

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**METODOLOGIA HÍBRIDA APLICADA EM UMA
FERRAMENTA NUMÉRICA PARA ANÁLISE DE
RADIER ESTAQUEADO**

SOFIA LEÃO CARVALHO

D0122G15

GOIÂNIA

2015

SOFIA LEÃO CARVALHO

**METODOLOGIA HÍBRIDA APLICADA EM UMA
FERRAMENTA NUMÉRICA PARA ANÁLISE 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.º DSc.º Maurício Martines Sales

D0122G15

GOIÂNIA

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Leão Carvalho, Sofia

Metodologia Híbrida Aplicada em uma Ferramenta Numérica para
Análise de Radier Estaqueado [manuscrito] / Sofia Leão Carvalho. -
2015.

142 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Martines Sales.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista
de figuras, lista de tabelas.

1. Radier Estaqueado. 2. Análise Numérica. 3. Método dos
Elementos Finitos. 4. Ferramenta Híbrida. I. Martines Sales, Maurício,
orient. II. Título.



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil


FOLHA DE APROVAÇÃO

Metodologia Híbrida Aplicada em uma Ferramenta Numérica para Análise de Radier Estaqueado

Sofia Leão Carvalho

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:


Prof. Dr. Maurício Martines Sales (GECON/UFG)


Prof.ª Dr.ª Sylvia Regina Mesquita de Almeida (GECON/UFG)


Prof.ª Dr.ª Neusa Maria Bezerra Mota (UniCEUB-DF)

Goiânia, 30 de setembro de 2015.

Aos meus queridos pais, Acelino e Eufrosina, meus maiores exemplos de educação e perseverança na busca de um futuro melhor através da Engenharia. À minha irmã, Olívia, que mesmo estando longe ao longo de nossa formação acadêmica, sempre foi tão presente e incentivadora.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Maurício Sales por todos os ensinamentos que me levaram à escolha do tema, atenção, orientação, dedicação e amizade ao longo da dissertação.

Ao querido Flávio, que não mediu esforços para me familiarizar com uma nova linguagem e me auxiliar no desenvolvimento do programa. Obrigada pela presença nos momentos mais difíceis, carinho, confiança e valorização sempre tão entusiasta deste trabalho. Obrigada também pelo nome do programa.

À Professora Sylvia, pelos ensinamentos e pela atenção despendida nos momentos decisivos do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, meus maiores exemplos de persistência e determinação na busca pelo conhecimento e que sempre fizeram de tudo para que a minha chegada até aqui fosse possível. À minha mãe, em especial, que mesmo em momentos tão delicados e difíceis foi meu maior incentivo e inspiração para seguir seus passos na Geotecnia.

À minha irmã Oliva, que sempre esteve ao meu lado e dividiu as dificuldades quando precisei nessa caminhada. Obrigada pela ajuda tão preciosa com as figuras e a revisão do texto.

A todos professores do GECON, obrigada pelos ensinamentos e pela atenção. A todo corpo técnico e secretariado do programa, agradeço toda a dedicação.

A todos os amigos do mestrado pelo companheirismo em todos os momentos. Um agradecimento especial a Tallyta e Isabella pela ajuda com o DIANA.

Às minhas tias Carmen e Maria e a minha prima Susana, obrigada por todo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

“Engineers are extremely necessary for these purposes; wherefore it is requisite that, besides being ingenious, they should be brave in proportion”
Nicholson’s British Encyclopedia 1809

RESUMO

A união de dois tipos de fundações tornou-se, nas últimas décadas, uma boa alternativa para carregamentos de fundações maiores, necessárias diante da expansão de edificações cada vez mais altas. Esse novo conceito de fundação, chamada de radier estaqueado, uniu o radier com sua boa capacidade portante às estacas que, quando posicionadas estrategicamente, são boas redutoras de recalques, abrindo um novo campo de estudos na engenharia de fundações. A união de dois tipos de fundações tão diferentes entre si estimulou o uso de novas metodologias que buscassem compreender melhor a interação entre os elementos do radier, das estacas e do solo quanto aos recalques e principalmente, distribuição de carregamento. Com a evolução das máquinas computacionais, alguns métodos numéricos passaram a ser utilizados para analisar esse tipo de fundação e novas ferramentas computacionais surgiram nos últimos anos, dentre elas destacando-se principalmente as baseadas em Método dos Elementos Finitos. Esse método, muito eficaz, tem sido cada vez mais utilizado em todos os campos da engenharia, mas ainda possui limitações principalmente relacionadas a capacidade de processamento das máquinas, quando analisada toda a fundação em suas 3 dimensões. Por esse motivo, algumas ferramentas de metodologia híbrida, utilizando mais de um tipo de método, foram implementadas afim de simplificar a análise, sem perder em qualidade de resultados. Dentro deste contexto, esta dissertação descreve a criação do programa *Soil-Foundation Interaction Analysis*, SoFIA, uma ferramenta híbrida criada em linguagem orientada a objetos, que analisa o radier em elementos finitos de placas de Kirchhoff e o meio solo/estaca através da superposição das interações de seus elementos dentro do próprio programa, obtidas através de elementos finitos axissimétricos. Nesse trabalho foram mostrada as etapas de construção da ferramenta, comparando resultados a trabalhos existentes na literatura e mostrando todas as aplicações da ferramenta. O objetivo principal desse trabalho foi criar uma ferramenta autossuficiente em linguagem orientada a objetos capaz de analisar o radier estaqueado integrando a análise de interação entre estacas e solo. A escolha da linguagem objetivou a expansão a ferramenta, com novos elementos, análises não lineares e outras tipos fundações. Os exemplos analisados mostraram bons resultados comparados à literatura quanto recalque, divisão do carregamento entre radier e estacas e momentos. Além disso a utilização das interações entre elementos de estacas e solo em uma análise axissimétrica é totalmente aceitável quando comparada a uma análise completa tridimensional e a uma análise em Método dos Elementos de Contorno.

Palavras-chave: Radier Estaqueado. Análise Numérica. Método dos Elementos Finitos. Ferramenta Híbrida.

ABSTRACT

The combination of two different types of foundation has become increasingly popular among engineers in the past few decades as a good alternative for large loads due to the trending expansion of taller skyscrapers. This new concept in foundation engineering, called piled raft, combines the raft capacity of withstanding large loads to the reduced settlement provided by a group of piles strategically placed. This new concept of foundation design has stimulated the use of new methodologies that look for understanding the interaction between its elements (raft, piles and soil), the settlement and the distribution of load between them. Over the past decades, the development of faster and more powerful computers has allowed engineers to use numerical methods in the analysis of this type of problem assisted by new software tools. Among all possible numerical methods, the Finite Element Method (FEM) has stood up for being precise and very adaptable to many situations. Despite its extensive applicability, the FEM method has its limitations regarding the processing time and capacity of computers mainly when the third dimension of the foundation is considered. For the fore mentioned reason, hybrid tools have been developed combining FEM to other methods aiming faster analysis and better quality results. In this context, this thesis presents a new tool, called Soil-Foundation Interaction Analysis, SoFIA. The code was developed in object-oriented programming with Approximate Computer Methods. The raft in SoFIA is modelled as two-dimensional finite plate elements, and the group soil/piles ins modelled as an elastic base. Each stage of the tool development and a set of application models are described on this report based on literature review. This work aimed creating a self-sufficient tool capable of analyzing a piled raft model with all the interaction analysis. Furthermore, the program SoFIA was modelled using object-oriented programming, anticipating future expansions, such as different finite elements, non-linear response and other types of foundation. Example results showed good agreement when compared to literature regarding settlement, share of load between raft and piles and moments in x and y directions. Moreover, the axisymmetric interaction analysis between elements of piles and soil indicated similar settlement when compared to complete tridimensional analysis and Boundary Element Method.

Key words: Piled Raft. Numerical Analysis. Finite Element Method. Approximate Computer Methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Redução de recalques com o acréscimo de estacas ao radier (modificado de Randolph, (1994)).....	26
Figura 2.2 – Sistemas de fundação: (a) Bloco Estaqueado, e (b) Radier estaqueado.....	29
Figura 2.3 - Estratégias de projeto de radier estaqueado (modificado de Poulos (2001a)).....	30
Figura 2.4 – Resultados experimentais em modelo reduzido em areia aumentando o número de estacas (modificado de El-Garhy <i>et al</i> (2013)).....	31
Figura 2.5 – Curva carga x recalque simplificada para análise preliminar (modificado de Poulos (2001b))	34
Figura 2.6 – Comportamento médio de uma estaca em diferentes provas de carga. (SALES, 2000).....	35
Figura 2.7 – Recalques de dois prédios residenciais em Hansbo ¹ (1993, <i>apud</i> POULOS, 2001a).....	36
Figura 2.8 – Resultados comparados por Russo (1998) de Kuwabara (1989) e Butterfield e Banerjee (1971): (a) recalques e (b) porção de carga mobilizada pelas estacas.....	39
Figura 2.9 – Definição do problema pelo programa GARP (modificado de Poulos (1994a))..	42
Figura 2.10 – Sequência de análise do programa GARP (modificado de Lima (2007)).....	44
Figura 2.11 – Modelo básico para o radier estaqueado (modificado de Russo (1998))	45
Figura 2.12 – Fluxograma do programa NAPRA (modificado de Russo (1998)).	47
Figura 2.13 – Elemento sólido utilizado no programa FENF. (modificado de TNO (2008))..	48
Figura 2.14 – Fluxograma do programa FENF (BITTENCOURT, 2012).....	49
Figura 2.15 – Fatores de interação utilizados no método de Hain e Lee (modificado de Hain e Lee (1978))	50

Figura 2.16 – Tensão vertical gerada pela aplicação de carga pontual num ponto (r,z).	52
Figura 2.17 - Carregamento vertical uniforme em área circular (modificada de Poulos e Davis (1974)	53
Figura 2.18 - Comparação de resultados da estaca isolada de Ottaviani: L= 40m e H 60m	55
Figura 2.19 – Malha de elementos finitos numa análise axissimétrica utilizada para única estaca (POTTS e ZDRAVKOVIC, 2001)	55
Figura 2.20 – Comportamento carga x recalque com aplicação de elementos de interface. (a)carregamento não drenado sem elementos de interface ao longo da superfície, (b) efeito da rigidez do elemento de interface aplicado, (c) elemento de interface aplicado com baixa rigidez. (modificado de Potts e Zdravkovic, 2001)	56
Figura 3.1 – Sistema do radier estaqueado utilizado no programa SoFIA: (a) Situação de projeto, (b) Sistema adotado com molas interativas e (c) componentes do sistema	59
Figura 3.2 – Radier genérico com aplicação de arestas inclinadas no radier.	61
Figura 3.3 – Nós dentro da Estaca.....	61
Figura 3.4 – Elemento Placa de Kirchhoff com quatro nós mostrando os: (a) graus de liberdade e (b) deformação da placa olhando em y (adaptado de Cook <i>et. al</i> (2007)).....	62
Figura 3.5 – Interações usadas no programa SoFIA, destacando em linha vermelha o posicionamento dos recalques obtidos para cada tipo de interação no raio de aplicação do carregamento	63
Figura 3.6 –Sentido positivos das rotações e a relação com o deslocamento transversal (adaptado de Cook <i>et. al</i> (2007))	66
Figura 3.7 – Esquema dos carregamentos na placa: (a) Carga pontual, (b) Carga distribuída em toda a placa, e (c) Carga distribuída numa área.....	69
Figura 3.8 – Validação do elemento PKQ4ISO com a solução de Navier: (a) Carregamento Pontual, (b) Carga distribuída em toda a placa e (c) Carga distribuída numa área.	70

Figura 3.9 - Elemento axissimétrico com quatro nós: (a) tensões associadas ao carregamento axissimétrico e (b) elementos hachurados em um material ortotrópico com eixos x' , y' e θ (COOK, <i>et al.</i> , 2007)	71
Figura 3.10 – Sistema de três nós com estacas com forças aplicadas e deformações	74
Figura 3.11 – Deslocamentos dos nós com aplicação de forças unitárias em cada nó.....	74
Figura 3.12 – Deslocamentos unitários aplicados juntamente com as equações em: (a) nó 1, (b) nó 2 e (c) nó 3.	75
Figura 3.13 – Comparação dos recalques promovidos entre: estaca-estaca, estaca-solo, solo-estaca, solo-solo.....	76
Figura 3.14 – Fluxograma básico do programa SoFIA	78
Figura 3.15 – Entrada de dados do programa SoFIA	79
Figura 3.16 – Etapas de execução dos sistemas axissimétricos: (a) solo e (b) todas as estacas	81
Figura 3.17 – Geração de Malhas e apoios: (a) estacas e (b) solo.....	82
Figura 3.18 – Superposição dos recalques provocados por dois nós	83
Figura 3.19 – Montagem da Matriz de Rigidez do sistema solo/estaca	84
Figura 3.20 – Solução em MEF do radier estaqueado no programa SoFIA.....	85
Figura 4.1 – Comparação entre: (a) Carregamento concentrado e Método de Boussinesq e (b) Carregamento distribuído ao método da carga circular.....	89
Figura 4.2 – Estudo de convergência da malha	90
Figura 4.3 –Elemento isoparamétrico de oito nós, tipo <i>brick</i> , HX24L (TNO, 2008).....	91
Figura 4.4 - Geometria do exemplo de carga distribuída aplicada à superfície do solo.....	92
Figura 4.5 – Modelagem de um quarto do problema no DIANA (TNO, 2008).....	92
Figura 4.6 – Recalques em z do programa SoFIA, valores em metro.....	93

Figura 4.7 – Recalque do solo na superfície comparando: programa SoFIA, elementos tridimensionais no DIANA e solução elástica do carregamento de uma área circular (POULOS, DAVIS, 1974),.....	93
Figura 4.8 - Elemento sólido isoparamétrico de cunha com seis nós, TP18L (TNO, 2008)....	95
Figura 4.9 – Modelagem da estaca no programa DIANA (TNO, 2008).....	95
Figura 4.10 – Geometria do exemplo axissimétrico com estaca e carregamento distribuído aplicado.....	96
Figura 4.11 – Análise axissimétrica para estaca no programa SoFIA: recalque em z, valores em metros	97
Figura 4.12 - Análise 3D para estaca no programa DIANA: recalque em z, valores em metros	97
Figura 4.13– Recalques em z da estaca comparados: Programa SoFIA, solução no programa Diana com elementos tetraedro e solução quadrática.....	98
Figura 4.14 – Comparação entre os α 's obtidos da análise do DEFPIG, DIANA e SoFIA.	99
Figura 4.15– Comparação de resultados de diferentes programas da estaca isolada com L = 20 m e H = 80 m.	100
Figura 4.16 – Esquema gráfico genérico dos exemplos de Kuwabara (1989).	102
Figura 4.17 - Recalque de uma estaca isolada, variando os valores de comprimento da estaca	103
Figura 4.18 – Resposta carga x recalque de Kuwabara (1989) com seguintes espaçamentos: (a) s/d = 3; (b) s/d = 5 e (c) s/d = 10.	104
Figura 4.19 – Parcela de carga absorvida pelo radier no radier estaqueado com 9 estacas, citado por Kuwabara (1989).....	106
Figura 4.20 – Porcentagem de carga nas estacas de canto com exemplo de Kuwabara (1989)	106

Figura 4.21 – Porcentagem de carga nas estacas do lado com exemplo de Kuwabara (1989)	107
Figura 4.22 – Porcentagem de carga nas estacas do centro com exemplo de Kuwabara (1989)	108
Figura 4.23– Radier estaqueado sob 16 estacas proposto pelo TC-18	108
Figura 4.24 – Carga absorvida pelas estacas em diferentes posições no radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-18.....	110
Figura 4.25 – Divisão da malha (modificado de Sales <i>et al</i> (2015)).....	110
Figura 4.26 - Momento em x normalizado na seção A-A'	111
Figura 4.27 - Momento em y normalizado na seção A-A'	112
Figura 4.28 - Recalque normalizado em z na seção A-A'	112
Figura 4.29 – Geometria dos dois radiers com as estacas do Edifício Messe-Torhaus, Frankfurt.	113
Figura 4.30 – Recalques em z, programa SoFIA.....	114
Figura 4.31 – Recalque em 10 meses comparados ao medido e aos métodos	115
Figura 4.32 – Recalque ao longo dos dois radiers em x.....	115
Figura 4.33 – Geometria do bloco com quatro estacas: (a) aplicação de binário e (b) aplicação de momento	116
Figura 4.34 – Gráfico de recalques em z da aplicação de um binário de forças	117
Figura 4.35 - Gráfico de recalques em z da aplicação de momento.....	117
Figura 4.36 – Corte transversal na direção x mostrando o recalque vertical causado pelo momento e binário	118
Figura 4.37 – Geometria e malha do problema.	119
Figura 4.38 – Recalques em z de um bloco com faces inclinadas.....	120

Figura A.1 – Geometria de um bloco com quatro estacas com pilar central analisado pelo programa SoFIA.....	129
Figura C.1 - Deformações w na direção z do programa SoFIA, valores em Metros.....	136
Figura C.2 - Rotação em x do programa SoFIA.....	137
Figura C.3 - Rotação em y do programa SoFIA.....	137
Figura C.4 - Momento em x do programa SoFIA, valores em kN.m.....	138
Figura C.5 - Momento em y do programa SoFIA, valores em kN.m.....	138
Figura C.6 - Cortante em x do programa SoFIA, valores em kN.....	139
Figura C.7 - Cortante em y do programa SoFIA, valores em kN.....	139
Figura C.8 - Tensões abaixo do radier do programa SoFIA, valores em kPa.....	140
Figura C.9 - Forças aplicadas abaixo do radier do programa SoFIA, valores em kN.....	140
Figura C.10 - Deformações no raio do axissimétrico com estaca do programa SoFIA, valores em m.....	141
Figura C.11 - Deformações na profundidade do axissimétrico com estaca do programa SoFIA, valores em m	141
Figura C.12 - Deformações no raio do axissimétrico com solo do programa SoFIA, valores em m.....	142
Figura C.13 - Deformações na profundidade do axissimétrico com solo do programa SoFIA, valores em m.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores de recalque no centro da placa	94
Tabela 4.2 – Comportamento do radier sobre as 16 estacas, proposto pelo TC-18	109
Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade do solo na condição não drenada (SALES, SMALL e POULOS, 2010)	114
Tabela 4.4 – Carregamento de um radier de Messe-Torhaus	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEM – *Finite Element Method*

FENF - Ferramenta Numérica para Análise de Fundações

GARP – *Geotechnical Analysis of Raft with Piles*

ISSMGE – *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

MEC – Método dos Elementos de Contorno

MEF – Método dos Elementos Finitos

NAPRA - *Non-linear Analysis of Piled RAfts*

SoFIA – *Soil-Foundation Interactions Analysis*

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

A, B e C	parâmetros de detalhe de ajuste da equação de Randolph e Wroth
\mathbf{B}	matriz cinemática
D	diâmetro da estaca
\mathbf{D}	matriz constitutiva
E	módulo de elasticidade do solo
\mathbf{E}	matriz constitutiva
$E(x)$	integral elíptica de segunda ordem
E_p	módulo de elasticidade da estaca
E_s	módulo de elasticidade do solo
\mathbf{F}	vetor de força
F_z	carregamento vertical
G	módulo de cisalhamento do solo
	valores do módulo de cisalhamento do solo respectivamente em profundidade e
G_L e G_B	na base da estaca
\mathbf{H}	matriz de transformação das curvaturas
\mathbf{J}	matriz de transformação Jacobiana
\mathbf{K}	vetor de curvaturas
K	rigidez relativa entre estaca e solo
$K(x)$	integral elíptica de primeira ordem
K_p	rigidez do grupo de estacas
K_{pr}	rigidez do radier estaqueado
K_r	rigidez do radier sozinho
\mathbf{K}_R	matriz de rigidez do radier
$\mathbf{K}_{S/E}$	Matriz de rigidez do meio solo/estaca
$\mathbf{K}_{S/E}$	matriz de rigidez do sistema solo/estaca
L	comprimento da estaca
\mathbf{M}	vetor de momentos fletores
M_x	momento em x
M_x e M_y	momentos fletores na direção x e y , respectivamente

M_{xy}	momento torsor
M_y	momento em y
N_1, N_2, N_3	
$e N_4$	funções de forma que dependem das coordenadas paramétricas ξ e η
Q	carga pontual aplicada
U	vetor de deslocamentos
a	raio de aplicação da carga circular
c	coordenadas dos nós do elemento finito
d	diâmetro da estaca
f	matriz de flexibilidade
p	carregamento distribuído
q_z	carregamento distribuído vertical
r	distância do ponto de observação do ponto central de aplicação do carregamento
r_1, r_2, r_3, r_4	coordenadas no raio r dos nós 1, 2, 3 e 4
r_m	raio de influência do recalque da estaca
s	espaçamento entre as estacas, centro a centro
t	espessura do radier
$u_1, u_2, u_3,$	
u_4	deslocamentos no raio r dos nós 1, 2, 3 e 4
u_z	deslocamento vertical do ponto
$w_1, w_2, w_3,$	
w_4	deslocamentos em z dos nós 1, 2, 3 e 4
$w_z(r, 0)$	recalque em z na superfície, variando o raio
$x_1, x_2, x_3,$	
x_4	são as coordenadas em x dos nós 1, 2, 3 e 4
$y_1, y_2, y_3,$	
y_4	são as coordenadas em y dos nós 1, 2, 3 e 4
z	profundidade
z_1, z_2, z_3, z_4	coordenadas em z dos nós 1, 2, 3 e 4
$w_{,x}$ e $w_{,y}$	as distorções na superfície da placa
w_z	deslocamento em z

Símbolos Gregos

α	fator de interação entre estacas
α_{pp}	fator de interação entre as estacas
α_{pr}	fator de interação radier-estaca
β_p	fator de interação estaca-superfície do solo
β_s	fator de interação superfície do solo-estaca
γ	parâmetro que reflete a homogeneidade vertical do solo, variando entre 0,5 e 1
γ_{zr}	rotações no plano zr
ϵ	vetor de deslocamentos
$\epsilon_r, \epsilon_z, \epsilon_\theta$	deformações em r, z e θ respectivamente
θ_x e θ_y	rotações usadas como grau de liberdade do nó do elemento
ν	coeficiente de Poisson do solo
ν_s	coeficiente de Poisson do solo
ξ e η	coordenadas paramétricas
σ	vetor de tensões
σ_v	tensão vertical
ψ_x e ψ_y	rotações normais à superfície média

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1 TRABALHO E OBJETIVOS	24
1.2 DIVISÃO DO TRABALHO	25
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 RADIER ESTAQUEADO E DEFINIÇÕES DE PROJETOS	28
2.1.1 Definições de Projeto	29
2.1.2 Métodos de Previsão de Recalque	32
2.1.3 Capacidade de carga da fundação	34
2.2 ANÁLISE NUMÉRICA NO COMPORTAMENTO FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS	36
2.2.1 Métodos dos Elementos de Contorno	38
2.2.2 Método dos Elementos Finitos aplicado às Fundações	39
2.2.3 Métodos combinados formando ferramentas numéricas híbridas	40
2.3 PROGRAMAS DE ANÁLISE DE RADIER ESTAQUEADO.....	41
2.3.1 GARP, de Poulos (1994a).....	42
2.3.2 NAPRA, de Russo (1998)	45
2.3.3 FENF, de Bittencourt (2012).....	48
2.4 INTERAÇÕES DOS ELEMENTOS DA FUNDAÇÃO.....	50
2.4.1 Análise de recalque e tensões no solo.....	51
2.4.2 Análise de estaca isolada	54

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA DO PROGRAMA SOFIA PARA ANÁLISE DO RADIER ESTAQUEADO	57
3.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS NO CÁLCULO DO RADIER ESTAQUEADO	57
3.2 PROBLEMA RADIER ESTAQUEADO.....	58
3.2.1 O Radier	61
3.2.2 Sistema solo/estaca.....	62
3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO À ANÁLISE DE RADIER ESTAQUEADO	64
3.3.1 Elemento Finito PKQ4ISO	65
3.3.2 Elemento Finito AXIQ4	70
3.3.3 Cálculo da matriz de rigidez da base elástica por meio de uma matriz de flexibilidade	73
3.4 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA.....	77
3.4.1 Estruturação do Programa.....	77
3.4.2 Entrada de Dados	79
3.4.3 Solução dos Sistemas Axissimétricos	80
3.4.4 Interações e Montagem da Matriz de Flexibilidade.....	82
3.4.5 Solução do radier e sistema solo/estaca pelo MEF	84
3.4.6 Saídas de Dados	85
CAPÍTULO 4 APLICAÇÕES DA FERRAMENTA NUMÉRICA	87
4.1 ANÁLISE DAS INTERAÇÕES	87
4.1.1 Validação do sistema axissimétrico com carregamento no solo.....	88

4.1.2	Validação do sistema axissimétrico com carregamento de estacas.....	94
4.2	ANÁLISE DO RADIER ESTAQUEADO	100
4.2.1	Radier sob 9 estacas, Kuwabara (1989).....	101
4.2.2	Radier com 16 estacas proposto em TC-18, Sales, 2000.....	108
4.2.3	Radier sobre 9 estacas, Sales <i>et al.</i> , 2015	110
4.2.4	Edifício Messe-Torhaus, Frankfurt, Sales, Small, Poulos (2010).....	113
4.3	OUTRAS APLICAÇÕES.....	116
4.3.1	Comparação entre binário e momentos.....	116
4.3.2	Radier com laterais inclinadas	118
	CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS	124

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O crescimento das grandes metrópoles e a construção de edifícios cada vez mais altos, muitas vezes em espaços limitados, exigiram dos projetistas de fundações a utilização de novas técnicas que garantissem segurança à estrutura e funcionalidade de todo o sistema predial. Grandes carregamentos e a necessidade de redução de recalques impulsionaram a criação de um novo sistema de fundações com associação do radier e de um conjunto de estacas, formando o radier estaqueado.

O radier é uma estrutura com boa capacidade de suporte, mas quando utilizado sozinho pode causar grandes recalques. Já as estacas, conhecidas por sua boa capacidade redutora de recalques, se tornaram uma alternativa bastante atrativa aos projetistas quando utilizadas em conjunto com o radier. Os modelos analíticos disponíveis na literatura e utilizados em projetos ainda hoje consideram o bloco rígido estaqueado. Nesse modelo o bloco é responsável somente pela distribuição de carga para as estacas, as quais transferem ao solo toda a carga e são responsáveis pela total capacidade de suporte do conjunto.

A necessidade de análises mais precisas estimulou vários pesquisadores nas últimas cinco décadas a criarem novas metodologias de análise que fossem mais abrangentes, ampliando a utilização de métodos numéricos já existentes, como Método dos Elementos de Contorno (MEC) e Método dos Elementos Finitos (MEF). A expansão da utilização dos métodos numéricos, particularmente o MEF, que representa hoje o método mais completo e que viabiliza análises diversificadas no campo da engenharia, dependeu da evolução das máquinas computacionais, permitindo solucionar problemas mais complexos e agregar as particularidades dos parâmetros do solo.

Nesse contexto, muitas ferramentas numéricas foram criadas ao longo dos anos, tentando capturar o complexo comportamento do radier estaqueado, cuja interação entre elementos de estaca, solo e radier não haviam sido compreendidas totalmente pelos métodos analíticos desenvolvidos até então.

A análise do radier estaqueado é um problema em três dimensões e, apesar da solução completa e tridimensional em MEF do solo e das estacas permitir melhores configurações para o problema, ainda é de limitado uso. O processamento completo da fundação depende do tamanho

da malha utilizada. Conseqüentemente, o espaço de armazenamento de dados e o consumo do processador da máquina podem representar uma dificuldade na análise de fundações maiores e complexas.

Diante disso, ganharam destaque nos últimos anos programas de análise que utilizam metodologias híbridas. Alguns autores perceberam que, ao combinar diferentes metodologias aplicadas ao radier estaqueado poderiam não só aproveitar o melhor aspecto de cada uma como também economizar em gasto computacional e tempo de processamento.

Dentre os programas de metodologia híbrida, a maioria busca dividir o radier estaqueado em duas partes: o radier e o domínio solo/estacas. O radier, nos trabalhos mais recentes, tem sido discretizado pelo Método dos Elementos finitos, enquanto que o conjunto solo/estacas é considerado como um domínio elástico onde o radier se apoia. A relação das interações entre os elementos de solo e as estacas ainda são um importante objeto de estudos para os pesquisadores que buscam entender melhor a rigidez e os parâmetros elásticos do meio solo/estaca.

1.1 TRABALHO E OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal mostrar as etapas de construção do programa de metodologia híbrida para a análise de radier estaqueado denominado SoFIA (*Soil-Foundation Interaction Analysis*), validando-o com os exemplos que existem atualmente na literatura.

O programa foi desenvolvido analisando o radier pelo Método dos Elementos Finitos e o domínio solo/estaca foi considerado como um meio elástico sobre o qual o radier está apoiado. O radier foi discretizado em elementos de placa de Kirchhoff isoparamétricos e com quatro nós. A rigidez relativa do meio solo/estaca, que é somada à rigidez do radier, calculada através das interações entre elementos de solo e de estacas. As interações foram obtidas dentro do próprio programa, por meio de análises axissimétricas em MEF formando uma matriz de flexibilidade.

O código do programa foi desenvolvido em linguagem orientada a objetos, objetivando a expansão do programa para outros tipos fundações, diferentes elementos em MEF, outros modelos para descrição do comportamento do solo dentre outras possibilidades, sem o comprometimento da estrutura original do programa.

Como parte dos objetivos das etapas de trabalho estão:

- Validação dos elementos placa de Kirchhoff isoparamétrica de quatro nós e o elemento axissimétrico de quatro nós;
- Validação da obtenção dos parâmetros de interação entre elementos de solo e estaca para montagem da matriz de flexibilidade do meio solo/estaca;
- Validação dos resultados analisando recalque, carga nas estacas e momento no radier.

1.2 DIVISÃO DO TRABALHO

Esse trabalho foi estruturado com a finalidade de apresentar o histórico e as metodologias existentes sobre radier estaqueado relevantes para a construção da ferramenta desenvolvida e explicar seu funcionamento detalhado com a devida validação das etapas. Ele foi estruturado em seis capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: É apresentada a contextualização e o tema abordado no trabalho, além dos objetivos e as divisões dos capítulos;

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Nesse capítulo é apresentado um breve histórico sobre o estudo do comportamento do radier estaqueado e as metodologias existentes para sua análise. Além disso, serão apresentados alguns aspectos relevantes sobre as demais ferramentas existentes que serviram como embasamento para o desenvolvimento do programa deste trabalho;

Capítulo 3 – Metodologia: Nesse capítulo é mostrada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do programa. Nessa seção são apresentadas as hipóteses consideradas no programa, a formulação do Método dos Elementos Finitos para obtenção das interações e para a análise do radier estaqueado, e o fluxograma com os detalhes de cada etapa;

Capítulo 4 – Aplicações da Ferramenta Numérica: Nesse capítulo são mostradas as aplicações da ferramenta numérica além de algumas validações sobre as etapas relevantes do desenvolvimento da ferramenta. As comparações são feitas através de métodos clássicos analíticos existentes na literatura e a exemplos de outros trabalhos;

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros: Finalizando este trabalho, são apresentadas as principais observações sobre o desenvolvimento do programa e seus resultados, e são feitas sugestões sobre a continuidade da pesquisa e o desenvolvimento de novas ferramentas.

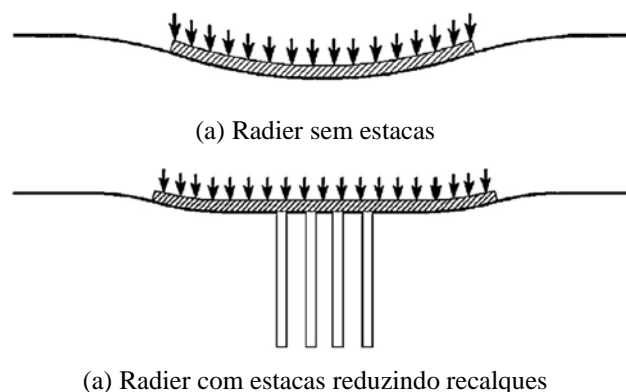
CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fundações são os elementos de uma estrutura associados à transferência de carregamento da superestrutura ao solo e, são divididas basicamente em dois tipos. As fundações instaladas nas camadas mais superficiais de um perfil de solo são classificadas como fundações rasas, entre elas os blocos e as sapatas, enquanto as fundações profundas são instaladas nas camadas mais profundas e resistentes do perfil de solo, como estacas e tubulões. Essa classificação entre fundações rasas e profundas têm sido utilizada até hoje pela maioria dos projetistas (SALES, 2000), pois sabe-se que seu desempenho e a transferência de carga são distintos.

Somente a partir de meados da década de 70, período relativamente recente em comparação ao desenvolvimento dos conceitos em Geotecnia e Fundações desde seu princípio, a combinação de fundações passou a ser uma alternativa interessante e possível, possibilitando melhores mobilização e distribuição de carregamentos, além de melhor desempenho do sistema em relação aos recalques. Surgiu, assim, um novo conceito de fundação mista, que busca aliar as vantagens dos dois tipos de fundação: o radier estaqueado. Essa combinação de dois tipos de fundação, profunda e rasa, propiciou uma fundação econômica em circunstâncias onde somente o radier não seria capaz de atender aos requisitos básicos de projeto, como ilustrado na Figura 2.1. Ao associar as estacas ao radier além de melhorar a capacidade última de carregamento, ajuda a combater os recalques total e diferencial do conjunto, e permite a utilização de espessuras menores no radier. (POULOS, 2001a) O radier estaqueado é uma fundação onde ambos, radier e estacas, são responsáveis pelas mobilizações de carregamento e de recalques.

Figura 2.1 – Redução de recalques com o acréscimo de estacas ao radier (modificado de Randolph, (1994))



Tão recente quanto a associação de diferentes tipos de fundações, é o uso de métodos de análises computacionais para as análises em Geotecnia como um todo. Os métodos de análise computacional em geral fizeram com que a engenharia avançasse em direção a soluções mais próximas da realidade utilizando modelos mais complexos e permitindo aos engenheiros projetar de forma mais segura e econômica. A utilização de métodos computacionais no dimensionamento de fundações é continuamente crescente, principalmente no que diz respeito à avaliação de recalques, que representa um parâmetro não apenas necessário ao projeto como a capacidade de carga, mas essencial ao bom funcionamento dos sistemas de uma construção como um todo. Particularmente neste trabalho utiliza-se abordado o Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse método quando comparado a outros métodos existentes, apresenta uma série de vantagens em relação aos demais, como sua versatilidade em relação à construção da geometria do conjunto, à modelagem do comportamento dos materiais e a aplicação das condições de contorno. (COOK, *et al.*, 2007)

A utilização do MEF em problemas de engenharia tem sido cada vez mais recorrente. O MEF, como ferramenta computacional, demanda bastante capacidade de armazenamento e consumo de memória de processamento. O avanço das máquinas computacionais das últimas décadas ajudou sua expansão pois passou a permitir a abordagem de problemas mais complexos, o uso de malhas mais refinadas e tempo de processamento mais curto. Segundo Potts e Zdravkovic (1999), na engenharia geotécnica, no entanto, o MEF passou a ser usada largamente somente depois da expansão do seu uso em outras áreas da engenharia, pois algumas questões complexas e exclusivas da Geotecnia só passaram a ser compreendidas recentemente.

Diversas ferramentas foram implementadas nos últimos anos, com o intuito de auxiliar a análise de radier estaqueados. Os principais métodos utilizados são: método dos elementos finitos, método de elementos de contorno, métodos das diferenças finitas, método de partículas, ou ainda a combinação desses métodos, as chamadas ferramentas híbridas que tentam superar as limitações de cada método utilizado.

Apesar das ferramentas já existentes apresentarem bons resultados quando comparados às reais situações, espera-se, mesmo assim, sempre melhorá-las e expandi-las para além do meio acadêmico, tornando-as atrativas ao mercado de projeto e construção. Por isso a necessidade de ferramentas mais eficientes em tempo de processamento, sem perder em qualidade de resultados será sempre uma constante impulsionando novos trabalhos.

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos fundamentais no desenvolvimento de uma ferramenta numérica para análise de radier estaqueado em MEF na linguagem orientada a objetos.

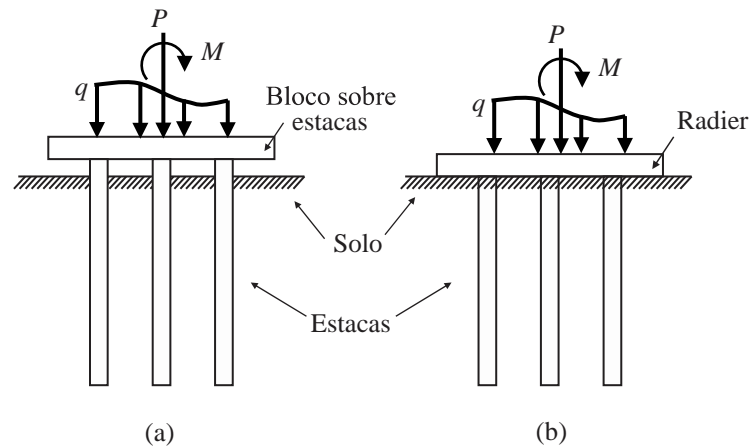
2.1 RADIER ESTAQUEADO E DEFINIÇÕES DE PROJETOS

O radier estaqueado é a combinação da fundação rasa radier e a fundação profunda estaca. Nesse conjunto, as estacas são elementos utilizados na engenharia de fundações desde a idade clássica, com o uso de estacas de madeira cravadas compactando terrenos fracos (NAPOLES NETO, 1998). Seu uso, por muitos anos, foi baseado em experiência e observação, e só no final do século XIX surgiram as primeiras formulações teóricas a respeito do seu uso (POULOS, DAVIS, 1980a). Esse tipo de fundação é classificado no grupo de fundações profundas e seu comportamento é bem distinto das demais fundações (blocos, sapatas e tubulões) que trabalham principalmente a compressão do solo sob a base. A transmissão de esforços de uma estaca é feita principalmente pela superfície lateral mais uma parcela bem menos representativa da base. A mobilização do carregamento, portanto, está relacionada principalmente à resistência ao cisalhamento da superfície lateral, no contato do material da estaca com o solo, também denominada fuste.

Tradicionalmente em projetos de fundações, a concepção do uso de blocos atuando juntamente às estacas leva em conta somente a atuação das estacas no solo, tendo o bloco apenas como elemento transmissor de cargas (Figura 2.2(a)).

Segundo Poulos e Davis (1980a), em condições de grandes carregamentos, como é o caso das atuais construções multipavimentos, a utilização de radier somente, seria adequada em relação à capacidade última de carga, porém os recalques seriam excessivos. Já as estacas, como boa alternativa para combater grandes recalques, seriam uma ótima opção. Porém o método tradicional de projeto, considerando um número excessivo de estacas capaz de suportar o carregamento total, é pouco econômico. O radier estaqueado, em sua concepção, reúne os dois tipos de fundações trabalhando em conjunto para juntos resistirem o carregamento e reduzirem os recalques, como mostra a Figura 2.2(b).

Figura 2.2 – Sistemas de fundação: (a) Bloco Estaqueado, e (b) Radier estaqueado.



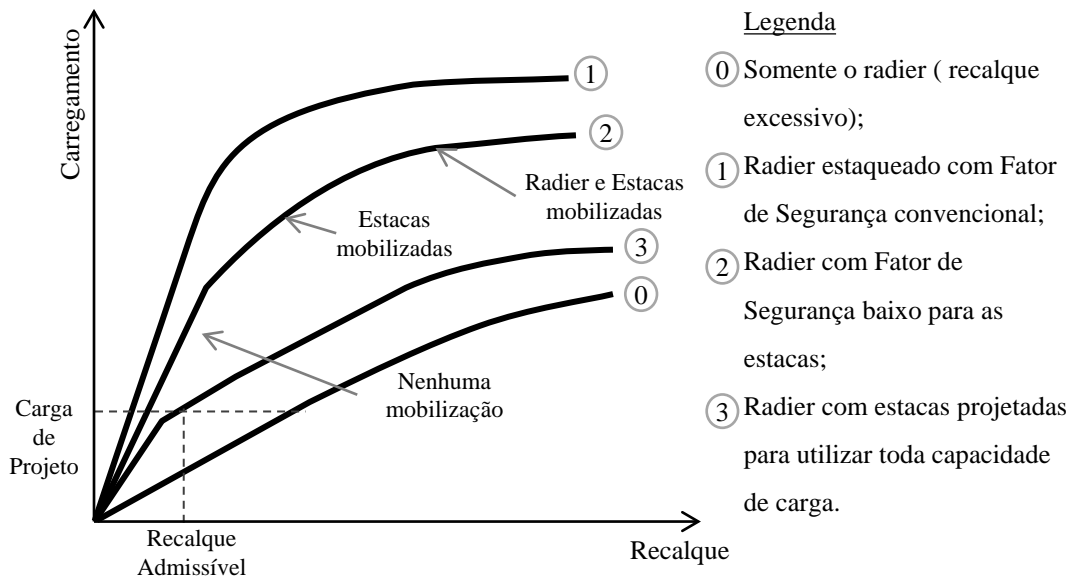
2.1.1 Definições de Projeto

Randolph (1994), relaciona três filosofias distintas sobre o dimensionamento de radier estaqueado. A primeira delas representa a abordagem convencional, em que as estacas são dimensionadas como um grupo capaz de absorver a maior parte do carregamento, enquanto permite que o radier também contribua com a mobilização de carga, principalmente para capacidade última de carga.

A segunda filosofia, chamada de “*creep piling*”, aproveita grande parte da capacidade de carga da estaca e dimensiona a fundação para que o sistema atinja uma deformação considerável, entre 70 e 80%, suficiente para permitir que o radier trabalhe, porém abaixo da tensão de pré-adensamento do solo. Alguns projetistas chegam a operar de forma mais radical, considerando que as estacas operam em até 100% de sua capacidade máxima de carregamento.

Por último, o controle do recalque diferencial, juntamente com as rotações internas, em que as estacas são localizadas estrategicamente a fim de reduzir o recalque diferencial do que reduzir a média do recalque total substancialmente. A Figura 2.3 ilustra o comportamento carga recalque do radier estaqueado sob diferentes tipos de combinação entre os dois elementos da fundação.

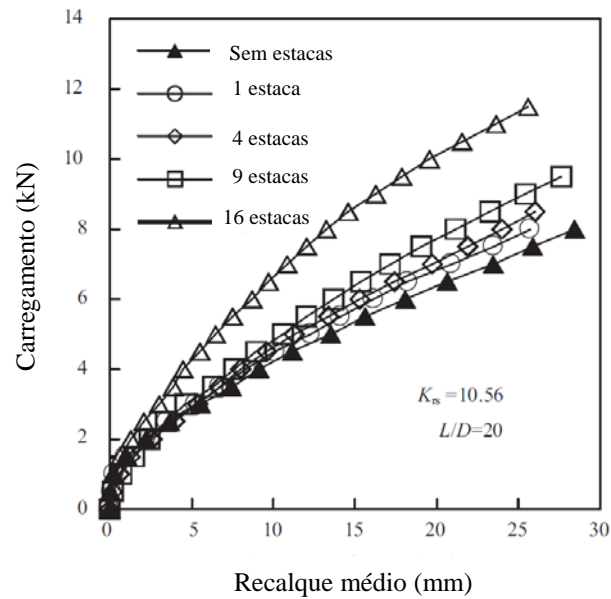
Figura 2.3 - Estratégias de projeto de radier estaqueado (modificado de Poulos (2001a))



O gráfico representa os diferentes comportamentos. No caso 1, representando um projeto tradicional, as estacas trabalham com alto fator de segurança, com valores baixos de recalque, enquanto que no outro extremo, 0, o radier trabalha sozinho suportando o carregamento mas permitindo elevados recalques. Entre eles estão os outros projetos, 2 e 3, que variam número e posicionamento de estacas no radier. Na estratégia 2, provavelmente, as estacas mobilizam mais carga que no caso 1 e com um fator de segurança menor, e permitem que o radier também possa mobilizar carga, de acordo com o gráfico. Já em 3, a estratégia usada foi a de reduzir ainda mais o fator de segurança das estacas, utilizando a capacidade máxima delas, respeitando contudo o critério de recalque aceitável.

