

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA ESTACA  
INTEGRANDO UM RADIER ESTAQUEADO EM SUA  
CAPACIDADE DE CARGA LATERAL**

**CAROLINA ALEJANDRA PEREZ COLLANTES**

**ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.**

**COORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM-286/17**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL/2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

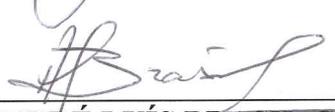
**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA ESTACA  
INTEGRANDO UM RADIER ESTAQUEADO EM SUA  
CAPACIDADE DE CARGA LATERAL**

**CAROLINA ALEJANDRA PEREZ COLLANTES**

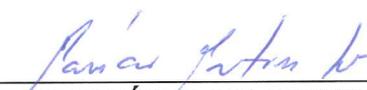
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)  
(ORIENTADOR)

  
\_\_\_\_\_  
PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, PhD (UnB)  
(COORIENTADOR)

  
\_\_\_\_\_  
PROF. JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, Dr. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

  
\_\_\_\_\_  
PROF. MAURÍCIO MARTINES SALES, Dr. (UFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de ABRIL de 2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

PEREZ COLLANTES, CAROLINA ALEJANDRA

Avaliação da Influência da Posição da Estaca Integrando um Radier Estaqueado em sua Capacidade de Carga Lateral [Distrito Federal] 2017

xviii, 98 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2017)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Radier estaqueado

2. Fundações profundas

3. Interação Solo-Estaca

3. ABAQUS

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREZ, C. C., (2017). Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral. Dissertação de Mestrado, Publicação **G.DM-286/17** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carolina Alejandra Perez Collantes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral.

GRAU / ANO: Mestre / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Carolina Alejandra Perez Collantes  
carolinaperezuni@gmail.com  
SCRN 714/715 BL H EN 45 AP 101  
ASA NORTE  
CEP 70.761-680

## DEDICATORIA

*Aos meus pais Rigoberto Perez e Eulalia Collantes de Perez pela vida, pelo amor incondicional, confiança, eternos exemplos e ensinamentos. Aos meus irmãos Arturo, Rafael, Frank e Rocio, pelo amor, apoio, compreensão, conforto, incentivo e proteção em todos os momentos da minha vida.*

*Ao meu amado esposo Eliu pelo amor, pelos sonhos comigo sonhados, pelos sonhos comigo realizados, pela coragem, compreensão, força e presença constante na minha vida. Você é a Minha Fortaleza e Fonte de Inspiração.*

*Ao meu filho Rodrigo, pelo amor e por ser minha fonte de inspiração para poder ter a força suficiente para conseguir nossos sonhos.*

## AGRADECIMENTOS

*À Santíssima Trindade (Pai, Filho e Espírito Santo). A Nossa Senhora pela intercessão em todos os momentos da minha vida. A nossa virgem Santa Rosa de Lima pela ajuda, cuidado e dar-nos sua benção a toda nossa família.*

*Agradeço a Universidade de Brasília e a CAPES pela oportunidade e apoio financeiro.*

*Ao meu orientador José Camapum de Carvalho, agradeço pela grande amizade, orientação, confiança, respeito, dedicação e compreensão em todos os momentos dessa caminhada.*

*Ao meu coorientador André Luis Brasil Cavalcante, agradeço pelos ensinamentos transmitidos, pela firmeza, objetividade, incentivo, cobrança, e principalmente pela amizade.*

*Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pela dedicação na difícil tarefa de transmitir conhecimento.*

*A minha irmã Rocio, pelo amor, ajuda e valiosos conselhos que serviram de alicerce no decorrer da minha vida. E pude contar com o incentivo e ajuda de você. Com palavras jamais poderei traduzir tamanha gratidão e admiração.*

*Aos meus amados sobrinhos Leonardo, Oriana, Aron, Danna, Tadeo, pelo amor, confiança e respeito.*

*O meu amigo Renato Paulinelli, pela orientação constante e dedicada, pela paciência e amizade demonstrada, sem dúvida imprescindíveis para a concretização deste trabalho.*

*A minha amiga de coração Iara Ferreira, pela atenção, amizade de anos, pela ajuda nas revisões e sugestões, além do incentivo e dedicação.*

*Aos amigos da Geotecnia que contribuíram com amizade e ciência: Ledy, Mariela, Carlos Moreno, Chan, Michael, Laoana, Janeth, Lucas, Raimundo, Silvana, Diana, André, Carlos Cuartas, David, Victor, Ana Carolina, Leticia, Flavio, Tomas, Katherin, Mateus, John, Nelson e a todos meus amigos que esqueci seus nomes, as desculpas do caso.*

## RESUMO

A presente dissertação tem por objetivo geral analisar a influência da posição de uma estaca compondo um radier estaqueado na interação solo-estaca. Analisa-se o comportamento da interação de estacas compondo o radier estaqueado submetido a carregamento vertical com o solo circundante. O método de análise é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF 3D), e faz uso do programa ABAQUS. São estudadas interações entre o solo e estacas compondo diversas configurações de raders estaqueados implantados em meio constituído por várias camadas de solo com diferentes quantidades e arranjos de estacas. Na modelagem do comportamento tensão-deformação do conjunto radier estaqueado – solo foi utilizado dois modelos constitutivos. O primeiro é o modelo elástico linear e o segundo o modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb. Os parâmetros geotécnicos iniciais utilizados em cada um desses modelos foram obtidos por Mota, em 2013. Conseguindo reproduzir o comportamento perto da realidade do solo e comparando os recalques por adensamento, percebe-se que os maiores valores do recalque ocorrem no centro do que na borda do radier

## **ABSTRACT**

This dissertation aims to analyze the influence of the position of a pile composing a raft pile system in the soil-stake interaction. It analyzes the behavior of the interaction of piles composing the raft pile system submitted to vertical loading with the surrounding soil. The method of analysis is based on the Finite Element Method (MEF 3D), and makes use of the ABAQUS program. Interaction between soil and raft is studied, composing several configurations of raft-pile systems implanted in a medium composed of several layers of soil with different amounts and arrangements of cuttings. In the modeling of tension-strain behavior of the raft-pile systems, two constitutive models were used. The first is the linear elastic model and the second is the elasto-plastic constitutive model of Mohr-Coulomb. The initial geotechnical parameters used in each of these models were obtained by Mota, in 2013. In order to reproduce of the soil and to compare the densification pressures, it is noticed that the higher values the densification pressures occur in the center than in the edge of the raft.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	2
1.2	OBJETIVO .....	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	RADIER ESTAQUEADO .....	5
2.1.1	BREVE HISTÓRICO SOBRE O USO DO RADIER ESTAQUEADO .....	6
2.1.2	MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM RADIERS ESTAQUEADOS .....	8
2.1.3	MÉTODOS DE ANÁLISES DO RADIER ESTAQUEADO.....	11
2.1.3.1	MÉTODOS PARA CÁLCULO SIMPLIFICADO .....	11
2.1.3.2	ANÁLISES BASEADOS NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO ...	13
2.1.3.3	ANÁLISES BASEADO NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	16
2.1.4	APLICABILIDADE DA TÉCNICA DE RADIER ESTAQUEADO.....	18
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
3.1	SOLOS DO DISTRITO FEDERAL .....	20
3.1.1	DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL.....	22
3.1.2	CARACTERÍSTICA GEOTÉCNICAS DO CAMPO EXPERIMENTAL .....	24
3.2	REVISÃO DE MODELOS CONSTITUTIVOS.....	25
3.2.1	MODELOS DE COMPORTAMENTO PARA SOLO.....	26
3.2.2	MODELO DE COMPORTAMENTO LINEAR-ELÁSTICO PARA AS ESTACAS	32
3.3	FERRAMENTA NUMÉRICA USADA – PROGRAMA ABAQUS.....	32
3.3.1	CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA .....	34
3.3.2	CARACTERÍSTICAS DO MODELO.....	35
3.3.3	CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DA MODELAGEM .....	35
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE ANÁLISE .....</b>	<b>37</b>

