile draft foundations: Practice and development. *In*: PROCEEDINGS. 4TH INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SEMINAR ON DEEP FOUNDATION ON BORED AND AUGER PILES, 2003. Rotterdam, p.59-80.

MELO, M. B. **Viga Composta com Viga e Laje Pré-Moldadas Ligadas Mediante Ninchos**: Análise via Modelagem Computacional. 2009. 205p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MENDONÇA, A.V.; PAIVA, J.B. Análise elastostática de radieres estaqueados pelo método dos elementos de contorno. *In*: SIMPÓSIO INTERAÇÃO ESTRUTURA-SOLO EM EDIFÍCIOS, 2000, São Carlos. **Anais do Simpósio estrutura-solo em edifícios**.

MIGUEL, M.G. **Análises Experimental e Numérica de Blocos sobre Três Estacas**. 2000. 231p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.

MINDLIN, R.D. Forces at point in the interior of a semi-infinite-solid. *Physics*, 1936, p. 195-202.

MORAES, M.C. **Estruturas de fundações**. São Paulo, ed: McGraw-Hill do Brasil, 1976.

MUNHOZ, F.S. **Análise do comportamento de blocos de concreto armado sobre estacas submetidas à ação de força centrada**. 2004. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

OTTAVIANI, M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. **Geotechnique**, London, v. 25, p. 159-174, 1975.

POULOS, H.G. *Defpigm – Users' Guide*. Centre for Geotechnical Researches. Univ. of Sydney. Austrália, 1980.

POULOS, H.G. **Analysis of Piled Strip Foundations**. *Comp. Methods and Advances in Geomechs*. Rotterdam: ed. G. Beer, J.R. Booker and J.P. Carter, AA Balkema, 1991. v. 1. 193-191p.

POULOS, H.G. Alternative design strategies for pile draft foundations. *In*: 3TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEEP FOUNDATION, 1994, Singapore, 239-244.

POULOS, H.G. The pile-enhanced raft – an economical foundation system. *In*: XI COBRAMSEG, 1998, Brasília.

POULOS, H.G. **Practical design procedures for pile d raft foundations**. Hemsley. Edited by J.A. Published by Thomas Telford Ltda, 2000.

POULOS, H. G. Piled Raft Foundations: design and applications. **Géotechnique**, London, v. 2, p. 95-113, 2001.

POULOS, H.G.; CARTER, J.P.; SMALL, J.C. Foundations and retaining structures – research and practice. In: PROC. 15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 2001, Istanbul, Turkey.

RAMOS, F.A.C. **Análise numérica de blocos sobre dez estacas: cálculo das reações de apoio**. 2007. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

RANDOLPH, M.F. Design methods for pile groups and pile drafts. In: PROC. 13TH INT. CONF. S.M. E FOUND. ENG., 1994, New Delhi, Índia, v. 5, p. 61-82.

REUL, O.; RANDOLPH, M.F. Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses. **Geotechnique**, v. 55, n. 3, 301-315, 2003.

RUSSO, G.; VIGGIANI, C. Some aspects of numerical analysis of pile drafts. In: PROC. 14TH ICSMFE, 1997, Hamburg, p. 1125-1128.

SALES, M.M. **Análise do comportamento de Sapatas Estaqueadas**. 2000. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília. 2000.

SALES, M.M.; SMALL, J.C.; POULOS, H.G. Compensated piled raft in clayey soils: behavior, measurements, and predictions. **Canadian Geotechnique**, v. 47, p. 327-345, 2010.

SALES, M.M., CUNHA, R.P., CARVALHO, J.C., SILVA, C.M. Previsões de comportamento de um radier estaqueado no distrito Federal. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2002, São Paulo, v. 3, p. 1459-1469.

SMALL, J.C. Practical solutions to soil-structure interaction problems. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, p. 305 – 314, 2001.

SMALL, J.; POULOS, H. G. A method of analysis of pile rafts. In: 10TH AUSTRALIA NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS, 2007, Brisbane, v. 2, p. 550-555.

SOUSA, L.C.M.; CUNHA, R.P. Estudo Experimental do comportamento de sapatas estaqueadas assentes em solo poroso colapsível. *In*: 11th CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2005, Florianópolis.

SOUZA, R.S. **Análise dos fatores de interação entre estacas em radier estaqueado: comparação entre duas ferramentas numéricas.** 2010. Folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2010.

TNO BUILDING AND CONSTRUCTION RESEARCH. **DIANA User's Manual – Release 9.3.** Delft, Netherlands, 2008.

YAMASHITA, K. Analyses of piled raft model provided by ISSMGE TC-18 – Part2: Estimation by three dimensional finite element analysis. TC-18 Japanese Geot. Society Member's Meeting on Piled Rafts. Tokyo. p. 2.1-2.8, 1998.