El-Garhy *et al* (2013) apresentaram em seu trabalho resultados experimentais com modelos de tamanho reduzidos em areia. Os resultados de sua análise mostram que o acréscimo de estacas ao radier diminui os recalques totais e diferenciais, diminuindo o recalque médio, como pode ser observado na Figura 2.4. Os autores concluem que mesmo o acréscimo de um número pequeno de estacas já representa um grande ganho em termos de recalques e que o radier tem um importante papel em recalques diferenciais, mas um efeito insignificante na média de recalques e na proporção de carregamento dividido com as estacas.

Figura 2.4 – Resultados experimentais em modelo reduzido em areia aumentando o número de estacas
(modificado de El-Garhy *et al* (2013))



Segundo Poulos (2001b), as etapas de projeto de um radier estaqueado envolve três eventos principais: a etapa preliminar onde se determina a viabilidade de usar o radier estaqueado com número satisfatório de estacas que atendam ao projeto; o segundo estágio, que determina onde as estacas, com suas devidas características, são necessárias; e o estágio final de detalhamento do projeto para se obter o número ideal, a localização e as características das estacas, além de determinar a distribuição de recalques na fundação, o momento de flexão e o cisalhamento no radier e carga e momentos nas estacas.

Entre as considerações de projeto, o autor ainda ressalta a necessidade de se avaliar os seguintes aspectos:

- a capacidade máxima de carregamento vertical, lateral e momentos;
- o recalque máximo desejável;
- o recalque diferencial permitido;
- os momentos e esforços cortantes para o projeto estrutural do radier;
- o carregamento vertical e momentos para o projeto estrutural das estacas.

Apesar de a capacidade máxima de carga e os recalques estarem em destaque entre as principais considerações de projeto, em determinadas ocasiões esforços ocasionados pelas combinações de carregamento com vento, por exemplo, podem representar esforços mais significativos e

importantes por hora do que o carregamento permanente, responsável principalmente pelas duas primeiras. Isso ressalta a importância da análise das diferentes combinações oriundas dos projetos estruturais.

2.1.2 Métodos de Previsão de Recalque

A aplicação do carregamento numa fundação implica, inevitavelmente, no aparecimento de recalque, mesmo que ele seja da ordem de poucos milímetros. Dependendo da ocasião e das condições, o recalque pode chegar à ordem de milhares de milímetros, com comprometimento relevante da superestrutura e dos outros sistemas de uma edificação.

O recalque é definido como o deslocamento vertical para baixo de uma fundação devido à deformação do solo ou também à compressão elástica da fundação. Dentre os tipos de recalque, podem ser analisados: recalque absoluto (ρ) de um único elemento de fundação, relativo (ρ_r), que é a diferença entre dois elementos, e angular (ρ_r/l), onde l é a distância entre os dois elementos (CINTRA, AOKI, ALBIERO, 2003)

Por sua vez, o recalque absoluto é composto por três parcelas:

- o recalque inicial acontece assim que o carregamento é aplicado, e ocorre principalmente em areias e solos não saturados. Em argilas saturadas ele é a deformação sob volume constante.
- o recalque por adensamento primário, segundo Alonso (1991), é causado pela expulsão de água e ar dos vazios do solo, ocorrendo uma redução de volume e conseqüentemente diminuição do índice de vazios. Ele ocorre principalmente em solos argilosos de baixa permeabilidade, quando a tensão é superior à pressão de pré-adensamento.
- por último, o recalque por adensamento secundário é o rearranjo de partículas por tensões de cisalhamento logo depois da dissipação da poro-pressão.

O recalque diferencial é a diferença entre os recalques absolutos. É ele o mais preocupante do ponto de vista de segurança, desempenho e funcionalidade do sistema.

Dentre os métodos existentes para previsão de recalque, alguns se destacam como os Métodos de Transferência de Carga, Métodos Elásticos e os Métodos Numéricos.

Os métodos numéricos, que serão citados no item 2.2, apresentam uma análise atualmente muito prática e precisa, e se desenvolveram principalmente com a evolução de máquinas computacionais. Exemplos desses métodos são o Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Elementos de Contorno (MEC).

Atualmente, os métodos elásticos são os métodos mais amplamente aplicados como o método de Poulos e Davis (1980a) e Randolph e Wroth (1978). O método de Poulos e Davis (1980a) é um método elástico que considera a compressão de uma estaca com carregamento axial. Por meio dele são verificados os deslocamentos axiais de uma estaca compressível que pode tanto ser flutuante, quando a camada resistente de solo se encontra abaixo da estaca, como também uma estaca de ponta, ou seja, apoiada na camada resistente. Já a análise feita pelo Método de Randolph e Wroth (1978) divide os efeitos de ponta dos efeitos do fuste no carregamento. Nesse caso, a camada que envolve a lateral da estaca é analisada separadamente da camada logo abaixo da ponta da estaca.

Além de conhecer a capacidade redutora de recalques da estaca, que depende sobretudo de sua geometria e do solo em que está imersa, outra preocupação durante a etapa de concepção da fundação é se preocupar com os menores recalques diferenciais que podem surgir na fundação de radier estaqueado. Nesta etapa, a intuição e experiência do projetista ainda são o critério mais utilizado. Nesse contexto, outra linha de trabalho passou a se preocupar também com a obtenção da melhor disposição dos elementos da fundação na busca do melhor resultado e da opção mais econômica.

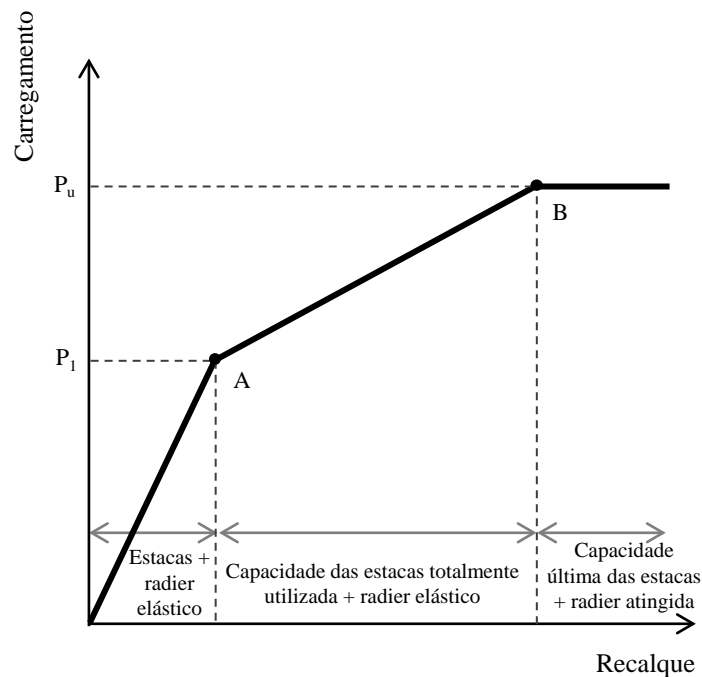
Lima (2007) e Bittencourt (2012) utilizaram em seus trabalhos técnicas de otimização conhecidas como *Branch-and-Bound* para a obtenção de melhores resultados variando alguns parâmetros do problema, como carregamento, propriedades do material do solo e geometria das estacas. O primeiro autor implementou o algoritmo de otimização no programa GARP e o segundo no programa FENF, desenvolvido também no trabalho. A técnica baseia-se na enumeração inteligente de pontos candidatos à solução ótima inteira do problema. Lima (2007) ressalta em suas conclusões que alguns resultados, como a predileção do posicionamento de estacas nos locais onde são aplicadas as cargas pontuais, quando no caso de carregamentos distribuídos, as estacas tendem a se posiciona nas regiões periféricas do radier. Além disso, algumas formas manuais e intuitivas do projetista de definir a posição das estacas em busca de menores recalques podem levar a caminhos incertos, pois as escolhas de geometria e carregamento podem inclusive encarecer a fundação.

2.1.3 Capacidade de carga da fundação

Antes do conceito do radier estaqueado, a capacidade máxima de carga da fundação era atribuída somente à capacidade máxima das estacas, por exemplo, quando usadas com um bloco. Com o surgimento do radier estaqueado, passou-se a considerar não só o conceito de que parte da carga deveria ser absorvida pelo radier, como também considerar fatores de segurança menores para as estacas, a fim de melhor aproveitar sua capacidade de carga.

A Figura 2.5 de Poulos (2001b) ilustra o comportamento da evolução do carregamento em um radier estaqueado. Inicialmente, até o ponto A, espera-se que as estacas absorvam a maior parte do carregamento aplicado, e à medida que cada uma delas atinja o seu carregamento limite ($P_{\text{últ}}$), o radier passe a assumir cada vez mais o carregamento aplicado. Quando é atingido o limite de todas as estacas, o radier, com uma rigidez bem menor, assume a mobilização de carga, no trecho de A a B. A inclinação da curva nesse momento é a mesma que seria numa situação onde só houvesse o radier, que recalcaria até que toda sua capacidade fosse atingida, em B.

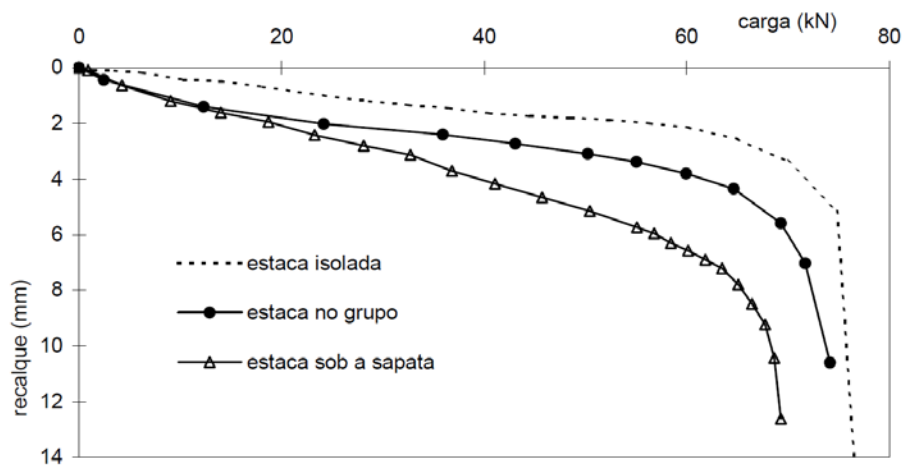
Figura 2.5 – Curva carga x recalque simplificada para análise preliminar (modificado de Poulos (2001b))



Além disso, a estaca, quando observada isoladamente, pode ter comportamento diferente do esperado quando junto ao radier. Com base em três provas de carga em diferentes situações, Sales (2000) ressalta o comportamento carga/recalque, como mostra a Figura 2.6. A primeira

estaca é analisada isoladamente, enquanto que as outras duas foram ensaiadas com e sem o contato entre a sapata e o solo. O autor concluiu que a estaca passa a ter uma resposta menos rígida com a presença da sapata e, comparada à estaca isolada, tem uma redução em torno de 10% de sua capacidade máxima. Ele ressalta ainda que essa comparação se refere exclusivamente ao elemento estaca pois, em termos de capacidade máxima da fundação, a associação de uma sapata a algumas estacas certamente aumenta a capacidade da fundação em relação aos elementos individualizados.

Figura 2.6 – Comportamento médio de uma estaca em diferentes provas de carga. (SALES, 2000)



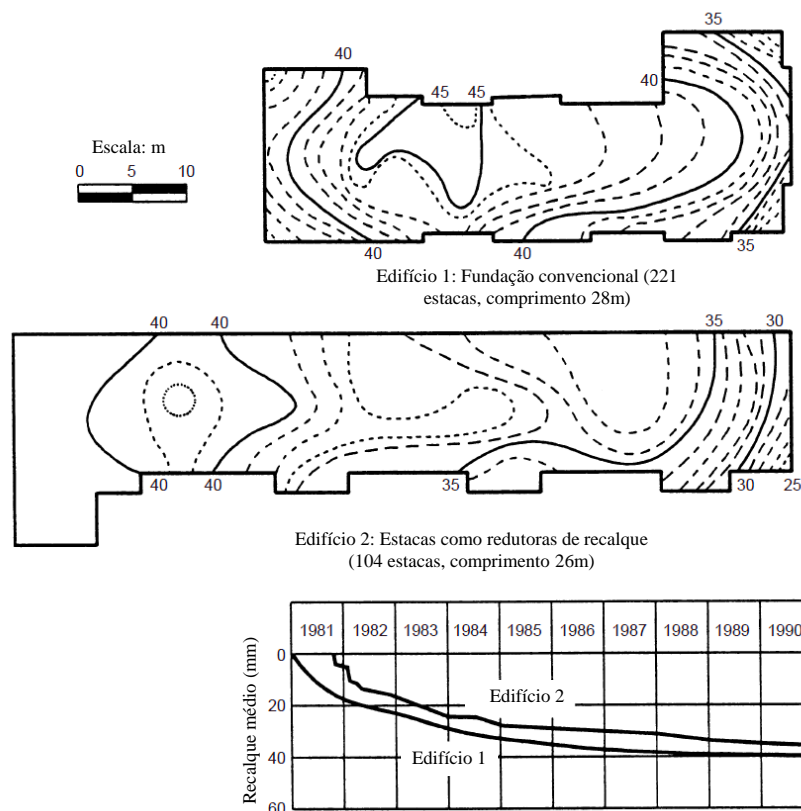
Ainda sob o aspecto do carregamento da fundação, é importante acrescentar às considerações sobre carga última do conjunto radier estaqueado que, como explicado anteriormente no item 2.1.1, o conceito de *Creep Piling* no dimensionamento desse tipo de fundação tem sido cada vez mais comum entre os projetistas, pois reduzindo o fator de segurança sobre as estacas utilizadas e permitindo maiores recalques dessas, espera-se maior participação do radier e, conseqüentemente, redução nos custos da fundação.

Um exemplo clássico da aplicação desse conceito é o edifício residencial Hansbo¹ (1993, *apud* POULOS, 2001a). Nele é possível comparar duas construções similares, em que numa se utilizou o método tradicional para cálculo de radier estaqueado, e na outra um fator de segurança menor para as estacas adotando o conceito de atingir o valor máximo próximo da capacidade de carga última em cada uma das estacas. Em um edifício foram utilizadas 211 estacas com 28

¹ HANSBO, S. (1993). Interaction problems related to the installation of pile groups. Proceedings of the seminar on deep foundations on bored and auger piles, Ghent, pp. 59-66.

metros de comprimento e no segundo 104 com 26 metros de comprimento. Os prédios foram monitorados por alguns anos, como mostra a Figura 2.7. Apesar da quantidade de estacas do primeiro exemplo ser aproximadamente o dobro de estacas do segundo, o segundo não recalçou mais que o primeiro, na verdade até menos. Esse estudo de caso demonstra claramente que o melhor aproveitamento da capacidade da fundação não altera o bom desempenho do conjunto.

Figura 2.7 – Recalques de dois prédios residenciais em Hansbo¹ (1993, *apud* POULOS, 2001a)



2.2 ANÁLISE NUMÉRICA NO COMPORTAMENTO FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

Para Poulos (1994c) o processo racional de projeto de radier estaqueado deve envolver essencialmente dois estágios principais. O primeiro deles, e não menos importante, envolve as primeiras estimativas do problema, como dimensão dos elementos e número inicial de estacas a serem usadas. Nessa etapa são utilizados os Métodos Simplificados de Análise, que envolvem cálculos mais simples.

Alguns métodos utilizados são Correlações Empíricas e Métodos Equivalentes de fundações e ainda baseados na teoria da Elasticidade, como o Método de Randolph (POULOS, 2001b). Nele, Randolph estima a rigidez do conjunto pela equação (2.1) a seguir.

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r (1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 K_r K_p} \quad (2.1)$$

onde:

K_{pr} = rigidez do radier estaqueado;

K_p = rigidez do grupo de estacas;

K_r = rigidez do radier sozinho;

α_{cp} = fator de interação radier-estaca;

A segunda etapa apontada pelo autor refere-se ao detalhamento do projeto. Ela ocorre quando se busca desenvolver as dimensões e o posicionamentos otimizado dos elementos das fundações, analisando-a em termos de recalque e esforços atuantes. Nessa etapa, é necessário o uso de ferramentas computacionais para desenvolver e solucionar o problema.

Ao longo de pouco mais de três décadas, vários autores propuseram soluções em diferentes métodos de análise numérica. Aqui, destacam-se principalmente duas metodologias: Método dos Elementos de Contorno (MEC) e Método dos Elementos Finitos (MEF). O uso dos dois métodos, sozinhos ou combinados, por cada autor, sempre buscou suprir deficiências e lacunas de um método e do outro. Com o passar dos anos, alguns métodos de análise começaram a serem aplicados a raders estaqueados com o intuito de prever recalques na fundação através da construção de ferramentas numéricas. A simulação numérica ganhou espaço e se expandiu à medida em que as máquinas computacionais evoluíram. Processadores mais rápidos e com maiores capacidades de memória permitem, por exemplo, soluções de problemas complexos que combinam diferentes características de solos, estrutura e carregamentos. A seguir serão apresentados os dois métodos, detalhando suas vantagens e desvantagens em relação à análise de raders estaqueados.

2.2.1 Métodos dos Elementos de Contorno

O Método dos Elementos de Contorno (MEC) é um método computacional para soluções de sistemas de equações integrais. Por esse método somente o contorno do problema necessita ser discretizado e em seguida são definidos os valores no interior do domínio em questão. Geralmente os parâmetros do solo nesse tipo de análise são considerados de maneira aproximada, no que diz respeito a heterogeneidade, não-linearidade e contato com as estacas. Além disso, o radier ou bloco é considerado como rígido, o que não condiz normalmente com a situação real (SALES, 2000).

Sales (2000) ressalta dois trabalhos que utilizaram o MEC. O primeiro deles ainda é utilizado como referência para novos métodos propostos. Trata-se do trabalho de Butterfield e Banerjee (1971). Os autores apresentam várias análises considerando o bloco rígido sob um grupo de estacas em contato com o solo. Nesses estudos os blocos tinham a função de ligação entre as estacas e essas possuíam um espaçamento entre elas equivalente a três vezes o diâmetro das estacas. A conclusão desse trabalho foi que os blocos pouco acrescentavam em rigidez ao conjunto e foram capazes de reduzir os recalques, entre 5 e 15%.

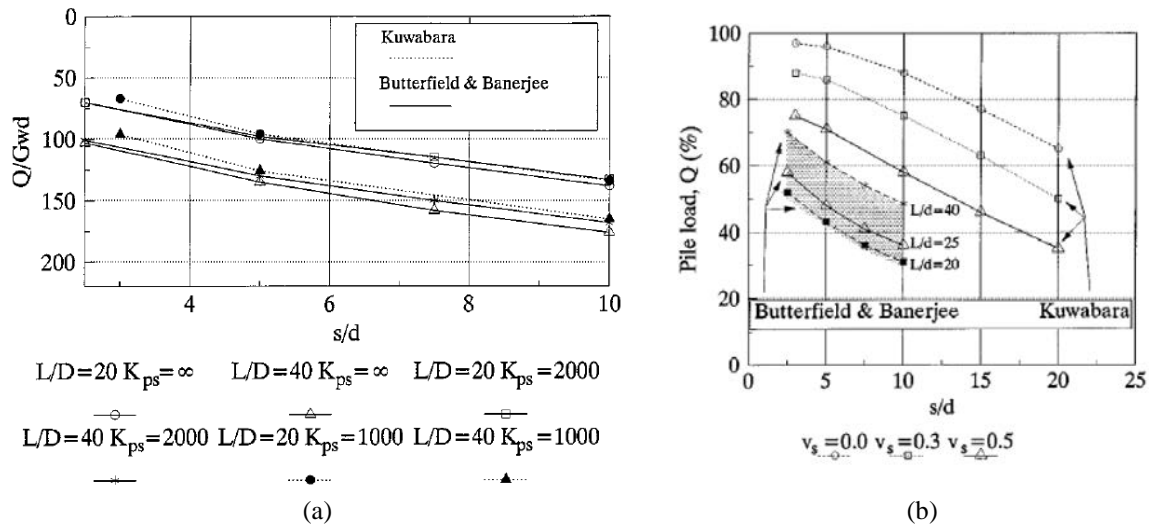
O segundo trabalho foi realizado por Kuwabara (1989) e será utilizado na validação do programa desenvolvido nessa pesquisa, no CAPÍTULO 4. Nele, o autor apresenta resultados gerados de um programa desenvolvido que considera o radier rígido e o meio semi-elástico. O autor realiza variações num radier de 9 estacas com os espaçamentos entre elas alternando a relação de distâncias entre estacas centro a centro, s , e diâmetro, D , (o s/D) entre 3, 5 e 10, enquanto varia também o comprimento relativo (L/D) que é a relação de comprimento pelo diâmetro da estaca, mantendo a rigidez relativa entre estaca e solo igual a $K=Ep/Es=1000$. Kuwabara (1989) concluiu, dentre outras coisas, que: a rigidez é maior num grupo de estacas quando considerado o contato do bloco do que quando não é considerado o bloco; estacas mais compressíveis, deixam o radier absorver mais carga enquanto uma parcela menor do carregamento chega a ponta; e o carregamento transferido à ponta das estacas é maior em grupos de estacas que em estacas isoladas.

Russo (1998) comparou os resultados de Butterfield e Banerjee (1971) com os de Kuwabara (1989) em termos de recalque e proporção de carga mobilizada pelas estacas. O autor concluiu que os resultados obtidos nos dois trabalhos variando compressibilidade e comprimento relativo L/D (Figura 2.8(a)) são bastantes satisfatórios, enquanto que os resultados sobre porção do total

de carga aplicada obtido por Kuwabara são significativamente maiores que os calculados por Butterfield e Banerjee (Figura 2.8(b)). Conclui-se que, apesar de os recalques nos dois trabalhos serem bem próximos, os valores de carregamento podem ser bem diferentes, pois deve-se levar em conta fatores como rigidez do sistema, que podem influenciar bastante nos resultados.

Figura 2.8 – Resultados comparados por Russo (1998) de Kuwabara (1989) e Butterfield e Banerjee (1971):

(a) recalques e (b) porção de carga mobilizada pelas estacas



O autor conclui que a variação entre os dois trabalhos acontece por que os trabalhos usaram diferentes abordagens e aproximações nas técnicas numéricas.

2.2.2 Método dos Elementos Finitos aplicado às Fundações

Outro método que utiliza a análise computacional para seu desenvolvimento é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Trata-se de um método mais sofisticado que vem sendo cada vez mais utilizado pelos pesquisadores em diversos campos da engenharia e tem algumas vantagens em relação a outros métodos numéricos de análise, como:

- Aplicabilidade a qualquer campo: transferência de calor, análise de tensões, campo magnético dentre outros;
- Não há restrição geométrica. O corpo ou região analisada podem ter qualquer geometria;
- As condições de contorno e carregamento são irrestritas;
- Propriedades materiais não são restritas à isotropia e podem mudar de um elemento para o outro, e no próprio elemento;
- Componentes que têm comportamentos diferentes e descrições matemáticas distintas, podem ser combinados;

- Uma estrutura em elementos finitos se assemelha bastante à região analisada, sem a necessidade de simplificações;
- A aproximação de resultados é facilmente melhorada com uma melhor discretização da malha. (COOK, *et al.*, 2007, p. 1-2)

Em fundações estaqueadas, o MEF também tem sido bastante utilizado, pois permite a avaliação de todos os elementos constituintes da estrutura, analisando-os em conjunto, além de permitir que algumas características sejam incorporadas, como a não linearidade do solo. Apesar de sua grande vantagem, é um método que exige mais da capacidade de processamento computacional, podendo gastar um grande tempo para a execução do programa, principalmente quando levada em conta a terceira dimensão do problema.

O primeiro trabalho que considerou a análise completa tridimensional de radier estaqueado utilizando MEF foi o de Ottaviani (1975). Ele utilizou um modelo elástico-linear para o solo em um grupo de estacas, com e sem o contato solo/bloco. Em sua análise ele concluiu que ao considerar o bloco em contato com o solo, não só estava contribuindo para diminuir as tensões cisalhantes no solo na parcela superior das estacas, como aumentando as tensões verticais no solo na ponta das estacas. Esse trabalho será utilizado na etapa de validações do programa.

Recentemente, Bittencourt (2012), construiu uma ferramenta computacional completa com elementos sólidos em 3D em MEF, que analisa o conjunto radier, estaca e solo linearmente: a Ferramenta Numérica para Análise de Fundações (FENF). O programa será brevemente descrito no item 2.3.

2.2.3 Métodos combinados formando ferramentas numéricas híbridas

Devido à dificuldade de processamento utilizando o MEF, vários autores publicaram trabalhos com simplificações restringindo geometricamente a análise, mas também impossibilitando a obtenção de determinados parâmetros, como o trabalho de Presley e Poulos (1986), que simplificou um radier estaqueado quadrado por círculos concêntricos de estacas equivalentes.

Os pioneiros, no entanto, foram Hain e Lee (1978) que trabalharam com um programa híbrido que analisa o radier em elementos de placa pelo MEF, considerando sua rigidez, e o conjunto estaca/solo foi analisado pelo MEC, sobrepondo os efeitos de deslocamento do solo e da estaca. Para isso eles consideraram interações apresentadas detalhadamente adiante no item 2.4.

A combinação dos métodos numéricos citados anteriormente passou a ser utilizada como alternativa para suprir as limitações um do outro e criar ferramentas matemáticas que sejam eficientes na análise de fundações estaqueadas. O princípio das combinações é reduzir os passos matemáticos, e por isso, reduzir o uso de memória e o tempo de processamento consumido nas máquinas.

Algumas das principais ferramentas desenvolvidas passaram a utilizar o MEF principalmente na discretização do radier, enquanto o conjunto solo/estaca analisado por outros métodos. Por exemplo, Poulos (1994a), em seu trabalho, modelou o radier em placas pelo MEF, enquanto que as estacas como molas interativas e o solo como um meio elástico contínuo. Já Russo (1998) modelou as estacas como molas de comportamento não linear e Kim *et al* (2001) consideraram o solo como molas de Winkler e as estacas como molas acopladas.

2.3 PROGRAMAS DE ANÁLISE DE RADIER ESTAQUEADO

Para o desenvolvimento da ferramenta numérica apresentada nesse trabalho, foi essencial conhecer o funcionamento de algumas ferramentas numéricas já existentes que auxiliam na análise de raders estaqueados. O conhecimento dessas ferramentas auxiliaram principalmente sob os seguintes aspectos:

- aspectos gerais sobre o radier estaqueado e compreensão das principais etapas do processo de sua análise;
- conhecimento do Método dos Elementos Finitos e da sua aplicação em radier estaqueado;
- escolha do tipo de elemento finito utilizado;
- obtenção das interações que compõem o sistema solo/estaca e montagem da matriz de flexibilidade desse sistema;
- aspectos gerais sobre programação.

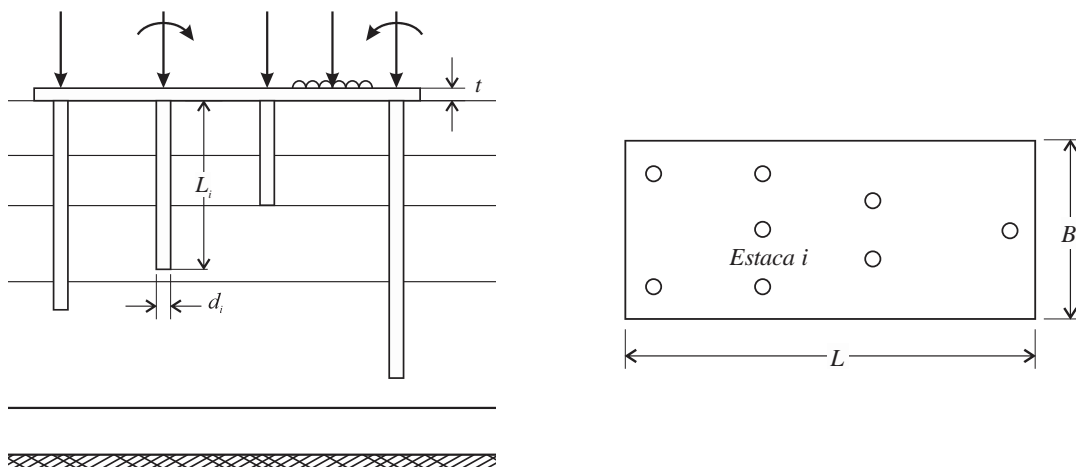
A seguir são sucintamente explicadas três ferramentas de análise de radier estaqueado: duas delas utilizando metodologia híbrida para análise; e por último, uma totalmente em MEF, utilizando elementos sólidos.

2.3.1 GARP, de Poulos (1994a)

Um dos principais programas hoje em dia na análise de radier estaqueado é o *Geotechnical Analysis of Raft with Piles*, o GARP (Análise Geotécnica de Radier Estaqueado), desenvolvido por Poulos (1994a). O programa utiliza uma metodologia híbrida de análise: o radier é analisado através do MEF com elementos de placa; as estacas são consideradas como molas cuja rigidez é um dado de entrada ou computada pela teoria da elasticidade e a capacidade máxima de compressão e tração são especificadas; e o solo é representado como um meio contínuo isotrópico elástico que consiste em camadas horizontais.

A definição do problema é apresentada pela Figura 2.9. O programa ainda utiliza os fatores de interação entre os elementos de solo e estaca como dados de entrada, oriundos de um outro programa de análise, o DEFPIG (POULOS, 1980b), baseado nas equações de Mindlin (1936), que utiliza o método de elementos de contorno em sua análise.

Figura 2.9 – Definição do problema pelo programa GARP (modificado de Poulos (1994a))



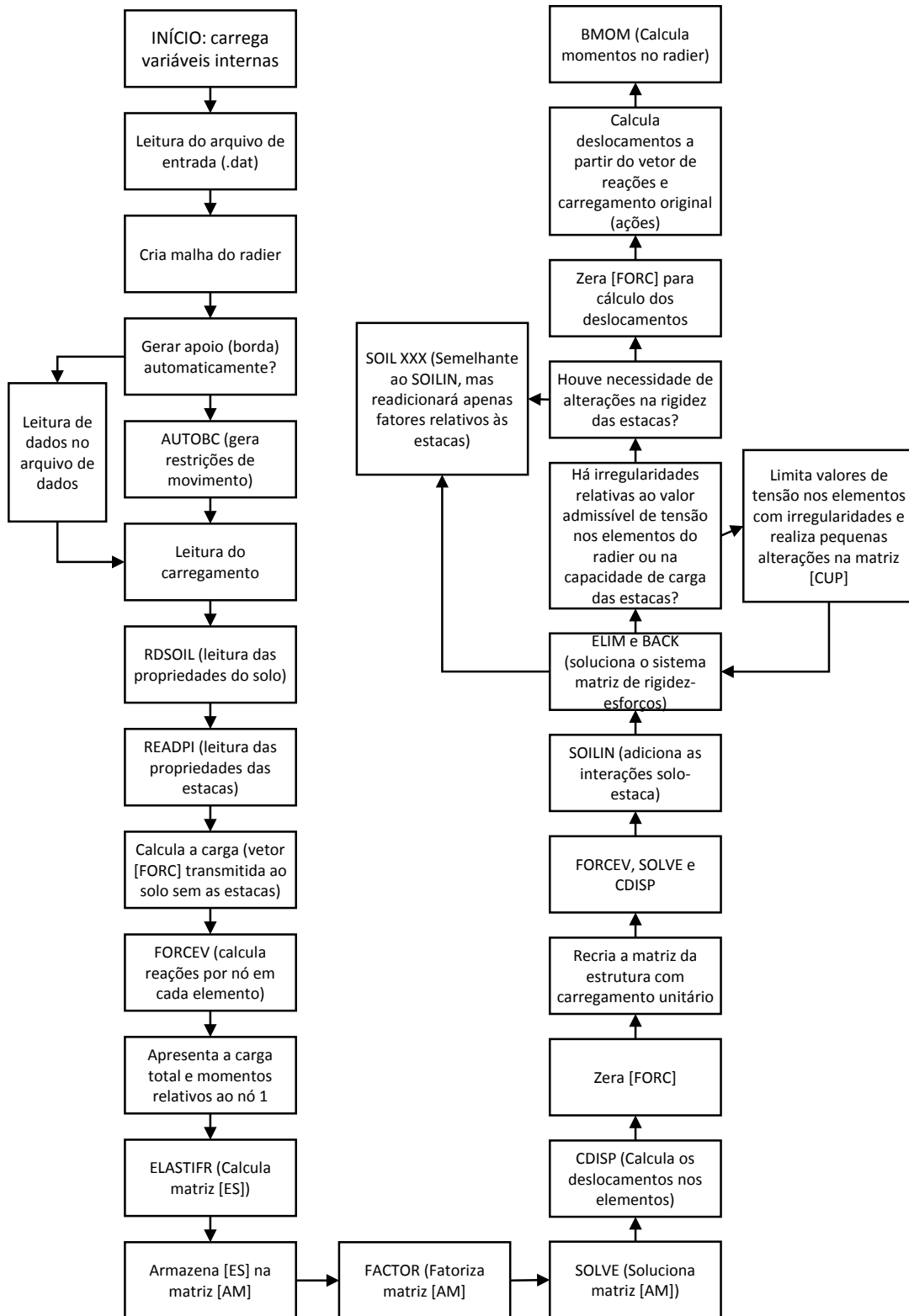
O programa, ainda adota as seguintes abordagens em sua análise:

- o radier é discretizado em elementos com quatro nós, onde as equações foram desenvolvidas para deslocamentos verticais do radier próprio devido a ações impostas de carregamento vertical e momento, e das reações desenvolvidas no contato entre o radier e o solo imediatamente abaixo;
- nos elementos onde a estaca está localizada, o carregamento é mobilizado pela estaca, e seu deslocamento vertical é obtido no meio do elemento;

- são consideradas as interações entre os seguintes elementos: entre os elementos do radier; entre as estacas, influência dos elementos do radier no recalque das estacas; influência das estacas no recalque dos elementos do radier;
- um conjunto de equações para a fundação e outro para os deslocamentos do solo são utilizados em conjunto para resolver o sistema com pressões de contato e deslocamento desconhecidos;
- o sistema é resolvido de maneira que nenhum dos seus elementos componentes excedam o valor limite de compressão, e todo o processo é repetido até que todos os elementos sejam analisados;
- dos contatos de tensão e dos deslocamentos, são calculadas as rotações, os momentos fletores e o cisalhamento do radier, juntamente com o carregamento suportado pelas estacas.

Lima (2007) descreve em seu trabalho as etapas importantes da análise do radier estaqueado pelo programa GARP resumidamente representado no fluxograma do programa da Figura 2.10.

Figura 2.10 – Sequência de análise do programa GARP (modificado de Lima (2007))



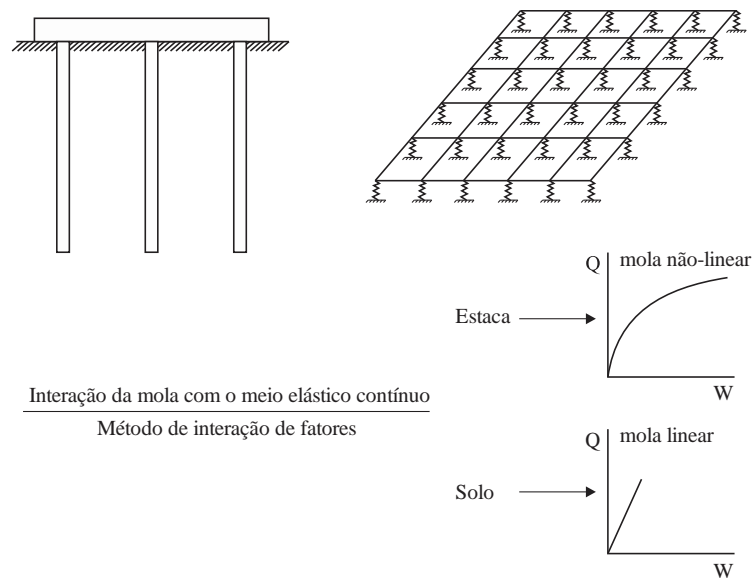
Atualmente, o programa encontra-se em sua versão 8 e possui dentre as principais alterações, a implementação da entrada gráfica. Nesse trabalho, no entanto, foi abordada a versão 6, que possui a linguagem em código aberto em Fortran, para melhor análise.

2.3.2 NAPRA, de Russo (1998)

O programa NAPRA, cuja sigla significa *Non-linear Analysis of Piled RAfts* (Análise não linear de radier estaqueado), também é um programa de análise de radier estaqueado que utiliza metodologia híbrida.

O radier nesse programa, também analisado pelo Método dos Elementos Finitos, é discretizado em elementos de placa de quatro nós, considerando somente deslocamentos verticais. A Figura 2.11 apresenta o problema básico analisado. Modelado em duas direções, o radier recebe carregamentos verticais concentrados e distribuídos e momentos. Enquanto isso o solo e as estacas são modelados como molas de comportamento linear e não linear respectivamente, e a relação com o radier é estritamente vertical.

Figura 2.11 – Modelo básico para o radier estaqueado (modificado de Russo (1998))



A relação de recalque do solo é feita através da solução de Boussinesq para carga aplicada em um ponto e através da solução de carregamento retangular produzido pelo radier sobre um meio elástico semi-infinito. Já para as estacas, o modelo aplicado para cálculo considera o comportamento das estacas como sendo não linear, utilizando a fórmula da hipérbole de Chin².(1970, apud RANDOLPH, WROTH, 1978). O fator de interação entre as estacas é regido

² F.K. Chin, Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure, Proc. 2nd South East Asian Conf. Soil Engng., Singapore, 1970, p.81

pela equação (2.2), enquanto o raio limitante da influência é calculado pela equação (2.3), uma formulação de Randolph e Wroth (1978).

$$\alpha_{pp}(s) = \frac{1}{1 + A \cdot (s/d)^B} + C \text{Log} \left(\frac{s}{d} + 10 \right) \quad (2.2)$$

onde:

α_{pp} = fator de interação entre as estacas;

s = espaçamento entre as estacas, centro a centro;

d = diâmetro da estaca;

A , B e C = parâmetros de detalhe de ajuste.

$$r_m = \left[0,25 + (2,5\gamma(1 - \nu_s) - 0,25) \frac{G_L}{G_B} \right] L \quad (2.3)$$

onde:

r_m = raio de influência do recalque da estaca;

γ = parâmetro que reflete a homogeneidade vertical do solo, variando entre 0,5 e 1;

ν_s = coeficiente de Poisson do solo;

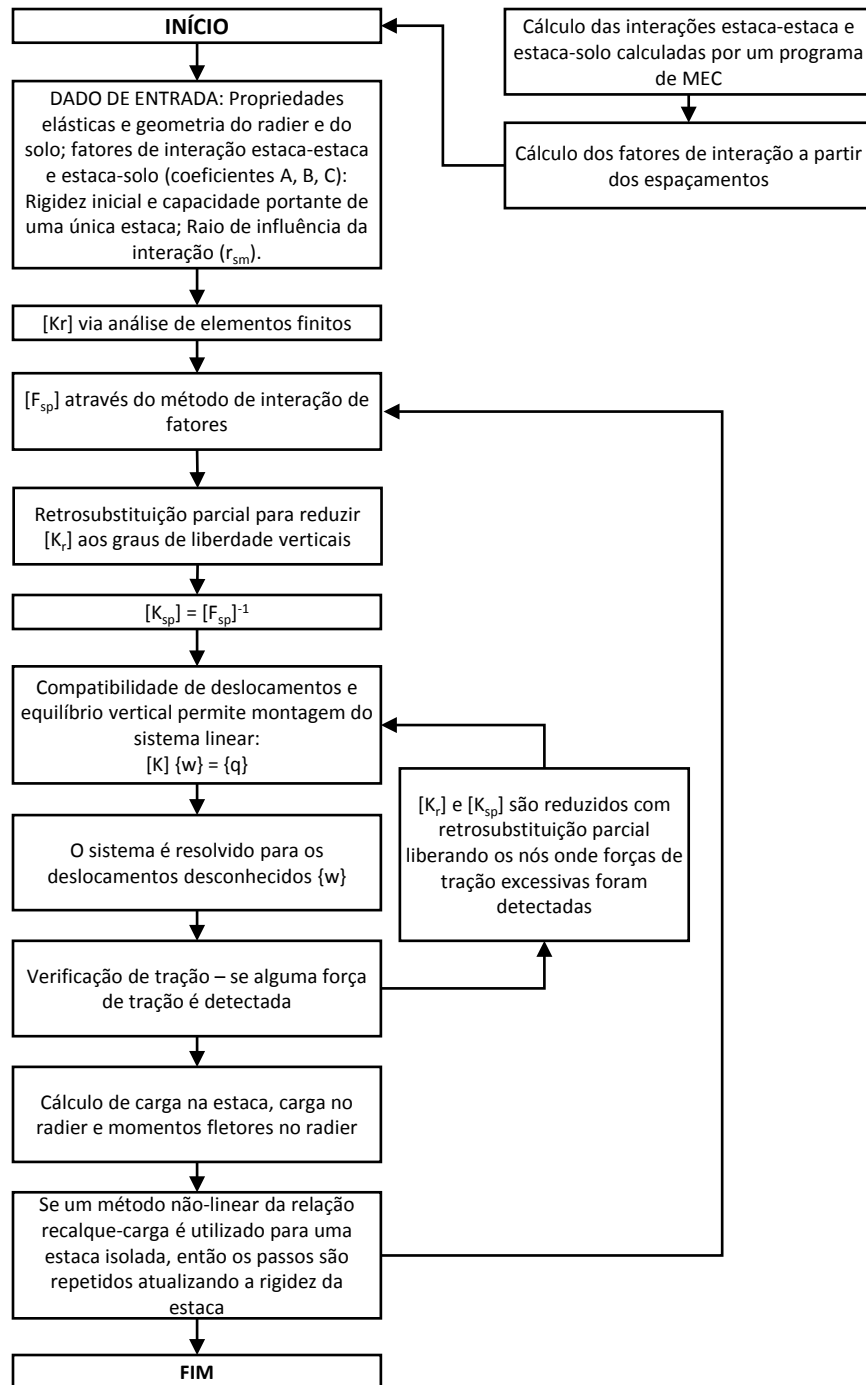
G_L e G_B = valores do módulo de cisalhamento do solo respectivamente em profundidade e na base da estaca;

L = comprimento da estaca.