4.1	PROCESSO DE MODELAGEM .....	37
4.1.1	MODELOS DE COMPORTAMENTO PARA O SOLO .....	38
4.1.1.1	MODELO DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO LINEAR .....	38
4.1.1.2	MODELO DE COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO MOHR-COULOMB ...	40
4.1.2	O MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO.....	40
4.1.3	MODELAGEM DA INTERFACE .....	41
4.2	PARÂMETRO QUE DEFINEM O CARREGAMENTO APLICADO .....	41
4.3	PARÂMETROS QUE DEFINEM A FUNDAÇÃO .....	41
4.4	PROCESSO DE SIMULAÇÃO OU PASSOS DA ANÁLISE .....	44
4.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	45
4.5.1	DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO MODELO.....	45
	RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS DIMENSÕES DO MODELO.....	47
4.5.2	ANÁLISE DA FORMA DO DOMÍNIO .....	48
	RESULTADOS DAS ANÁLISES DA FORMA DO DOMÍNIO .....	48
4.5.3	ANÁLISES DE DENSIDADE DE MALHA.....	50
	RESULTADO DAS ANÁLISES DE DENSIDADE DE MALHA.....	54
4.5.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	67
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	68
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	69
5.2	MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO PARA UMA CAMADA.....	70
5.2.1	CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA UMA CAMADA DO MODELO ELÁSTICO LINEAR .....	70
5.2.2	CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA UMA CAMADA NO MODELO ELÁSTICO LINEAR .....	76
5.2.3	CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA UMA CAMADA DO MODELO MOHR-COULOMB.....	77

5.2.4	CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA UMA CAMADA DO MODELO MOHR-COULOMB.....	81
5.3	MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO PARA VÁRIAS CAMADAS.....	81
5.3.1	CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA VÁRIAS CAMADAS NO MODELO ELÁSTICO LINEAR.....	82
5.3.2	CALCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA VARIAS CAMADAS DO MODELO ELÁSTICO LINEAR.....	85
5.3.3	CALCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA VARIAS CAMADAS NO MODELO MOHR-COULOMB.....	86
5.3.4	CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA VARIAS CAMADAS NO MODELO MOHR-COULOMB.....	90
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS .....</b>	<b>92</b>
6.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	92
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. (a) Grupo de estacas e (b) radier estaqueado. (Curado, 2015).....	6
Figura 2.2. Planta do edifício Messeturm: distribuição e cortes do radier estaqueado .....	7
Figura 2.3. Disposição das estacas no radier (Katzenbach et al., 1994) .....	8
Figura 2.4. Mecanismos de interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).....	9
Figura 2.5. Diferentes interações que afetam o comportamento do radier estaqueado (El-Mossalamy & Franke, 1997).....	10
Figura 2.6. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com $L/d = 10$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).....	13
Figura 2.7. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com $L/d = 25$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).....	14
Figura 2.8. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com $L/d = 100$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).....	14
Figura 3.1. Mapa de solos original com legenda simplificada (EMBRAPA, 2006).....	21
Figura 3.2. Perfil de solo do campo experimental da UnB (Modificado de Mota, 2003).....	25
Figura 3.3. Critério de escoamento de Mohr-Coulomb: a) no plano ( $\sigma$ , $\tau$ ); b) em plano octaédrico. ....	30
Figura 3.4. Relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb .....	30
Figura 3.5. Superfície de Mohr-Coulomb no espaço de tensões principais ( $c = 0$ ). ....	31
Figura 3.6. Estágios de análise do ABAQUS/Standard. ....	33
Figura 3.7. Elementos utilizados na modelagem do radier estaqueado. ....	35
Figura 3.8. Discretização da interação e do contato entre as superfícies “mestre” (base do radier) e “escrava” (topo da superfície do conjunto estacas/solo).....	36
Figura 4.1. Perfil estratigráfico e parâmetros do modelo de uma camada .....	39
Figura 4.2. Perfil estratigráfico e parâmetros do modelo de 4 camadas .....	39
Figura 4.3. Parâmetros que definem o carregamento aplicado .....	42
Figura 4.4. Diversas configurações para o radier estaqueado. ....	44
Figura 4.5. Estado de tensões horizontais a) Início do passo Geostático b) Final do passo Geostático. ....	44

Figura 4.6. Vista transversal do radier estaqueado para o cálculo dos deslocamentos na horizontal.....	46
Figura 4.7. Vista transversal do recalque vertical. ....	46
Figura 4.8. Deslocamentos horizontais a partir das fronteiras do modelo .....	47
Figura 4.9. Recalques a partir do meio do radier estaqueado até a fronteira do modelo - Fronteira vertical. ....	47
Figura 4.10. Geometria considerada no estudo da forma (a) total, (b) quarta parte do domínio.....	48
Figura 4.11. Geometria da forma total .....	49
Figura 4.12. Geometria da forma quarta parte. ....	49
Figura 4.13. Malha M1 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	51
Figura 4.14. Malha M2 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	51
Figura 4.15. Malha M3 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	52
Figura 4.16. Malha M4 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	52
Figura 4.17. Malha M5 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	53
Figura 4.18. Malha M6 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado. ....	53
Figura 4.19. Nós para controle de deslocamento. ....	54
Figura 4.20. Deslocamento do nó R1 versus número de nós. ....	55
Figura 4.21. Deslocamento do nó R2 versus número de nós. ....	56
Figura 4.22. Deslocamento do nó R3 versus número de nós. ....	56
Figura 4.23. Tempos de cálculo versus número de nós para as cinco malhas. ....	56
Figura 4.24. (a) Modelo em 3D do radier; (b) Malha gerada.....	57
Figura 4.25. (a) Modelo em 3D para 1 estaca; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica.....	58
Figura 4.26. (a) Modelo em 3D para 5 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	58
Figura 4.27. (a) Modelo em 3D para 9 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	59
Figura 4.28. (a) Modelo em 3D para 13 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	59
Figura 4.29. (a) Modelo em 3D para 17 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	60
Figura 4.30. (a) Modelo em 3D para 21 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	61