Além disso a interação entre a estaca e o solo, foi implementada no programa por uma rotina em método dos elementos de contorno.

As etapas de análise do programa são resumidas na Figura 2.12, segundo Russo (1998).

Figura 2.12 – Fluxograma do programa NAPRA (modificado de Russo (1998)).



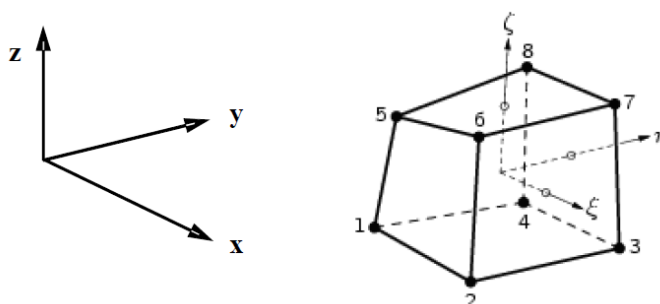
Basicamente, o programa compatibiliza os deslocamentos do radier com o sistema estaca/solo, onde as tensões são computadas. O processo iterativo de incremento de carga é necessário para serem computados os deslocamentos das estacas com comportamento não linear.

A saída de resultados do programa inclui deslocamentos nodais do radier e do sistema estaca/solo, distribuição de carga entre estaca e solo e momento fletor no radier.

2.3.3 FENF, de Bittencourt (2012)

O programa FENF, cuja sigla significa Ferramenta Numérica para Análise de Fundações, é um programa de análise 3D do radier estaqueado, desenvolvido no mesmo grupo de pesquisa que este trabalho. A ferramenta desenvolvida em linguagem C, foi completamente desenvolvida em MEF, e discretizou toda sua estrutura (radier, estacas e solos) por elementos finitos sólidos hexaédricos isoparamétricos de oito nós, como mostra a Figura 2.13.

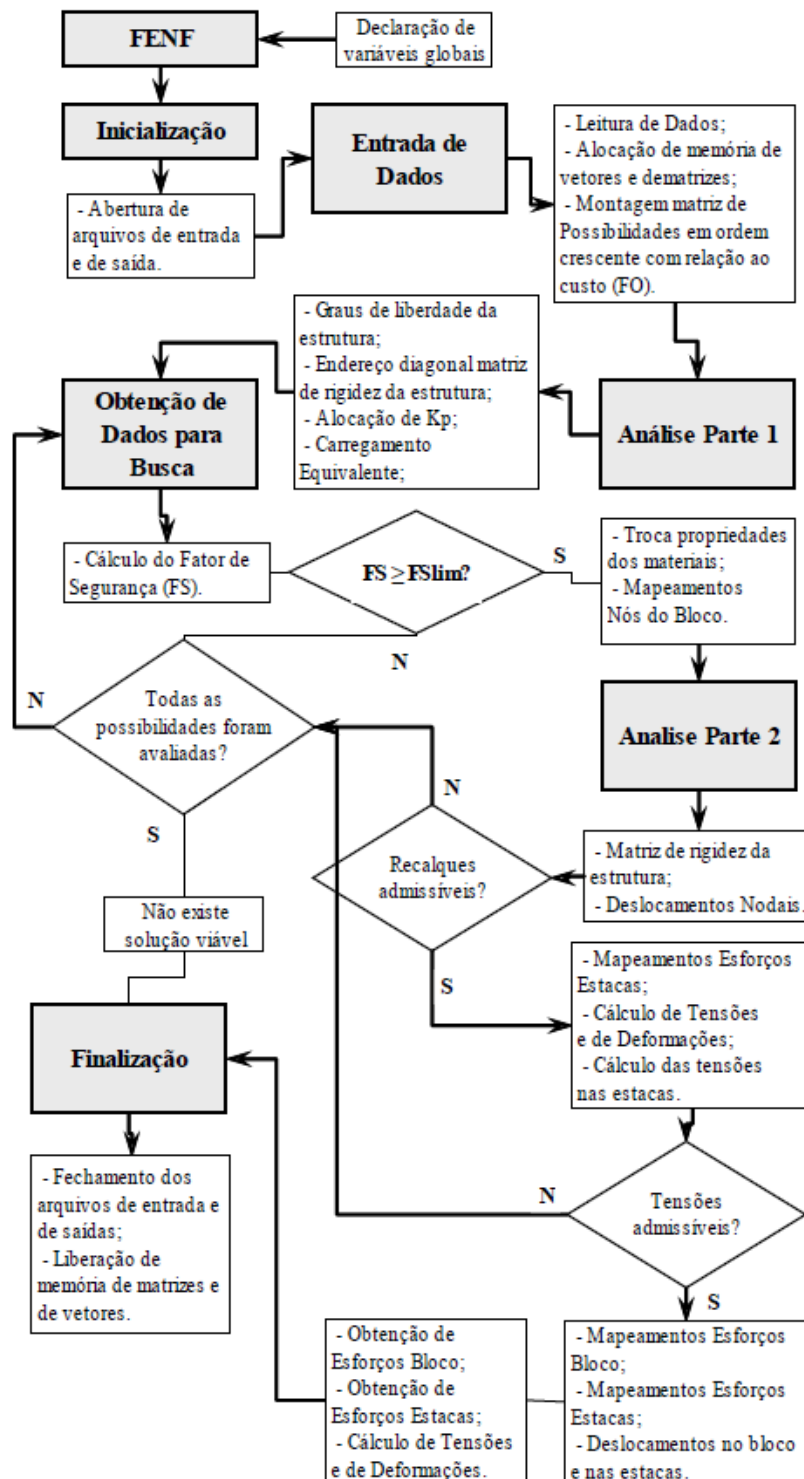
Figura 2.13 – Elemento sólido utilizado no programa FENF. (modificado de TNO (2008))



O programa simplifica a seção das estacas como sendo de uma seção quadrada equivalente a uma circular, podendo escolher se a estaca deverá ter mesma área transversal ou mesmo perímetro que uma estaca circular. A entrada do programa é feita por arquivo texto padrão, em que são informados os dados das propriedades dos materiais e os carregamentos. Como o programa não dispõe de gerador de malha, essa etapa deve ser feita previamente por um outro programa, como o programa DIANA (TNO, 2008), com o pré processador *FX+*.

Além disso, o programa dispõe ainda de um algoritmo de otimização que aplica o método de *Branch-and-Bound* (B&B), na busca da solução mais viável. Para isso o programa requer do usuário dados como o fator de segurança global mínimo, recalque vertical máximo, diferença de recalques verticais máximo ou tensão vertical máxima nas estacas. O fluxograma do programa completo foi apresentado por Bittencourt (2012) como na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Fluxograma do programa FENF (BITTENCOURT, 2012)



A saída de dados do programa é feita através de arquivo texto e arquivo para leitura em programa externo para geração de gráficos. Dentre os dados gerados estão tensões nos elementos de estaca, deformações, deslocamentos nas seções das estacas, esforços solicitantes

no bloco e na estaca, resultados da solução ótima, máximos e mínimos dos esforços no bloco e recalques máximo e diferencial.

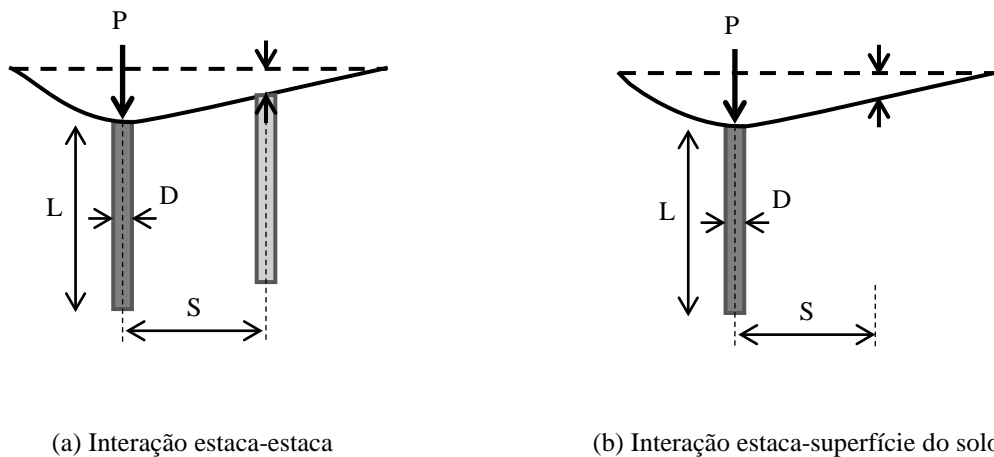
2.4 INTERAÇÕES DOS ELEMENTOS DA FUNDAÇÃO

Hain e Lee (1978) foram os primeiros a trabalhar com programas híbridos que analisam o radier em elementos de placa discretizados pelo MEF e a interação entre o conjunto estaca/solo pelo MEC.

De acordo com os autores, a análise da estaca reforçando o meio contínuo do solo, além da análise de uma única estaca, necessita considerar quatro interações entre a própria estaca e a superfície do solo. A Figura 2.15 mostra os quatro tipos de interação. Poulos³ (1972, *apud* HAIN; LEE, 1978), que investiga a relação de recalques entre as estacas, relaciona o fator de interação α como sendo descrito pela equação (2.4).

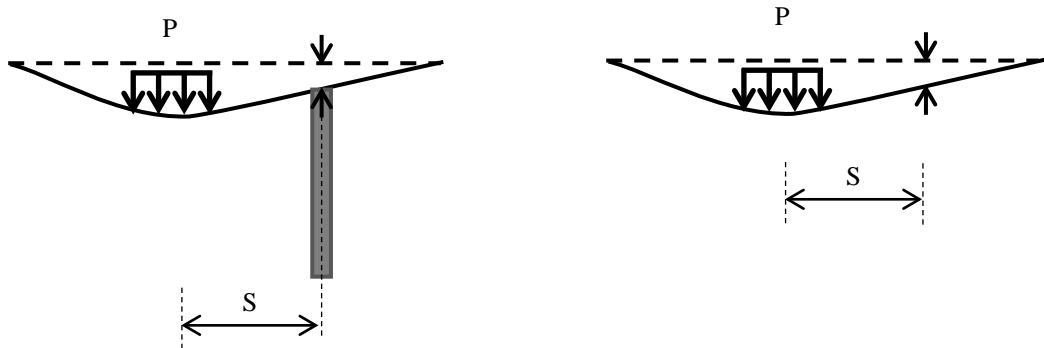
$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional unitário devido ao deslocamento de outra estaca}}{\text{deslocamento de uma estaca devido a carregamento unitário}} \quad \left(\begin{array}{l} 2.4 \\ \end{array} \right)$$

Figura 2.15 – Fatores de interação utilizados no método de Hain e Lee (modificado de Hain e Lee (1978))



³ Poulos, H.G (1972). Load Settlement prediction for piles and piers. *J. Soil Mech. Fdns Div., Am. Soc. Civ. Engrs*, 98, No. SM9, 379-397.

Figura 2.15 – Fatores de interação utilizados no método de Hain e Lee (modificado de Hain e Lee (1978))
(Continuação)



(c) Interação carga superficial-estaca

(d) Interação carga superficial-superfície do solo

Além disso, a razão entre as demais relações também são apresentadas nas Figura 2.15(b) e Figura 2.15(c), como sendo descritas pelas equações (2.5) e (2.6).

$$\beta_p = \frac{\text{recalque adicional da estaca devido ao deslocamento unitário da superfície}}{\text{deslocamento de uma estaca devido a carregamento unitário}} \quad (2.5)$$

$$\beta_s = \frac{\text{recalque adicional da superfície devido ao deslocamento de outra estaca}}{\text{deslocamento da superfície devido a carregamento unitário}} \quad (2.6)$$

onde:

β_p = fator de interação estaca-superfície do solo;

β_s = fator de interação superfície do solo-estaca.

No programa GARP, desenvolvido por Poulos (1994b), foram considerados também os tipos de interação mostrados na Figura 2.15 O programa considerava as estacas como molas equivalentes e o radier analisado primeiramente pelo método das diferenças finitas e posteriormente o programa, aperfeiçoado por Small e Poulos (1998), passou a analisar o radier como elementos de placa através do MEF.

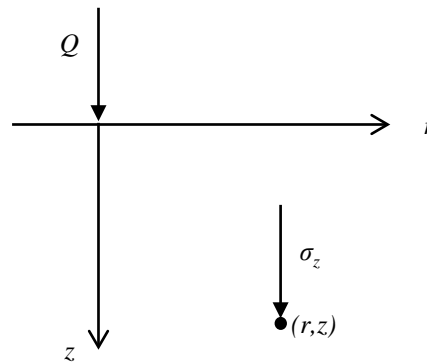
2.4.1 Análise de recalque e tensões no solo

Para determinar os deslocamentos provocados nas imediações do carregamento numa porção do solo, alguns métodos analíticos clássicos da literatura de Mecânica dos Solos são

apresentados, como por exemplo em Lambe e Withman (1969). Dentre eles duas principais se destacam: a aplicação de carga pontual, determinada pelas fórmulas de Boussinesq; e a aplicação de carregamento de carga circular distribuída.

O método de Boussinesq⁴ (1885, apud LAMBE, (1969)), determina as tensões em um ponto qualquer num meio semi-infinito de uma carga aplicada pontualmente na superfície, como mostra a Figura 2.16, e dentre as tensões provocadas em todas as direções, a tensão da direção vertical que provoca os deslocamentos verticais, é descrita pela equação (2.7) e o deslocamento vertical a uma profundidade 0 pela equação (2.8).

Figura 2.16 – Tensão vertical gerada pela aplicação de carga pontual num ponto (r,z).



$$\sigma_v = \frac{3z^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} Q \quad (2.7)$$

$$w_z = \frac{Q(1+\nu)}{2\pi E \sqrt{z^2 + r^2}} \left(2(1-\nu) + \frac{z^2}{z^2 + r^2} \right) \quad (2.8)$$

onde:

σ_v = tensão vertical;

w_z = deslocamento em z;

z = profundidade;

r = distância do ponto observado ao ponto de aplicação da carga;

⁴ Boussinesq, J., 1885. Application des Potentials a L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris

Q = carga pontual aplicada;

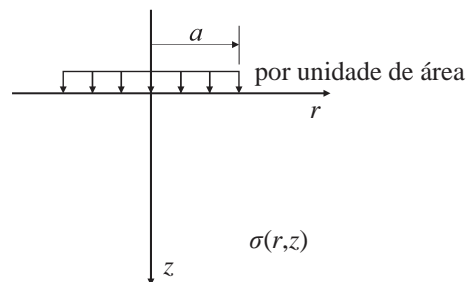
E = módulo de elasticidade do solo;

ν = coeficiente de Poisson do solo.

A expressão (2.7), no entanto, quando r se aproxima de valores muito perto de zero, tende a valores muito elevados de tensão, apontando uma singularidade na expressão para tensões logo abaixo do carregamento pontual.

Outra formulação (POULOS, DAVIS, 1974) para carregamentos distribuídos é uma formulação baseada na teoria da elasticidade do carregamento circular aplicado no solo, como mostra a Figura 2.17. A formulação apresentada por Lubarda (2012), do problema clássico de Love⁵ (1929) para o carregamento circular no meio semi-infinito é apresentado na equação (2.9).

Figura 2.17 - Carregamento vertical uniforme em área circular (modificada de Poulos e Davis (1974))



$$u_z = \frac{2pa(1-\nu)}{\pi G} \begin{cases} E\left(\frac{r}{a}\right) & , r \leq a \\ \frac{r}{a} \left[E\left(\frac{a}{r}\right) - \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) K\left(\frac{a}{r}\right) \right] & , r \geq a \end{cases} \quad (2.9)$$

Onde:

u_z = deslocamento vertical do ponto;

p = carregamento distribuído;

⁵ LOVE, A.E.H, The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. 1929. Phil. Trans. R.Soc. Lond. A 228,377-420.

a = raio de aplicação da carga circular

r = distância do ponto de observação do ponto central de aplicação do carregamento;

G = módulo de cisalhamento do solo;

$K(x)$ = integral elíptica de primeira ordem;

$E(x)$ = integral elíptica de segunda ordem.

2.4.2 Análise de estaca isolada

Apesar de a estaca ser raramente utilizada sozinha, a análise de estacas isoladas é bastante útil e menos complexa para a compreensão do comportamento em relação à análise de todo o grupo de estacas. (POTTS e ZDRAVKOVIC, 2001).

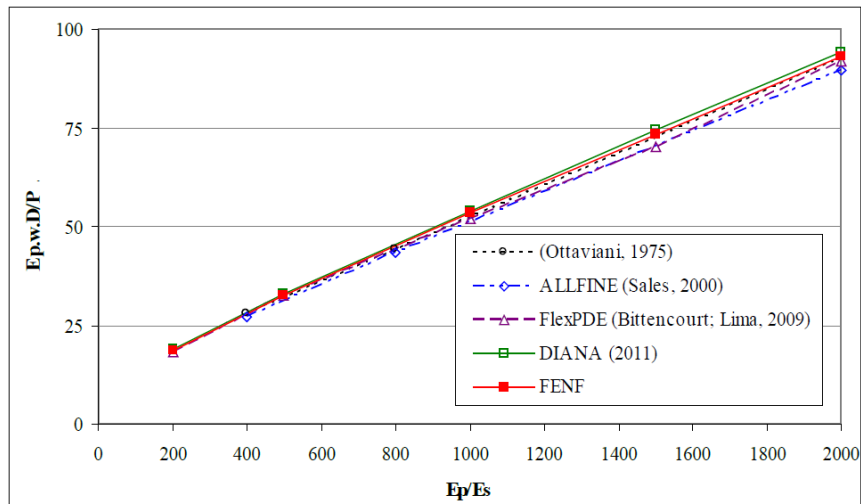
A análise de estacas isoladas através do Método dos Elementos Finitos depende, no entanto, das definições do problema para se escolher qual tipo de elemento utilizar. Segundo Potts e Zdravkovic (2001), quando uma estaca tem seção circular, e é instalada verticalmente no solo com litologia e nível d'água horizontal, em problemas onde somente carregamento vertical é analisado, esse problema pode ter sua geometria pode ser considerada como axissimétrica, e pode assim ser computacionalmente analisada. No entanto, quando alguma das condições citadas acima não são satisfeitas, seja pelo carregamento horizontal, ou pela estaca apresentar inclinação em sua instalação, ou ainda não tem seção circular, é recomendável a utilização de modelos em análise 3D completa.

Um dos trabalhos mais utilizados na validação da análise de estacas isoladas é o de Ottaviani (1975). O autor trabalha diferentes rigidez relativas, variando a relação de comprimento da estaca pelo seu diâmetro.

Bittencourt (2012) em seu trabalho, analisou o problema de Ottaviani (1975) com outros resultados simplificando a geometria da estaca por uma de seção retangular, como mostra a Figura 2.18. Percebe-se pelo gráfico, que todos os resultados dos programas são concordantes: ALLFINE (SALES, 2000), FlexPDE (BITTENCOURT, LIMA, 2009), ao próprio trabalho FENF (BITTENCOURT, 2012) e ao DIANA. No problema foi variada a relação de módulo de elasticidade do solo em comparação ao recalque normalizado. A estaca possui comprimento de

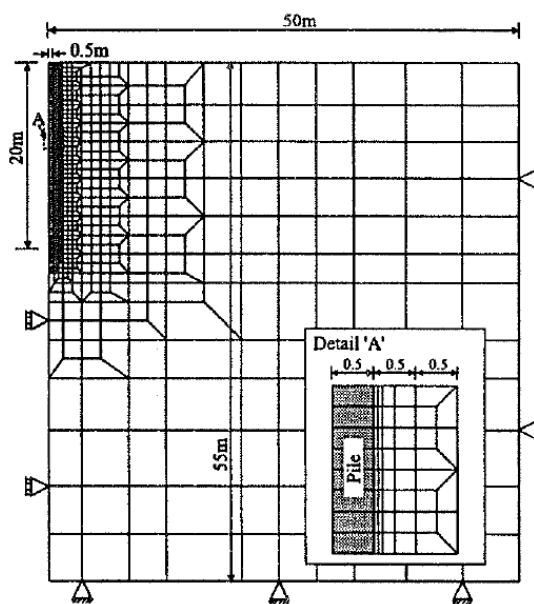
40m e a camada de solo 60m. Percebe-se pelo gráfico que todos os resultados dos programas são concordantes.

Figura 2.18 - Comparação de resultados da estaca isolada de Ottaviani: L= 40m e H 60m



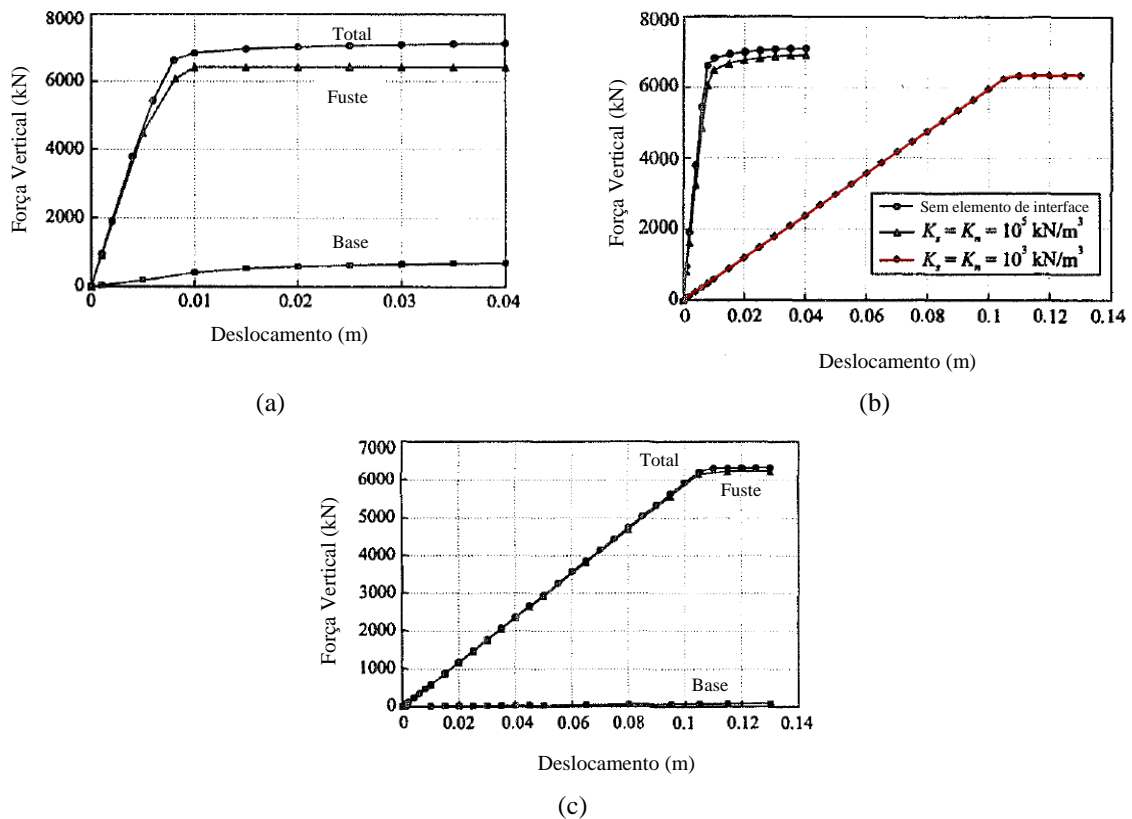
Potts e Zdravkovic (2001) discutem a necessidade ou não da aplicação de elementos de interface no caso de uma análise axissimétrica de estaca isolada. A geometria do problema é mostrada na Figura 2.19 e as análises foram feitas em incrementos, a fim de mostrar o comportamento não linear do problema.

Figura 2.19 – Malha de elementos finitos numa análise axissimétrica utilizada para única estaca (POTTS e ZDRAVKOVIC, 2001)



No primeiro gráfico, em (a), da Figura 2.20, não há elementos de interface utilizados entre a estaca e o solo adjacente a ela. No gráfico são mostradas as parcelas de mobilização da estaca, onde é clara a rápida mobilização do fuste em relação à sua base. Na Figura 2.20(b) são mostradas três opções pela utilização de uma rigidez grande no elemento de interface, uma rigidez baixa e sem o elemento de interface. Percebe-se que quando é utilizado um elemento de interface com baixa rigidez, os recalques são bem mais expressivos que os obtidos usando elementos com alta rigidez, ou mesmo sem elemento de interface. A Figura 2.20 (c) separa, no caso da rigidez mais baixa, os efeitos de ponta e fuste.

Figura 2.20 – Comportamento carga x recalque com aplicação de elementos de interface. (a) carregamento não drenado sem elementos de interface ao longo da superfície, (b) efeito da rigidez do elemento de interface aplicado, (c) elemento de interface aplicado com baixa rigidez. (modificado de Potts e Zdravkovic, 2001)



Apesar de pouco interferir no limite último de capacidade de carga, os elementos de interface podem ter grande influência sobre a rigidez do sistema total. Potts e Zdravkovic (2001) concluem que é preferível escolher entre elementos de interface com rigidez alta, embora ela possa levar a singularidades numéricas. Portanto, é preferível nesses casos, quando se aplica somente carregamento aplicado é somente o vertical, não usar elementos de interface.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DO PROGRAMA SoFIA PARA ANÁLISE DO RADIER ESTAQUEADO

O programa *Soil-Foundation Interaction Analysis*, cuja sigla é SoFIA, é um programa que foi inicialmente desenvolvido para o cálculo de radiers estaqueados e que utiliza metodologia híbrida. Na análise do programa, o radier estaqueado é dividido em duas partes: o radier e o sistema solo/estaca. Esse último será assim chamado, por se tratar de um meio elástico que possui rigidez calculada a partir da interação entre o meio solo e as estacas instaladas verticalmente nele.

O programa utiliza Método dos Elementos Finitos na discretização do radier em placas e calcula a interação do meio elástico solo com as estacas dentro do próprio programa SoFIA por meio de análises axissimétricas também em MEF, formando uma matriz de rigidez que é somada à rigidez do radier. Portanto, o programa SoFIA utiliza em toda sua metodologia elementos finitos.

O programa foi desenvolvido em linguagem orientada a objetos, com o intuito de facilitar a expansão da ferramenta sem comprometimento da estrutura original do programa, podendo acrescentar novos tipos de elementos finitos, novas análises e até mesmo outros tipos de fundações.

3.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS NO CÁLCULO DO RADIER ESTAQUEADO

A análise de um radier estaqueado requer que algumas hipóteses básicas sejam feitas, principalmente pelo fato de se tratar de uma ferramenta híbrida, que simplifica sua análise considerando o meio solo/estaca um meio elástico no qual o radier se apoia. Por isso, nessa análise foram considerados as seguintes hipóteses:

- A análise do radier estaqueado é feito no regime elástico linear, valendo então a hipótese da superposição dos efeitos do recalque das estacas e do solo;

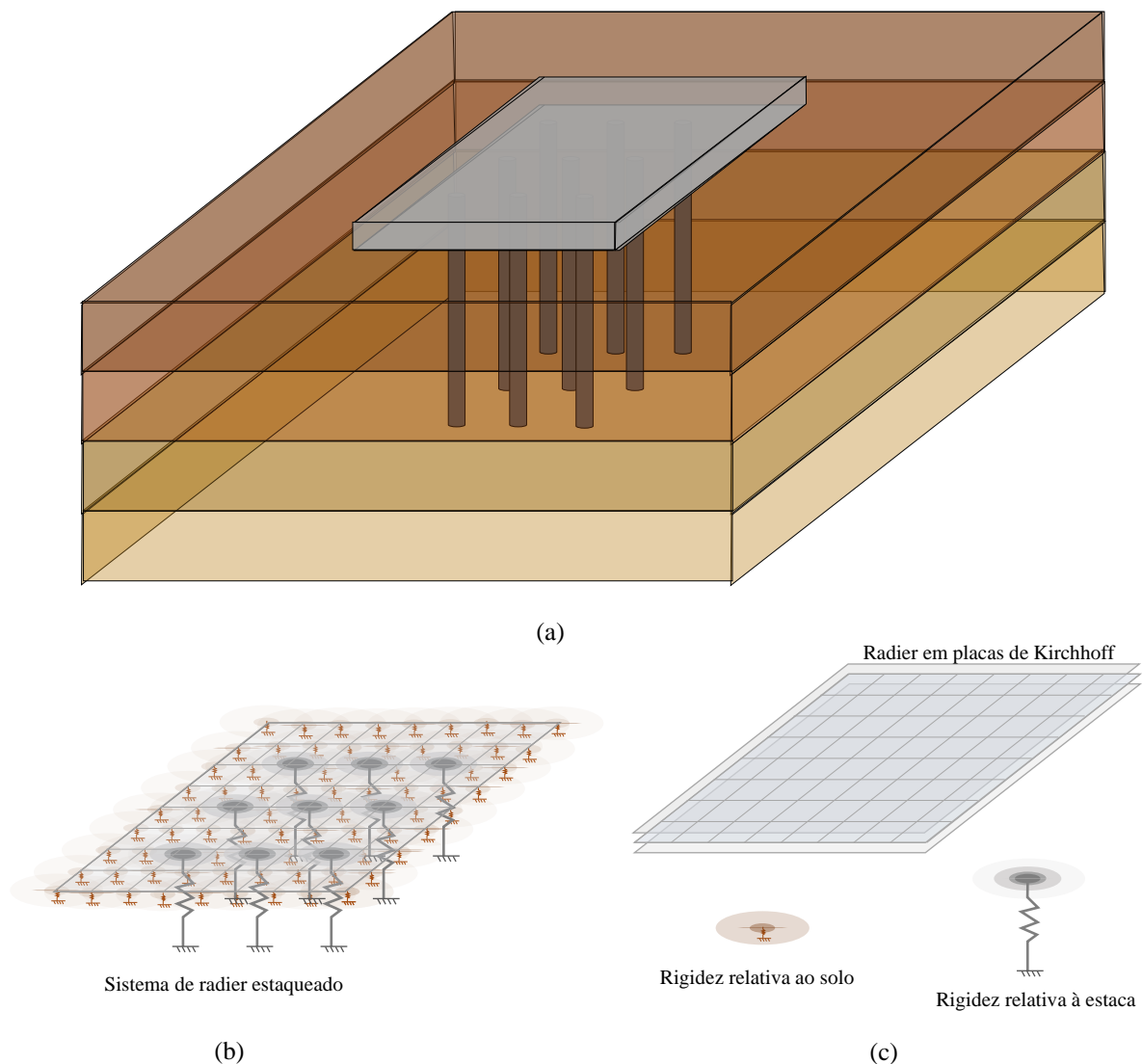
- O radier é representado por uma placa esbelta, seguindo as hipóteses de Kirchhoff para as estruturas do tipo;
- O deslocamento vertical em um ponto do radier em contato com o solo ou com uma estaca é medido pelo deslocamento vertical do ponto correspondente no plano médio do radier e é igual ao deslocamento da superfície do solo naquela localidade. Ou seja, as interfaces entre o radier e o conjunto solo/estacas estão perfeitamente ligadas e indissociáveis, independente da natureza dos esforços (tração ou compressão);
- O acréscimo de rigidez do solo e das estacas se dá apenas na direção correspondente ao deslocamento vertical. Ou seja, o solo e as estacas não são capazes de resistir a esforços horizontais e momentos fletores aplicados diretamente a eles;
- Uma estaca ou o conjunto delas contida em uma massa de solo se movimenta de forma semelhante à massa de solo ao seu redor, sendo que:
 - A presença de uma ou um conjunto de estacas não altera o comportamento do solo na suas proximidades, mantendo-se em regime linear e elástico;
 - O deslocamento da cabeça de uma estaca devido a aplicação vertical de uma força diretamente na superfície do solo adjacente a uma certa distância é equivalente ao deslocamento de um ponto do solo localizado à mesma distância, porém medido a profundidade de um terço do comprimento dessa estaca em um sistema onde é desconsiderada a existência da estaca. O fator de influência de um terço do comprimento é uma calibração de Poulos (1994a) em relação a métodos mais precisos;
 - O deslocamento de uma estaca devido à força aplicada em outra estaca a uma certa distância é medido pelo deslocamento da superfície solo a uma mesma distância em um sistema em que é desconsidera a existência da primeira estaca.

3.2 PROBLEMA RADIER ESTAQUEADO

O problema analisado pelo programa SoFIA trata de um radier estaqueado cujas propriedades geométricas e do material são definidas pelo usuário. Separadamente, são considerados os três elementos da fundação, que são mostrados na Figura 3.1(a): o radier, as estacas e o solo. O radier é analisado utilizando elementos finitos de placa de Kirchhoff. Esse radier, que pode conter regiões com espessuras e materiais diferentes, determina nos seus nós a posição onde abaixo se encontram solo ou estaca, mostrados na Figura 3.1(b).

O solo possui um perfil homogêneo e isotrópico na direção horizontal, mas que pode variar na direção vertical, dividido em camadas que podem ter diferentes espessuras e propriedades do material. Os dados de entrada do programa são fornecidos em sequência da superfície até a profundidade máxima. As estacas desse problema são consideradas instaladas verticalmente a partir da cota $z=0$, referente à cota da face inferior do radier, no perfil de solo e fazem parte do meio solo/estaca. É ilimitado o número de tipos de estacas utilizadas em cada problema, e cada tipo é definido pelas propriedades geométricas, como diâmetro e comprimento, além de propriedades do material. O meio solo/estaca, definido pela junção do solo às estacas posicionadas estrategicamente pelo projetista, é formado pela rigidez relativa a esses dois elementos como mostra a Figura 3.1(c).

Figura 3.1 – Sistema do radier estaqueado utilizado no programa SoFIA: (a) Situação de projeto, (b) Sistema adotado com molas interativas e (c) componentes do sistema



O perfil de solo e as estacas são considerados molas interativas, onde a relação de deformação de cada uma delas depende não somente de sua rigidez, mas da interação e da interferência de todos os outros elementos do meio solo/estaca. Dessa forma, o deslocamento vertical de uma única estaca, ou de um único ponto de aplicação do solo, representa uma interferência na rigidez de todos os outros elementos que é diminuída com a distância desse ponto de aplicação. Por isso não é correto afirmar que abaixo de cada nó do radier exista apenas uma mola de deformação linear. Ela faz parte de um sistema muito mais complexo, que interage com todos os elementos ali presentes. A formação da rigidez do meio solo será explicada em detalhes no item 3.3.3 deste capítulo.

O programa SoFIA em sua primeira versão, analisa todos os seus componentes linearmente, no regime elástico. Isso significa dizer, que o programa não considera ruptura de seus componentes, delegando à experiência e à intuição do projetista o carregamento máximo e o limite de ruptura dos elementos da fundação.

Dentre as possibilidades do programa SoFIA, destacam-se ainda:

1. Aplicação de carregamento vertical distribuído nos elementos situados no plano médio do radier ou concentrado nos nós, e momento em x e em y aplicados nos nós, resultantes do produto vetorial, ou seja, momento M_x na direção x e momento M_y na direção y ;
2. O elemento utilizado no radier é um elemento isoparamétrico que permite a utilização de elementos de face inclinada, eliminando a necessidade de aplicação de elementos com ângulos retos, e portanto a simplificação em “escada” das faces inclinadas no radier, como mostra a Figura 3.2. Além disso, os elementos permitem o alinhamento de 3 nós, formando elementos triangulares;
3. A aplicação da geometria da estaca no radier é definida pelo centro da estaca e o diâmetro dela. Porém a eventual passagem de outros nós no meio dela, oriundos do alinhamento de outros elementos não impede a análise do programa, como mostra a Figura 3.3. É necessário apenas indicar quais nós do radier têm sob ele uma estaca.

Figura 3.2 – Radier genérico com aplicação de arestas inclinadas no radier.

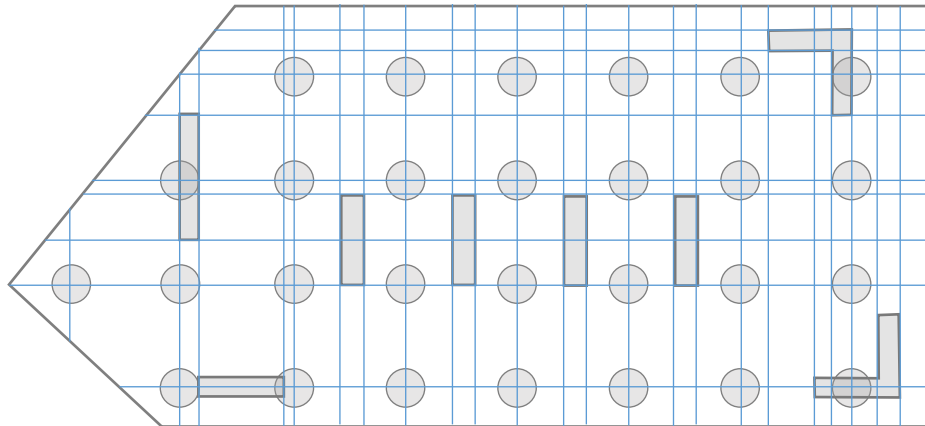
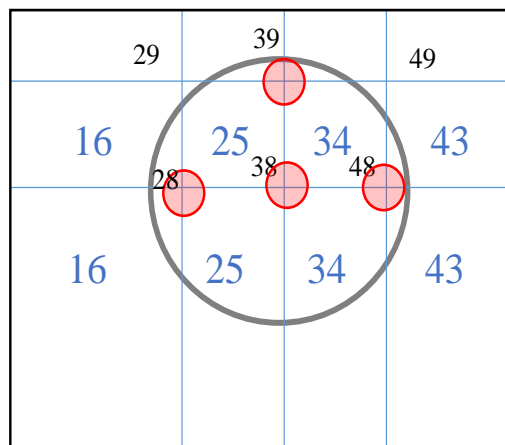


Figura 3.3 – Nós dentro da Estaca

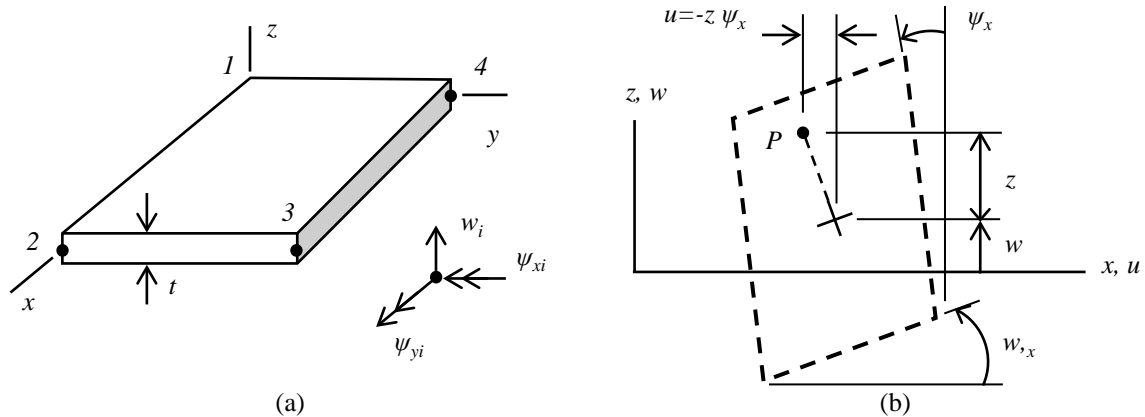


3.2.1 O Radier

O radier analisado no programa SoFIA é discretizado em elementos de placa de Kirchhoff isoparamétricos de quatro nós. A utilização de elementos de placa se justifica pelo problema considera espessura, ou seja a altura do radier, bem menor que o comprimento de suas laterais, e a modelagem na terceira dimensão (a altura) poderia causar problemas relacionados ao mal condicionamento de cisalhamento, que só podem ser evitados com uma discretização maior em altura, criando mais graus de liberdade. (COOK, *et al.*, 2007).

As formulações de placas utilizam uma superfície média, onde são necessárias somente as coordenadas da superfície do radier (em x e em y) e na formulação da placa de Kirchhoff não são consideradas as deformações geradas por cisalhamento.

Figura 3.4 – Elemento Placa de Kirchhoff com quatro nós mostrando os: (a) graus de liberdade e (b) deformação da placa olhando em y (adaptado de Cook *et. al* (2007))



Atualmente existem duas principais teorias de placas que são a de Kirchhoff e de Mindlin. A maior diferença entre as duas é que a teoria de Mindlin é adequada para placas com espessuras maiores, onde os efeitos do cisalhamentos são considerados. Na formulação adotada pelo programa SoFIA, como foram desconsiderados esses efeitos, é portanto utilizada a teoria de Kirchhoff.

3.2.2 Sistema solo/estaca

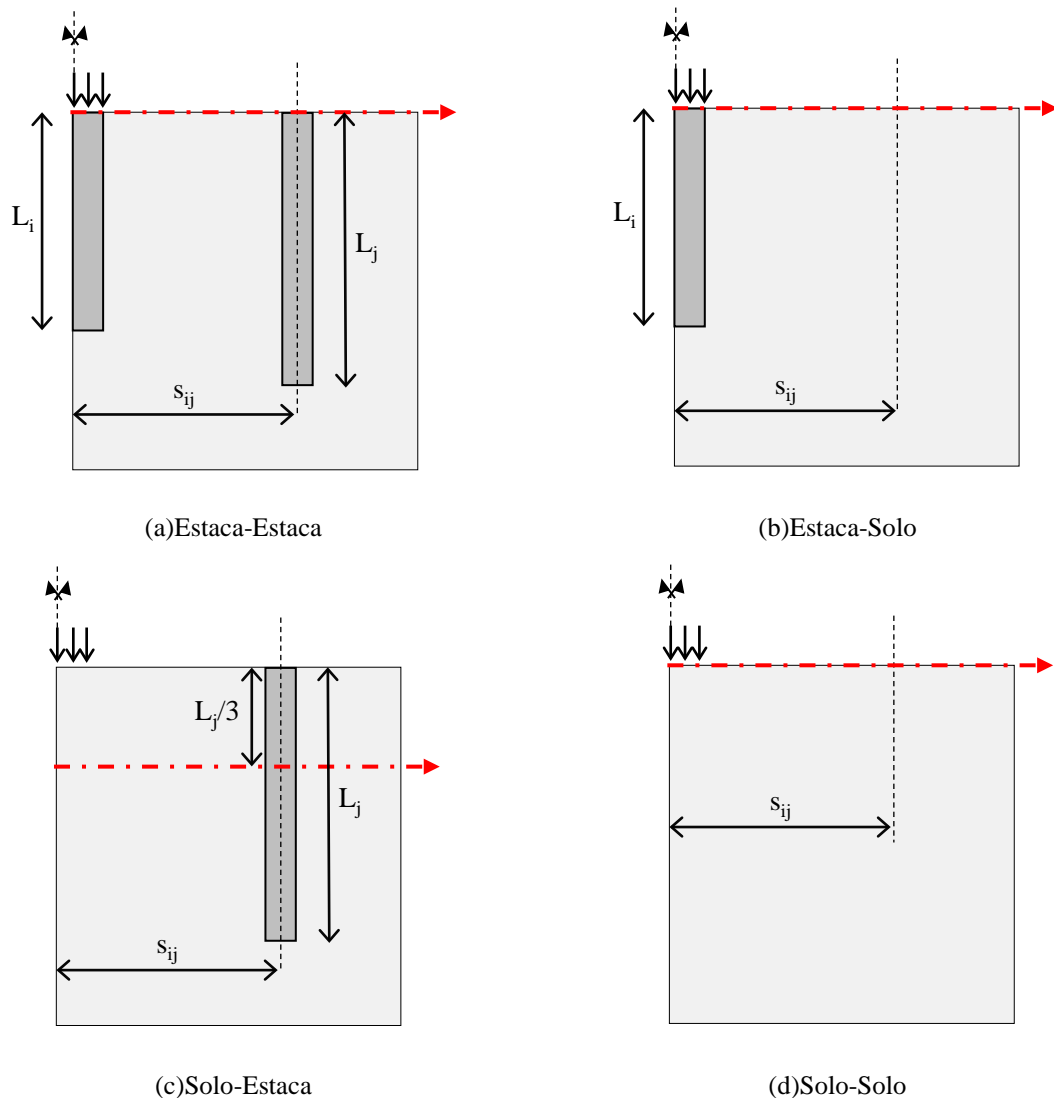
O conjunto do perfil de solo juntamente de estacas foi nesse texto tratado como meio solo/estaca, por se tratar da superposição da interação desses elementos que formam a base elástica na qual o radier se apoia. As relações de interações, primeiramente apontadas por Hain e Lee (1978) na Figura 2.15, foram calculadas no próprio programa através da análise axissimétrica do solo e da estaca.

No programa SoFIA são consideradas as análises do perfil de solo e de todos os tipos de estacas que forem usadas no radier. Para cada uma das análises são mensuradas as interferências em outro elemento de solo ou estaca. Essa interferência é medida pelos deslocamentos provocados no meio quando são aplicados carregamentos equivalentes unitários no solo e na estaca.

Quando o carregamento é aplicado numa estaca, os recalques provocados em um ponto de solo são obtidos na própria superfície do sistema axissimétrico, como mostra a Figura 3.5(b). Quando essa interação é com outra estaca, uma estaca é considerada fictícia nesse meio, posicionada em algum ponto na superfície do domínio horizontal, como mostra a Figura 3.5(a).

Já quando o carregamento é aplicado diretamente no solo, de forma distribuída, os recalques provocados em um outro elemento de solo são obtidos na superfície, como mostra em a Figura 3.5(d), e quando a influência de um solo carregado está sobre outra estaca, também considerada fictícia no meio axissimétrico, esses recalques são obtidos a um terço da altura de cada estaca fictícia, seja elas quanto forem, mostrada na a Figura 3.5(c). Essa consideração de resultados a um terço é mencionada por Poulos (1994a), que destaca que os recalques de um solo provocado numa estaca são relativos aos recalques num solo a um terço da altura da estaca.

Figura 3.5 – Interações usadas no programa SoFIA, destacando em linha vermelha o posicionamento dos recalques obtidos para cada tipo de interação no raio de aplicação do carregamento



Cada ponto sobre o radier, seja ele ou estaca, influencia todos os outros pontos, sejam eles estacas ou solo, e também é influenciado por todos os outros pontos. O somatório de todas essas

influências mencionadas dão origem à matriz f de flexibilidade, cuja a inversa é a matriz de rigidez $K_{S/E}$ do meio solo/estaca.

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO À ANÁLISE DE RADIER ESTAQUEADO

O Método dos Elementos Finitos é atualmente uma das análises numéricas mais utilizadas para a solução de problemas em engenharia. Sua aplicabilidade e versatilidade o torna uma das metodologias preferidas, pois além de atender diferentes tipos de problema como transferência de calor, análise de tensões, campo magnético, dentre outros, é possível se aplicar qualquer geometria, condições de contorno e materiais, além de poder combinar elementos de diferentes descrições matemáticas e aproximar as soluções apenas refinando a malha (COOK, *et al.*, 2007).

Em problemas geotécnicos, no entanto, a aplicação de soluções em MEF só começou a ser amplamente usada recentemente, devido à gama da complexidade de determinados parâmetros que fazem parte da engenharia geotécnica. (POTTS e ZDRAVKOVIC, 1999). Além disso, a aplicação de MEF tem sido acompanhada da evolução das máquinas computacionais, que permitem a cada geração de processadores, eficiência na solução de problemas mais refinados e completos.

Partindo das hipóteses da seção 3.1, neste trabalho o radier estaqueado foi analisado como uma placa, calculada por meio do método dos elementos finitos, apoiada sobre uma base elástica. O acréscimo de rigidez ao sistema referente à base elástica se dá somente nos graus de liberdade referentes ao deslocamento vertical e é calculado por meio de uma matriz de flexibilidade. Por sua vez, os coeficiente de flexibilidade dessa matriz são retirados de análises axissimétricas também realizadas via MEF. Neste contexto, a placa é a representação do radier e a base elástica representa o conjunto solo/estacas. O sistema final resultante dessa análise é dado pela equação (3.1).

$$(\mathbf{K}_R + \mathbf{K}_{S/E})\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3.1)$$

onde:

\mathbf{K}_R = matriz de rigidez do radier;

$\mathbf{K}_{S/E}$ = matriz de rigidez do sistema solo/estaca;

\mathbf{U} = vetor de deslocamentos;

\mathbf{F} = vetor de força.

3.3.1 Elemento Finito PKQ4ISO

Utilizou-se no cálculo do radier elementos PKQ4ISO baseados na teoria de Kirchhoff para placas esbeltas. O elemento possui quatro nós e três graus de liberdade por nó, sendo um deslocamento transversal e duas rotações. Ressalta-se que o programa SoFIA não trabalha com carregamentos horizontais, apenas carregamentos verticais e momentos e supõe-se que as direções das linhas da espessura permaneçam retas.

O primeiro passo da formulação é a definição da geometria da placa. São coletados então dos dados de entrada o conjunto c de coordenadas dos nós do elemento finito, as coordenadas x e y em qualquer ponto no interior do elemento finito são calculadas de acordo com a seguinte equação (3.2).

$$c = [x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4]^T \quad (3.2)$$

onde:

x_1, x_2, x_3, x_4 = são as coordenadas em x dos nós 1, 2, 3 e 4;

y_1, y_2, y_3, y_4 = são as coordenadas em y dos nós 1, 2, 3 e 4.

É ainda definido o vetor com as funções de interpolação para o caso de elementos isoparamétricos pela equação (3.3).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde,

N_1, N_2, N_3 e N_4 = funções de forma que dependem das coordenadas paramétricas ξ e η .

Essas funções são definidas na equação (3.4).

Como a função na equação (3.6) é descrita por coordenadas paramétricas, a determinação das variáveis ψ_x e ψ_y para aplicação das condições de contorno deve ser feita aplicando a regra da cadeia, de acordo com a equação (3.7)

$$\begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} w_{,\xi} \\ w_{,\eta} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde:

\mathbf{J} = é a matriz de transformação Jacobiana dada pela equação (3.8);

$w_{,\xi}$ e $w_{,\eta}$ = são as distorções na superfície da placa para o caso de coordenadas paramétricas;

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Os momentos fletores atuantes na placa são função das curvaturas da placa – $\psi_{x,x}$, $\psi_{x,y}$, $\psi_{y,x}$, $\psi_{y,y}$ – e da rigidez de flexão \mathbf{D} de acordo com a equação (3.9).

$$\mathbf{M} = \mathbf{Dk}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & \nu D & 0 \\ \nu D & D & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)D}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{x,x} \\ \psi_{y,y} \\ \psi_{x,y} + \psi_{y,x} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

onde:

D = é a matriz constitutiva definida na equação (3.10);

\mathbf{M} = é o vetor de momentos fletores;

\mathbf{K} = é o vetor de curvaturas;

M_x e M_y = são os momentos fletores na direção x e y , respectivamente;

M_{xy} = é o momento torsor.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.10)$$

O cálculo das curvaturas também deve ser efetuado respeitando a regra da cadeia, o que resulta na equação (3.11).

$$\begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_{x,x} \\ \psi_{x,y} \\ \psi_{y,x} \\ \psi_{y,y} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \psi_\xi \\ \psi_\eta \\ \psi_{\xi,\xi} \\ \psi_{\xi,\eta} \\ \psi_{\eta,\xi} \\ \psi_{\eta,\eta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

onde:

\mathbf{H} = é uma matriz de transformação das curvaturas, dada pela equação (3.12).

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{,\xi}^2 & x_{,\xi}y_{,\xi} & x_{,\xi}y_{,\xi} & y_{,\xi}^2 \\ x_{,\xi\eta} & y_{,\xi\eta} & x_{,\xi}x_{,\eta} & x_{,\xi}y_{,\eta} & x_{,\eta}y_{,\xi} & y_{,\xi}y_{,\eta} \\ x_{,\xi\eta} & y_{,\xi\eta} & x_{,\xi}x_{,\eta} & x_{,\eta}y_{,\xi} & x_{,\xi}y_{,\eta} & y_{,\xi}y_{,\eta} \\ 0 & 0 & x_{,\eta}^2 & x_{,\eta}y_{,\eta} & x_{,\eta}y_{,\eta} & y_{,\eta}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.12)$$

Uma matriz auxiliar pode ser utilizada para a determinação do vetor de curvaturas em função da equação (3.11), o que resulta na equação (3.13).

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \psi_{x,y} \\ \psi_{y,x} \\ \psi_{x,y} + \psi_{y,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{H} \begin{bmatrix} \psi_\xi \\ \psi_\eta \\ \psi_{\xi,\xi} \\ \psi_{\xi,\eta} \\ \psi_{\eta,\xi} \\ \psi_{\eta,\eta} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Isolando os deslocamentos nodais do vetor de curvatura é possível chegar na seguinte expressão da equação (3.14).

$$\mathbf{K} = \mathbf{Bd} \quad (3.14)$$

onde:

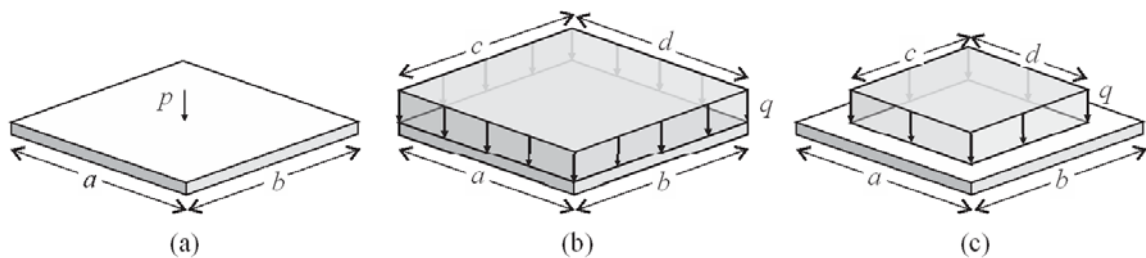
\mathbf{B} = é a matriz cinemática.

Finalmente, a matriz de rigidez do elemento finito PKQ4ISO é dada pela equação (3.15). O método da quadratura de Gauss foi utilizado para o cálculo da integral.

$$\mathbf{k} = \int_A \mathbf{B}^t \mathbf{D} \mathbf{B} dA = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \det(\mathbf{J}) \mathbf{B}^t \mathbf{D} \mathbf{B} d\xi d\eta \quad (3.15)$$

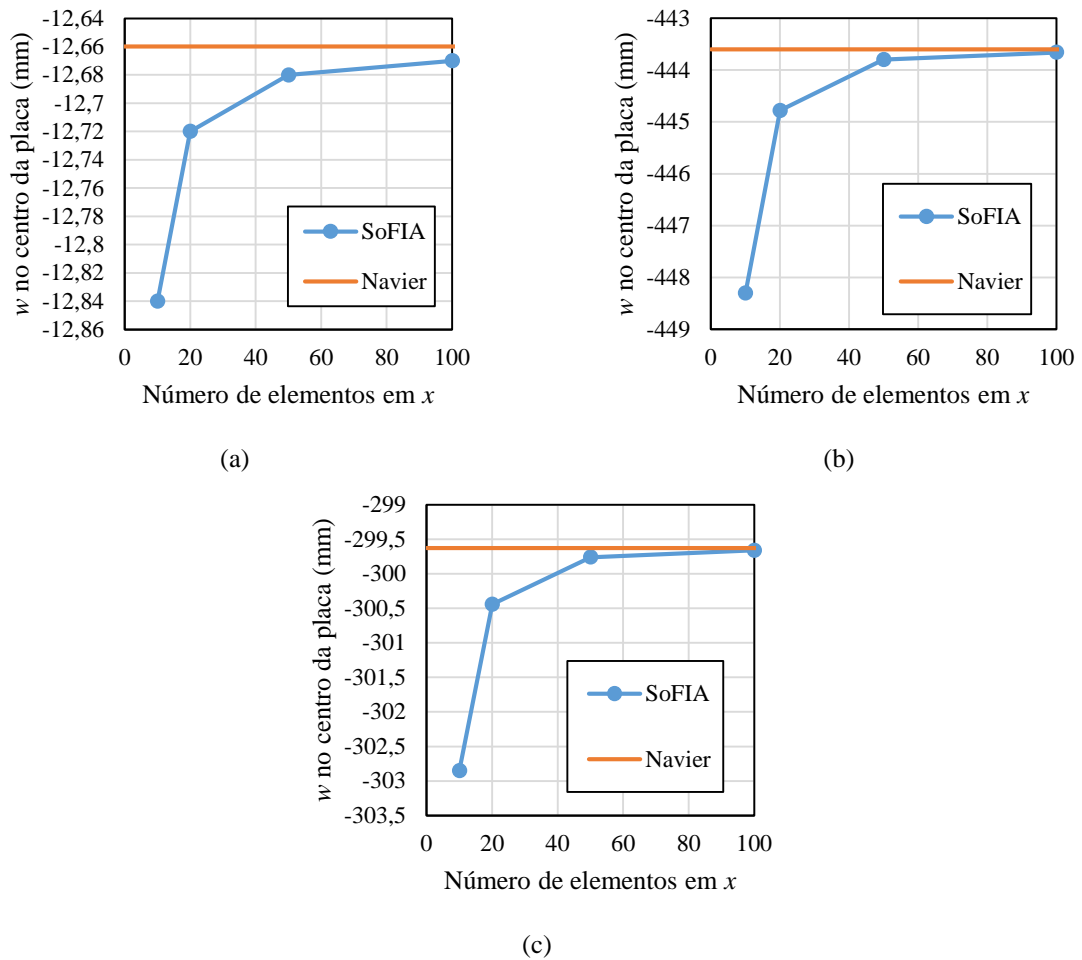
Para a validação do elemento finito PKQ4ISO, foi feita uma comparação dos resultados encontrados via MEF com os resultados encontrados pela solução analítica de Navier para placas simplesmente apoiadas nas quatro bordas (TIMOSHENKO, 1964). Foram realizadas três análises, conforme a Figura 3.7: a primeira para uma placa submetida a um carregamento nodal aplicado no meio da placa, na Figura 3.7(a); a segunda para uma placa submetida a um carregamento uniformemente distribuído em toda a placa, na Figura 3.7 (b); e por último analisou-se uma placa com um carregamento distribuído em apenas parte dela Figura 3.7 (c). A placa possui dimensões de 10x10x0,1m. O módulo de elasticidade de 20GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. Os carregamento distribuído é de 20kN/m² e o carregamento pontual de 20kN.

Figura 3.7 – Esquema dos carregamentos na placa: (a) Carga pontual, (b) Carga distribuída em toda a placa, e (c) Carga distribuída numa área.



Primeiramente foi realizado um estudo de convergência da malha para as três análises, conforme a Figura 3.8. Observa-se mesmo para uma malha de 10x10 a solução já é bem próxima da solução analítica e a medida que a malha é refinada, as soluções rapidamente convergem para a solução analítica de Navier. A partir dessa observação de convergência de malha, concluiu-se que a formulação do elemento PkQ4ISO está correta.

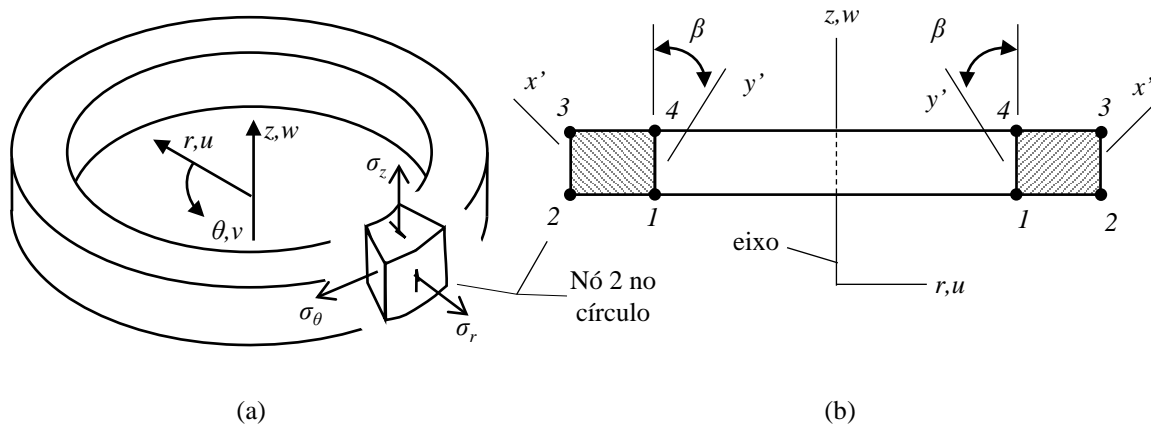
Figura 3.8 – Validação do elemento PKQ4ISO com a solução de Navier: (a) Carregamento Pontual, (b) Carga distribuída em toda a placa e (c) Carga distribuída numa área.



3.3.2 Elemento Finito AXIQ4

Para obter as interações entre estacas e solo foi utilizada uma análise axissimétrica, já que as condições de carregamento vertical reproduzida no sistema solo/estaca, estacas instaladas verticalmente e solo estratificado apenas horizontalmente permitiam que cada sistema fosse analisado de forma axissimétrica, diminuindo número de nós e graus de liberdade. Nesse problema foram utilizados elementos AXIQ4 que possuem quatro nós e são isoparamétricos, possibilitando a utilização de faces inclinadas. Nesse elemento, cuja geometria é ilustrada na Figura 3.9, os carregamentos podem ser distribuído nas faces e pontual aplicado nos nós.

Figura 3.9 - Elemento axissimétrico com quatro nós: (a) tensões associadas ao carregamento axissimétrico e (b) elementos hachurados em um material ortotrópico com eixos x' , y' e θ (COOK, *et al.*, 2007)



As coordenadas e os deslocamentos dos nós de cada elemento são definidos pelas equações respectivamente em (3.16) e (3.17).

$$\mathbf{c} = [r_1, z_1, r_2, z_2, r_3, z_3, r_4, z_4]^T \quad (3.16)$$

onde:

r_1, r_2, r_3, r_4 = são as coordenadas no raio r dos nós 1, 2, 3 e 4;

z_1, z_2, z_3, z_4 = são as coordenadas em z dos nós 1, 2, 3 e 4.

$$\mathbf{d} = [u_1, w_1, u_2, w_2, u_3, w_3, u_4, w_4]^T \quad (3.17)$$

onde:

u_1, u_2, u_3, u_4 = são os deslocamentos no raio r dos nós 1, 2, 3 e 4;

w_1, w_2, w_3, w_4 = são os deslocamentos em z dos nós 1, 2, 3 e 4.

São ainda definidas as funções de forma como na equação (3.18) e (3.19).

$$\begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \mathbf{c} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \mathbf{d} \quad (3.19)$$

onde,

N_1, N_2, N_3 e N_4 = funções de forma que dependem das coordenadas paramétricas ξ e η .

Da mesma forma como foi definido para o elemento PKQ4ISO na seção anterior, a matriz jacobiana e matriz de transformação são definidas pelas Equações respectivamente em (3.20) e (3.21).

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{11} & J_{12} & 0 \\ 0 & 0 & J_{21} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.21)$$

Os deslocamentos voltando para os eixos do sistema em r e z , são calculados pela equação (3.22) e as deformações pela equação(3.23).

$$\begin{bmatrix} u_{,r} \\ u_{,z} \\ w_{,r} \\ w_{,z} \\ u/r \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u_{,\xi} \\ u_{,\eta} \\ w_{,\xi} \\ w_{,\eta} \\ u/r \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{H} \begin{bmatrix} u_{,\xi} \\ u_{,\eta} \\ w_{,\xi} \\ w_{,\eta} \\ u/r \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

onde:

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ = deformações em r, z e θ respectivamente;

γ_{zr} = rotações no plano zr .

ou ainda, a equação dos deslocamentos nodais em evidência utilizando a matriz cinemática é escrita pela equação (3.12).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{Bd} \quad (3.24)$$

onde:

\mathbf{B} = é a matriz cinemática.

As tensões são definidas na equação (3.25).

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.25)$$

onde:

$\boldsymbol{\sigma}$ = vetor de tensões;

\mathbf{E} = matriz constitutiva definida pela equação (3.26), (3.27) e (3.28);

$\boldsymbol{\varepsilon}$ = vetor de deslocamentos;

$$\mathbf{E} = \frac{(1+\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & f & f & 0 \\ f & 1 & f & 0 \\ f & f & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$f = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (3.27)$$

$$g = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (3.28)$$

Por fim, a matriz de rigidez do elemento é definida pela equação (3.29).

$$\mathbf{K} = \int_A \int_{-\pi}^{\pi} \mathbf{B}^t \mathbf{D} \mathbf{B} r d\theta dA = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \det(\mathbf{J}) \mathbf{B}^t \mathbf{D} \mathbf{B} 2\pi r d\theta d\xi d\eta \quad (3.29)$$

3.3.3 Cálculo da matriz de rigidez da base elástica por meio de uma matriz de flexibilidade

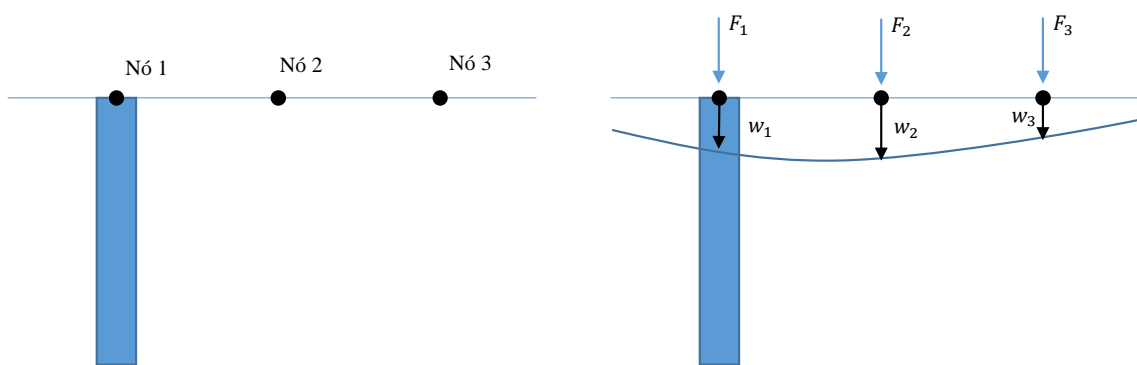
Para obter a matriz do sistema solo/estaca foi necessário fazer a superposição dos efeitos do deslocamento provocado por cada um dos elementos, seja ele estaca ou solo, em todos os outros elementos abaixo do radier, como já explicado anteriormente na seção Sistema solo/estaca 3.2.2.

A Figura 3.5 dessa mesma seção mostra como foram obtidos os recalques para cada uma das interações listadas (estaca-estaca, estaca-solo, solo-estaca, solo-solo).

Para uma melhor compreensão de como funciona a superposição dos efeitos de recalque, a seguir será mostrada uma analogia das interações em questão e o método das forças.

Seja um sistema composto por três nós e apresentado na Figura 3.10. Neste sistema estão representados pontos na superfície do conjunto solo/estaca que estão em contato com o radier. Cada nó possui um grau de liberdade, o deslocamento vertical. Deseja-se conhecer os deslocamentos w_1 , w_2 e w_3 ao se aplicar as forças F_1 , F_2 e F_3 .

Figura 3.10 – Sistema de três nós com estacas com forças aplicadas e deformações

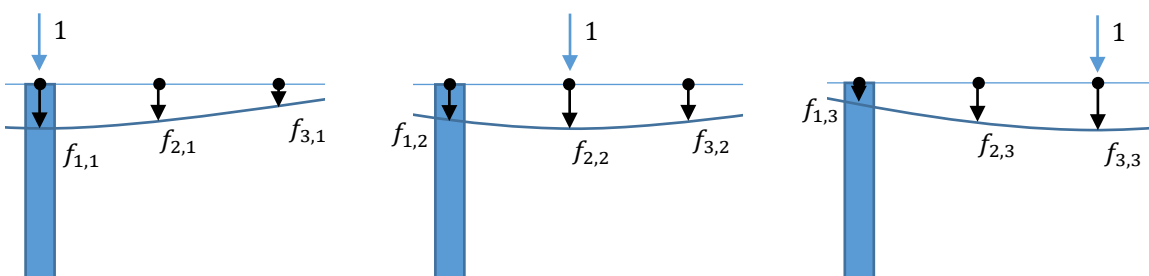


De forma análoga ao método das forças, é possível descobrir os deslocamentos w_1 , w_2 e w_3 pelo princípio da superposição de efeitos, conforme a equação (3.30). Para o cálculo dos coeficientes de flexibilidade $f_{i,j}$, efetua-se três análises distintas, uma para cada nó. Em cada uma dessas análises aplica-se uma força unitária no nó correspondente. Os coeficientes de flexibilidade são numericamente iguais aos deslocamentos resultantes, conforme ilustra a

Figura 3.11.

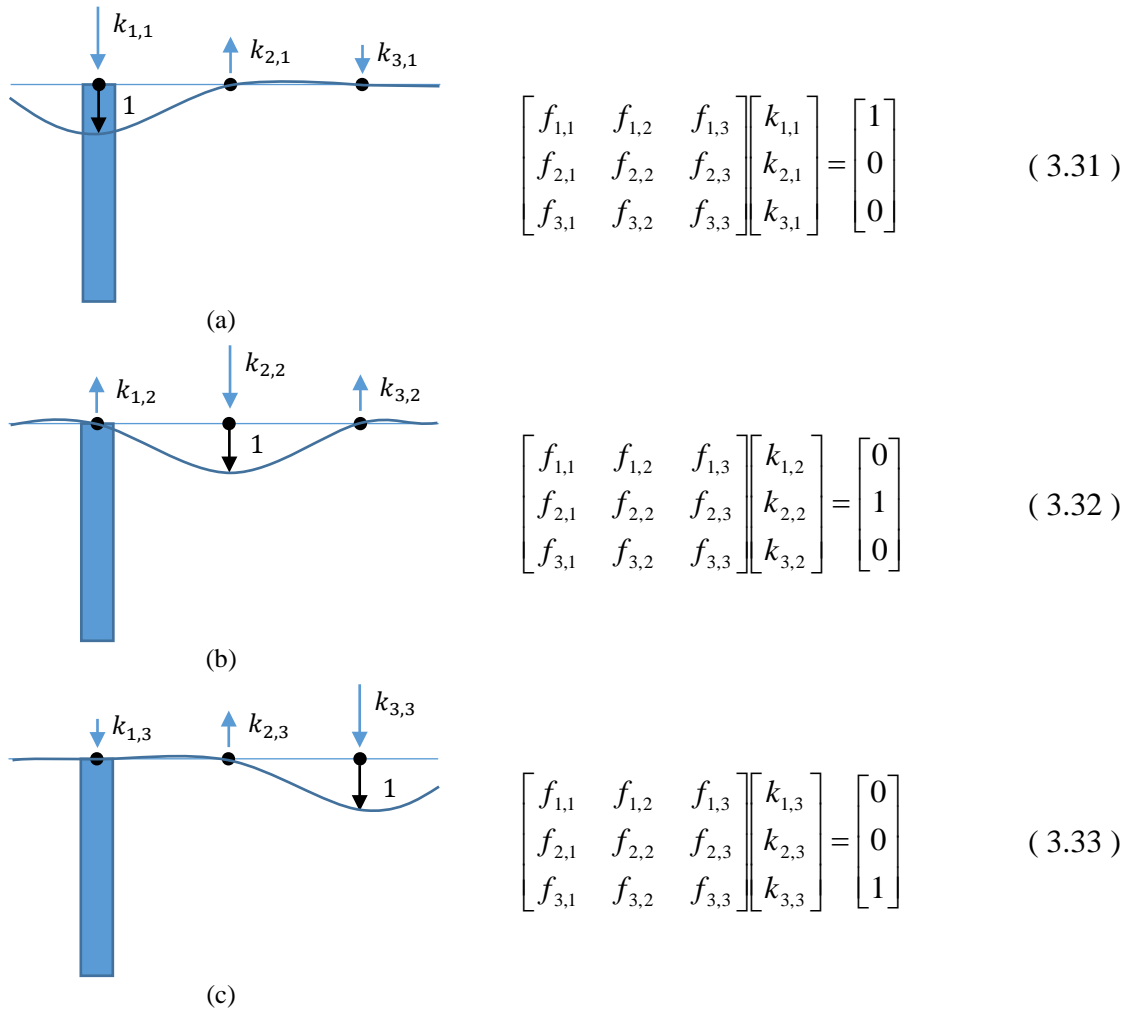
$$\begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & f_{1,3} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & f_{2,3} \\ f_{3,1} & f_{3,2} & f_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Figura 3.11 – Deslocamentos dos nós com aplicação de forças unitárias em cada nó



Assim como no método dos deslocamentos, é possível calcular a matriz de rigidez aplicando deslocamentos unitários e impedindo os demais deslocamentos, conforme ilustra a Figura 3.12. Os coeficientes de rigidez são numericamente iguais às forças resultantes. Ao lado de cada uma das figuras são apresentadas as equações (3.31), (3.32) e (3.33) para os nós 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 3.12 – Deslocamentos unitários aplicados juntamente com as equações em: (a) nó 1, (b) nó 2 e (c) nó 3.



Agrupando os três sistemas acima, tem-se o sistema apresentado na equação (3.34).

$$\begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & f_{1,3} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & f_{2,3} \\ f_{3,1} & f_{3,2} & f_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} \\ k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

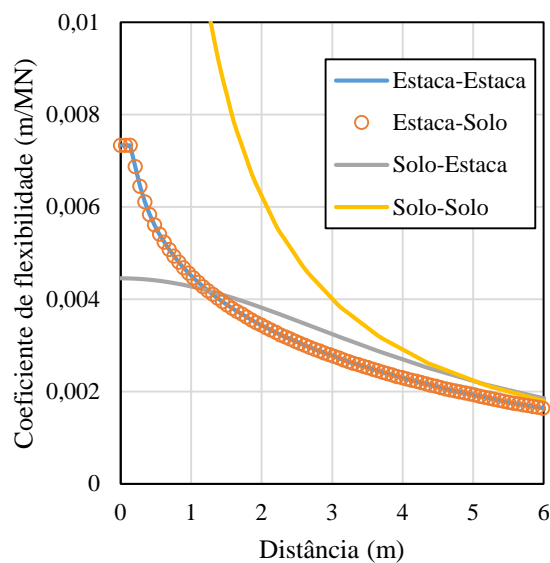
Conclui-se que a matriz de rigidez do sistema proposto na Figura 3.12 é numericamente igual à inversa da matriz de flexibilidade, de acordo com a equação (3.35).

$$\mathbf{f}_{S/E} = \mathbf{K}_{S/E}^{-1} \quad (3.35)$$

Essa metodologia foi utilizada para o cálculo do acréscimo de rigidez da base elástica na matriz de rigidez global do radier estaqueado. Os coeficientes de flexibilidades são calculados por meio de análises axissimétricas mostradas na Figura 3.5, extraindo dessas soluções os deslocamentos que são gerados dos quatro tipos de interações entre nós que representam um ponto na superfície do solo ou na cabeça da estaca.

Desta forma, os coeficientes de flexibilidade dependem de duas coisas, o tipo de interação e a distância entre os nós. O gráfico da Figura 3.13 mostra os coeficientes de flexibilidade para as quatro interações entre uma estaca e o solo. Nesse exemplo, a estaca tem 15m de profundidade e 0,3m de diâmetro. O módulo de elasticidade da estaca é 20GPa e o coeficiente de Poisson 0,2. O perfil do solo é formado por uma camada de 65m cujo módulo de elasticidade é de 20MPa e o coeficiente de Poisson 0,4. Tanto o carregamento do solo como o da estaca são distribuídos e equivalentes a 1kN de carregamento pontual.

Figura 3.13 – Comparação dos recalques promovidos entre: estaca-estaca, estaca-solo, solo-estaca, solo-solo



Adiante, no CAPÍTULO 4 com as aplicações da ferramenta numérica SoFIA são apresentadas algumas análises e observações sobre as interações no sistema axissimétrico, considerando o elemento estaca e solo com aplicações de carregamentos pontuais e concentrados.

3.4 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

O processo de desenvolvimento do programa SoFIA decorreu em algumas etapas importantes. Essas etapas foram desde o aprendizado da linguagem de programação até alguns testes preliminares de funcionamento da ferramenta. Dentre elas estão:

- Aprendizado da linguagem orientada em C#, com divisão do problema em Método dos Elementos Finitos em na estrutura de programação para melhor aproveitamento da linguagem;
- Montagem de uma biblioteca matemática com soluções matemáticas envolvendo matrizes e vetores;
- Montagem de rotinas básicas do funcionamento do MEF para qualquer tipo de elemento, como por exemplo montagem da matriz com graus de liberdade dos elementos;
- Montagem de rotinas de saída de dados em texto e para programa de plotagem de gráficos;
- Montagem da rotina de análise para radier estaqueado, utilizando duas partes principais de análise: radier e sistema solo/estaca.

A seguir estão mostradas as etapas da execução do programa para qualquer radier estaqueado.

3.4.1 Estruturação do Programa

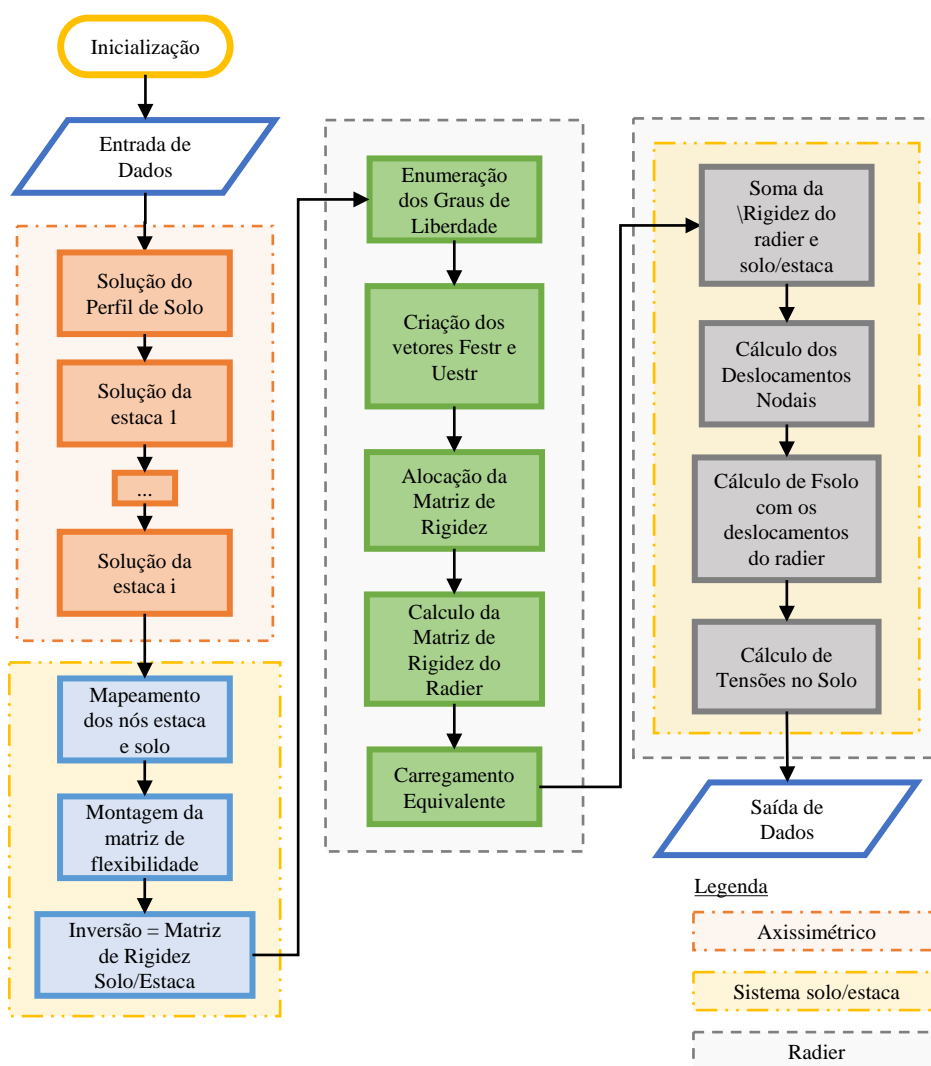
O programa SoFIA utiliza em todas as etapas de sua análise o Método dos Elementos Finitos. Basicamente, a análise se divide em duas etapas: obtenção da matriz de rigidez do meio de solo e estacas através das análises axissimétricas para solo e o número de estacas que tiver o problema; e a análise do radier estaqueado com as matrizes de rigidez do radier e do meio solo/estaca somados.

A sequência com as principais etapas do programa estão resumidas na Figura 3.14. Nela, são mostradas a sequência:

- Inicialização com entrada de dados;
- Solução das malhas com elementos axissimétricos para solo e estacas;

- Montagem da matriz de flexibilidade mapeando todos os nós do radier onde existem nós com solo e nós com estacas;
- Montagem da matriz de rigidez do radier, passando pela enumeração dos graus de liberdade e montagem do vetor de carregamento equivalente;
- Solução do sistema do radier com o meio solo/estaca, obtendo deslocamentos, forças e tensões no radier e no solo;
- Saída de dados.

Figura 3.14 – Fluxograma básico do programa SoFIA



Cada uma das etapas é mais detalhadas na sequência desse texto.

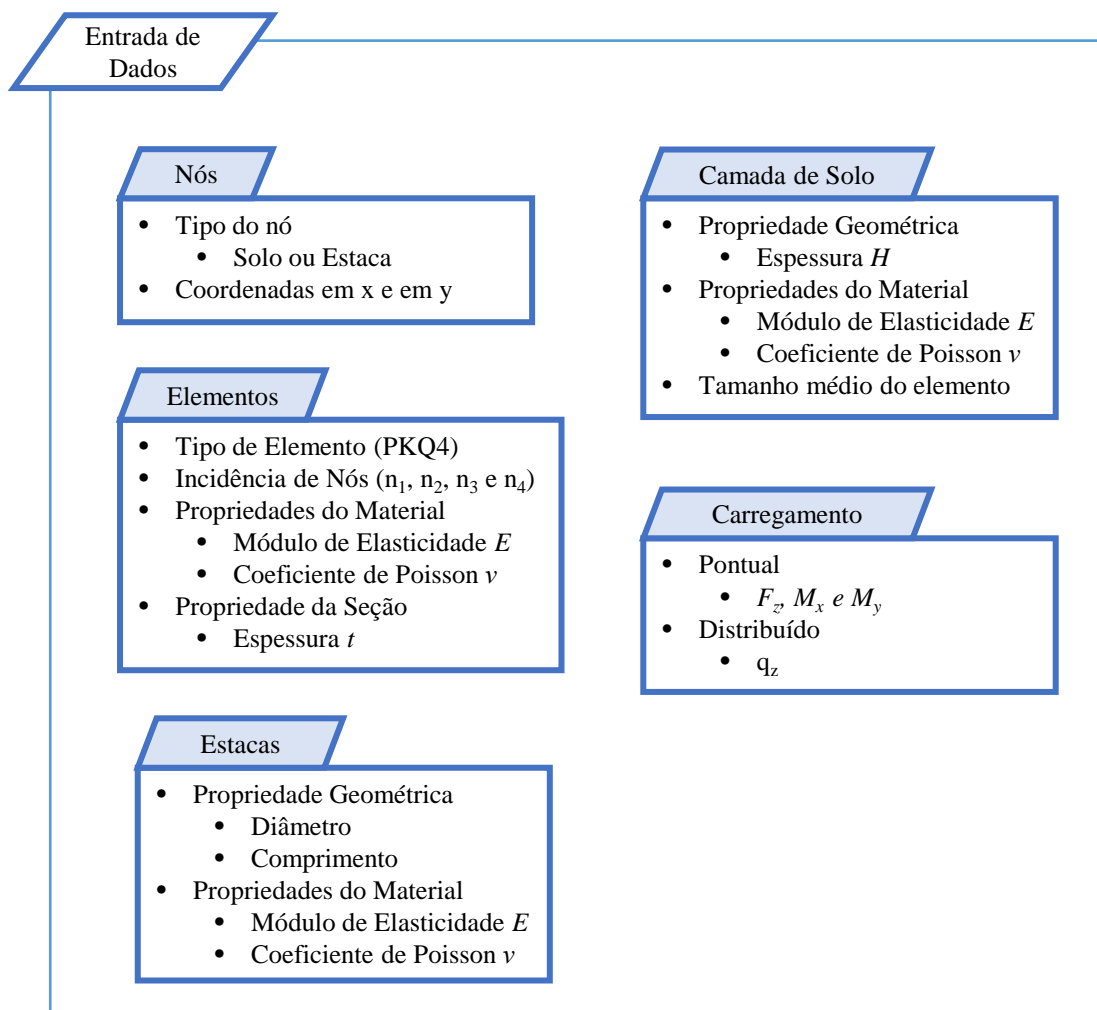
3.4.2 Entrada de Dados

A entrada de dados para um radier estaqueado deve conter informações sobre a geometria e materiais dos elementos envolvidos no processo: o radier, as estacas e o solo.

Essas informações são alocadas em matrizes, vetores e listas. Esse último faz parte de um recurso da linguagem orientada a objetos que possibilita o armazenamento de elementos, sejam eles variáveis inteiras ou mesmo vetores.

O programa SoFIA ainda não dispõe de gerador de malha automático, portanto é necessário entrar com a geometria do radier, apontando nós e elementos. A entrada de dados completa é mostrada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Entrada de dados do programa SoFIA



Na entrada de dados é preciso entrar além das coordenadas do nó em x e em y , o tipo do nó do radier, se está apoiado sobre estaca ou um solo. Nos elementos é necessário entrar o tipo de

elemento, no caso um elemento PKQ4ISO, sua incidência de nós, ou seja, quais os nós compõem aquele determinando elemento, e suas propriedades de material e espessura.

Os tipos de estacas são identificadas por um índice, têm propriedade geométrica e de material, e juntamente são fornecidas suas posições no radier, identificando os nós a qual pertencem.

As camadas de solo são fornecidas na sua sequência da superfície com a profundidade, com suas características físicas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e espessura de cada uma. Além disso, o usuário deve fornecer um tamanho médio de elemento, para que seja feita a análise axissimétrica do perfil de solo. A escolha desse tamanho do elemento foi baseada num estudo de convergência de malha, apresentado logo a frente no CAPÍTULO 4, no subitem 4.1.1.1. Esse tamanho médio é uma média da lateral dos elementos utilizados no radier.