Figura 4.31. (a) Modelo em 3D para 25 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	61
Figura 4.32. (a) Modelo em 3D radier; (b) Malha gerada.....	62
Figura 4.33. (a) Modelo em 3D para 1 estaca; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica.....	63
Figura 4.34. (a) Modelo em 3D para 5 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	63
Figura 4.35. (a) Modelo em 3D para 9 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	64
Figura 4.36. (a) Modelo em 3D para 13 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	65
Figura 4.37. (a) Modelo em 3D para 17 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica. ....	65
Figura 4.38. (a) Modelo em 3D para 21 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	66
Figura 4.39. (a) Modelo em 3D para 25 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica .....	67
Figura 4.40. Condições de contorno para radier estaqueado (Modificado de Figueredo, 2010).....	67
Figura 5.1. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca. ....	71
Figura 5.2. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.....	71
Figura 5.3. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas. ....	72
Figura 5.4. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas. ....	72
Figura 5.5. Tensões verticais atuantes sob o centro do radier.....	74
Figura 5.6. Tensões verticais atuantes a 1,50 m do centro do radier. ....	75
Figura 5.7. Diagrama de tensões verticais sob fundações estaqueadas (Terzaghi & Peck, 1976).....	75
Figura 5.8. Tensões horizontais x profundidade ao longo da estaca em uma camada do solo no modelo elástico linear.....	77
Figura 5.9. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca. ....	78
Figura 5.10. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.....	78
Figura 5.11. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas. ....	79

Figura 5.12. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas. ....	79
Figura 5.13. Comparação nos valores de recalque no centro do radier no modelo elástico linear e no modelo Mohr-Coulomb. ....	80
Figura 5.14. Tensões horizontais x profundidade ao longo da estaca em uma camada do solo no modelo Mohr-Coulomb. ....	82
Figura 5.15. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca. ....	83
Figura 5.16. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas. ....	83
Figura 5.17. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas. ....	84
Figura 5.18. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas. ....	84
Figura 5.19. Tensões horizontais x posição ao longo da estaca em várias camadas do solo no modelo Elástico linear. ....	86
Figura 5.20. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca. ....	87
Figura 5.21. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas. ....	88
Figura 5.22. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas. ....	88
Figura 5.23. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas. ....	89
Figura 5.24. Comparação nos valores de recalque no centro do radier no modelo elástico linear e no modelo Mohr Coulomb para uma e para várias camadas. ....	90
Figura 5.25. Tensões horizontais x posição ao longo da estaca em várias camadas do solo no modelo Mohr-Coulomb. ....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Resumo do estudo .....	21
Tabela 3.2. Parâmetros geotécnicos do perfil de intemperismo de Brasília - DF (modificado – Araki, 1997).....	23
Tabela 3.3. Resumo dos estudos do perfil de solo do campo experimental da UNB .....	24
Tabela 4.1. Propriedades e parâmetros do solo, para o modelo de Elástico - Linear.....	40
Tabela 4.2. Propriedades e parâmetros do solo, para o modelo de Morh-Coulomb. ....	40
Tabela 4.3 Propriedades e parâmetros do concreto para o modelo de Elástico – Linear. (Castillo, 2013).....	41
Tabela 4.4. Propriedades do concreto de fundação do radier estaqueado (modificado Mota, 2013; Castillo, 2013) .....	42
Tabela 4.5. Propriedades Geométricas da estaca e radier (Sales et al. 2002) .....	42
Tabela 4.6. Tamanho dos elementos adotados nas cinco malhas.....	50
Tabela 4.7. Deslocamentos nos Nós (m).....	54
Tabela 4.8. Tempo de processamento para as malhas analisadas .....	55
Tabela 5.1. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Elástico linear.....	73
Tabela 5.2. Recalques máximos no centro do radier estaqueado usando o modelo Mohr-Coulomb. ....	80
Tabela 5.3. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Elástico linear em várias camadas.....	85
Tabela 5.4. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Mohr-Coulomb em várias camadas. ....	89

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

## ABREVIATURAS

APPRAF	Analysis of Piles and Piled Raft Foundations
CCTV	Sede da Televisão Central da China
CPT	Cone penetration test
CTC	Ensaio de compressão triaxial convencional
DF	Distrito Federal
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
M1	Malha 1
M2	Malha 2
M3	Malha 3
M4	Malha 4
M5	Malha 5
M6	Malha 6
M.E.C	Método de elementos de contorno
M.E.F	Método dos elementos finitos
SPT	Standard Penetration Test
SUCS	Classificação unificada dos solos
2D	Tridimensional
3D	Bidimensional

## LETRAS ARÁBICAS

$a$	Aderência estaca/solo
$c$	Coesão do solo
$d$	Diâmetro da estaca
$d_r$	Diâmetro do bloco
$e$	Índice de vazios
$E$	Modulo Young
$f$	Função de plastificação
$g$	Função de potencial plástico
$G$	Modulo de cisalhamento
$H$	Espessura do radier
$k$	Coefficiente de permeabilidade
$K_0$	Coefficiente de empuxo no repouso
$K$	Modulo volumétrico
$K_{pg}$	Rigidez do grupo de estacas
$K_r$	Rigidez do grupo de radier
$K_{pr}$	Rigidez do radier estaqueado
$l$	Comprimento da estaca
$L$	Lado do radier
$LL$	Limite de Liquidez
$LP$	Limite de Plasticidade
$r_0$	Raio da estaca
$r_c$	Raio efetivo do topo
$r_m$	Raio de influência da estaca
$P_r$	Carga transferida ao solo pelo bloco
$P_t$	Carga transferida total
$S$	Grau de saturação

$V$	Volume
$w$	Teor de umidade natural

## LETRAS GREGAS

$\alpha$	Fator adimensional.
$\alpha_{rp}$	O fator de interação
$\beta_p$	Interação estaca-radier
$\beta_s$	Interação radier-estaca
$\sigma_n$	Tensão normal à superfície da estaca
$\phi$	Ângulo de atrito
$\phi^*$	Ângulo de atrito estaca/solo
$\tau$	Tensão cisalhante
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\lambda$	Fator de proporcionalidade

## ELEMENTOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Ca	Cálcio
Fe	Ferro
K	Potássio
Na	Sódio
Mg	Magnésio

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o número de habitantes dos centros urbanos tem se elevado exponencialmente e esse é um dos principais motivos da tendência mundial de verticalização das edificações, resultando na construção de edifícios cada vez mais altos e estruturas mais esbeltas assentes em diferentes tipos de solos requerendo muitas vezes a adoção de técnicas alternativas de fundação. Buscando tirar maior proveito da capacidade de suporte do maciço que recebe a edificação, o radier estaqueado onde a solução em fundações superficiais se soma a solução em fundações profundas, constitui-se em exemplo dessas técnicas alternativas de fundação.

A ampliação do número de edifícios cada vez mais altos com grandes cargas a serem transferidas às fundações, acoplada aos avanços no desenvolvimento das ferramentas computacionais possibilitou o desenvolvimento de ferramentas numéricas, como a que será usada nesse estudo, para a análise do comportamento solo-estrutura de fundação.

Como exemplos de edificações de grande altura onde a técnica foi usada, pode-se citar, *Petronas Tower* com 452 m de altura (Malásia), o *Burj Khalifa Tower* com 828 m (Emirados Árabes Unidos), a obra da *CCTV* com 234 m (China) e o Monumento à Revolução com 63 m (México).

O objetivo principal de se estaquear uma fundação em radier é limitar o recalque, particularmente o recalque diferencial, que é o principal fator causador de danos estruturais. Como já introduzido, o radier estaqueado é um sistema de fundação que absorve as cargas da estrutura por meio da capacidade de carga da laje implantada sobre o solo (radier), mais a capacidade de carga do grupo de estacas a ela acopladas, constituindo-se em opção técnica e econômica para situações onde somente o radier isolado não consegue satisfazer a todos os critérios de projeto e o uso apenas de fundações profundas terminaria por aumentar os custos da obra (Bacelar, 2003)

Tem sido nessa análise acoplada avaliada a contribuição do radier para a ampliação da capacidade de carga das estacas por meio das tensões que ele induz no maciço. No entanto, em solos estruturados como os solos profundamente intemperizados e muitos solos residuais, não tem sido analisada a perda de capacidade de carga das estacas mais centrais do radier, devido a

interceptação da propagação das tensões horizontais devido ao peso próprio pelas estacas mais externas.