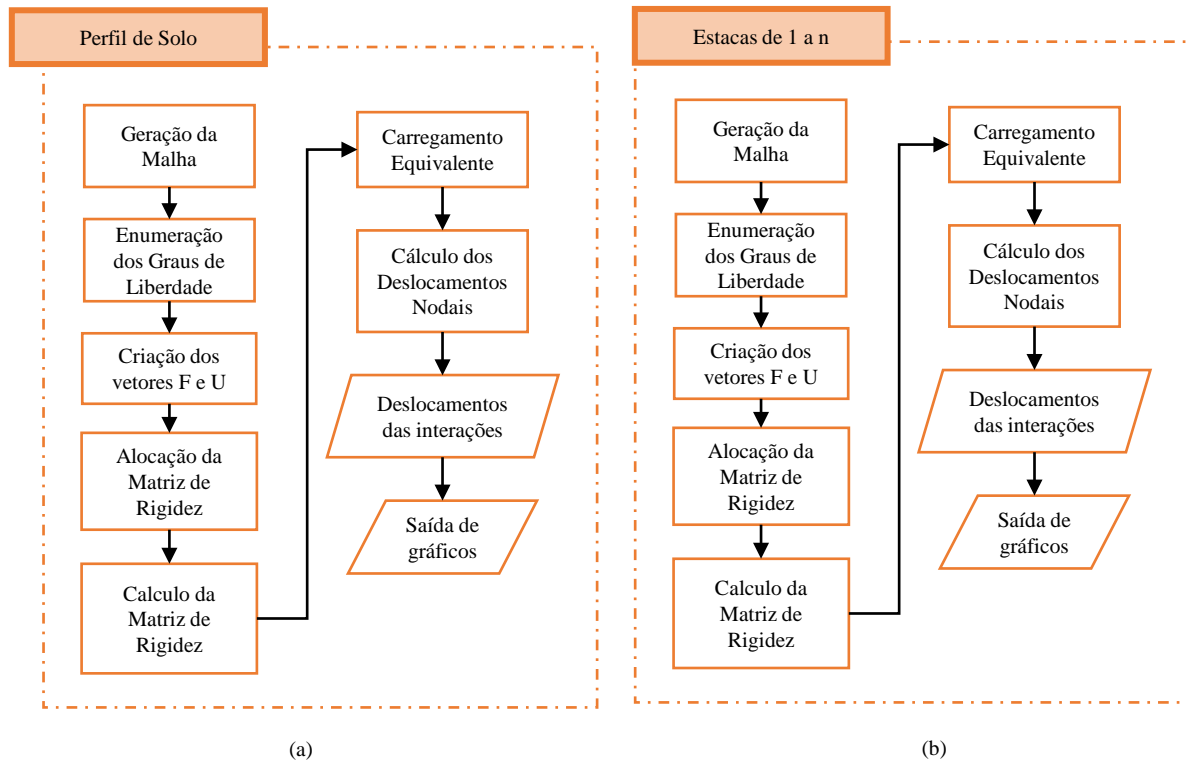
Por fim, são informados os dados de carregamento que podem ser tanto pontual como distribuído. O carregamento pontual deve identificar o nó de aplicação no radier, e pode ser tanto o carregamento vertical, F_z , como os momentos aplicados nas duas direções, M_x e M_y . O carregamento distribuído é somente vertical, q_z , e deve identificar os elementos em que são aplicados.

3.4.3 Solução dos Sistemas Axissimétricos

A segunda etapa de execução do programa é a solução dos sistemas axissimétricos para o perfil de solo e para os tipos de estacas existentes.

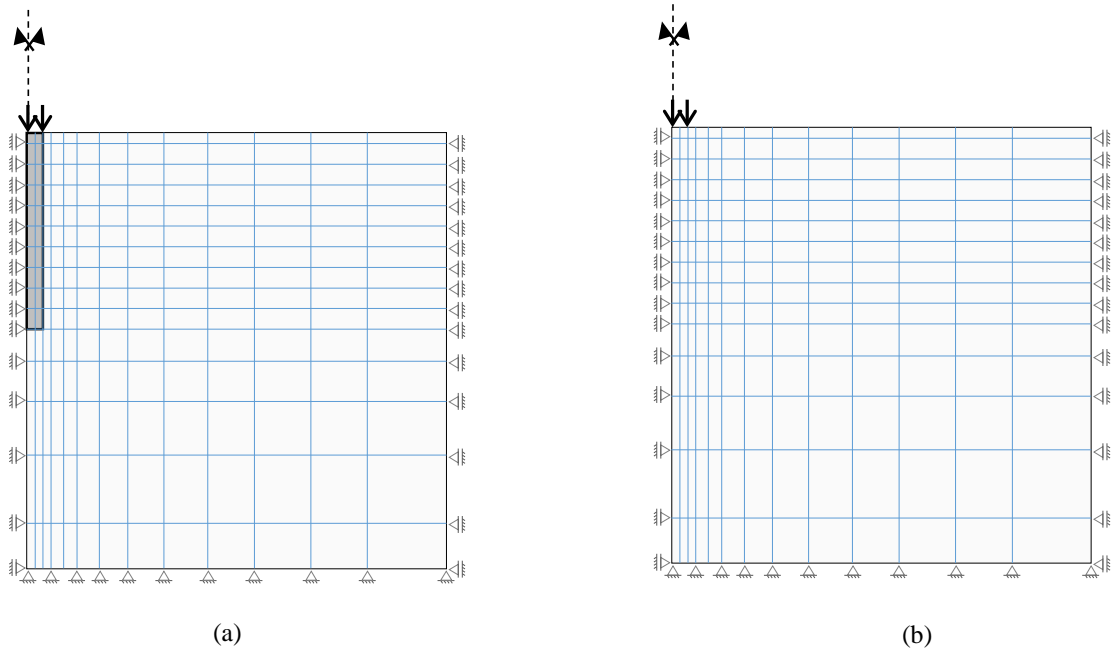
Essa etapa consiste na solução axissimétrica do Método dos Elementos Finitos, e portanto tem todas as etapas relacionadas a esse método, como mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Etapas de execução dos sistemas axissimétricos: (a) solo e (b) todas as estacas



Tanto o axissimétrico do solo, como o da estaca têm os mesmos processos que envolvem uma análise com elementos finitos. Ela se inicia com a geração automática da malha dos sistemas, incluindo as geometrias da estaca (diâmetro e comprimento) e das camadas de solo que fazem parte dessa análise. No caso do solo, a aplicação de carga no solo é equivalente a média da lateral dos elementos do radier fornecida pelo usuário na entrada de dados do programa. Ressalta-se que a malha é mais refinada próximo a aplicação do carregamento tanto no caso das estacas como na do solo. A medida que se afasta da aplicação de carga, tanto verticalmente como horizontalmente, os elementos da malha ficam maiores, uma vez que os efeitos de deslocamento também diminuem com o raio de aplicação da carga. Por se tratar de um sistema axissimétrico, as faces laterais foram restringidas com apoios que impedissem movimento horizontal, mas que permitissem deslocamentos verticais. Já na maior profundidade são impedidos deslocamentos verticais e horizontais. Um esquema gráfico da geração da malha e das condições de apoio do sistema são mostrados na Figura 3.17, para os sistemas com estacas e somente com solo.

Figura 3.17 – Geração de Malhas e apoios: (a) estacas e (b) solo



Na sequência, as etapas de solução do MEF são a enumeração dos graus de liberdade, criação dos vetores de força e deslocamento do sistema, alocação e cálculo da matriz de rigidez, cálculo dos carregamentos equivalentes e cálculo dos deslocamentos nodais.

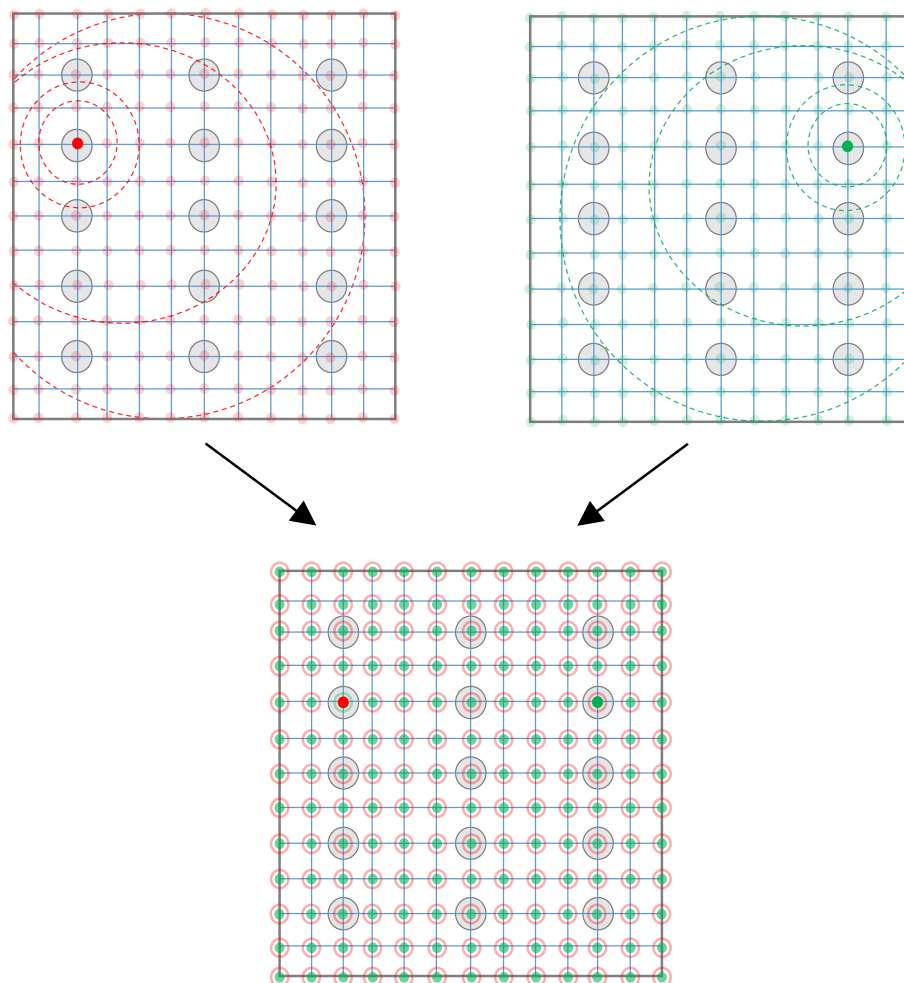
Dessa análise são extraídas as deformações que dão origem a matriz de flexibilidade e um arquivo para geração gráfica com dados para plotagem dos deslocamentos, tensões, momentos fletores e cisalhamento gerados nesse sistema.

3.4.4 Interações e Montagem da Matriz de Flexibilidade

Depois de gerados os sistemas com as deformações ocasionadas pelo carregamento dos tipos de estacas e do solo, é feito um mapeamento nos nós do radier, identificando os nós que possuem solo ou estacas abaixo.

O programa identifica em cada nó a qual sistema ele pertence (solo ou estaca) e utiliza os dados de recalque obtidos nos sistemas axissimétricos em função do raio. Para cada nó, são percorridos os demais nós, também identificando-os como nós com solo ou estacas, e computando na matriz de flexibilidade os deslocamentos provocados. A superposição dos efeitos são ilustradas na Figura 3.18.

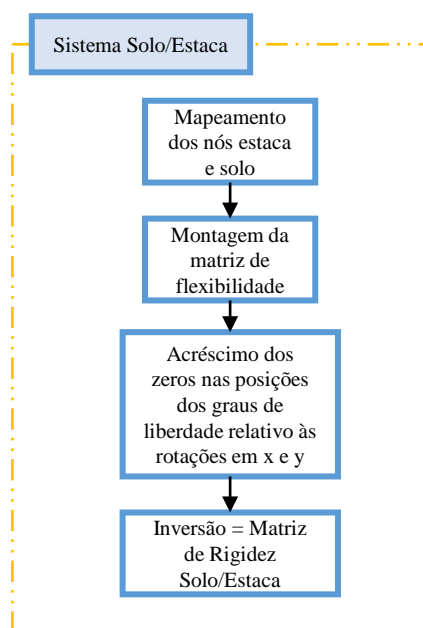
Figura 3.18 – Superposição dos recalques provocados por dois nós



A figura mostra a superposição dos efeitos de duas estacas carregadas, que possuem a própria deformação vertical, e o efeito nos outros nós. As superposições somadas, de todos os nós é a matriz de flexibilidade.

Após a montagem da matriz de flexibilidade percorrendo todos os nós, são acrescentados os outros dois graus de liberdade relativos à rotação no eixo x e no eixo y , incluindo zeros nessas posições, para assim então, inverter a matriz obtendo a matriz de rigidez do sistema solo/estaca. O fluxograma dessa etapa é mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Montagem da Matriz de Rigidez do sistema solo/estaca



3.4.5 Solução do radier e sistema solo/estaca pelo MEF

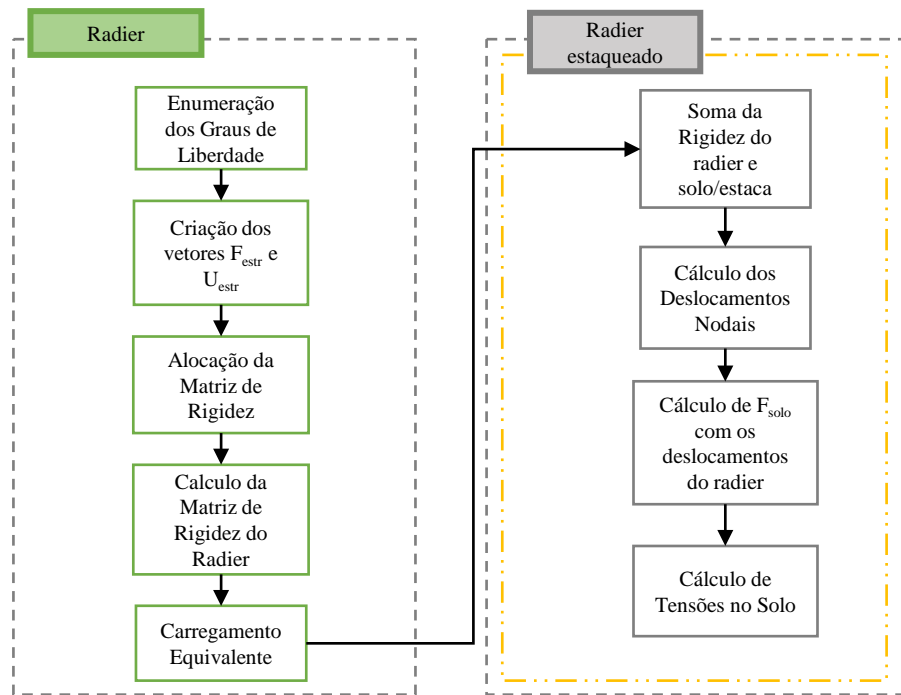
A finalização da resolução do radier estaqueado no programa SoFIA ocorre juntando a matriz de rigidez do radier estaqueado à recém formada matriz de rigidez do sistema solo/estaca solucionando novamente as rotinas de MEF. O fluxograma em detalhe dessa etapa está na Figura 3.20.

Nessa etapa, primeiramente é montada a matriz com os graus de liberdade do radier, e são criados os vetores de força e deslocamento da estrutura. Em seguida é alocada e montada a matriz de rigidez do radier e o vetor de carregamentos equivalentes.

A partir de então, a matriz de rigidez do radier é somada à matriz do sistema solo/estaca, formando a matriz de rigidez do radier estaqueado.

São então calculados os deslocamentos nodais a partir do carregamento equivalente e da rigidez do sistema, a força nos elementos do solo, e as tensões no solo.

Figura 3.20 – Solução em MEF do radier estaqueado no programa SoFIA



3.4.6 Saídas de Dados

A saída de dados do programa SoFIA é feita através de dois tipos de arquivos: um arquivo de texto, no formato *.txt* e outro no formato *.dat* para leitura num programa específico de montagem de gráficos.

Dentre os arquivos *.txt* estão os recalques verticais das interações de solo e estacas e o arquivo com o resultado das forças nas estacas.

Os arquivos *.dat* contêm os demais resultados dessa análise. Além dos resultados do próprio radier estaqueado, também são reproduzidos os dados das análises axissimétricas separadamente. Entre as saídas de dados são listados:

1. Recalque em z ;
2. Rotação em x e y ;
3. Momento em x e y ;
4. Cortante x e y ;
5. Tensões.

Nos anexos estão os arquivos de entrada e saída de dados de um exemplo de bloco com 4 estacas com um pilar central.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÕES DA FERRAMENTA NUMÉRICA

Neste capítulo serão mostradas as etapas de validação e exploração do potencial do programa SoFIA. Assim como a elaboração do programa consistiu em etapas principais, as validações do programa também ocorreram concomitantemente à sua elaboração.

Além dos testes de funcionamento das rotinas, a validação do programa consistiu em duas etapas principais: validação dos sistemas axissimétricos de estaca e solo com carregamento unitário que dão origem à matriz de influência das interações entre estaca e elemento de solo, e consequentemente a matriz de rigidez solo/estaca; validação do comportamento de radier estaqueados comparados a exemplos conhecidos da literatura no regime linear.

A validação das interações entre elementos solo e estaca, como as de Hain e Lee (1978), foi feita através de uma análise axissimétrica com elementos axissimétricos de quatro nós, considerando as estacas do problema carregadas e o solo carregado, e a influência de ambas situações sobre o recalque nos demais elementos (estaca ou solo). Essa abordagem, de certa forma inédita na obtenção de recalques dentro do próprio programa de análise de radier estaqueado, foi comparada a outras metodologias que abordam a interação entre estacas e solos utilizando outros métodos analíticos existentes e outros programas, comparando também exemplos da literatura.

Já a validação de radier estaqueados foi comparada a outros exemplos de trabalhos clássicos e validações de trabalhos recentes sobre resultados de recalque vertical, momentos e carga absorvida pelas estacas e pelo radier. Além disso foram mostradas algumas aplicações do programa.

4.1 ANÁLISE DAS INTERAÇÕES

Dentro da sequência de execução do programa SoFIA foram calculadas as interações entre elementos de solo e estacas que dão origem à matriz de rigidez da base elástica sob a qual se apoia o radier. Essas interações são mostradas na Figura 3.5 da metodologia desse trabalho. Elas irão somar-se à rigidez do radier discretizado em elementos de placa. Os recalques verticais provocados pelo carregamento no solo ou na estaca dão origem à matriz de flexibilidade e,

posteriormente, à matriz de rigidez solo/estaca utilizada em conjunto com a matriz de rigidez da placa, para análise da fundação completa.

A seguir são apresentadas as validações separadamente dos elementos solo e estaca. O elemento solo será comparado a métodos consagrados baseados na teoria da elasticidade e a exemplos obtidos no programa DIANA (TNO, 2008) com elementos tridimensionais. O elemento estaca será comparado ao trabalho consagrado de Ottaviani (1972) descrito em Ottaviani (1975) sobre a análise de uma única estaca, e também ao recalque obtido pelo programa DIANA com elementos tridimensionais.

4.1.1 Validação do sistema axissimétrico com carregamento no solo

A seguir serão mostradas algumas análises que dizem respeito à escolha entre carregamento concentrado ou distribuído na escolha da interação de solo carregado, e uma comparação a uma análise tridimensional.

4.1.1.1 Carregamento Concentrado e Distribuído

A primeira etapa de validações consistiu em comparar os resultados obtidos no SoFIA com métodos analíticos existentes para cálculo de recalque vertical devido ao carregamento da superfície de um solo. Os métodos analíticos mais conhecidos e utilizados foram previamente descritos no item 2.4.1 deste trabalho para carregamento pontual e distribuído circular no meio semi-infinito.

Primeiramente, para o carregamento pontual, observando os deslocamentos verticais da superfície, simplificou-se a equação (2.7), onde $z=0$, obtendo a equação (4.1). O mesmo procedimento foi adotado para o carregamento circular.

$$w_z(r,0) = \frac{Q(1-\nu^2)}{\pi Er} \quad (4.1)$$

onde:

$w_z(r,0)$ = recalque em z na superfície, variando o raio;

Q = carregamento pontual aplicado;

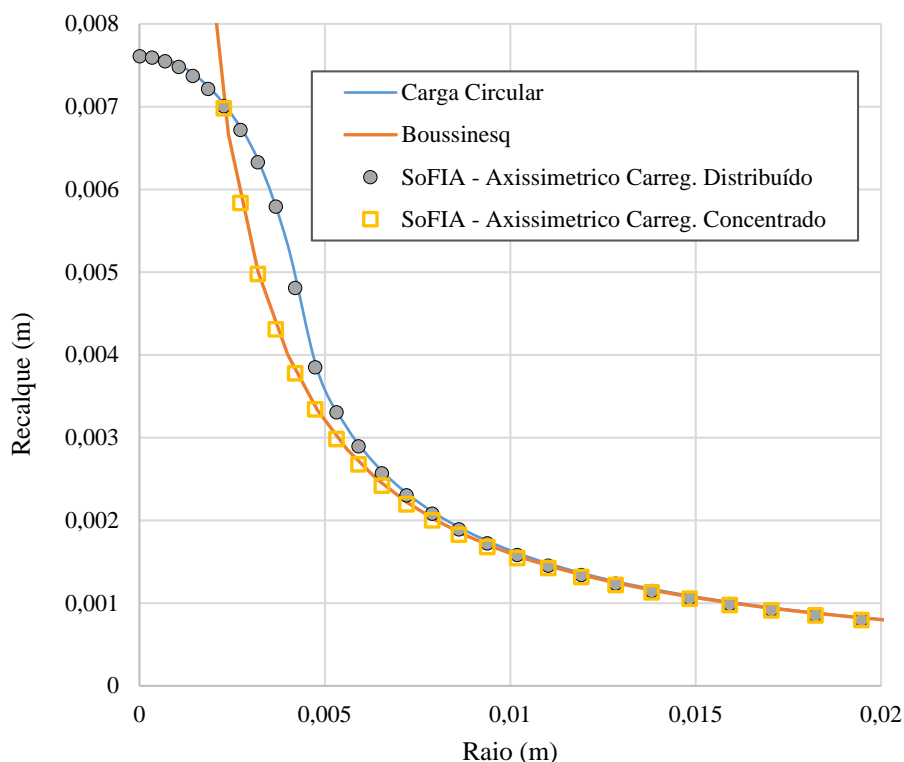
ν e E = coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do solo;

r = raio.

Cada um dos carregamentos, pontual e distribuído, foi comparado respectivamente ao carregamento pontual de 19,63 kN, equivalente a um carregamento distribuído numa área circular de raio 0,25 m de 100 kN/m² no meio axissimétrico. O solo desse exemplo tinha módulo de elasticidade de 20 MPa e coeficiente de Poisson 0,49. Os resultados são mostrados na Figura 4.1.

O gráfico foi limitado em valores próximos ao de aplicação do carregamento distribuído, a fim de mostrar as diferenças nessa região, já que para raios maiores, os valores de deslocamento foram os mesmos nos dois casos. No gráfico é possível notar que o carregamento pontual não é definido pelo método de Boussinesq para carregamentos pontuais quando o raio r da área de influência se aproxima de zero. Tanto o caso de carregamento distribuído, como para carregamento pontual, os valores obtidos foram os mesmos quando analisado por elementos finitos axissimétricos. Isso demonstra que para carregamentos aplicados diretamente no solo, o modelo proposto possui uma excelente aproximação e pode ser utilizado para obtenção da flexibilidade, como mostra a Figura 4.1 os pontos são coincidentes com os modelos elásticos.

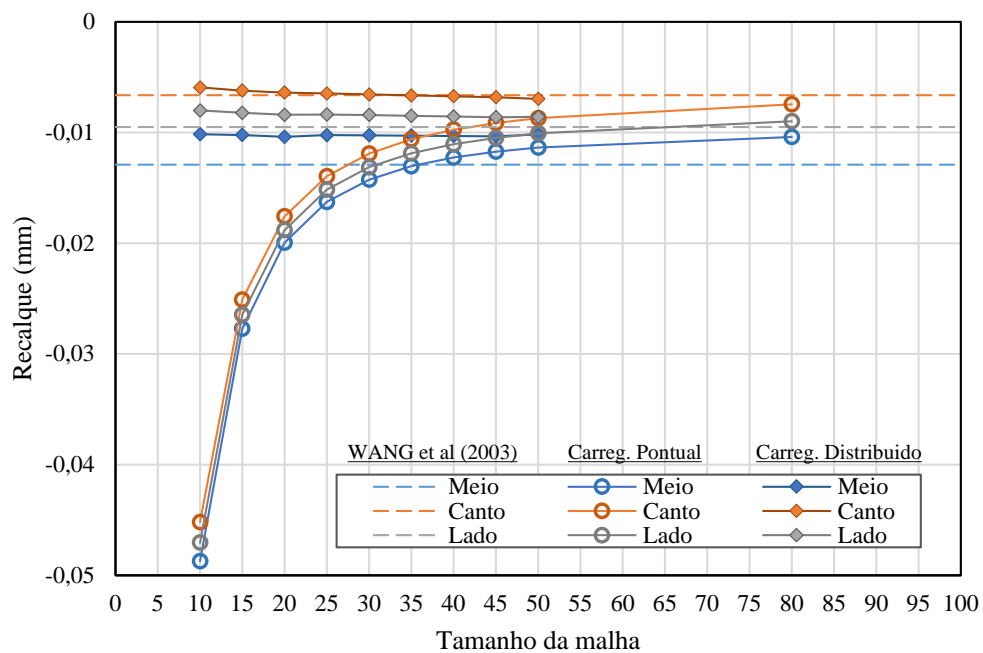
Figura 4.1 – Comparação entre: (a) Carregamento concentrado e Método de Boussinesq e (b) Carregamento distribuído ao método da carga circular.



Ainda analisando os efeitos de carregamentos pontuais e distribuídos e as consequências da rigidez obtida no conjunto e os recalques da fundação, foi observado o recalque de uma placa carregada e apoiada no solo. Para isso, um exemplo do trabalho de Wang *et al* (2003), que estuda os efeitos de recalque de uma placa de oito nós apoiada numa camada finita de solo, foi analisado. A placa quadrada possui lateral de 10 m, espessura de 0,5 m, módulo de elasticidade de 15 GPa e coeficiente de Poisson 0,2 e está apoiada num solo de espessura 40m, cujo módulo de elasticidade é 83,2 MPa e coeficiente de Poisson 0,3. O carregamento aplicado está distribuído em toda a área da placa com valor de 0,1MPa.

O estudo feito nesse exemplo utilizou uma análise axissimétrica com carregamento unitário e concentrado e um carregamento distribuído que totaliza uma unidade. As comparações foram feitas a fim de mostrar quão o radier deveria ser discretizado para que os resultados obtidos de recalque na placa de Wang *et al* (2003) convergissem.

Figura 4.2 – Estudo de convergência da malha



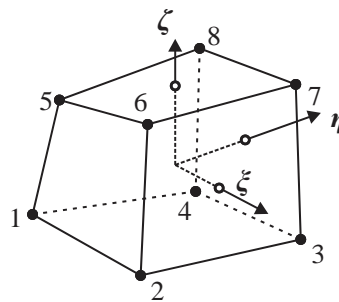
Pelo gráfico, é possível perceber a rápida convergência entre os resultados obtidos pelos autores e a utilização do carregamento distribuído na análise axissimétrica do programa SoFIA. Quando utilizado o carregamento pontual, para se obter uma boa malha que convergissem os resultados, foi necessário discretizar a placa em aproximadamente 80 elementos em cada direção. Já quando utilizado o carregamento distribuído, rapidamente com uma malha de 15 elementos em cada direção, os resultados já eram bastante satisfatórios.

Como discutido anteriormente, na adoção do carregamento distribuído foi levado em conta a escolha de elementos de aproximadamente mesma área utilizada na placa, pois a conversão dos resultados é mais rápida do que quando não são feitas essas considerações, correndo o risco de obter elementos de tamanhos muito distintos, e necessitando de uma discretização muito grande da placa.

4.1.1.2 Análise Axissimétrica e tridimensional

Além da avaliação do tipo de carregamento utilizado na análise de elementos de solo carregado, foi necessário avaliar o desempenho do elemento axissimétrico em relação a outros tipos de elemento, como elementos tridimensionais. Os resultados de recalque foram então obtidos e comparados de diferentes formas: análise pelo programa SoFIA, com análise utilizando elementos finitos axissimétricos; análise pelo programa DIANA (TNO, 2008), com elementos hexaédricos do tipo *brick* com oito nós (HX24L) de interpolação linear, como mostra a Figura 4.3; e a solução analítica de carregamento circular, descrita anteriormente.

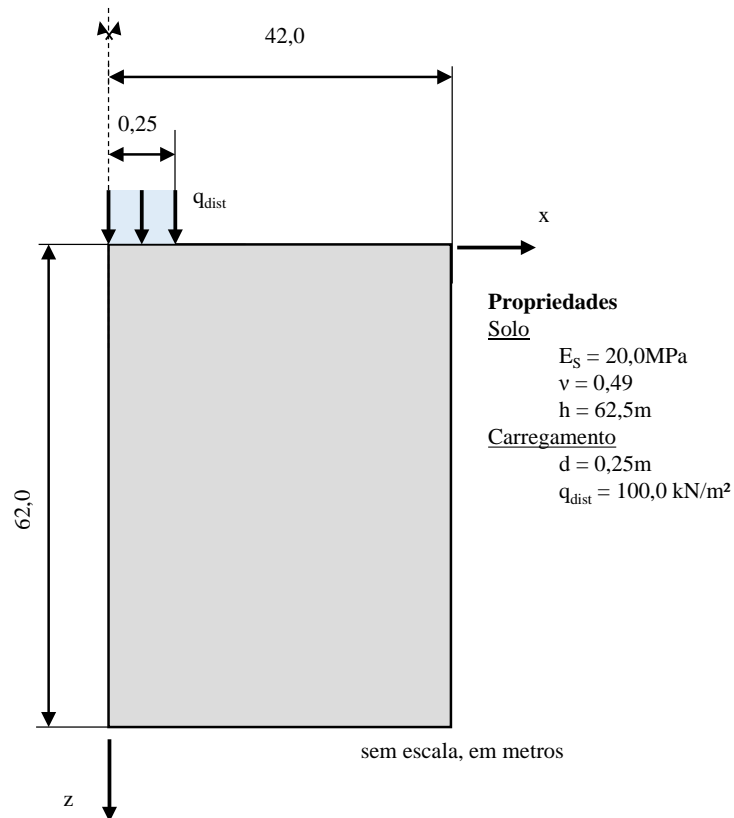
Figura 4.3 –Elemento isoparamétrico de oito nós, tipo *brick*, HX24L (TNO, 2008).



HX24L

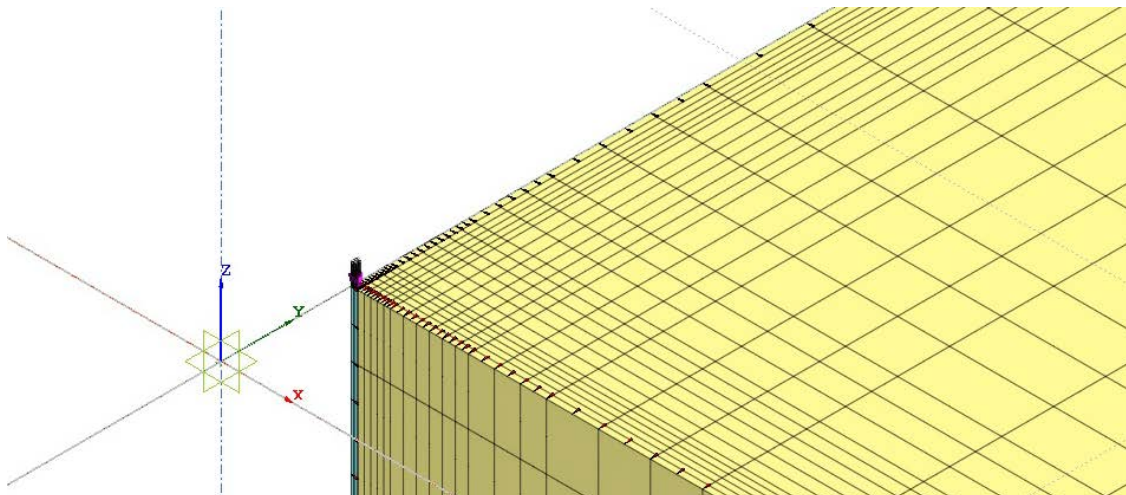
O exemplo proposto trata de um carregamento distribuído aplicado a um solo homogêneo, cujo domínio horizontal é igual a 42 m e o domínio vertical a 62 m. O solo possui módulo de elasticidade igual a 20 MPa e módulo de Poisson 0,49. Foi adotado um carregamento distribuído de valor 100 kN/m² aplicado numa área circular de raio 0,25 m. O esquema gráfico é apresentado na Figura 4.4, cuja dimensões não são apresentadas em proporção.

Figura 4.4 - Geometria do exemplo de carga distribuída aplicada à superfície do solo



A modelagem do exemplo tridimensional no DIANA, no entanto foi feita em apenas um quarto do problema, como mostra a Figura 4.5, e a extensão do problema em x e y foram ambas de 42 m.

Figura 4.5 – Modelagem de um quarto do problema no DIANA (TNO, 2008)



Em ambas as modelagens a malha foi mais refinada na região próxima à aplicação da carga e menos refinada à medida que se afastava dela.

O resultado gráfico de recalque vertical do programa SoFIA, é mostrado na Figura 4.6, e a curva de recalque vertical pelo raio de aplicação da carga com as três metodologias (SoFIA axissimétrico, DIANA tridimensional e solução analítica para carregamento circular) são apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Recalques em z do programa SoFIA, valores em metro

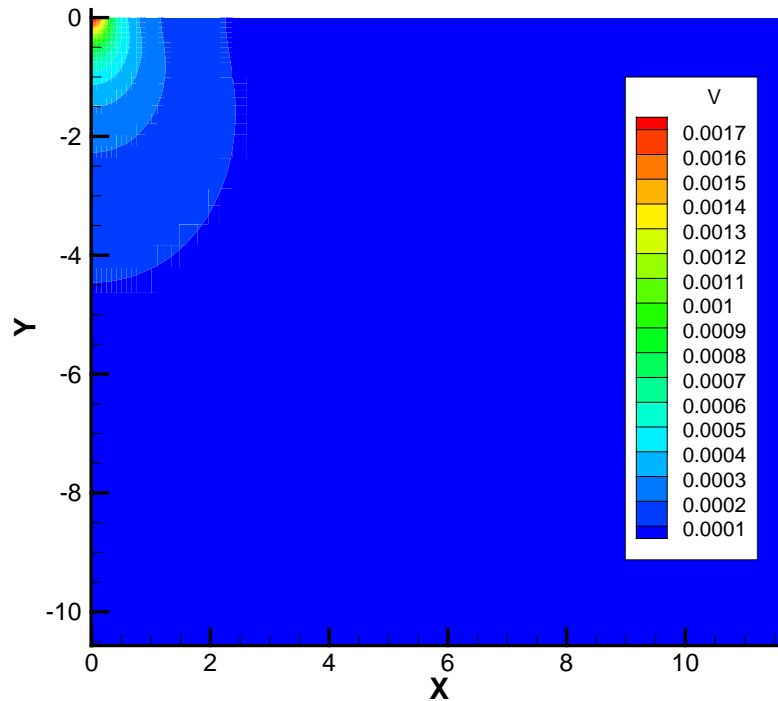
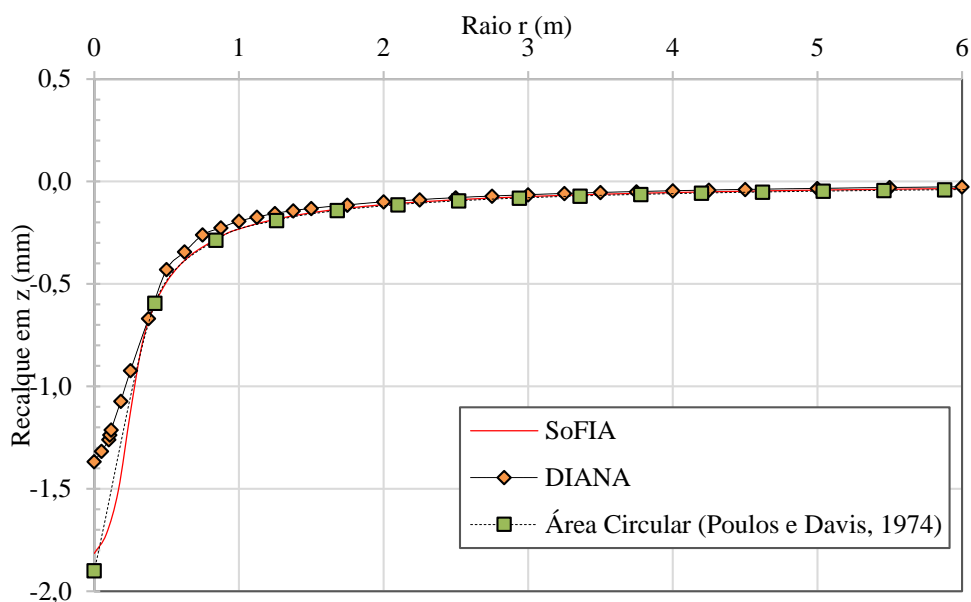


Figura 4.7 – Recalque do solo na superfície comparando: programa SoFIA, elementos tridimensionais no DIANA e solução elástica do carregamento de uma área circular (POULOS, DAVIS, 1974),



Percebe-se no gráfico, uma boa concordância entre a influência de recalques ao redor da aplicação de carga quando comparadas as diferentes modelagens em MEF. Sob a região da aplicação de carga, no entanto, o elemento axissimétrico do programa SoFIA se aproximou mais da solução analítica de carga circular. Os valores nesse ponto, (0,0,0) são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de recalque no centro da placa

Exemplo	Recalque no centro do carregamento circular(mm)
SoFIA	1,82
DIANA (TNO, 2008)	1,37
Solução analítica para Carga circular	1,90

Essa diferença entre as duas análises em método dos elementos finitos, apesar de pequena, pode ser devido a discretização da malha no caso de elementos 3D. Nesse caso, o uso de elementos axissimétricos além do processamento ser mais rápido representou uma melhor alternativa.

4.1.2 Validação do sistema axissimétrico com carregamento de estacas

Para a análise de recalque de estacas isoladas e o efeito do recalque ao seu redor, a validação ocorreu em duas etapas. Na primeira delas, assim como no caso de solo carregado, foram comparadas as análises mostrando os efeitos da aplicação dos diferentes tipos de elementos: o axissimétrico do programa SoFIA e o tridimensional do programa DIANA. Além disso a análise de recalque da estaca e seu entorno, que é o fator de interação α definido por Hain e Lee (1978) na equação (2.4), foi comparada ao resultado obtido através do programa Defpig (POULOS, 1980b). Por fim o programa foi comparado a outros programas numa análise de recalque clássica de Ottaviani (1975).

4.1.2.1 Estaca carregada em solo homogêneo

As análises a seguir irão comparar os resultados de uma estaca com carregamento vertical e distribuído em um solo homogêneo. Novamente, a análise axissimétrica do programa SoFIA foi comparada a uma análise tridimensional do programa DIANA (TNO, 2008). Nesse último programa, além de utilizar o elemento sólido tipo *brick*, com oito nós, HX24L, da Figura 4.3, também foi utilizado outro elemento na região da estaca, para melhor aproximação do formato circular dela: o elemento de formato de cunha com seis nós e isoparamétrico, TP18L, ilustrado na Figura 4.8. A modelagem da estaca com os dois tipos de elemento estão na Figura 4.9.

Figura 4.8 - Elemento sólido isoparamétrico de cunha com seis nós, TP18L (TNO, 2008).

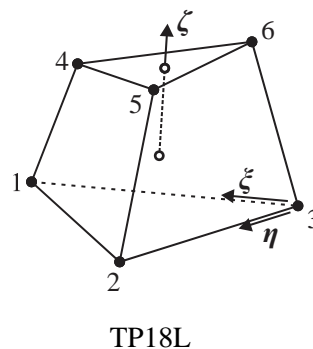
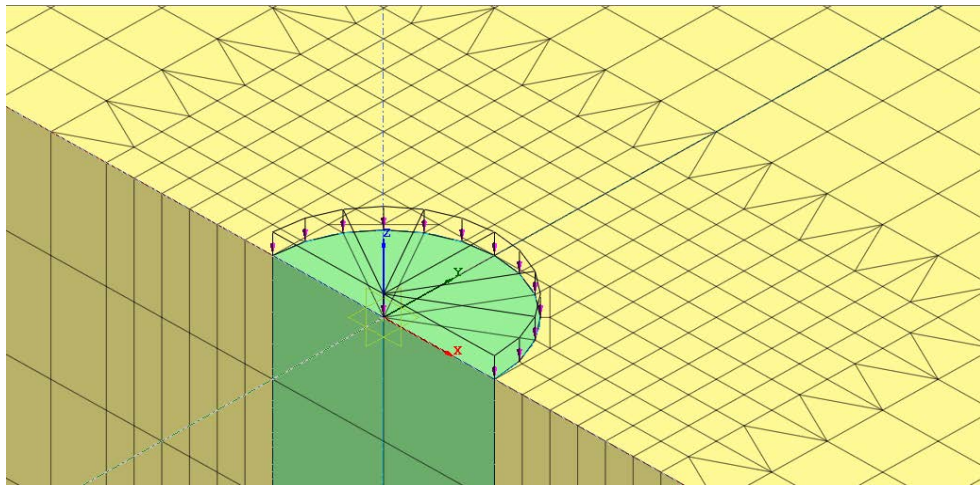


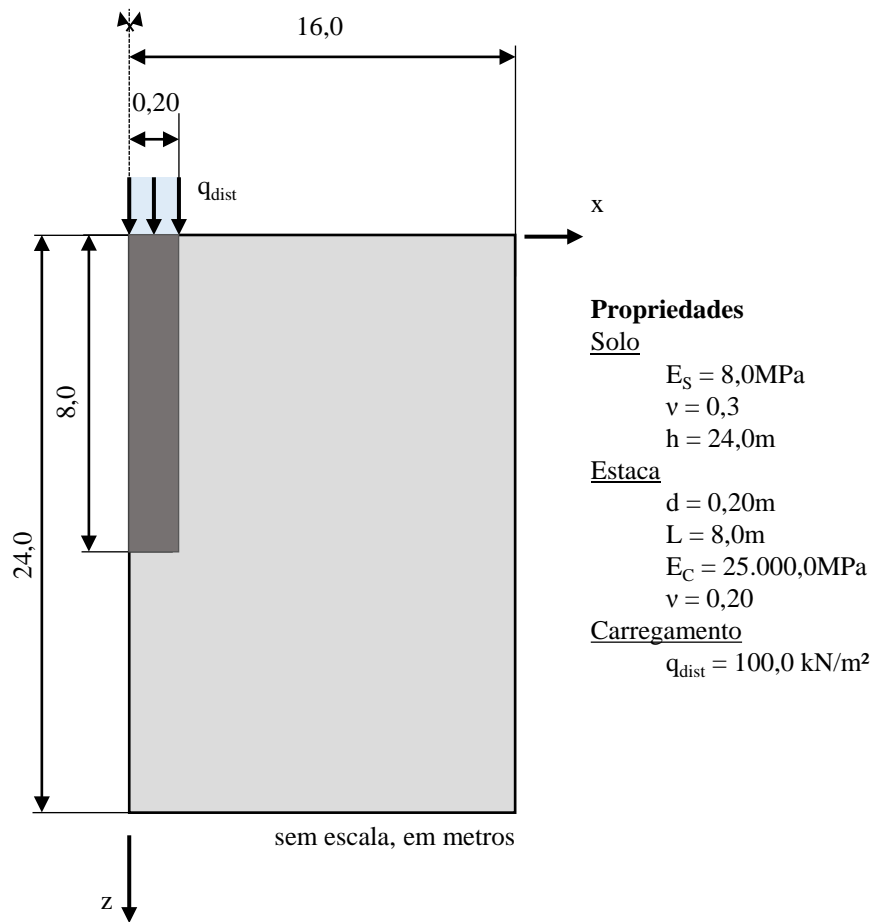
Figura 4.9 – Modelagem da estaca no programa DIANA (TNO, 2008)



Nessa análise, os parâmetros e limites do solo utilizado foram: módulo de elasticidade de 8MPa, coeficiente de Poisson 0,3, limite horizontal de 16,0m e limite vertical de 24,0m.