Devido à complexidade nas interações do sistema radier estaqueado, utiliza-se uma ferramenta numérica para melhor compreender o processo de interação entre solo-estaca-radier. Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foi utilizado o programa de simulação numérica em elementos finitos ABAQUS, realizando estudos paramétricos de radiers estaqueados, considerando diferentes quantidades e arranjos de estacas, para os quais são adotadas distintas características mecânicas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas os conceitos de fundações superficiais se ampliaram com o acoplamento dos elementos de fundações profundas, geralmente do tipo estaca e, por essa razão, deram origem ao denominado “radier/bloco estaqueado” (Katzenbach & Turek, 2005).

Este tipo de sistema de fundação já vem sendo utilizado em alguns países, principalmente na Europa e também em México, para suportar uma grande variedade de estruturas como superestruturas de pontes, edifícios e plantas industriais de grande porte.

Sendo o radier estaqueado atualmente reconhecido como uma alternativa econômica em relação à utilização de uma fundação convencional apenas estaqueada (El- Mossalamy & Franke, 1997).

No Brasil, empregam-se em grande parte de suas edificações, as fundações profundas em estacas, porém com a ampliação da altura das edificações já estão sendo usados os radiers estaqueados. É importante adiantar que ainda há dúvidas sobre o comportamento e as formas de interações que ocorrem no sistema solo-estaca-radier, em especial, no caso de solos estruturados como a maioria dos perfis de solos brasileiros.

Esta técnica mista também possui grande aplicabilidade nos lugares com solos superficiais de baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade ou colapsibilidade, em que é difícil o uso de fundações rasas. O uso do radier estaqueado busca suprir tecnicamente a menor custo, tanto a necessidade de capacidade de carga, quanto de recalques diferenciais toleráveis (Katzenbach *et al.*, 1997; Sales, 2000).

Os resultados que serão obtidos nesta dissertação poderão contribuir significativamente para o entendimento do comportamento das estacas frente ao solo que envolve o radier estaqueado, e para a melhoria dos projetos de fundação.

## **1.2 OBJETIVO**

Esta dissertação tem como objetivo geral analisar o comportamento das estacas compondo fundações em radiers estaqueados no solo de Brasília, considerando uma e várias camadas de solo. Nessa análise será avaliada a influência da posição das estacas nos radiers estaqueados em suas capacidades de carga lateral e recalques da estaca do centro. Fazendo para isso, a utilização do Método de Elementos Finitos 3D, com o modelo constitutivo elástico linear e o modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb por meio do programa ABAQUS.

Para atender melhor estes objetivos gerais serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Buscar a compreensão do mecanismo de transferência de carga e a ocorrência de recalque em radiers estaqueados;
- Avaliar o comportamento da interação solo-estaca com a inclusão de estacas adicionais;
- Avaliar as ferramentas numéricas simplificadas capazes de simular, de maneira aproximada, o problema;
- Avaliar a influência dos parâmetros geotécnicos envolvidos no comportamento do radier estaqueado, determinando o peso de cada variável em função de duas abordagens constitutivas.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho está basicamente dividido em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica; metodologia de análise, análise dos resultados do estudo do comportamento e conclusões. Para a realização da dissertação foi organizada em cinco capítulos, descritos sucintamente a seguir:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao trabalho, na qual se faz considerações iniciais sobre o tema e apresenta-se os objetivos do estudo.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica abordando o comportamento do radier estaqueado e alguns aspectos relacionados com o projeto desse tipo de fundação, discutindo os mecanismos de interação entre os seus elementos (radier e estacas) e os métodos de análise propostos por diversos autores.

O terceiro capítulo apresenta-se as características do solo do Distrito Federal e os resultados dos ensaios realizados no Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo da Universidade de Brasília. Apresenta-se também aspectos relacionados ferramenta numérica utilizada nas análises dos raders estaqueados.

O quarto capítulo trata primeiramente dos aspectos correspondentes à concepção geral do processo de modelagem para o caso geral do radier estaqueado; abordando a modelagem dos materiais, carregamentos, condições de contorno, passos de análises e a calibração dos modelos numéricos quanto à seleção da forma de domínio estudado, dimensões do mesmo, tipo de elemento finito e densidade de malha, conjugando precisão e custo computacional. Descreve a metodologia numérica adotada na realização das análises considerando-se as diversas configurações estudadas.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações numéricas, as análises, discussões e as considerações para critérios de projeto.

O sexto capítulo é dedicado à apresentação das principais conclusões desta pesquisa, e propõem sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras que possibilitem continuar o tema pesquisado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Apresenta-se neste capítulo, um breve histórico sobre os primeiros estudos de radiers estaqueados no Brasil e no mundo. Assim como, os principais aspectos sobre a definição e o conceito de radier estaqueado, os solos do Distrito Federal, a descrição do campo experimental, a revisão sobre modelos constitutivos, a ferramenta numérica usada - programa ABAQUS.

A técnica de radier estaqueado vem sendo intensamente pesquisada por muitos especialistas que concentraram seus esforços, quer do ponto de vista teórico, quer experimental e numérico sobre o comportamento desse tipo de fundação estaqueada.

### **2.1 RADIER ESTAQUEADO**

As fundações se classificam em diretas (superficiais) e profundas, de acordo com a forma de transferência de cargas da estrutura para o solo onde ela se apoia. As fundações diretas são aquelas que transferem as cargas diretamente para camadas de solos capazes de suportá-las, sem deformar-se exageradamente. Esta transmissão é feita através da base do elemento estrutural da fundação, considerando apenas o apoio da peça sobre a camada do solo, sendo desprezada qualquer outra forma de transferência das cargas (Brito, 1987). Já as fundações profundas podem transferir as solicitações para o terreno natural de duas formas isoladamente ou em conjunto: por meio do atrito lateral entre a estrutura de fundação e o solo ao longo do perfil; por meio da ponta da fundação sobre a camada em que se apoia. Quando o solo na ponta é muito mole tem-se apenas a parcela de atrito lateral o que constitui as chamadas fundações flutuantes. Quando o solo mole se situa ao longo do perfil e o material de apoio é resistente tem-se somente a parcela de ponta, não raro, no entanto, se tem um solo com alguma resistência ao longo do perfil fazendo com que a parcela de atrito lateral ao se somar a resistência de ponta define a capacidade de carga da fundação profunda como um todo.

O radier estaqueado é um tipo de fundação mista que associa uma fundação rasa, o radier, com os elementos de fundação profunda, geralmente estacas. A transmissão de esforços ao solo ocorre pela base radier e pelas estacas (Lima, 2007). O radier estaqueado é usado quando o solo mais superficial tem alguma resistência conferindo ao radier uma parcela de capacidade de carga que se soma à do conjunto de estacas sobre as quais se apoia. Esse conjunto de estaca

pode atuar mobilizando o atrito lateral e a ponta ou apenas o atrito lateral conforme o tipo de perfil de solo sobre o qual é instalado o radier estaqueado.

Janda *et al.* (2009) citam que o termo radier estaqueado é mencionado como um sistema de fundação em que as estacas e o radier interagem uns com os outros e com o solo adjacente para sustentar cargas verticais, horizontais e momentos provenientes da superestrutura.

O objetivo principal de se estaquear uma fundação é limitar o recalque, particularmente o recalque diferencial, que é um dos principais fatores causadores de danos estruturais. Curado (2015) ressalta a diferença básica entre grupos de estacas e radier estaqueado, deve-se à consideração do contato do radier, que está direto no solo e contribui absorvendo parte das cargas derivadas da superestrutura, enquanto no primeiro essa contribuição não é considerada (Figura 2.1). Destaca-se que, embora desprezado o bloco de coroamento de um grupo de estacas, este atua transferindo parte da carga ao solo superficial.

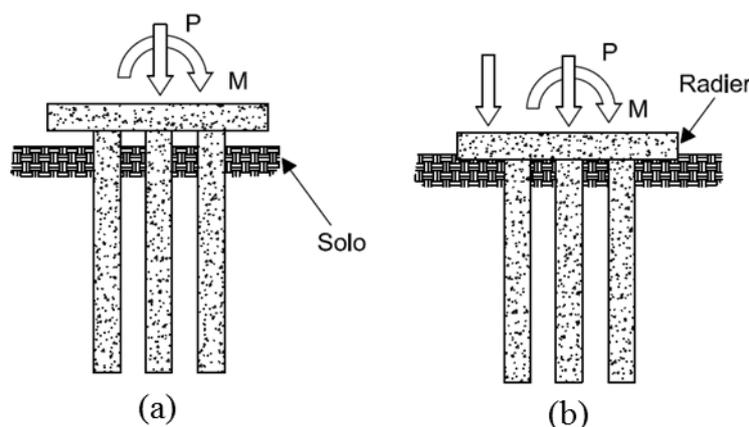


Figura 2.1. (a) Grupo de estacas e (b) radier estaqueado. (Curado, 2015)

### 2.1.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE O USO DO RADIER ESTAQUEADO

O edifício *Messeturm*, em Frankfurt já foi considerado um dos mais altos da Europa com 256 m de altura, cuja construção começou em 1988 e foi finalizada em 1991. O edifício possui dois subsolos e uma superestrutura composta por 60 andares.

O radier foi projetado medindo 58,8m x 58,8m, ou seja, um quadrado cuja espessura variou de 6,00 metros na região central e 3,00 metros nas bordas, distribuídas em três círculos concêntricos sob o radier (Figura 2.2). Foram utilizadas 64 estacas no total, com diâmetro de

1,30 metros e comprimento de 34,9 metros nos anéis internos composto por 16 estacas, 30,9 metros no anel central composto por 20 estacas e 26,9 metros no anel externo composto por 28 estacas. A carga total do edifício foi calculada em 1.880 MN. O solo de fundação do edifício é composto por argila, compondo uma camada com espessura de mais de 100 m abaixo da superfície. (Katzenbach *et al.*, 2005).

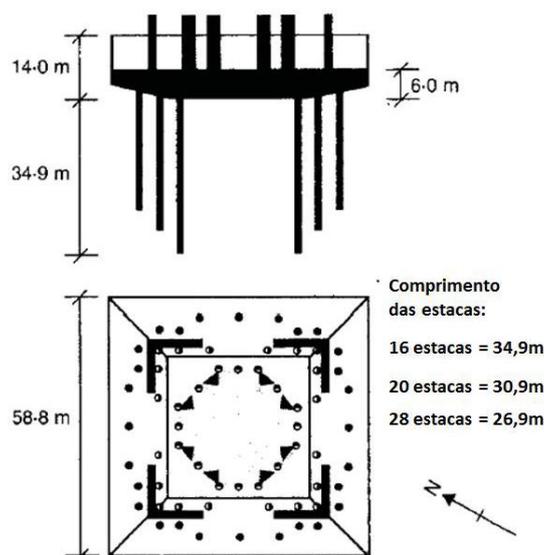


Figura 2.2. Planta do edifício *Messeturm*: distribuição e cortes do radier estaqueado

Outro exemplo é *Commerzbank Tower*, edificado também na cidade de Frankfurt. Foi concluído em 1997, é um dos edifícios de escritório mais altos da Europa, com altura de 258,70 m e 50 andares. A fundação, constituída por um radier estaqueado com 111 estacas escavadas conforme ilustra a Figura 2.3. Foi utilizado um modelo constitutivo elasto-plástico especial para a argila de Frankfurt na análise desse radier estaqueado. Foi projetada de modo que toda a carga estrutural, incluindo a decorrente da ação do vento, fosse suportada somente pelas estacas, as quais foram projetadas em concreto estrutural reforçado. Usando um modelo constitutivo elastoplástico especial para a argila de Frankfurt, os autores concluíram que 5% do carregamento total do edifício são suportados pelo radier.

O edifício mais alto do mundo, denominado *Burj Khalifah*, localizado em Dubai, nos Emirados Árabes, tem 828 m de altura. Esse edifício está apoiado sobre um radier estaqueado com 3,5 m de espessura, assente sobre 194 estacas escavadas de 1,5 metro de diâmetro e profundidade de aproximadamente 50 metros. Nesse caso, o princípio de cálculo foi o de limitar os recalques

diferenciais e médios ao menor valor possível. Para tanto, o radier deveria ser responsável por absorver uma pequena parcela de carga, sendo o restante assumido pelas estacas, que possuem, devido ao seu diâmetro, elevada capacidade de suporte e rigidez por recalque. Isso devido ao fato que as pontas das estacas se encontram apoiadas a 50 m de profundidade sobre rochas carbonáticas.

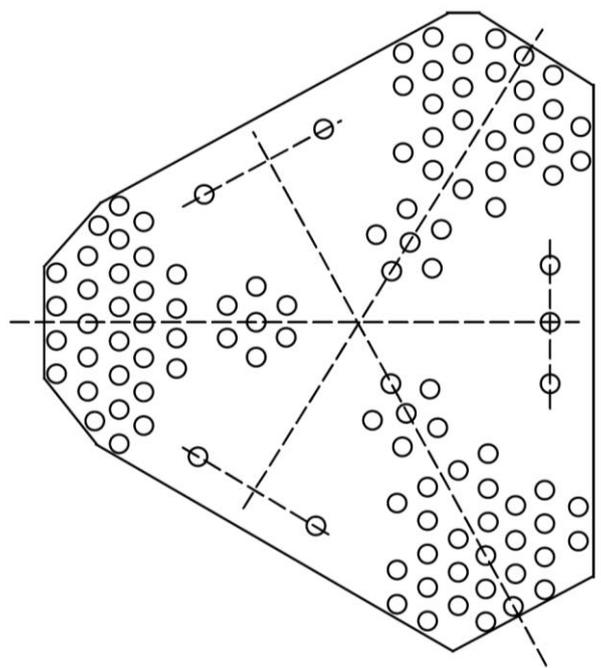


Figura 2.3. Disposição das estacas no radier (Katzenbach *et al.*, 1994)

### 2.1.2 MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM RADIERS ESTAQUEADOS

Os mecanismos de interação desenvolvidos num radier estaqueado são complexos, e requer a consideração da transferência de carga ao solo pelos elementos horizontais e verticais que compõem a fundação, assim com as tensões horizontais geradas pelo radier sobre as estacas e as tensões horizontais oriundas do maciço.