A estaca utilizada possui seção circular de 0,20 m de raio, e comprimento igual a 8,0 m. A estaca possui ainda propriedades do material do concreto, com módulo de elasticidade igual a 25 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2. O carregamento aplicado foi distribuído com valor de 100 kN/m². A geometria e propriedades do problema são ilustrados esquematicamente na Figura 4.10, sem proporções reais.

Figura 4.10 – Geometria do exemplo axissimétrico com estaca e carregamento distribuído aplicado



A análise 3D do DIANA (TNO, 2008) foi feita para a metade do problema. Os resultados do programa SoFIA são apresentados na Figura 4.11 e para o programa DIANA na Figura 4.12. Em ambas, é possível perceber a semelhança dos resultados. Os resultados dos recalques da superfície, que são objeto de estudo deste trabalho tanto para a reprodução de recalques em outros elementos de solo como para outros elementos de estaca, são mostrados na sequência no gráfico da Figura 4.13.

Figura 4.11 – Análise axissimétrica para estaca no programa SoFIA: recalque em z, valores em metros

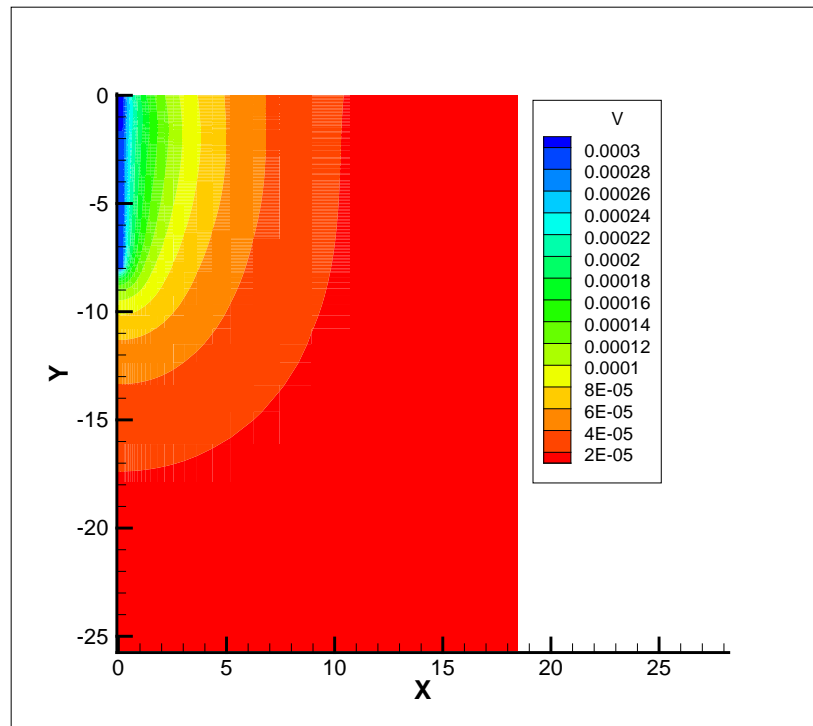


Figura 4.12 - Análise 3D para estaca no programa DIANA: recalque em z, valores em metros

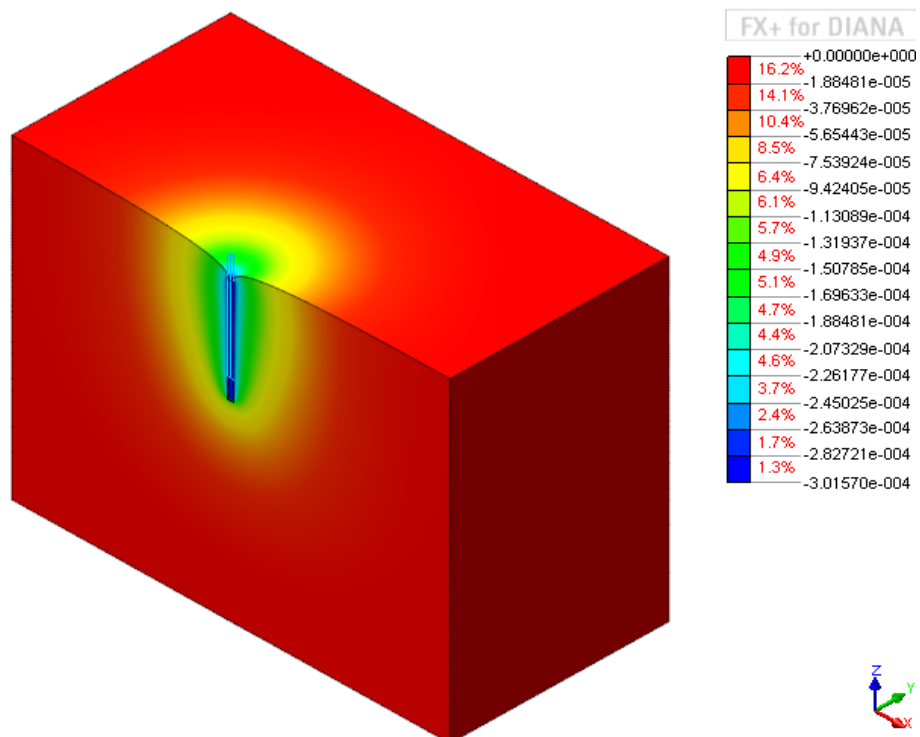
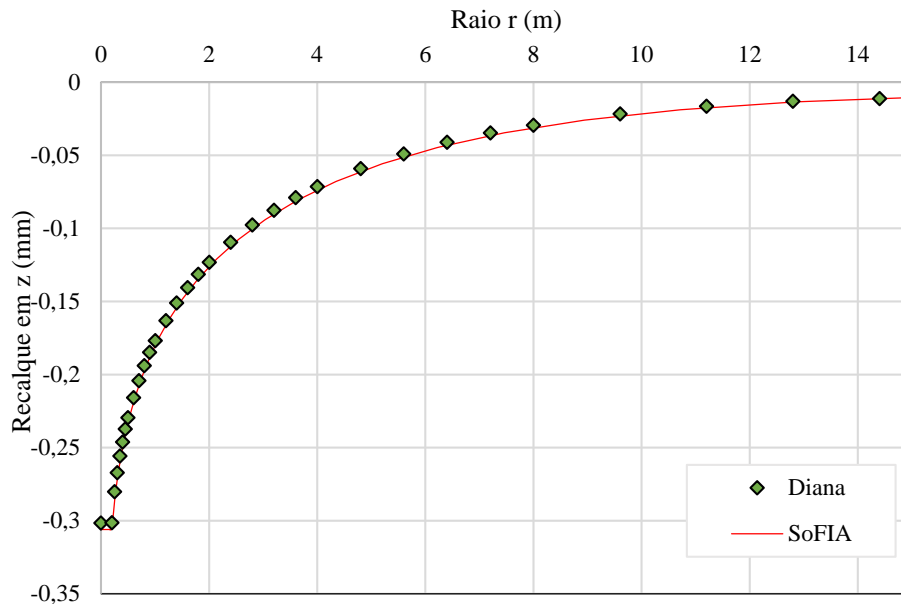
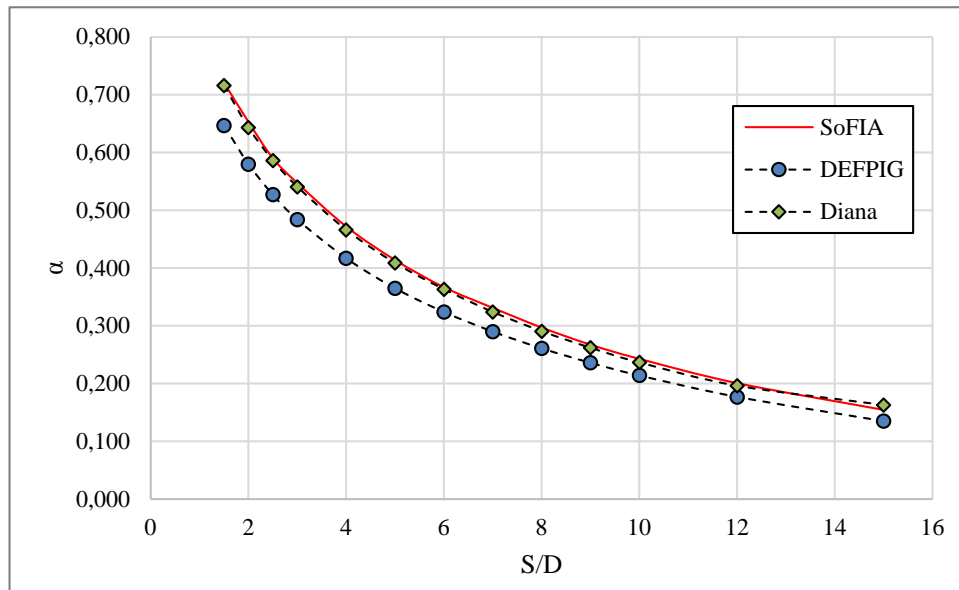


Figura 4.13– Recalques em z da estaca comparados: Programa SoFIA, solução no programa Diana com elementos tetraedro e solução quadrática



No gráfico da Figura 4.13 é notável a semelhança dos resultados entre as duas análises. A utilização da análise axissimétrica para obtenção de recalques verticais na superfície do solo, além de ser igual e eficiente como a análise em elementos finitos tridimensionais, é uma análise com menos nós, portanto menor, mais simples e rápida.

Além das próprias análises utilizando elementos finitos, outra análise, do programa DEFPIG (POULOS, 1980b), também foi feita. Esse programa atualmente é uma das principais ferramentas para obtenção dos fatores de interação para estacas, α , utilizados em programas como GARP (POULOS, 1994b). O gráfico com a análise é mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Comparação entre os α 's obtidos da análise do DEFPIG, DIANA e SoFIA.

No gráfico é possível perceber a semelhança dos deslocamentos com o distanciamento entre os dois programas que utilizam método dos elementos finitos em sua análise, cujos valores de α são um pouco maiores que o DEFPIG. Apesar dos elementos utilizados serem de natureza diferentes, as curvas são similares e bem próximas, e têm uma tendência a se aproximar a medida que se afastam do carregamento. Essa pequena diferença pode ser atribuída aos métodos diferentes utilizados, já que esse último utiliza método dos elementos de contorno em sua formulação.

4.1.2.2 Estaca Isolada de Ottaviani (1975)

Ainda analisando estacas isoladas, um dos trabalhos mais conhecidos e utilizados como referência é o trabalho de Ottaviani (1975). Esse trabalho reúne a análise de grupos de estacas e de estacas isoladas mencionadas em um outro trabalho do autor, de Ottaviani (1972). Neste último, o autor descreve a malha da estaca analisada axissimetricamente.

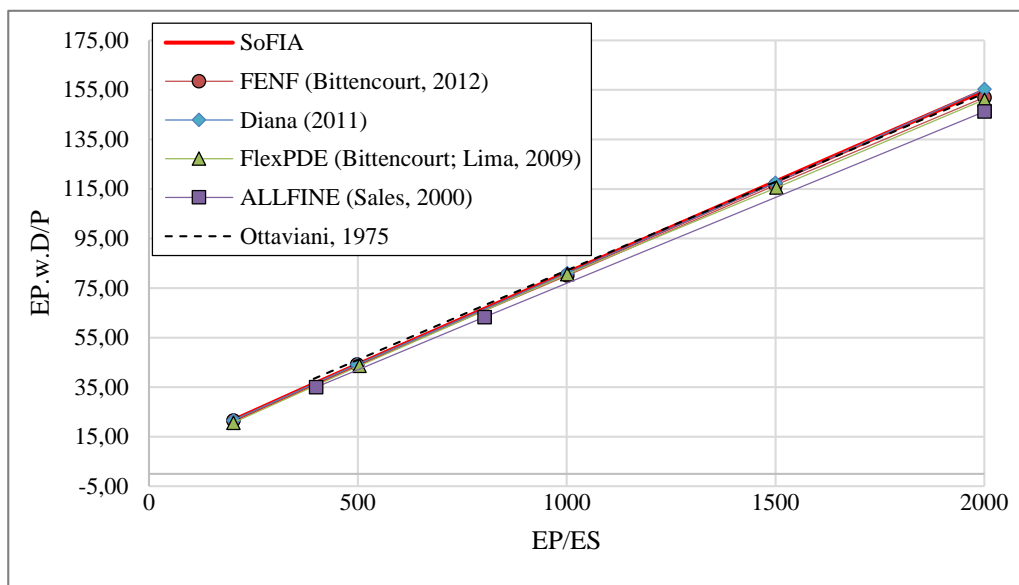
No caso das estacas isoladas, o autor apresenta alguns exemplos variando o comprimento da estaca e a espessura da camada de solo. Neste trabalho foram utilizados comprimento de estaca igual a 20m e espessura do solo homogêneo de 80 m.

Foram analisados os recalques normalizados em função da variação da rigidez relativa (entre a estaca e o solo). Nesse caso, foi fixado o módulo de elasticidade da estaca em 20 GPa, e variado o módulo de elasticidade do solo. O diâmetro da estaca no trabalho adotado foi de 1,0m e o coeficiente de Poisson do concreto de 0,25. A rigidez relativa (E_p/E_s) variou de 200 a 2000 e o

coeficiente de Poisson adotado para o solo foi de 0,45, considerado para um solo não drenado e estaca escavada, no qual o carregamento é principalmente mobilizado pela lateral da estaca e carregamento é de 1000,0kN.

O gráfico reuniu algumas análises obtidas de Bittencourt (2012) e é mostrado na Figura 4.15. Dentre elas estão a de Sales (2000), que utilizou o programa ALLFINE (FARIAS, 1993), Bitterncourt e Lima (2009), que empregou o programa FlexPDE, e Bittencourt, Doehler e Sales (2011) que obtiveram as análises através do programa DIANA (TNO, 2008).

Figura 4.15– Comparação de resultados de diferentes programas da estaca isolada com $L = 20$ m e $H = 80$ m.



Assim como em outros programas, a análise do SoFIA foi bastante próxima aos dados obtidos por Ottaviani (1975), sendo que a variação entre essas duas curvas foi de apenas 2%.

4.2 ANÁLISE DO RADIER ESTAQUEADO

Na análise de um radier estaqueado, alguns parâmetros do seu comportamento são importantes e serão analisados adiante em comparação a outros trabalhos. O intuito de comparar o trabalho a outros existentes é verificar quão próximo os resultados obtidos da análises do programa SoFIA estão em relação a outros programas de análise, e até mesmo a resultados reais medidos em campo.

O primeiro parâmetro de análise é o recalque do conjunto. Como mencionado algumas vezes nesse trabalho, espera-se através do posicionamento estratégico das estacas, diminuir recalques absolutos assim como, dependendo da geometria do problema, o recalque diferencial.

O segundo parâmetro importante durante a análise é o carregamento dos elementos da fundação: radier e estacas. Em um primeiro momento do carregamento, espera-se que as estacas recebam a maior parte do recalque, enquanto que o radier uma parcela menor. Como o programa ainda em sua versão inicial trabalha no regime linear, espera-se que o carregamento aplicado nos exemplos não atinjam o limite último das estacas, e portanto, verifica-se que o radier recebe uma parcela muito pequena nessa etapa.

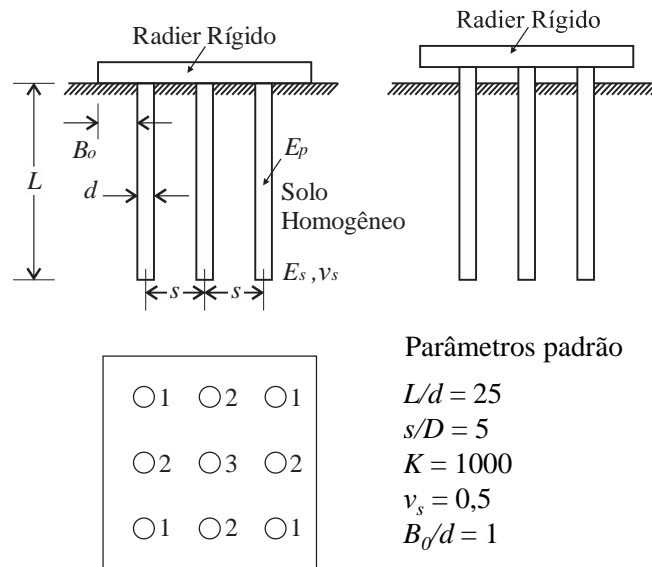
Por último, serão analisados os momentos gerados na placa, que são importantes para o dimensionamento do radier.

4.2.1 Radier sob 9 estacas, Kuwabara (1989)

O primeiro trabalho analisado nessa dissertação é o trabalho de Kuwabara (1989), um dos trabalhos pioneiros na análise de radier estaqueado e ainda bastante utilizado para comparação de trabalhos mais recentes. Trata-se da análise de um grupo de estacas e de uma estaca isolada utilizando em toda a análise o Método dos Elementos de Contorno.

Nesse trabalho as análises foram feitas comparando recalque e parcela de mobilização de carga das estacas variando o comprimento e os espaçamentos entre elas, num meio semi-infinito de um solo homogêneo, isotrópico e elástico. Os detalhes da geometria são mostrados na Figura 4.16. A análise feita pelo programa SoFIA adotou a espessura da camada de solo como sendo o dobro do comprimento da estaca.

Figura 4.16 – Esquema gráfico genérico dos exemplos de Kuwabara (1989).



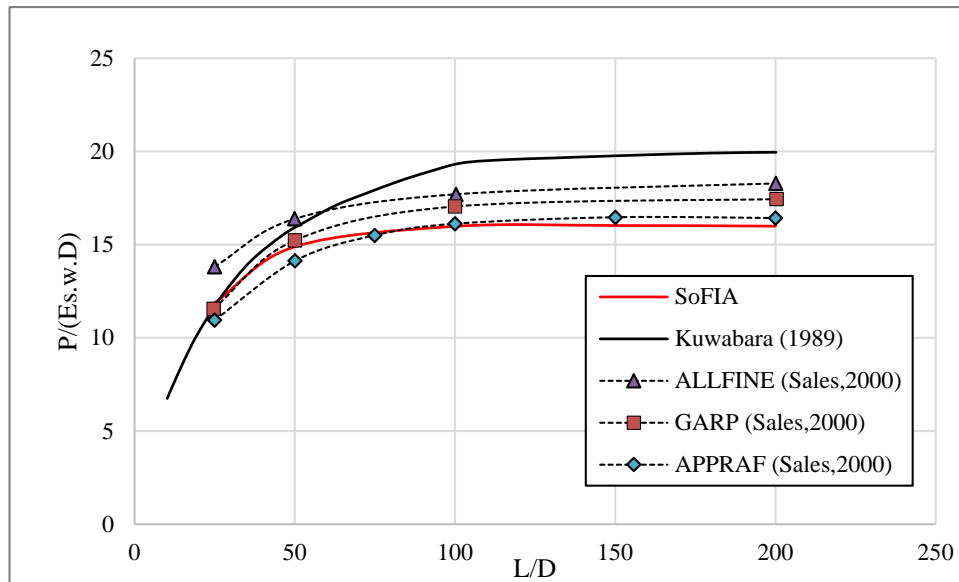
Sales (2000) em seu trabalho fez comparações do trabalho de Kuwabara (1989) com outros três programas: GARP (POULOS, 1994b), ALLFINE (FARIAS, 1993) e APPRAF, de Small e Zhang⁶ (1999, *apud* Sales, 2000). O primeiro programa, como já descrito, utiliza metodologia híbrida, com placa pelo MEF e rigidez do solo/estaca como molas interativas. O programa ALLFINE é desenvolvido em MEF com enfoque em problemas geotécnicos, e o último programa, o APPRAF, é um programa baseado no Método das Camadas Finitas para representar o comportamento do solo (SALES, 2000).

A primeira parte de resultados é a comparação do comportamento de uma estaca isolada entre os 4 programas e o artigo de Kuwabara (1989). Nesse exemplo, foi variada a razão entre comprimento e diâmetro da estaca (L/D) pelo recalque normalizado $P/(E_s \cdot w \cdot D)$. O gráfico é apresentado na Figura 4.17. Nele é possível perceber que o comportamento entre as curvas é semelhante, onde a partir de um determinado comprimento relativo da estaca, os recalques tendem a se manter constante. A análise feita pelo programa SoFIA, em valores menores de L/D se aproxima bastante tanto do programa APPRAF como do programa GARP, que utiliza a mesma metodologia que o primeiro. Para valores maiores de L/D o programa SoFIA, no entanto, mostra recalques ligeiramente menores que os demais.

⁶ Small, D.M.A., & Zhang, H. (1999). Dados fornecidos através de comunicação pessoal com Sales (2000).

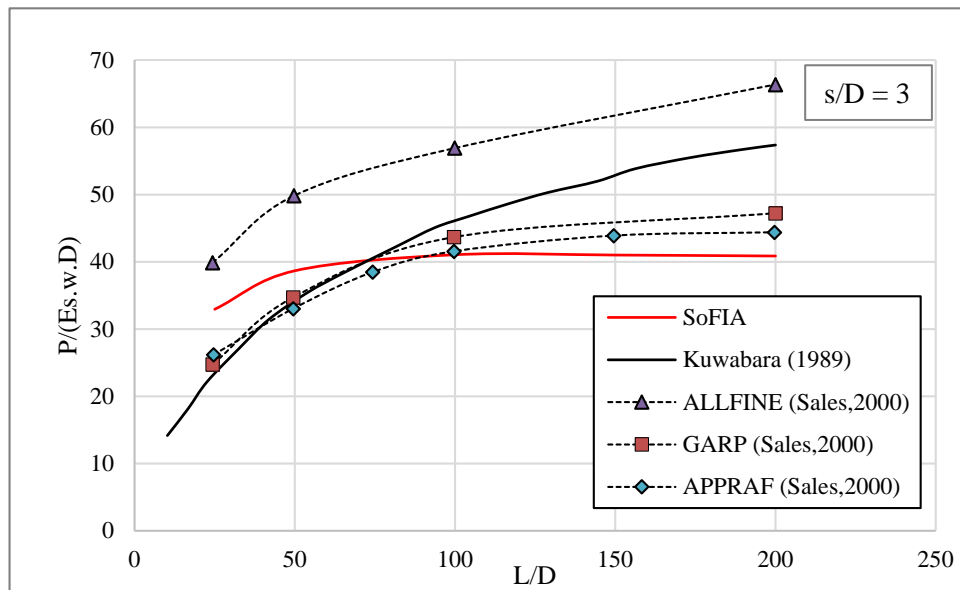
O distanciamento da curva de Kuwabara (1989) de todos os outros métodos é esperado, já que o método utilizado pelo autor é o mais distinto entre os demais, utilizando elementos de contorno.

Figura 4.17 - Recalque de uma estaca isolada, variando os valores de comprimento da estaca

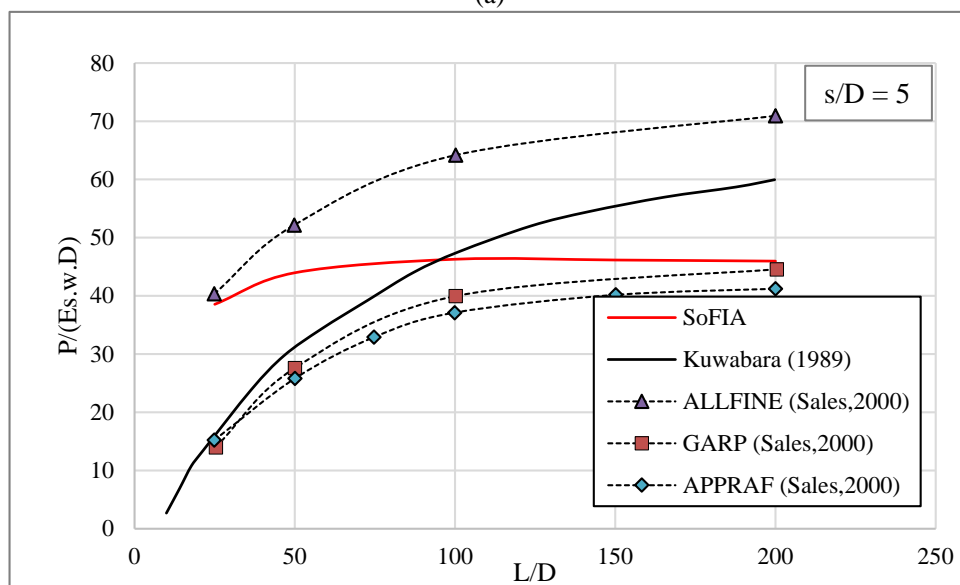


Na sequência, foram analisadas diferentes combinações de radier sobre nove estacas. Nessas análises foram modelados três radies diferentes com relações de espaçamentos pelo diâmetro entre estacas (s/D) diferentes, iguais a 3, 5 e 10. Na Figura 4.18, são mostradas as previsões de recalques no centro do radier para os diferentes espaçamentos, novamente, variando o comprimento da estaca.

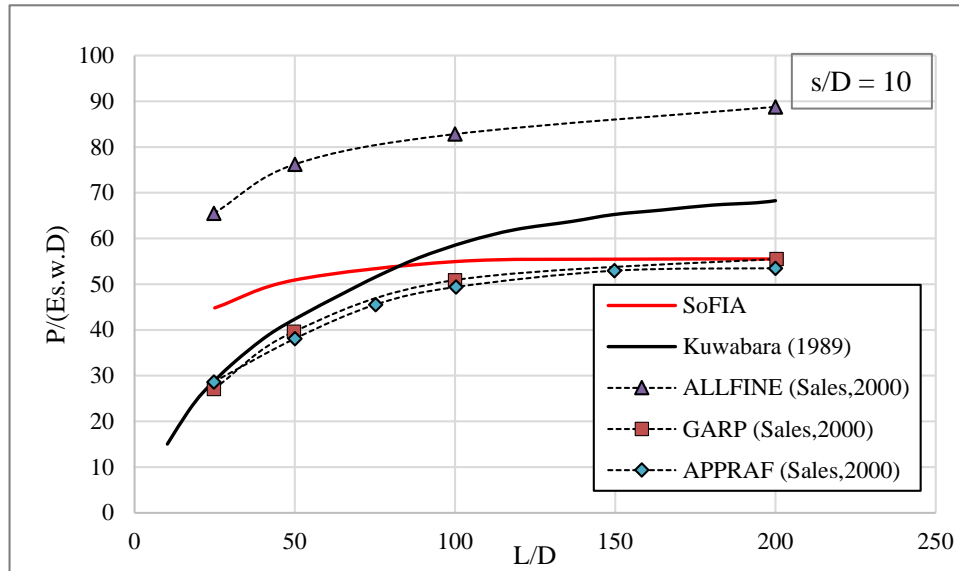
Figura 4.18 – Resposta carga x recalque de Kuwabara (1989) com seguintes espaçamentos: (a) $s/d = 3$; (b) $s/d = 5$ e (c) $s/d = 10$.



(a)



(b)

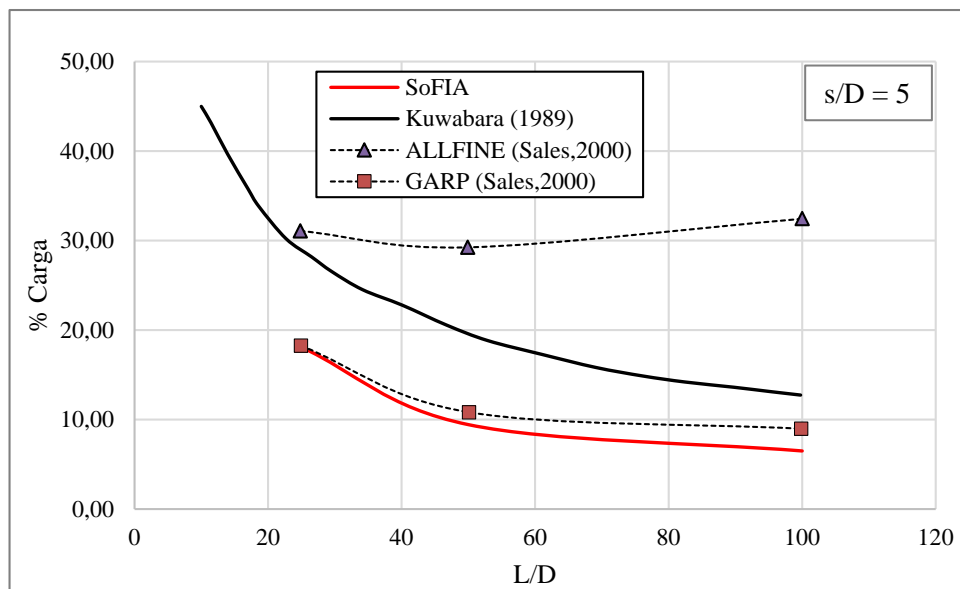


(c)

Em todos os gráficos da Figura 4.18, percebe-se o mesmo comportamento entre os programas. A análise feita pelo programa SoFIA se aproxima bastante do comportamento do programa GARP e APPRAF, estabilizando os recalques com o aumento do comprimento das estacas. O programa SoFIA, no entanto tem uma variação muito menor para comprimentos relativos menores que 100, enquanto que, tanto o ALLFINE quanto o método proposto por Kuwabara não possuem uma estabilização com o aumento do comprimento das estacas.

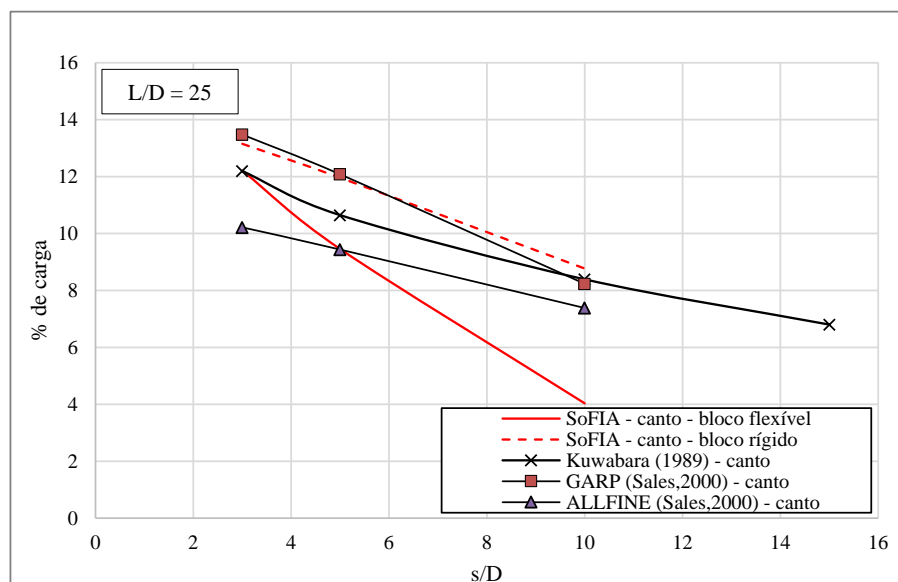
Além dos recalques, também foi observado o quanto os elementos da fundação mobilizam carga. Na primeira figura, a Figura 4.19, é mostrada a porcentagem de carregamento mobilizada pelo radier. Com exceção do programa ALLFINE, todos os outros mostraram que quanto maior o comprimento da estaca, menor será a mobilização de carga pelo radier, com uma tendência de estabilização a partir de $L/D=50$. Novamente, o programa SoFIA se aproximou dos resultados do GARP.

Figura 4.19 – Parcela de carga absorvida pelo radier no radier estaqueado com 9 estacas, citado por Kuwabara (1989)



Ainda sobre carregamentos, foram analisadas as porcentagens de carregamentos em posições diferentes de estacas no radier, dessa vez calibrando também no programa SoFIA a rigidez do radier, variando a altura do bloco entre flexível e rígido. As análises foram feitas para estacas de canto (Figura 4.20), do lado (Figura 4.21) e do centro (Figura 4.22).

Figura 4.20 – Porcentagem de carga nas estacas de canto com exemplo de Kuwabara (1989)



As estacas de canto, mobilizam mais carga que as da lateral, e essas mais que as do centro. Observando o gráfico da Figura 4.20, percebemos que a medida que se aumenta o espaçamento entre as estacas, maior será o contato do radier com solo, e conseqüentemente menos carga será

mobilizada pela estaca. Comparando os exemplos, o bloco rígido, que é o que normalmente se espera de um radier estaqueado, se aproxima bastante dos resultados do GARP, enquanto que o bloco flexível perde bastante de sua capacidade mobilizadora de carregamento quanto maior forem os espaçamentos entre as estacas, permitindo bastante recalque inclusive entre elas. O decaimento da porcentagem para essas estacas tem característica bem linear no trecho observado.

Enquanto isso, as estacas posicionadas no lado e no centro possuem em suas curvas um ponto máximo, indicando que a variação de espaçamentos entre as estacas deve ser otimizada, a fim de aproveitar ao máximo a mobilização de carga delas.

Nos gráficos seguintes percebe-se novamente a aproximação da curvatura do SoFIA com o GARP para o radier rígido. O carregamento em estacas quando o radier é muito flexível, tende a ser muito maior, já que os deslocamentos também serão excessivos. No caso das estacas centrais, esse efeito é bem acentuado, se afastando das demais soluções.

Figura 4.21 - - Porcentagem de carga nas estacas do lado com exemplo de Kuwabara (1989)

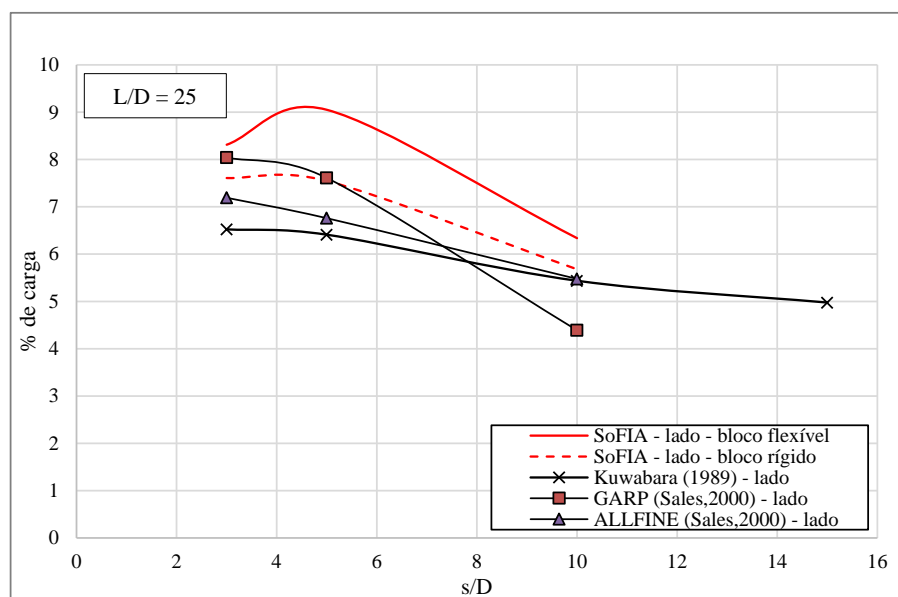
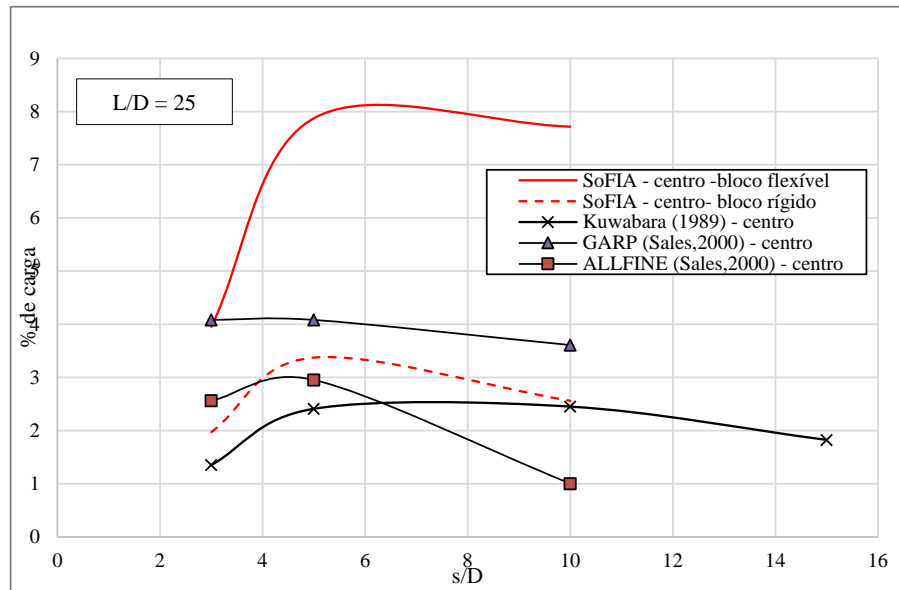


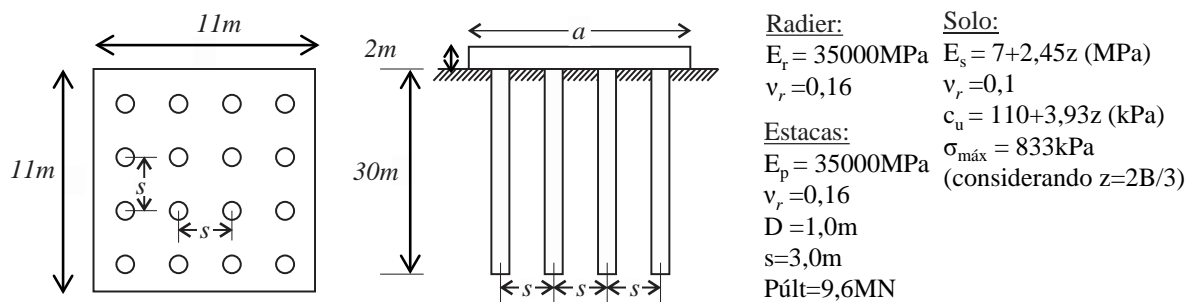
Figura 4.22 – Porcentagem de carga nas estacas do centro com exemplo de Kuwabara (1989)



4.2.2 Radier com 16 estacas proposto em TC-18, Sales, 2000

O exemplo analisado a seguir é um radier estaqueado com 16 estacas. Esse exemplo é apresentado pelo comitê técnico TC-18 no ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*) por O'Neill *et al.*⁷ (1996, *apud* Sales, 2000) e foi analisado por diversos autores. Os detalhes sobre a fundação estão descritas na Figura 4.23

Figura 4.23– Radier estaqueado sob 16 estacas proposto pelo TC-18



Na análise desse bloco foi utilizada uma carga de 80MN distribuída aplicada em uma área central de 1,0×1,0m, que representa um fator de segurança bem elevado, considerando que cada estaca suportaria 9,6MN, e as 16 em conjunto um total de 153,6MN. Além disso, uma vez que

⁷ O'NEIL, M.W., CAPUTO, V., DE COCK, F., HARTIKAINEN, J & METS, M. (1996). Case histories of pile-supported rafts. Report for ISSMFE Tech Comm. TC-18, Univ. of Houston, Texas.

o módulo de elasticidade do solo utilizado é definido por uma equação linear, o solo foi estratificado em 18 camadas, totalizando 90m, que nesse caso é 3 vezes o valor do comprimento das estacas.

Sales (2000) mostra em seu trabalho alguns trabalhos comparando recalque e porcentagem de carregamento das estacas. Esses resultados estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comportamento do radier sobre as 16 estacas, proposto pelo TC-18

Programa/Método/Autor	Recalque (mm)	% de carga nas estacas
SoFIA	40,7	98,6
MEF – Yamashita (1998) (H/L=3)	29,0	98
Tubulão equivalente – Horikoshi & Randolph (1998)	31,0	--
HyPR – Horikoshi & Randolph (1998)	41,0 – 43,0	100
KURP – Matsumoto (1998)	42,0	96
GARP – Método Aproximado (Sales,2000)	42,0	98
PIRAF – Método das Camadas Finitas (Sales,2000)	31,0	98
ALLFINE – MEF (H/L=5) (Sales, 2000)	27,0	95

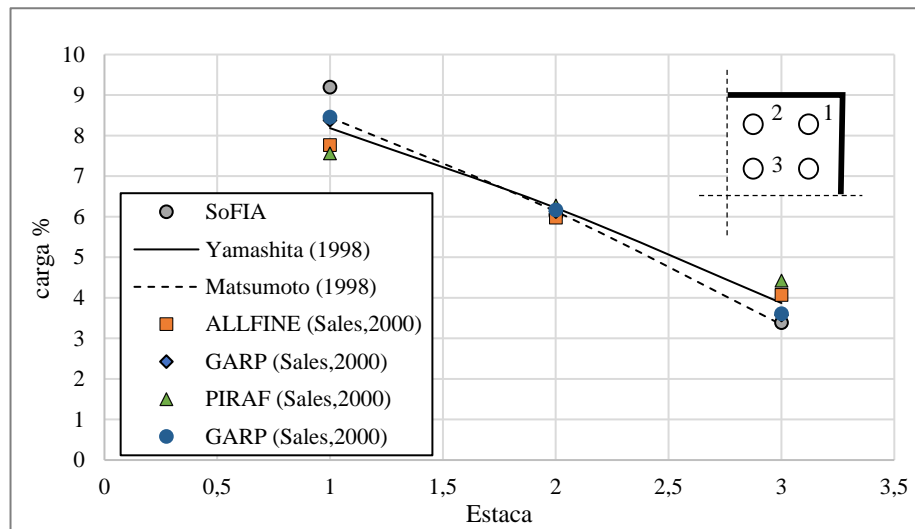
O programa SoFIA, como a maioria dos outros resultados, mostra que as estacas absorvem em torno de 98% do carregamento total. Sales (2000) ressalta que esse comportamento acontece pois o grupo de estacas com espaçamento empregado de s/D de 3m e um solo resistente, apresenta uma rigidez relativa superior ao radier, e o conjunto acaba se comportando mais como um “grupo de estacas” do que como um radier estaqueado propriamente dito.

Quanto aos recalques, os programas com metodologia parecida (GARP, KURP, HyPR e SoFIA) têm resultados próximos, pois são métodos aproximados enquanto as ferramentas que utilizam totalmente o MEF, como o caso de Yamashita (1998) e do ALLFINE (SALES, 2000) giram em torno de 27 e 29mm.