Hain & Lee (1978) apresenta a análise de um radier estaqueado que leva em consideração quatro interações desenvolvidas entre os elementos da fundação mista, onde determinaram fatores de interação para um solo cujo módulo de elasticidade cresce linearmente com a profundidade. A Figura 2.4 mostra cada uma dessas interações.

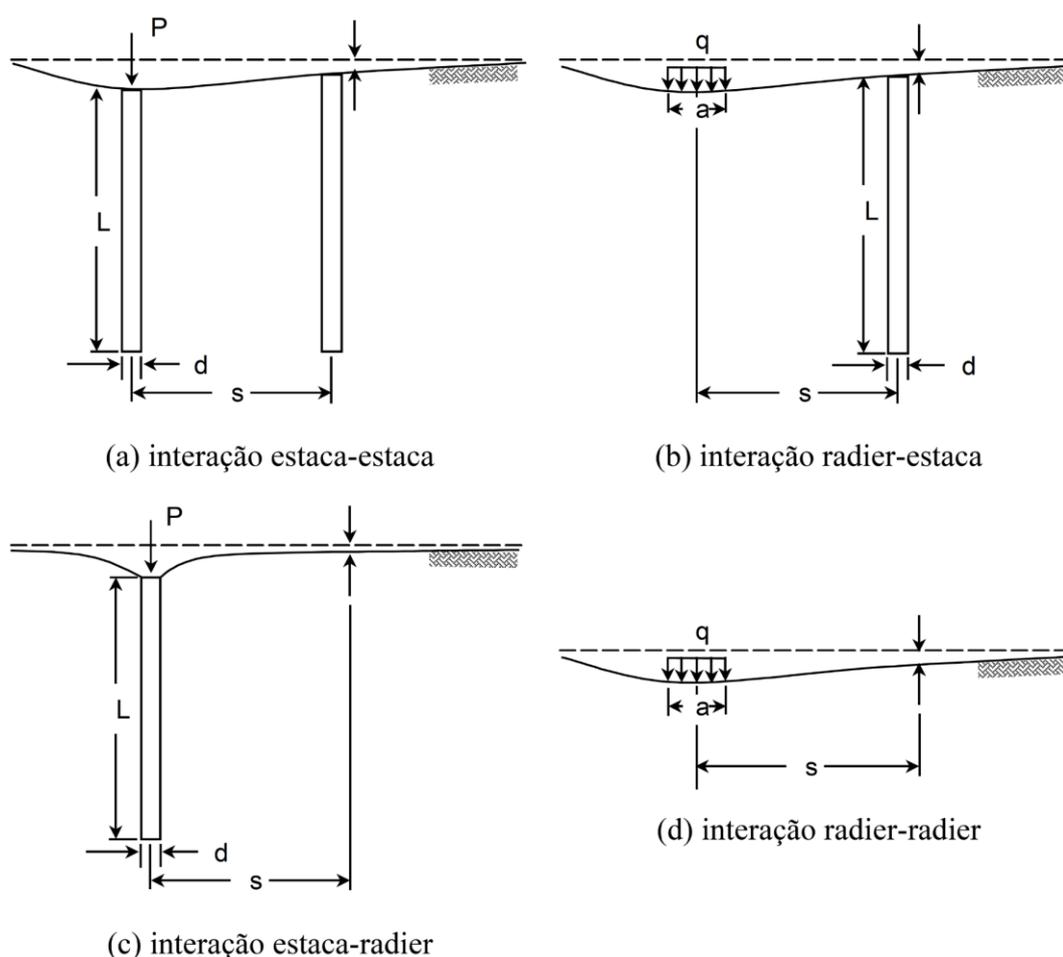


Figura 2.4. Mecanismos de interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).

De acordo com El-Mossalamy e Franke (1994), verifica-se, na Figura 2.5, a exemplo da sapata estaqueada, que existem diversas interações que governam o comportamento de um radier estaqueado, tais como as condições do subsolo, o método de instalação das estacas e muitos outros fatores também afetam o comportamento dessa fundação.

As interações observadas no radier estaqueado representadas na Figura 2.5 são da seguinte forma: 1. interação estaca - estaca; 2. interação radier - estaca; 3. interação radier - solo; 4. interação estaca - solo; 5. interação fuste da estaca - ponta.

Poulos (1974) define o fator de interação estaca-estaca como  $\alpha$  na Eq. (2.1). Os fatores de interação são apresentados apenas para um meio contínuo homogêneo, isotrópico e linearmente elástico como:

$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional devido a uma carga unitária na estaca adjacente}}{\text{recalque da estaca devido a uma carga unitária}} \quad (2.1)$$

A análise das interações entre as estacas e o radier são ilustradas na Figura 2.5 onde Hain (1977) admitiu radiers perfeitamente flexíveis. Dessa análise foram obtidos os fatores de interação:

Fator de interação estaca-radier  $\beta_p$

$$\beta_p = \frac{\text{recalque adicional da estaca devido à carga superficial unitária}}{\text{recalque da estaca sob carga unitária}} \quad (2.2)$$

Fator de interação radier-estaca  $\beta_s$

$$\beta_s = \frac{\text{recalque adicional da superfície do solo devido à carga unitária aplicada na estaca}}{\text{recalque da superfície devido à carga superficial unitária}} \quad (2.3)$$

A distribuição tradicional de recalques superficiais em um radier perfeitamente flexível é mostrada na Figura 2.4 que pode ser avaliada usando-se as soluções da teoria da elasticidade linear para um meio homogêneo ou ainda, a partir de Brown & Gibson (1972) que apresenta a solução para o caso de um maciço de solo com módulo de elasticidade linearmente, crescente com a profundidade. Vale salientar que quando opta-se pela construção de radiers com lajes de concreto armado com espessura maiores, a interação entre o radier e as estacas comporta-se de forma rígida.

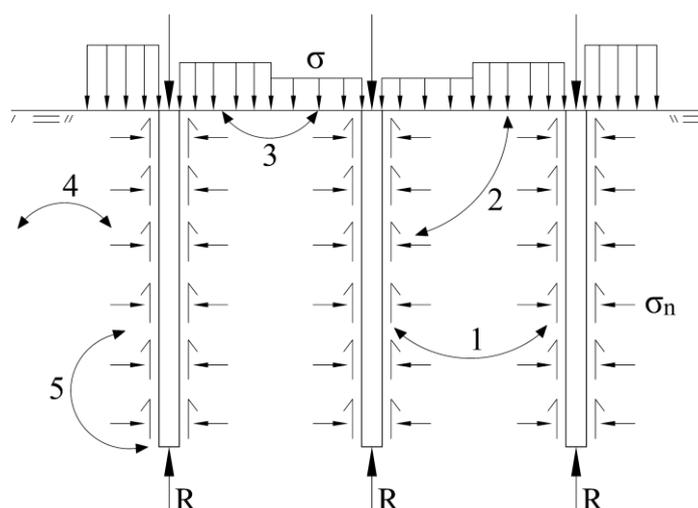


Figura 2.5. Diferentes interações que afetam o comportamento do radier estaqueado (El-Mossalamy & Franke, 1997).

### 2.1.3 MÉTODOS DE ANÁLISES DO RADIER ESTAQUEADO

Diversos métodos foram propostos na literatura por diferentes pesquisadores, tentando desenvolver um método de concepção adequada em várias abordagens no estudo do radier estaqueado.

Para realizar uma revisão, estes foram categorizados em três grandes grupos: método de análise simplificada, o método de análise numérica aproximada e método de análise numérica.

#### 2.1.3.1 MÉTODOS PARA CÁLCULO SIMPLIFICADO

Este método envolve o desenvolvimento de modelo matemático, baseado na teoria e nos princípios estabelecidos.

Envolvem o uso de soluções teóricas obtidas pela teoria da elasticidade linear para estimativa do recalque médio do conjunto, e da distribuição de carga entre o radier e as estacas (Padfield & Sharrock, 1983; Randolph, 1983, Poulos & Davis, 1980).

Randolph (1983) apresenta um processo que considera separadamente a rigidez do grupo de estacas ( $K_{pg}$ ) e do radier ( $K_r$ ), e utiliza um fator de interação entre as estacas e o bloco ( $\alpha_{rp}$ ). A rigidez do radier estaqueado ( $K_{pr}$ ) é dada por:

$$K_{pr} = \frac{K_{pg} + K_r(1-2\alpha_{rp})}{1 - \alpha_{rp}^2 \left(\frac{K_r}{K_{pg}}\right)} \quad (2.4)$$

A relação entre a carga transferida ao solo pelo bloco ( $P_r$ ) e a carga total ( $P_t$ ) é dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1-\alpha_{rp})}{K_{pg} + K_r(1-2\alpha_{rp})} \quad (2.5)$$

A rigidez da estaca e do bloco pode ser determinada por processo convencional. O fator de interação  $\alpha_{rp}$  é dado por:

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (2.6)$$

onde,

$r_m$  é o raio de influência da estaca (distancia real na qual a deformação cisalhante é considerada nula; é da ordem da grandeza da estaca), em [L];

$r_c$  é o raio efetivo do topo (área do topo dividida pelo número de estacas), em [L];

$r_0$  é o raio da estaca, em [L].

Poulos & Davis (1980) apresentam um método alternativo, similar aquele empregado para análise de grupo de estacas, porém considerando que a unidade estrutural básica é uma estaca isolada, e seu bloco de coroamento circular em contato com a superfície do solo. A interação entre duas unidades de estaca-radier idênticas e igualmente carregadas, pode ser expressa em termos de um fator de interação  $\alpha_r$  na equação (2.1).

As curvas apresentadas na Figura 2.6, Figura 2.7 e Figura 2.8 a seguir, relacionam  $\alpha_r$  com o espaçamento relativo entre as estacas  $s/d$  considerando vários valores de diâmetro relativo  $d_r/d$  ( $d_r$  = diâmetro do bloco;  $d$  = diâmetro da estaca). As Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 consideram curvas relativas a três valores de comprimento relativo  $L/d$  (10, 25 e 100).

As curvas que relacionam o fator de interação com a relação  $L/d$  são usadas para dimensionamento do radier estaqueado, considerando o recalque de uma unidade estaca-radier qualquer, este pode ser aproximado pela seguinte equação:

$$\rho_i = \rho_1 \left[ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (P_j \alpha_{rij}) + P_i \right] \quad (2.7)$$

onde,

$\rho_1$  é o recalque de uma unidade estaca-radier sob carga unitária, em [L];

$n$  é o número de estacas;

$\alpha_{rij}$  é o valor de  $\alpha_r$  correspondente a  $d_r/d$  da unidade  $j$ , considerando o espaçamento entre as unidades  $i$  e  $j$ .

$P_i$  e  $P_j$  são as cargas nas unidades  $i$  e  $j$ , respectivamente.

O método proposto por Randolph (1983) e Padfield & Sharrock (1983) propõem uma metodologia de cálculo semelhante. Padfield & Sharrock admite que parte da carga estrutural será transferida diretamente do radier ao solo de fundação, se mostrando bastante conservativo, por considerar uma distribuição uniforme das estacas na área do radier, abordando o problema da forma convencional. Randolph, sugere que poucas estacas sejam dispostas na região central do radier, o que pode representar uma economia significativa no custo da fundação.

### 2.1.3.2 ANÁLISES BASEADOS NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

A análise de fundações em estacas pelo método dos elementos de contorno (MEC) é fundamentada na solução clássica de Mindlin (1936), que admite a hipótese de isotropia e homogeneidade do solo, representado como meio linearmente elástico. Algumas poucas publicações recentes, admitem o maciço constituído por diferentes camadas horizontais e são baseadas em funções de Green específicas.

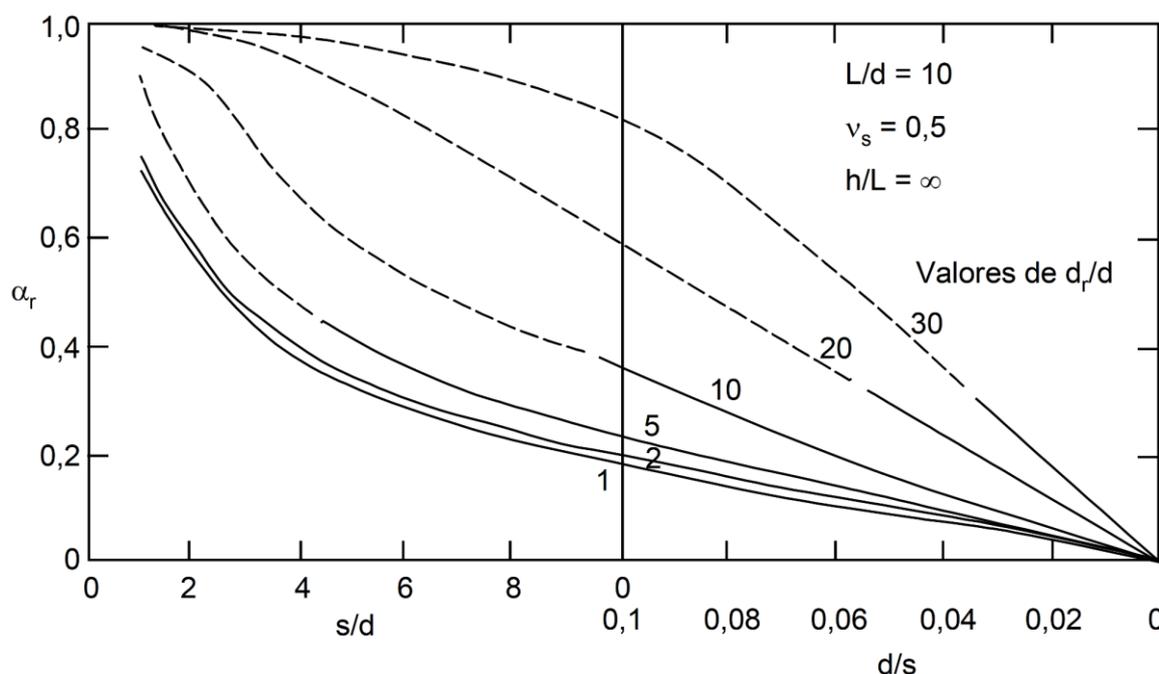


Figura 2.6. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com  $L/d = 10$  (modificado de Poulos & Davis, 1980).