Nessa análise, foram ainda comparados resultados de distribuição de carga entre as estacas do canto, lado e centro do radier. Esses resultados estão mostrados na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Carga absorvida pelas estacas em diferentes posições no radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-

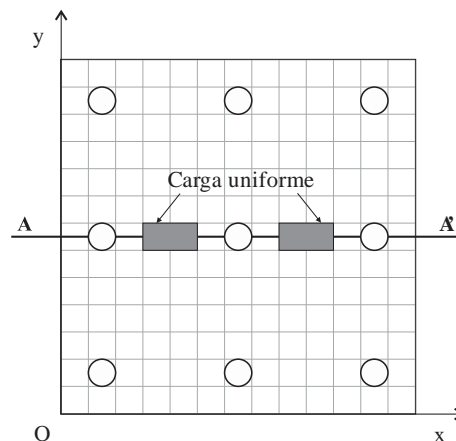
18



O gráfico mostra que o programa SoFIA teve uma leve tendência em absorver mais carregamento nas estacas do canto e menos nas estacas do centro quando comparado aos demais programas. De maneira geral, o programa se aproximou bastante ao resultado dos demais trabalhos.

4.2.3 Radier sobre 9 estacas, Sales *et al.*, 2015

Sales *et al.* (2015) apresentou em seu trabalho um estudo sobre momento fletor em um radier apoiado sobre nove estacas inicialmente apresentado por Zhang e Small (2000). Esse exemplo foi analisado utilizando elementos finitos, e o radier foi submetido a um carregamento de dois pilares (carregamento distribuído). A geometria do problema, juntamente com a discretização da malha, são apresentadas na Figura 4.25.

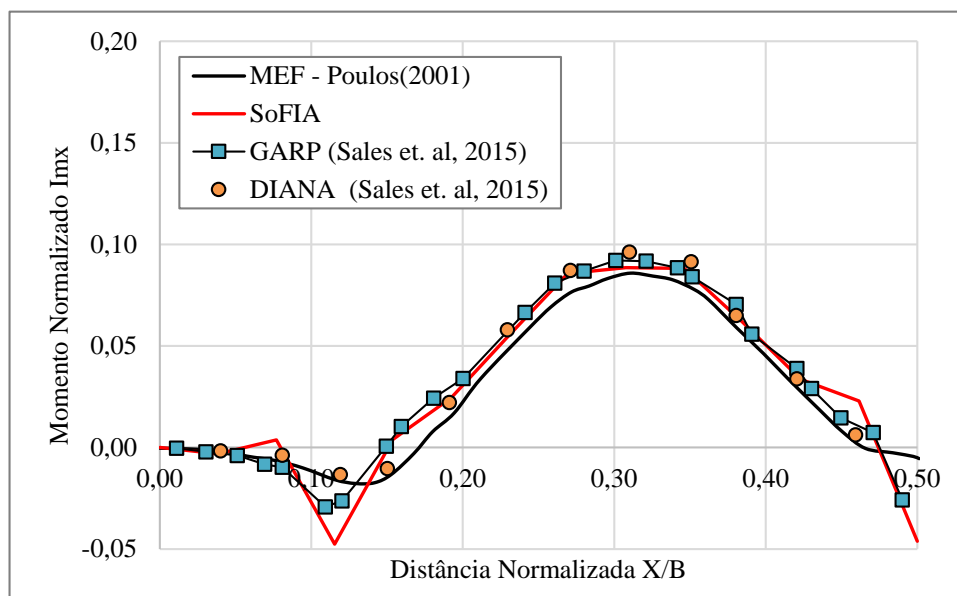
Figura 4.25 – Divisão da malha (modificado de Sales *et al.* (2015))

O solo desse exemplo é isotrópico e homogêneo, cujo módulo de elasticidade E_s é igual a 20 MPa e o coeficiente de Poisson é 0,4. As propriedades do material das estacas e do radier são módulo de Young igual a 20 GPa e coeficiente de Poisson 0,2. O radier quadrado possui lateral 3,9 m e espessura 0,3m. Todas as nove estacas têm comprimento de 15m e diâmetro de 0,3 m. As estacas foram espaçadas de 1,5 m ($s/D=5$) e a aplicação de carga foi feita em pilares de dimensões 0,3x0,6 m, com aplicação de 100 kPa em cada pilar.

Esse estudo originalmente foi feito por Zhang e Small (2000) e depois por Poulos *et al.* (2001). Poulos *et al.* (2001) analisou o radier estaqueado através de uma análise 3D em MEF e Zhang e Small (2000) realizou a análise utilizando o método de elementos finitos para análise do radier e das estacas, e teoria das camadas finitas para a análise do solo. Na Figura 4.28 são apresentados os resultados do problema original. Além disso, Sales *et al.* (2015) apresentou duas análises de momento utilizando o GARP, com metodologia híbrida e o DIANA, completamente em MEF.

Os primeiros resultados comparam o momento normalizado Im_x e Im_y pela distância em x normalizada (X/B), respectivamente nas Figura 4.26 e Figura 4.27. Em ambos os gráficos, percebe-se que todos os métodos deram resultados bem próximos.

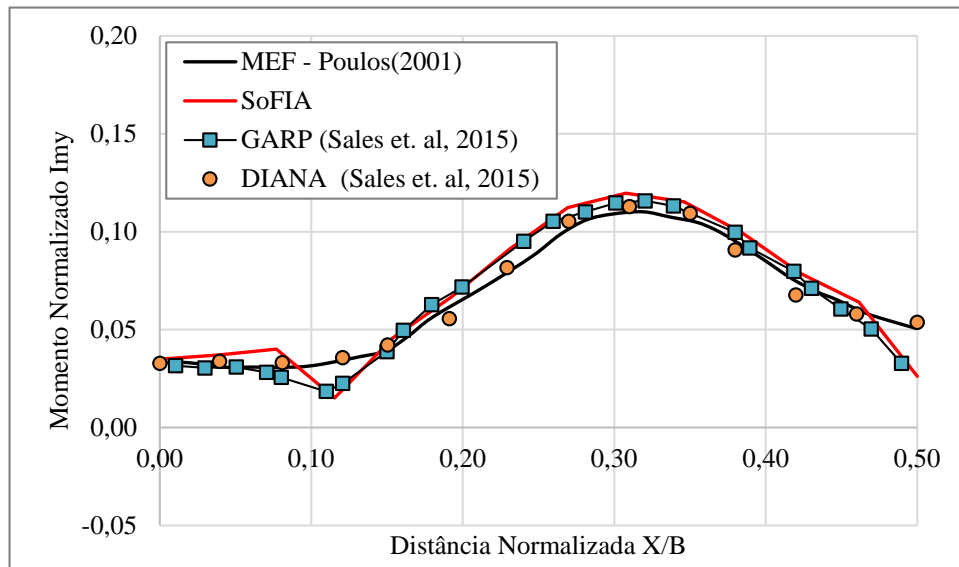
Figura 4.26 - Momento em x normalizado na seção A-A'



No gráfico das duas figuras percebe-se uma leve tendência, tanto do GARP como do SoFIA de momentos negativos bem mais acentuados no posicionamento de estacas, para distância normalizadas em torno 0,1 e 0,5. Esses dois programas utilizam metodologia híbrida. Enquanto

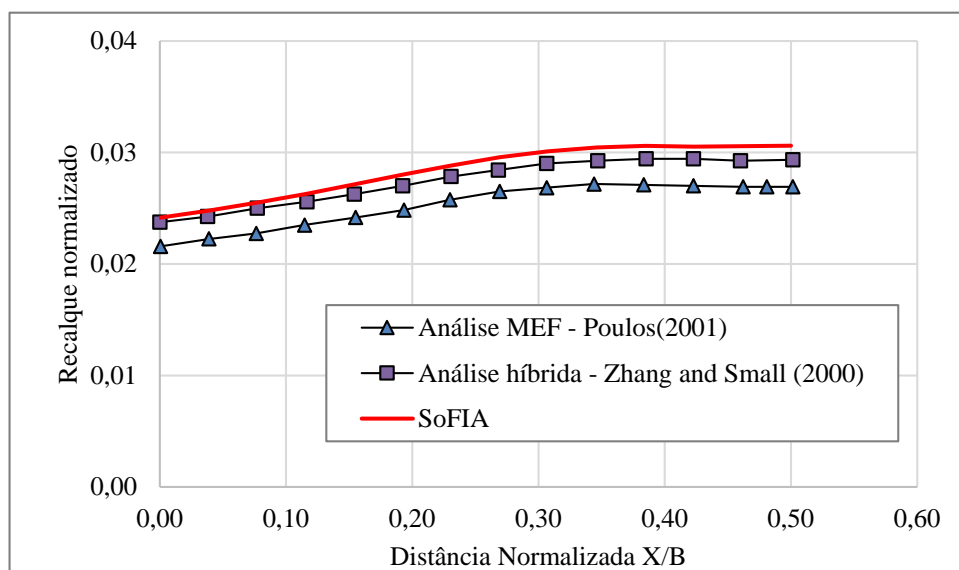
isso, a análise de Poulos e o programa DIANA, que utilizaram análises em MEF 3D, aproximam-se entre si nesses locais de momentos negativos.

Figura 4.27 - Momento em y normalizado na seção A-A'



Já na análise de recalques, o programa SoFIA foi comparado aos resultados originais de Poulos *et al.* (2001), com análise 3D utilizando elementos finitos, e Zhang e Small (2000), utilizando uma ferramenta híbrida. Tanto o programa SoFIA quanto a análise de Zhang e Small (2000), superestimam um pouco os recalques da análise 3D completa, aproximando-se entre si. Porém, sob uma visão do conjunto de resultados, todas são satisfatórias.

Figura 4.28 - Recalque normalizado em z na seção A-A'

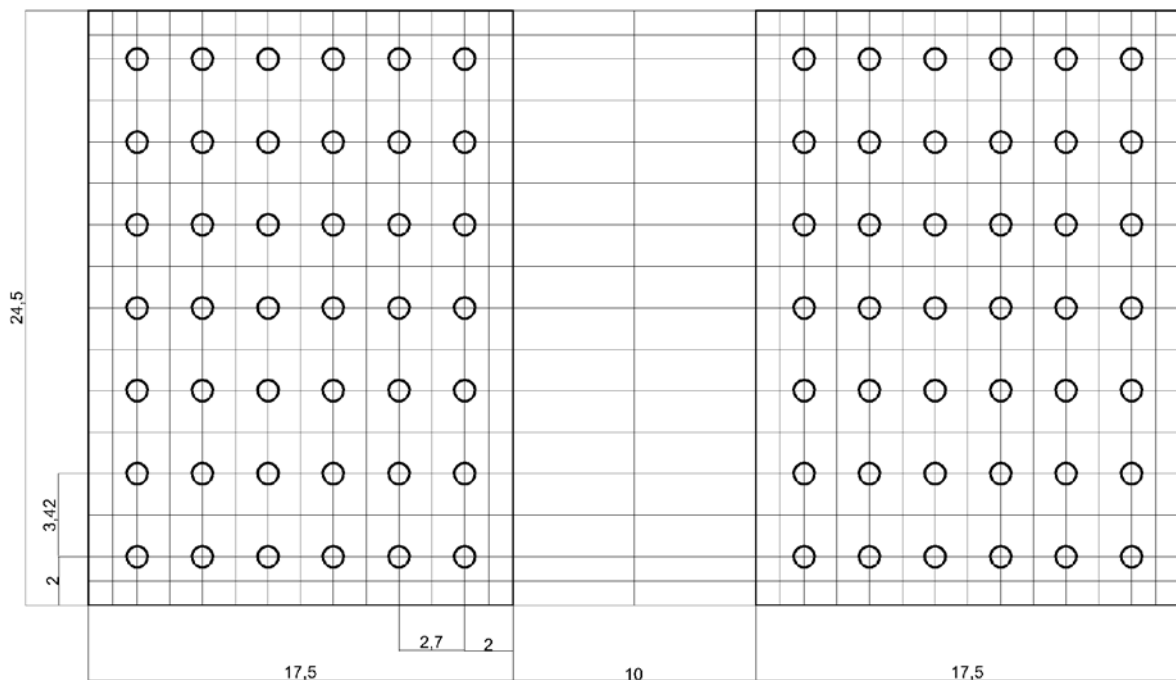


4.2.4 Edifício Messe-Torhaus, Frankfurt, Sales, Small, Poulos (2010)

O edifício Messe-Torhaus foi construído entre 1983 e 1985 em Frankfurt e é considerado o primeiro edifício a aplicar o conceito de radier estaqueado na Alemanha. Ele foi construído numa área estreita entre 6 prédios residenciais e linhas de trem, e portanto necessitava de uma fundação que fosse redutora de recalques. A fundação foi dividida em dois raders, pois entre eles deveria ser construído um túnel. O solo dessa fundação consiste em primeiros 5,5m de cascalho quaternário sob a Argila de Frankfurt até grandes profundidades. (HEMSLEY, 2000)

Cada radier consiste num arranjo 6×7 de estacas com diâmetro de 0,9m e comprimento de 20m. Elas foram espaçadas em 2,7 m na horizontal e 3,42 m na vertical, e os raders estão posicionados horizontalmente e distantes 10,0 m um do outro. A geometria desse problema e a malha utilizada é representada na Figura 4.29. Para possibilitar a análise de fundações em conjunto, entre os blocos foram utilizados elementos de placa de espessura bem fina com espessura de 1mm, simplificando uma situação que simula a ausência de fundações.

Figura 4.29 – Geometria dos dois raders com as estacas do Edifício Messe-Torhaus, Frankfurt.



O radier com 2,5 m de espessura possui módulo de elasticidade de 34 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2, enquanto as estacas possuem módulo de elasticidade de 23,5 GPa e coeficiente de Poisson 0,2. O solo possui módulo de elasticidade variável, apresentado na Tabela 4.3, e coeficiente de Poisson de 0,3.

Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade do solo na condição não drenada (SALES, SMALL e POULOS, 2010)

Profundidade (m)	Módulo de Young não drenado, E_u (MPa)
0 - 10	22,9
10 - 20	40
20 - 25	53
25 - 40	73
40 - 60	110
60 - 100	157

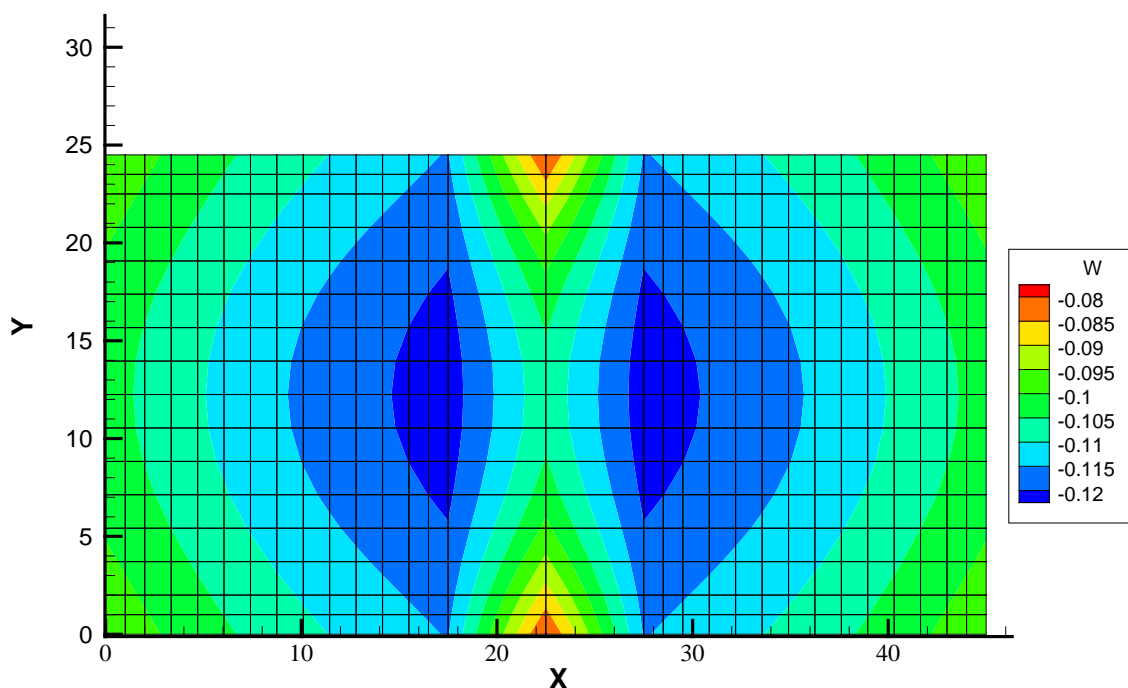
A análise completa foi feita por alguns autores que são mostrados por Sales *et al.* (2010) e são comparadas ao recalque medido no local durante e depois da construção do edifício. Este trabalho, no entanto irá se ater ao recalque previsto para o final da construção, em 10 meses de monitoramento, considerando uma situação não drenada de carregamento do solo. Nessa situação, foram considerados os carregamentos no estágio final das fundações e a Tabela 4.4 apresenta o carregamento de um dos radiers.

Tabela 4.4 – Carregamento de um radier de Messe-Torhaus

	Carregamento (MN)
Escavação	-23,152
Peso do radier	+26,797
Carga aplicada	+200,000
Total	203,654

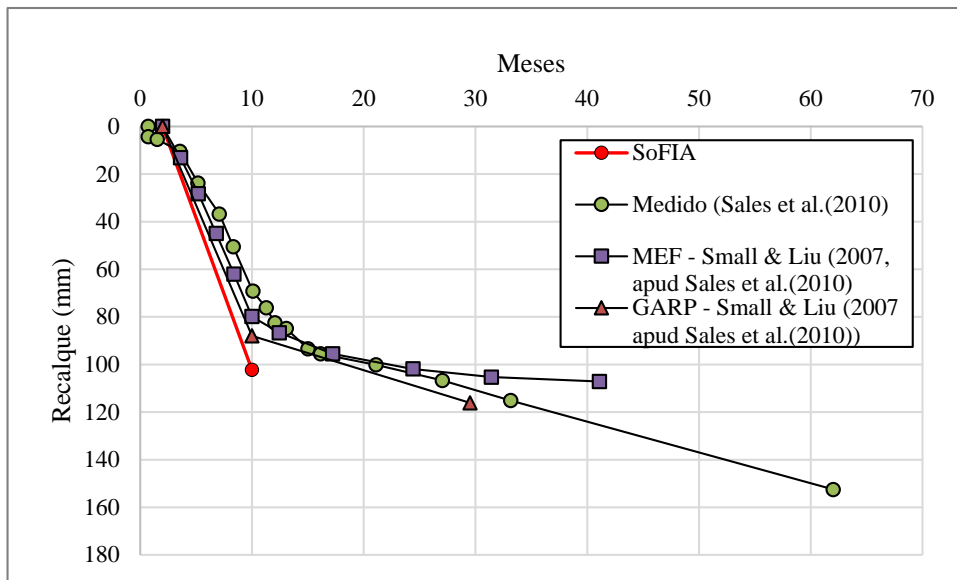
O resultado de recalque dos dois radiers é ilustrado na Figura 4.30, onde percebe-se que os recalques são maiores nas adjacências do encontro entre os dois radiers.

Figura 4.30 – Recalques em z, programa SoFIA



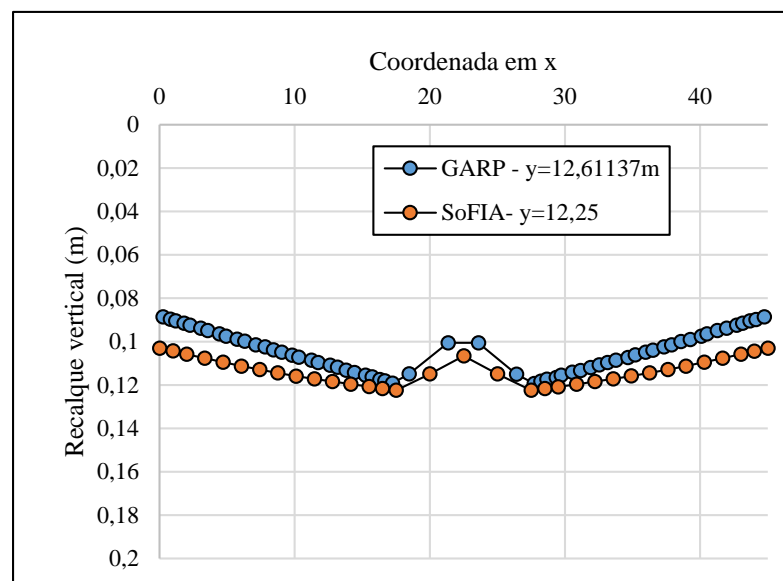
Comparado a outros resultados apresentados por Sales *et al.* (2010), o recalque previsto para edificação ao final dos 10 meses de construção com o programa SoFIA tem uma leve tendência no aumento dos recalques, como mostrado na Figura 4.31. Percebe-se que tanto o programa quanto o GARP superestimam um pouco o recalque quando comparado às análises 3D.

Figura 4.31 – Recalque em 10 meses comparados ao medido e aos métodos



Por último, na análise de recalque aproximadamente na metade do comprimento em y dos dois radiers estaqueados, o programa SoFIA obtém resultados bem semelhantes ao do programa GARP, mostrado na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Recalque ao longo dos dois radiers em x



Esse exemplo com dois radiers mostra a possibilidade que o programa SoFIA tem de aplicação de blocos independentes e analisados em conjunto, colocando entre eles placas de espessura mínima, sem comprometer a análise.

4.3 OUTRAS APLICAÇÕES

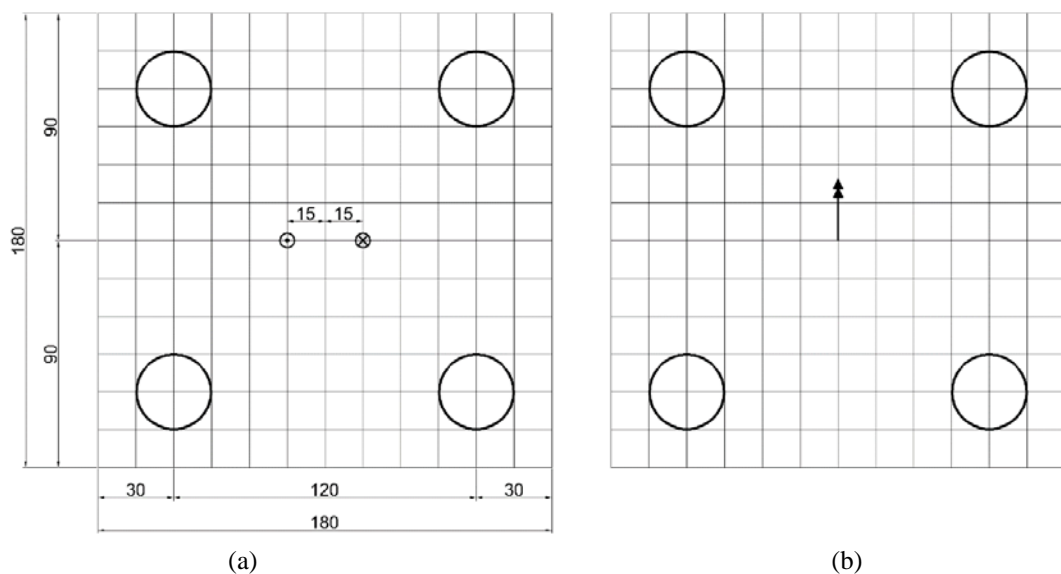
Nessa seção serão apresentados alguns exemplos que ilustram ainda algumas das possibilidades que o programa apresenta como a aplicação de momento nos nós do radier e a possibilidade de implementação de geometrias trapezoidais.

4.3.1 Comparação entre binário e momentos

Com o objetivo de observar os efeitos de recalque pela aplicação de momento, o exemplo de um radier simples com 4 estacas foi comparado sob duas aplicações de carregamento: um binário de forças e a aplicação de momento em y .

Os exemplos, ilustrados na Figura 4.33, mostram a geometria do problema e malha utilizada com aplicação em (a) do binário de forças e em (b) o momento aplicado em y . O radier quadrado com lado de 1,8m e espessura 0,3m, possui módulo de elasticidade de 20GPa e coeficiente de Poisson de 0,2. As estacas, com as mesmas propriedades de material, possuem diâmetro de 0,3m e comprimento de 15m. O solo é uma camada única e homogênea com 65m de espessura com módulo de elasticidade 20MPa e coeficiente de Poisson de 0,4.

Figura 4.33 – Geometria do bloco com quatro estacas: (a) aplicação de binário e (b) aplicação de momento



O carregamento pontual aplicado no binário de força foi de -100kN e 100kN, distantes do centro do radier de 15cm. O momento aplicado equivalente foi de 30kN.m. Os resultados dos carregamentos são mostrados respectivamente na Figura 4.34 e na Figura 4.35.

Figura 4.34 – Gráfico de recalques em z da aplicação de um binário de forças

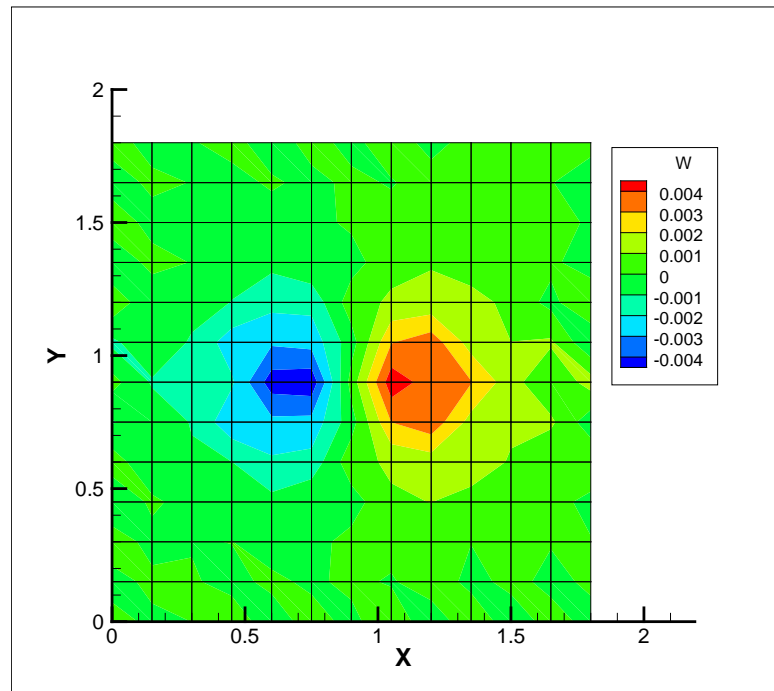
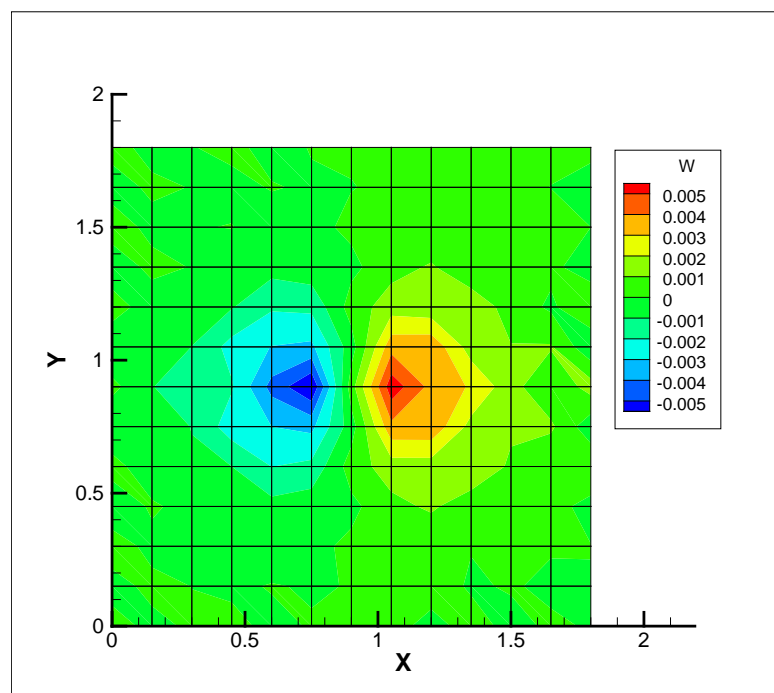
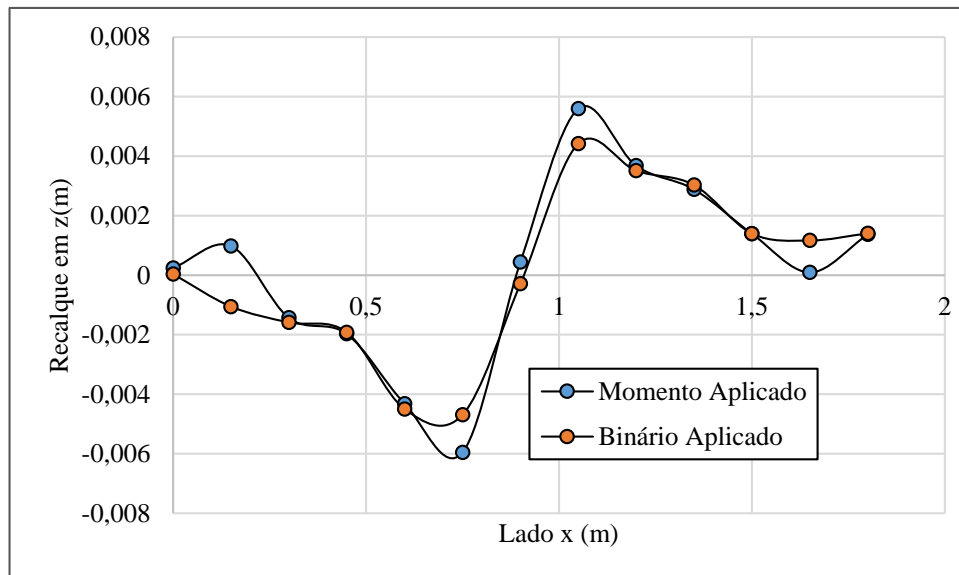


Figura 4.35 - Gráfico de recalques em z da aplicação de momento



A partir desses gráficos é possível perceber que os recalques nos pontos de aplicação têm valor aproximado a 4,5 e 5 mm nos dois exemplos. Caso a malha fosse mais refinada e a distância do braço de aplicação do binário fosse menor, esperar-se-ia que os resultados se aproximassem mais ainda. A comparação em um corte no meio do bloco no eixo y é ilustrada na Figura 4.36.

Figura 4.36 – Corte transversal na direção x mostrando o recalque vertical causado pelo momento e binário



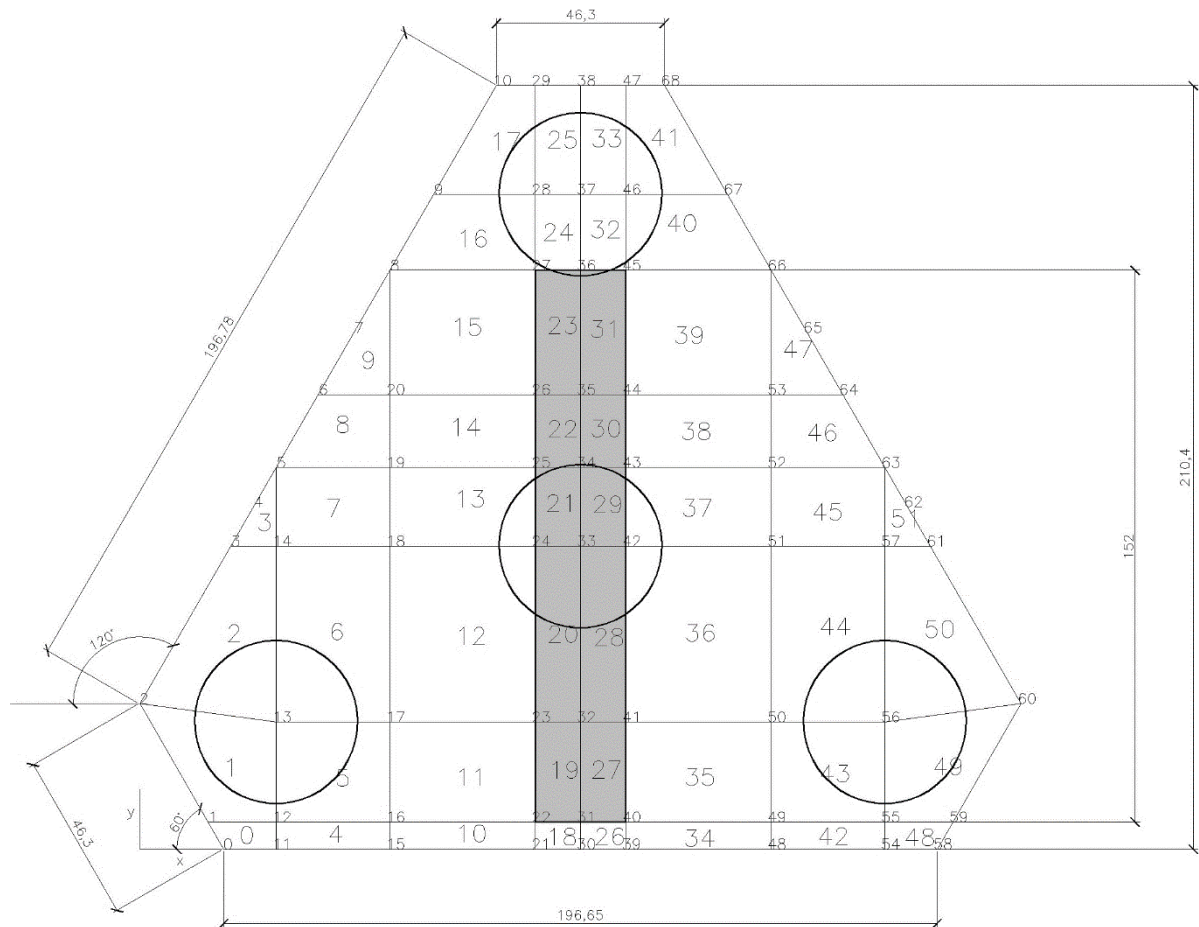
4.3.2 Radier com laterais inclinadas

Outra possibilidade de aplicação do programa SoFIA é a utilização de elementos com face inclinada para montagem do radier, já que os elementos aqui utilizados são isoparamétricos e permitem tanto o alinhamento dos nós, formando triângulos, como a formação de ângulos entre os lados do elemento que não sejam somente reto.

O exemplo mostrado na Figura 4.37 é de um bloco de 4 estacas com faces inclinadas que recebem um pilar de dimensões 1,52×0,25 m e carregamento distribuído de 1201,84 kPa, equivalentes a 456,7 kN aplicados.

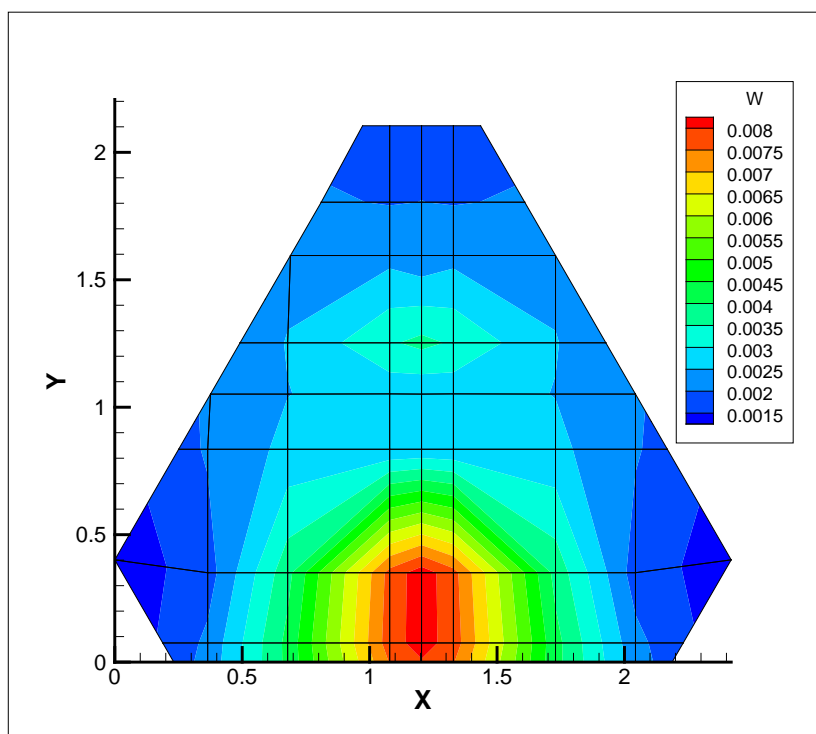
O radier possui espessura de 0,5 m, módulo de elasticidade de 20 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2. As estacas têm diâmetro de 0,45 m, comprimento de 20 m e mesmo material que o radier. O solo é formado por uma única camada homogênea e finita de 65 m de profundidade, módulo de elasticidade de 20 MPa e coeficiente de Poisson de 0,2.

Figura 4.37 – Geometria e malha do problema.



Os recalques desse problema são mostrados na Figura 4.38, onde é possível perceber os recalques maiores entre os espaçamentos das estacas e onde é aplicado o pilar. Essa aplicação mostra a importância da utilização de elementos de face inclinada, em que não é preciso fazer simplificações em geometria de “escada” para utilizar elementos retangulares.

Figura 4.38 – Recalques em z de um bloco com faces inclinadas



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou as etapas para elaboração e aplicação de uma nova ferramenta de análise de radier estaqueado utilizando a metodologia híbrida, o programa *Soil-Foundation Interaction Analysis*, SoFIA, desenvolvida em linguagem orientada a objetos.

Até o presente momento, o programa foi desenvolvido para calcular fundações estaqueadas no regime elástico e obteve bastante êxito na comparação de resultados de outras ferramentas quanto a recalque, distribuição de carga entre estacas e radier, e momento no radier.

O programa SoFIA é uma ferramenta totalmente desenvolvida em métodos dos elementos finitos, que representa hoje o método mais completo e eficiente em vários campos da engenharia, e atualmente tem ganhado bastante espaço em implementações geotécnicas.

As ferramentas híbridas em determinadas ocasiões podem não apresentar resultados tão precisos como as ferramentas que utilizam elementos finitos 3D, como observado em diversas comparações apresentadas nesse trabalho. No entanto, a ferramenta SoFIA, como outras ferramentas híbridas, são ferramentas práticas e aplicáveis à maioria de situações de fundações geotécnicas. Essa metodologia no entanto não é aplicável a situações em que haja alguma variação no horizonte do perfil, seja ela no solo ou mesmo para estacas inclinadas em relação ao eixo z no sentido da profundidade.

O programa SoFIA utiliza na análise do radier elementos finitos de placa de Kirchhoff isoparamétricos que são capazes de discretizar faces inclinadas sem a necessidade de discretização das faces em “escada”. Além disso, por se tratar de uma ferramenta híbrida de análise, ele é capaz de obter suas próprias interações de análise do meio solo/estaca, também por elementos finitos axissimétricos, representando uma novidade entre os programas utilizados nesse tipo de análise.

Nessa etapa foram verificados os resultados das interações tanto de estacas carregadas reproduzindo recalques em outros elementos, como de solos carregados. Comparados a outros programas de análise usando o MEF 3D, ao método de elemento de contorno e a outros métodos

analíticos de cálculo de recalques, a análise axissimétrica se mostrou bastante precisa e rápida para esses fins. A análise de interações pelo Método dos Elementos Finitos representa ainda um ganho na análise de solos heterogêneos, quando comparado por exemplo ao Método dos Elementos de Contorno.

Os resultados foram bastante satisfatórios em relação a recalques, carregamentos e momentos, quando comparado a outros exemplos da literatura. Os resultados, em especial os de recalque, tendem a se aproximarem mais do resultados obtidos por programas semelhantes que utilizam metodologia híbrida, ao passo que os programas que são desenvolvidos totalmente em Método dos Elementos Finitos em três dimensões, devem se atentar ao fato de utilizar elementos de placa para a análise do radier no lugar de elementos sólidos 3D. Esse problema está principalmente relacionado à formulação de elementos 3D que podem apresentar problemas de mau condicionamento de cisalhamento. Portanto, sugere-se que mesmo nas análises que discretizam o problema completo em três dimensões, utilize-se os elementos de placa para o radier.

Além disso, o programa foi desenvolvido em linguagem orientada a objetos, linguagem promissora que permite a expansão da ferramenta numérica, agregando novos tipos de elementos finitos, novas análises e até mesmo outros tipos de fundação, sem risco de comprometer a estrutura inicial desse programa.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos para elaboração da ferramenta e na aplicação feita para alguns exemplos, propõe-se:

1. Implementação de um gerador de malha eficiente tirando da operação do usuário a numeração dos nós evitando risco de operação ineficiente. O gerador deve ser capaz de numerar nós de forma eficaz e otimizada para exemplos mais complexos, com faces inclinadas e superposição de alinhamentos de estacas e de pilares;
2. Entrada de dados gráfica, permitindo que o usuário não precise entrar com dados como: numeração de elementos e coordenadas dos nós;
3. Implementação de saída gráfica, não necessitando a utilização de um software intermediário para geração de gráficos;
4. Implementação de rotina para cálculo de esforços ao longo da estaca;

5. Implementação de placa de Mindlin para resultados mais precisos quando utilizadas alturas maiores para o radier;
6. Implementação de rotinas com passos de carga da não-linearidade das estacas e do solo, permitindo uma análise mais completa, principalmente no que diz respeito a diminuição dos fatores de segurança, permitindo que algumas estacas cheguem ao seu limite último de carga;
7. Implementação de rotinas para análise de diferentes combinações de carregamento, a fim de obter uma solução que atenda todas as combinações oriundas do um projeto estrutural.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. 1ª Edição. ed. São Paulo: Blucher, 1991.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. **An approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles**. V PACSMFE. Buenos Aires: [s.n.]. 1975.
- BITTENCOURT, D. M. A. **Construção de uma Ferramenta Numérica para Análise de Radiers Estaqueados**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 223. 2012.
- BITTENCOURT, D. M. A.; DOEHLER, T. A.; SALES, M. M. **Análise da Influência do tipo de seção transversal no comportamento de estacas isoladas via modelagem numérica**. VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA. Brasília: Universidade de Brasília. 2011. p. 213-221.
- BITTENCOURT, D. M. A.; LIMA, B. E. A. **Análise dos fatores de interação em radier estaqueado: comparação entre dias abordagens numéricas**. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 136. 2009.
- BUTTERFIELD, R.; BANERJEE, P. K. The problem of pile group - pile cap interaction. **Geotechnique**, 21, 1971. 43-60.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Tensão Admissível em Fundações Diretas**. 1ª Edição. ed. São Carlos: Rima, 2003.
- COOK, ROBERT D.; MALKUS, DAVID S.; PLESHA, MICHAEL E.; WITT, ROBERT J. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. **Capacidade de Carga de Estacas a partir de valores de SPT**. Proc. of VI COBRAMSEF. Rio de Janeiro: [s.n.]. 1978. p. 45-53.
- EL-GARHY, BASUONY; GALIL, AHMED ABDEL; YOUSSEF, ABDEL-FATTAH; RAI, MOHAMED ABO. Behaviour of raft on settlement reducing piles: Experimental model study. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 5, p. 389-399, 2013.
- FARIAS, M. M. **Numerical analysis of clay core dams**. PhD Thesis. Swansea, UK: University. College of Swansea, 1993.
- HAIN, S. J.; LEE, I. K. The analysis of flexible raft-pile systems. **Geotechnique**, 28(1), 1978. 65-83.

HEMSLEY, J. A. **Design applications of raft foundations**. Londres: Thomas Telford Ltd, 2000.

KIM, KYUNG NAM; LEE, SU-HYUNG; KIM, KI-SEOK; CHUNG, CHOONG-KI; KIM, MYOUNG MO; LEE, HAE SUNG. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. **Computers and Geotechnics**, v. 28, p. 235-253, 2001.

KUWABARA, F. An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. **Soils and Foundations**, 29, 1989. 89-92.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1969.

LIMA, B. S. **Otimização de Fundações Estaqueadas**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 118. 2007.

LUBARDA, V. A. Circular loads on the surface of a half-sapece: Displacement and stress discontinuities under the load. **International Journal of Solids and Structures**, v. 50, p. 1-14, 2012.

MINDLIN, R. D. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid. **Physics**, v. 7, n. 5, p. 195-202, maio 1936.

NAPOLIS NETO, A. D. F. História das Fundações. In: NAPOLIS NETO, A. D. F. . E. A. **Fundações, Teoria e prática**. São Paulo: PINI, 1998. p. 17-33.

OTTAVIANI, M. Un esempio di applicazione del metodo degli elementi finiti allo studio di pali di fondazione in terreni stratificati. **Rivista Italiana di Geotecnica**, 3, 1972. 1-13.

OTTAVIANI, M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. **Geotechnique**, 25(2), 1975. 159-174.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. **Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory**. London: Thorns Telford Ltd, v. 1, 1999.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. **Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application**. 1ª. ed. London: Thorns Telford Ltd, v. 2, 2001.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. New York: Wiley, 1980a.

POULOS, H. G. **Users guide to program DEFPIG**. Sydney: School of Civil Engineering. The University of Sydney, 1980b.

- POULOS, H. G. An Approximate Numerical Analysis of pile-raft interaction. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, London, v. 18, p. 73-92, 1994a.
- POULOS, H. G. **GARP**, 1994b.
- POULOS, H. G. Pile drafts in swelling or consolidation soils. **Journal of Geot. Eng. Div.**, p. 374-380, 1994c.
- POULOS, H. G. **Methods of analysis of piled raft foundations**. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [S.l.]. 2001a.
- POULOS, H. G. Piled Raft Foundations: design and applications. **Géotechnique**, p. 19, 2001b.
- POULOS, H. G.; CARTER, J. P.; SMALL, J. C. Foundation and Retaining structures: research and practice, 2001.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- PRESLEY, J. S.; POULOS, H. G. **Finite Element Analysis of Mechanism of Pile Group Behaviour**. University of Sidney. [S.l.]. 1986. (R518).
- RANDOLPH, M. F. **Design methods for pile groups and piled rafts: state-of-art report**. Proc 13th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engin. New Delhi: [s.n.]. 1994. p. 61-82.
- RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. **Journal of Geotechnical Engineering, A.S.C.E.**, v. 104, p. 1465-1488, 1978.
- RUSSO, G. Numerical Analysis of Piled Rafts. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 22, p. 477-493, 1998.
- SALES, M. M. **Análise do comportamento de sapatas estacadas**. Tese de Doutorado. Brasília,DF: Universidade de Brasília, 2000.
- SALES, MAURÍCIO M.; LIMA, BRUNO S.; ALMEIDA, SYLVIA REGINA M.; FARIAS, MÁRCIO M.. Automatic optimization of piled raft design based on branch and bound method. **The structural design of tall and special buildings**, v. 24, p. 351-365, 2015.
- SALES, M. M.; SMALL, J. C.; POULOS, H. G. Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements and predictions. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 47, p. 327-345, 2010.
- SMALL, J. C.; POULOS, H. G. **User's Manual of GARP6**. University of Sidney. [S.l.]. 1998.

TIMOSHENKO, S. **Theory of Plates and Shells**. 2^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1964.

TNO, B. A. C. R. **Diana User's Manual**: Release 9.3. Delf, Netherlands: [s.n.], 2008.

WANG, Y. H.; THAM, L. G.; YUE, Z. Q. Plate on layered foundation analyzed by a semi-analytical and semi-numerical method. **Computers and Geotechnics**, v. 30, p. 409-418, 2003.

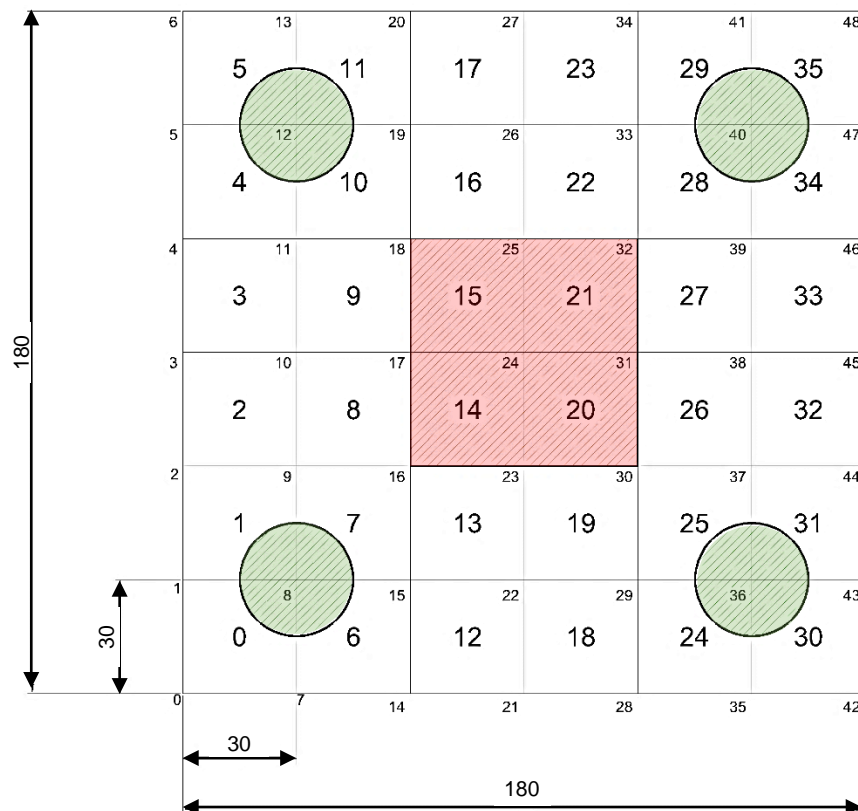
ZHANG, H. H.; SMALL, J. C. Anaysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. **Computers and Geotechnics**, v. 26, p. 1-21, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A ENTRADA DE DADOS

Neste Apêndice é apresentado um exemplo de arquivo de entrada de dados do programa Soil-Foundation Interaction Analysis, SoFIA. Esse exemplo trata-se de um bloco sobre quatro estacas com carregamento distribuído de um pilar central, como mostra a Figura A.1.

Figura A.1 – Geometria de um bloco com quatro estacas com pilar central analisado pelo programa SoFIA



O arquivo de entrada de texto desse exemplo é apresentado abaixo:

```
%apendice
/Nos/
%Coordenadas dos nos
%      Tipo  x      y      Estaca
0      NoS23  0.0    0
1      NoS23  0.0    0.3
2      NoS23  0.0    0.6
3      NoS23  0.0    0.9
4      NoS23  0.0    1.2
5      NoS23  0.0    1.5
```

6	NoS23	0.0	1.8	
7	NoS23	0.3	0	
8	NoE23	0.3	0.3	0
9	NoS23	0.3	0.6	
10	NoS23	0.3	0.9	
11	NoS23	0.3	1.2	
12	NoE23	0.3	1.5	0
13	NoS23	0.3	1.8	
14	NoS23	0.6	0	
15	NoS23	0.6	0.3	
16	NoS23	0.6	0.6	
17	NoS23	0.6	0.9	
18	NoS23	0.6	1.2	
19	NoS23	0.6	1.5	
20	NoS23	0.6	1.8	
21	NoS23	0.9	0	
22	NoS23	0.9	0.3	
23	NoS23	0.9	0.6	
24	NoS23	0.9	0.9	
25	NoS23	0.9	1.2	
26	NoS23	0.9	1.5	
27	NoS23	0.9	1.8	
28	NoS23	1.2	0	
29	NoS23	1.2	0.3	
30	NoS23	1.2	0.6	
31	NoS23	1.2	0.9	
32	NoS23	1.2	1.2	
33	NoS23	1.2	1.5	
34	NoS23	1.2	1.8	
35	NoS23	1.5	0	
36	NoE23	1.5	0.3	0
37	NoS23	1.5	0.6	
38	NoS23	1.5	0.9	
39	NoS23	1.5	1.2	
40	NoE23	1.5	1.5	0
41	NoS23	1.5	1.8	
42	NoS23	1.8	0	
43	NoS23	1.8	0.3	
44	NoS23	1.8	0.6	

```

45    NoS23  1.8    0.9
46    NoS23  1.8    1.2
47    NoS23  1.8    1.5
48    NoS23  1.8    1.8

```

```
/NosFim/
```

```
/Materiais/
```

```
%Propriedades dos materiais
```

```

%      Tipo           E           poisson
1      HomoIso       20000000.0       0.2

```

```
/MateriaisFim/
```

```
/Secoes/
```

```
%Propriedades das seções transversais
```

```

%      Tipo  t
1      Plana 0.30

```

```
/SecoesFim/
```

```
/Elementos/
```

```
%Incidencia
```

```

%      Tipo      no1    no2    no3    no4    mat    sec
0      PKQ4ISO    0      7      8      1      0      0
1      PKQ4ISO    1      8      9      2      0      0
2      PKQ4ISO    2      9      10     3      0      0
3      PKQ4ISO    3      10     11     4      0      0
4      PKQ4ISO    4      11     12     5      0      0
5      PKQ4ISO    5      12     13     6      0      0
6      PKQ4ISO    7      14     15     8      0      0
7      PKQ4ISO    8      15     16     9      0      0
8      PKQ4ISO    9      16     17     10     0      0
9      PKQ4ISO    10     17     18     11     0      0
10     PKQ4ISO    11     18     19     12     0      0
11     PKQ4ISO    12     19     20     13     0      0
12     PKQ4ISO    14     21     22     15     0      0
13     PKQ4ISO    15     22     23     16     0      0
14     PKQ4ISO    16     23     24     17     0      0
15     PKQ4ISO    17     24     25     18     0      0
16     PKQ4ISO    18     25     26     19     0      0
17     PKQ4ISO    19     26     27     20     0      0

```

18	PKQ4ISO	21	28	29	22	0	0
19	PKQ4ISO	22	29	30	23	0	0
20	PKQ4ISO	23	30	31	24	0	0
21	PKQ4ISO	24	31	32	25	0	0
22	PKQ4ISO	25	32	33	26	0	0
23	PKQ4ISO	26	33	34	27	0	0
24	PKQ4ISO	28	35	36	29	0	0
25	PKQ4ISO	29	36	37	30	0	0
26	PKQ4ISO	30	37	38	31	0	0
27	PKQ4ISO	31	38	39	32	0	0
28	PKQ4ISO	32	39	40	33	0	0
29	PKQ4ISO	33	40	41	34	0	0
30	PKQ4ISO	35	42	43	36	0	0
31	PKQ4ISO	36	43	44	37	0	0
32	PKQ4ISO	37	44	45	38	0	0
33	PKQ4ISO	38	45	46	39	0	0
34	PKQ4ISO	39	46	47	40	0	0
35	PKQ4ISO	40	47	48	41	0	0

/ElementosFim/

/Estacas/

%Propriedade das Estacas

%	Comprimento	Diametro	E	poisson
1	15	0.30	20000000.0	0.2

/EstacasFim/

/CarregamentoDistribuido/

%Elementos carregados (idsis=1 global. idsis=0 local)

%	e1	idsis	qz
1	14	1	100.0
1	15	1	100.0
1	20	1	100.0
1	21	1	100.0

/CarregamentoDistribuidoFim/

/CarregamentoNodal/

%Nos_carregados

%	no	fz	mx	my
---	----	----	----	----

```
/CarregamentoNodalFim/
```

```
/CamadasSolo/
```

```
%Propriedades_do_solo
```

%	Espes	E	Poisson	Lado
1	10.0	22900.0	0.3	0.3
2	10.0	40000.0	0.3	0.3
3	5.0	53000.0	0.3	0.3
4	15.0	73000.0	0.3	0.3
5	20.0	110000.0	0.3	0.3
6	40.0	157000.0	0.3	0.3

```
/CamadasSoloFim/
```

```
%Fim
```

A entrada, como explicado no Capítulo 3 com a metodologia deste trabalho, é dividida basicamente em Nós, Elementos, Tipo de materiais e seções do radier, Estacas e suas propriedades, Carregamento distribuído, Carregamento nodal e camadas do solo.

Cada uma dessas seções são iniciadas pelo seu nome entre barras, como “/CamadasSolos/” e são finalizadas pelo seu nome e a palavra fim, emendadas e entre barras: “/CamadasSolosFim/”. Toda linha que inicia em “%” é considerada comentário pelo código de leitura, e portanto desconsiderada como informação relevante.

APÊNDICE B SAÍDA EM TXT

Entre os arquivos de saída para leitura com final *.txt* estão os arquivos com valor de força na estaca e valores das interações entre os elementos de solo e os tipos de estacas do problema.

O arquivo com os valores das forças nas estacas são apresentados a seguir:

Estaca 1	0.30000	0.30000	força: 8.6123988543107
Estaca 2	0.30000	1.50000	força: 8.61239885431387
Estaca 3	1.50000	0.30000	força: 8.61239885430575
Estaca 4	1.50000	1.50000	força: 8.61239885431069

Já os arquivos com os valores para os recalques obtidos das interações serão resumidos com os primeiros e últimos cinco valores para cada um dos tipos de interação. Em cada coluna estão os valores raio, profundidade z e valor do recalque em metros.

Estaca 0 – estaca 0:

0.0000E+000	0.0000E+000	7.8738E-006
6.8785E-002	0.0000E+000	7.8732E-006
1.3757E-001	0.0000E+000	7.8711E-006
2.0636E-001	0.0000E+000	7.0348E-006
2.7514E-001	0.0000E+000	6.4133E-006
(...)		
3.4049E+001	0.0000E+000	9.4971E-008
3.4117E+001	0.0000E+000	9.4884E-008
3.4186E+001	0.0000E+000	9.4797E-008
3.4255E+001	0.0000E+000	9.4710E-008
3.4324E+001	0.0000E+000	9.4623E-008

Estaca 0 – solo:

0.0000E+000	0.0000E+000	7.8738E-006
6.8785E-002	0.0000E+000	7.8732E-006
1.3757E-001	0.0000E+000	7.8711E-006
2.0636E-001	0.0000E+000	7.0348E-006
2.7514E-001	0.0000E+000	6.4133E-006
(...)		
3.4049E+001	0.0000E+000	9.4971E-008
3.4117E+001	0.0000E+000	9.4884E-008

3.4186E+001	0.0000E+000	9.4797E-008
3.4255E+001	0.0000E+000	9.4710E-008
3.4324E+001	0.0000E+000	9.4623E-008

Solo – Estaca 0:

0.0000E+000	-5.0000E+000	3.2715E-006
1.2538E-001	-5.0000E+000	3.2690E-006
2.5076E-001	-5.0000E+000	3.2617E-006
3.7614E-001	-5.0000E+000	3.2498E-006
5.0152E-001	-5.0000E+000	3.2332E-006

(...)

6.2063E+001	-5.0000E+000	1.1479E-008
6.2188E+001	-5.0000E+000	1.1465E-008
6.2313E+001	-5.0000E+000	1.1451E-008
6.2439E+001	-5.0000E+000	1.1437E-008
6.2564E+001	-5.0000E+000	1.1423E-008

Solo – Solo:

0.0000E+000	0.0000E+000	8.3407E-005
1.2538E-001	0.0000E+000	7.9416E-005
2.5076E-001	0.0000E+000	6.5330E-005
3.7614E-001	0.0000E+000	3.6431E-005
5.0152E-001	0.0000E+000	2.5550E-005

(...)

6.2063E+001	0.0000E+000	1.1932E-008
6.2188E+001	0.0000E+000	1.1918E-008
6.2313E+001	0.0000E+000	1.1904E-008
6.2439E+001	0.0000E+000	1.1890E-008
6.2564E+001	0.0000E+000	1.1876E-008

APÊNDICE C SAÍDA EM DAT

Os arquivos final *.dat* são arquivos de saída para geração de gráficos em um outro programa. Nesse caso a saída é específica para leitura nesse programa, e serão aqui apresentadas somente por meio de figuras por serem arquivos de texto bastante extensos. As saídas de dados são divididas para dados do radier, do solo, do sistema axissimétrico do solo e das estacas.

Primeiramente são mostrados os gráficos gerados do radier das Figura C.1 a Figura C.7, com valores de deformações em z, rotação em x e y, momento em x e y e cortantes em x e y.

Figura C.1 – Deformações w na direção z do programa SoFIA, valores em metros

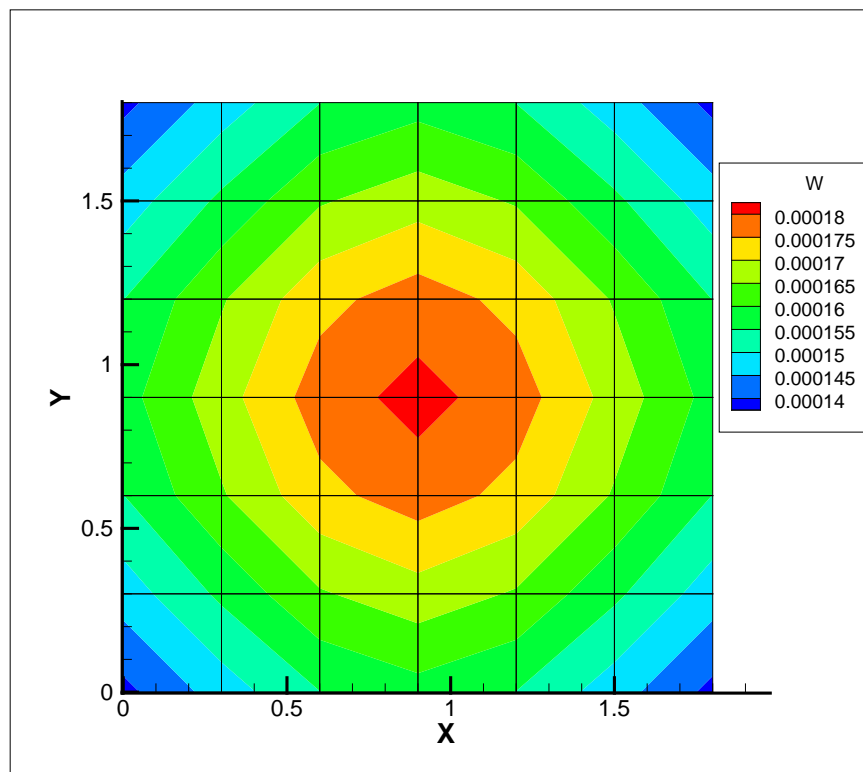


Figura C.2 – Rotação em x do programa SoFIA

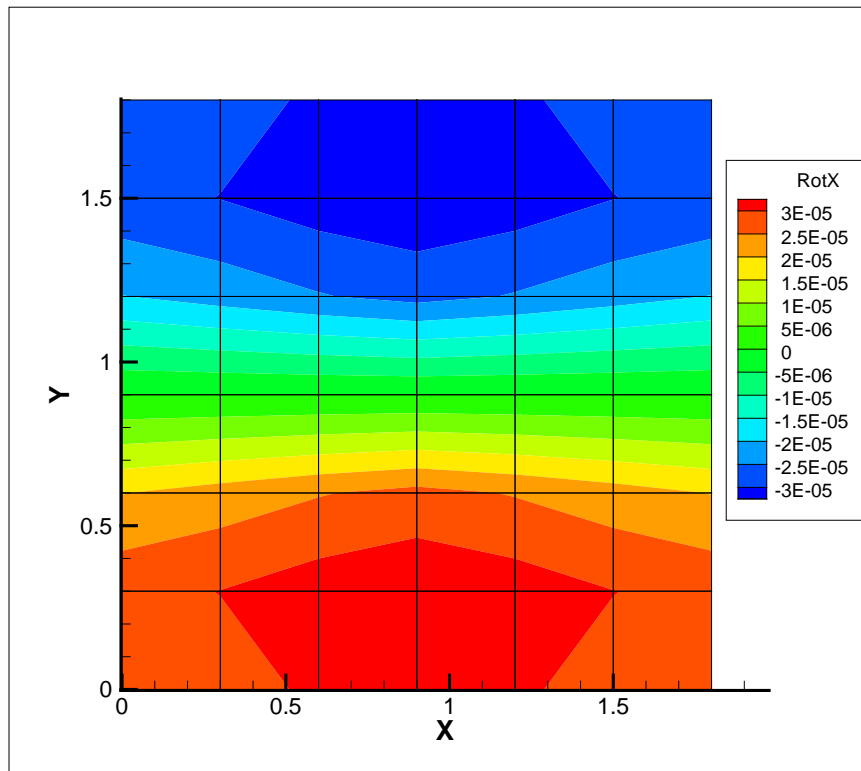


Figura C.3– Rotação em y do programa SoFIA

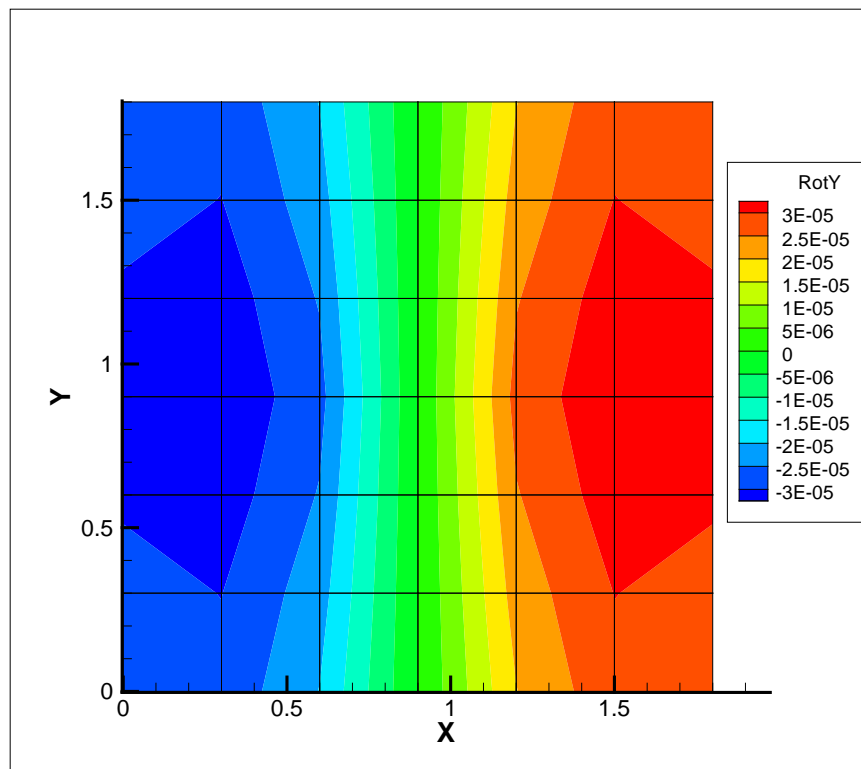


Figura C.4 – Momento em x do programa SoFIA, valores em kN.m

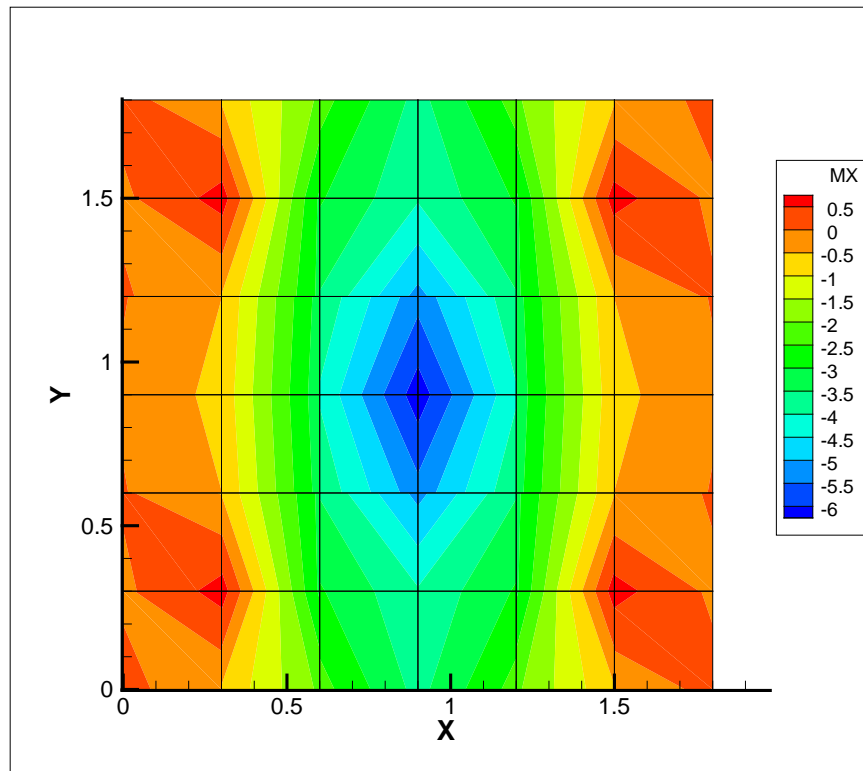


Figura C.5 – Momento em y do programa SoFIA, valores em kN.m

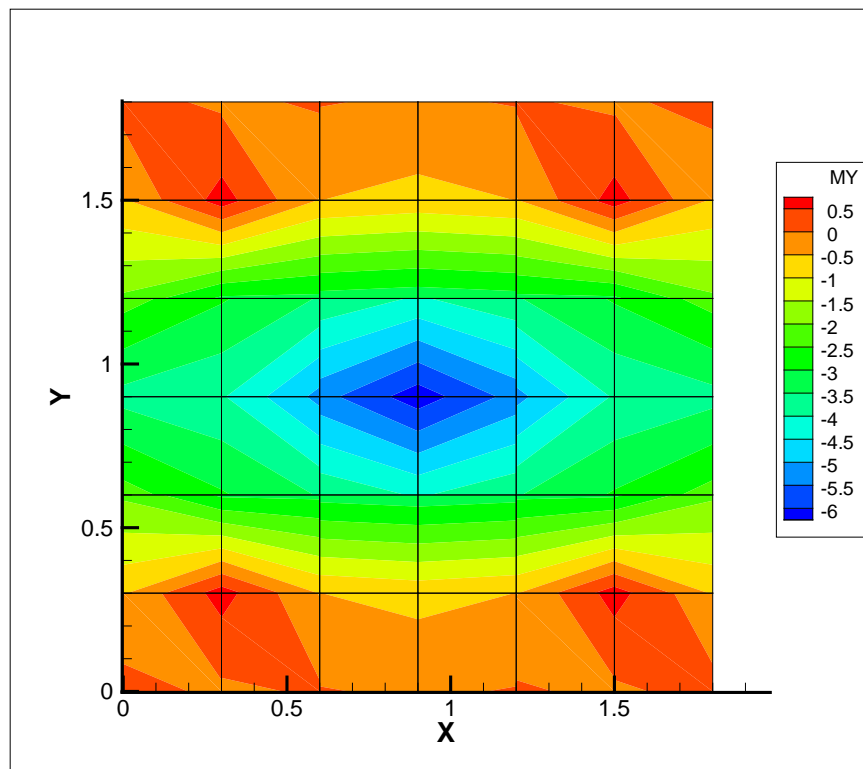


Figura C.6 – Cortante em x do programa SoFIA, valores em kN

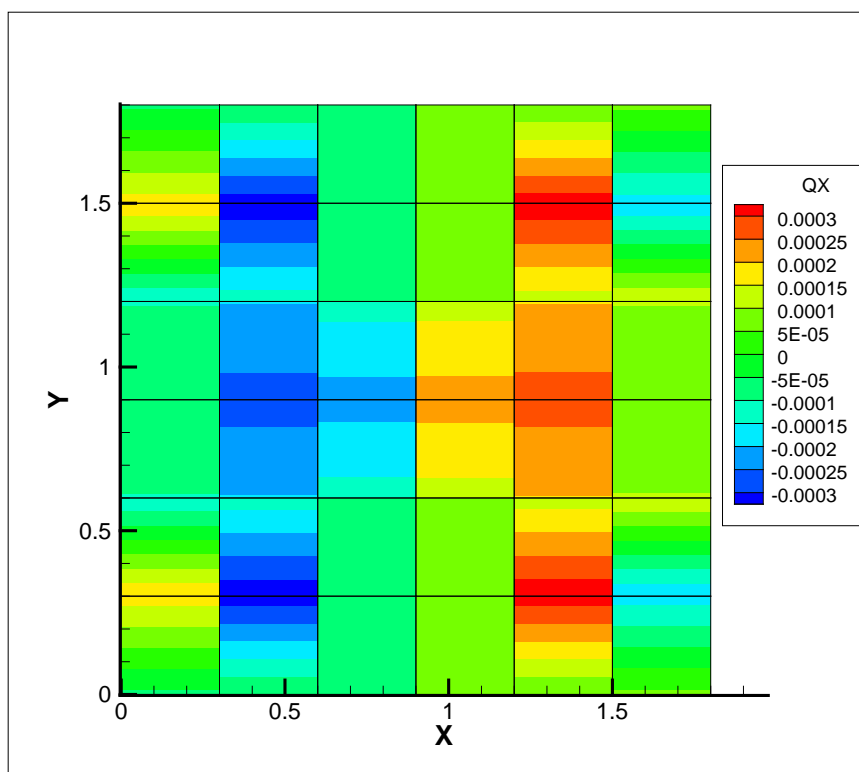
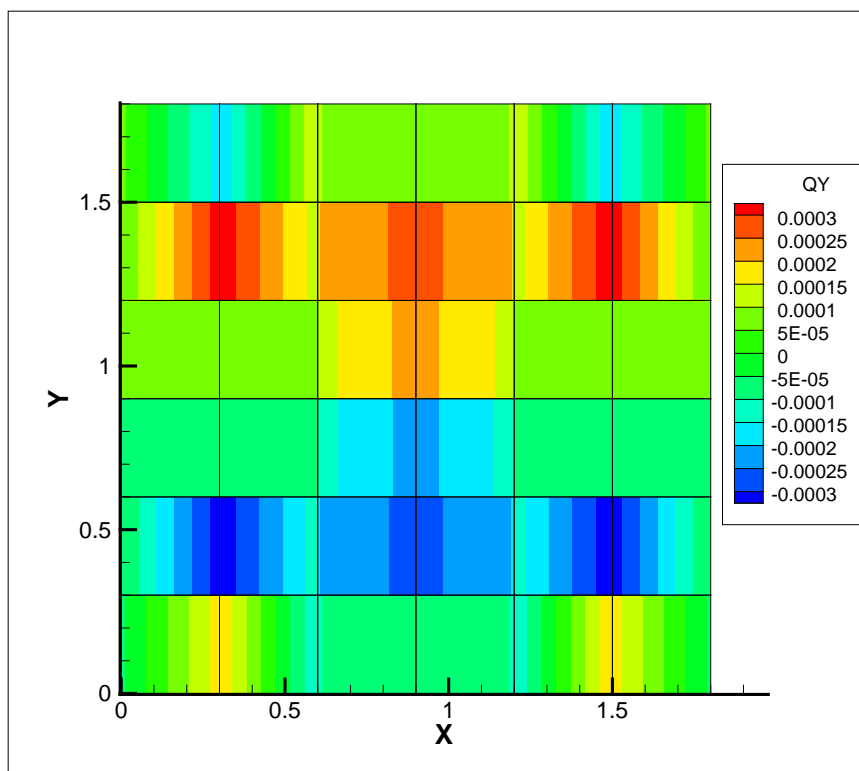


Figura C.7 – Cortante em y do programa SoFIA, valores em kN



Ainda são apresentadas num segundo arquivo as tensões na superfície do solo e forças aplicadas logo abaixo do radier, como mostra a Figura C.8 e Figura C.9 respectivamente.

Figura C.8 – Tensões abaixo do radier do programa SoFIA, valores em kPa

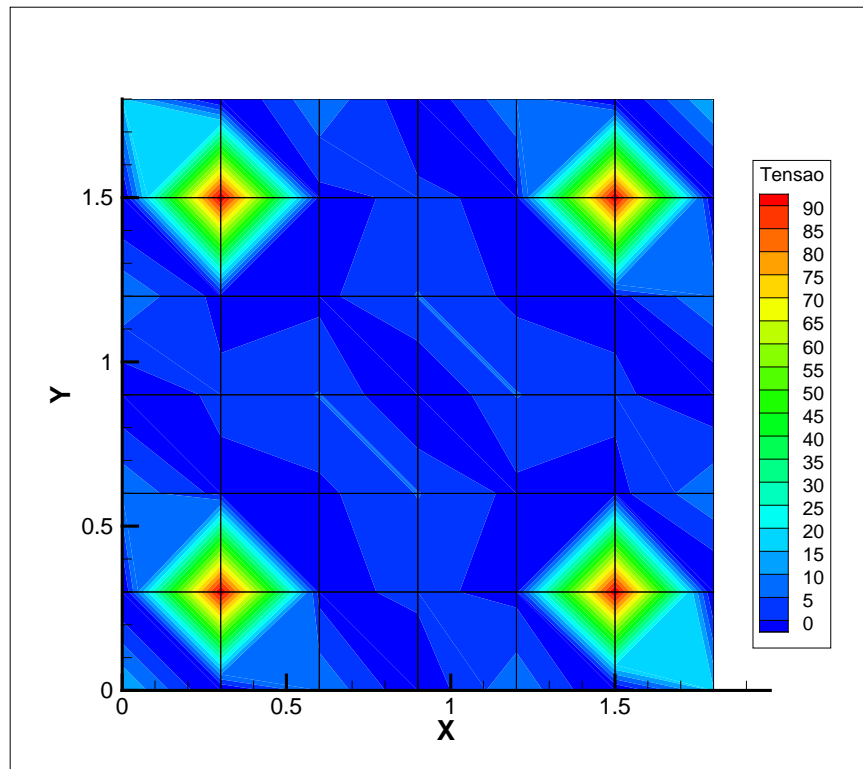
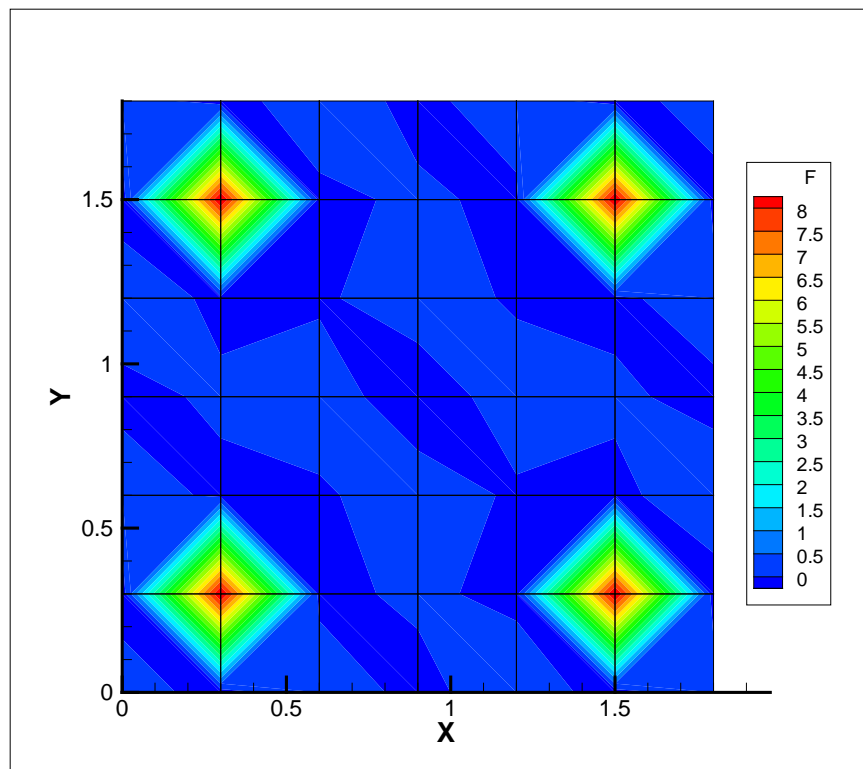


Figura C.9 – Forças aplicadas abaixo do radier do programa SoFIA, valores em kN



Por último, os resultados dos sistemas axissimétricos para o solo e a estaca reúnem valores apresentados de Figura C.10 a C.11, com valores de deformações no raio e em profundidade,

para a estaca e para o solo nessa ordem. As figuras foram aproximadas no ponto de aplicação de carga para melhor visualização dos efeitos de deformações.

Figura C.10 – Deformações no raio do axissimétrico com estaca do programa SoFIA, valores em m

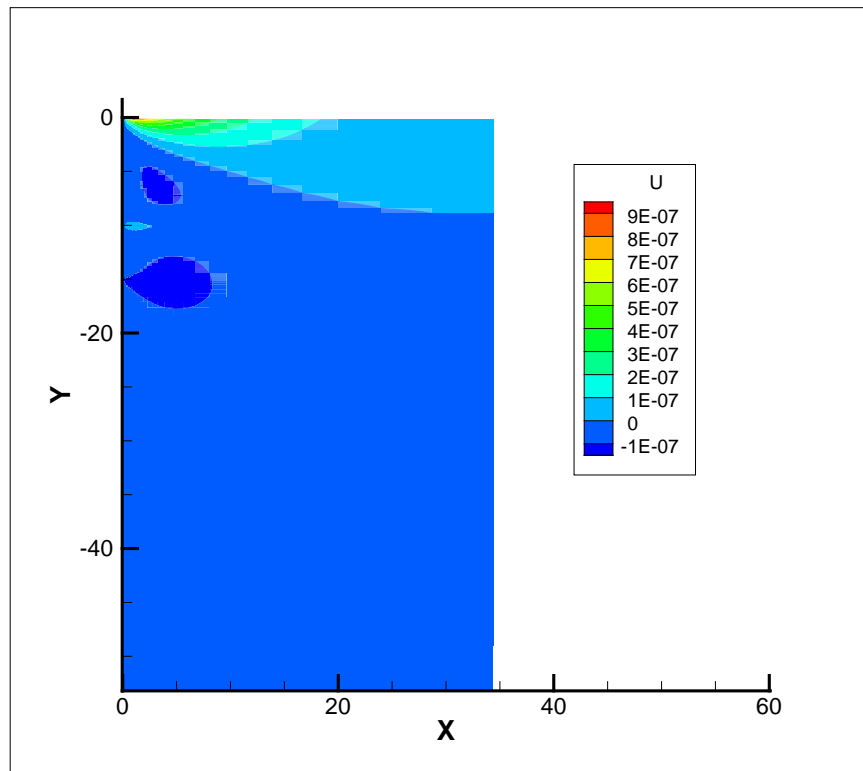


Figura C.11 – Deformações na profundidade do axissimétrico com estaca do programa SoFIA, valores em m

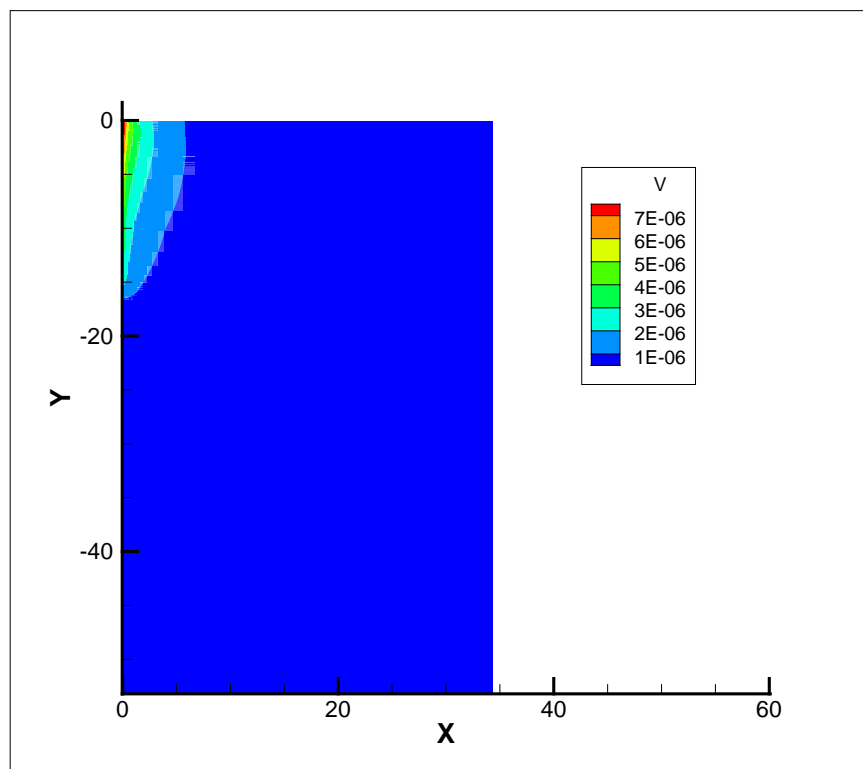


Figura C.12 – Deformações no raio do axissimétrico com solo do programa SoFIA, valores em m

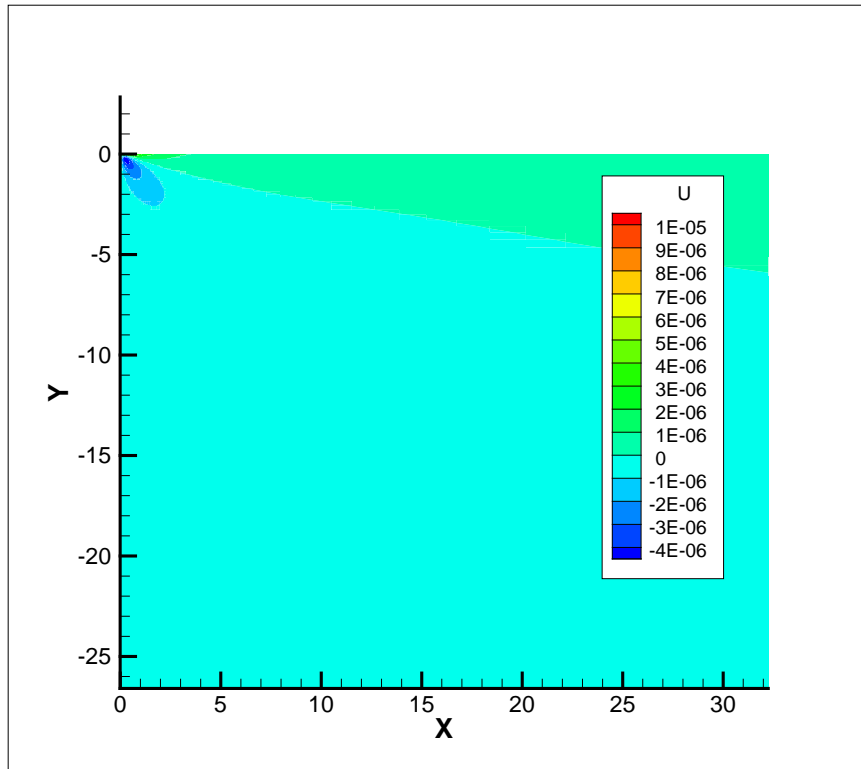


Figura C.13 – Deformações na profundidade do axissimétrico com solo do programa SoFIA, valores em m