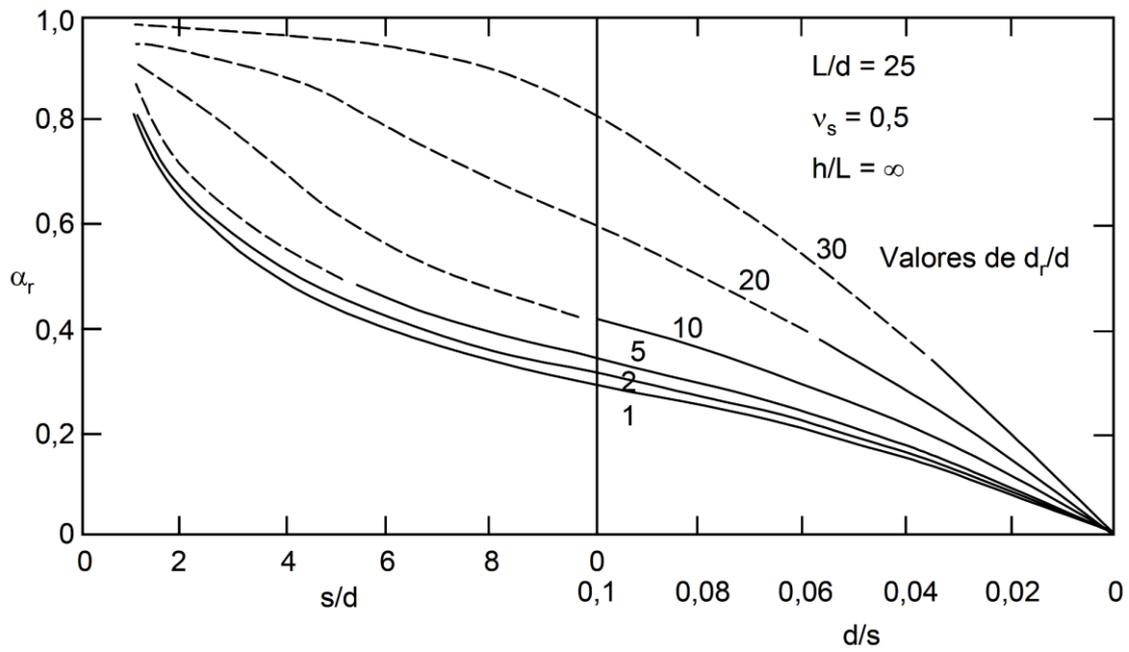


Figura 2.7. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com  $L/d = 25$  (modificado de Poulos & Davis, 1980)

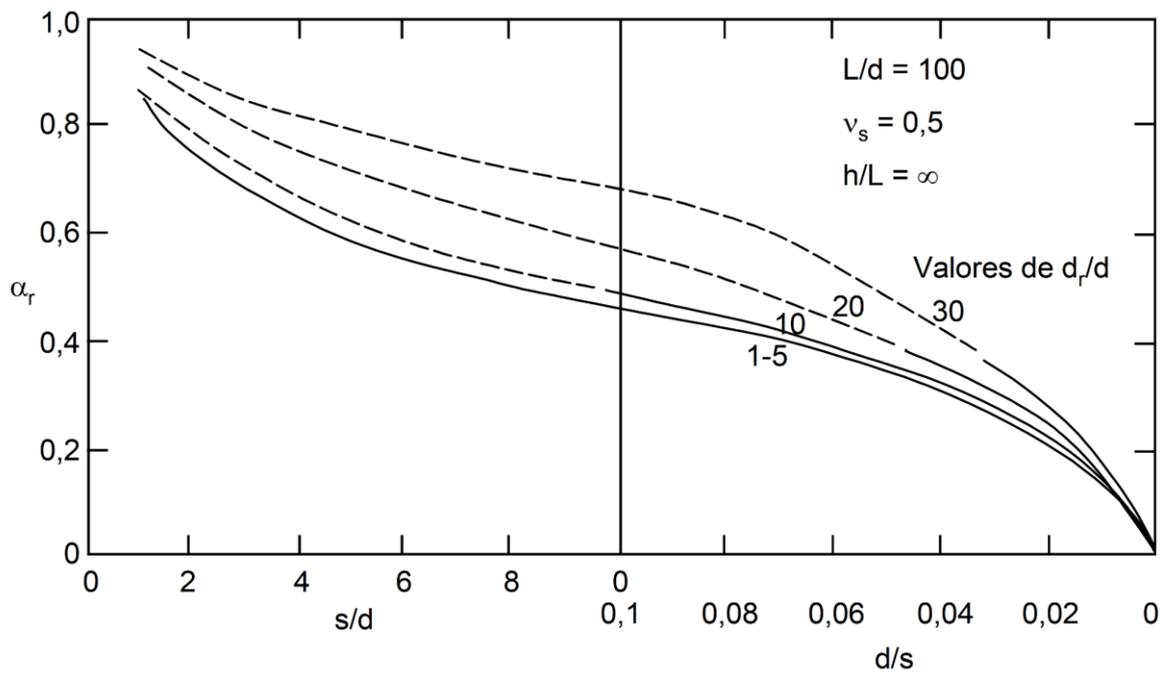


Figura 2.8. Fatores de interação ( $\alpha_r$ ) para unidades estaca-radier com  $L/d = 100$  (modificado de Poulos & Davis, 1980)

Butterfield & Banerjee (1971) realizaram pelo método dos elementos de contorno, um extenso estudo numérico de radiers rígidos com estacas rígidas ou compressíveis em um semi-espaço elástico. Os resultados desse estudo mostram o contato do bloco de coroamento das estacas (ou do radier) com o solo. Os autores afirmaram que o contato do radier com o solo, embora faça o primeiro absorver uma razoável parcela da carga aplicada (20 a 60%), pouco alterou a rigidez da fundação, reduzindo os recalques apenas entre 5 a 15%. Outra observação desses autores, foi que, para espaçamentos convencionais de grupos de estacas (3D), a distribuição de cargas nas estacas foi alterada em função do contato radier/solo.

Kuwabara (1989) estudou o comportamento de grupos de estacas e radiers estaqueados, através de um procedimento em elementos de contorno para análise de estacas isoladas e grupos de estacas em solos homogêneos. Esse procedimento faz uso de fatores de influência para o grupo de estacas, os quais devem ser avaliados considerando-se os efeitos de interação entre as estacas e o radier, com a vantagem de permitir a determinação das tensões atuantes não apenas nas estacas, como também no radier.

Mendonça & de Paiva (2000) apresentaram uma formulação para análise estática de radiers estaqueados, na qual todas as interações entre o radier e as estacas são simultaneamente consideradas. Nesta investigação o radier é considerado como uma placa delgada matematicamente descrita por equações integrais, enquanto o solo é considerado como um semi-espaço homogêneo, isotrópico e elástico linear representado por equações integrais baseadas na solução de Mindlin (1936). Neste caso, cada estaca é modelada por um único elemento quadrático de três pontos nodais e a força cisalhante ao longo do mesmo é aproximada por um polinômio de segundo grau. A interface radier-solo é dividida em elementos triangulares, admitindo-se uma variação linear das pressões de contato através de cada elemento. Os deslocamentos do radier e das estacas são então representados através de equações integrais, de modo que se possa obter um sistema de equações lineares envolvendo forças e deslocamentos em todos os pontos da interface e, resolvendo-se esse sistema, obtêm-se os recalques e a rigidez global da fundação. Comparações feitas entre os resultados numéricos obtidos nessa formulação com outros apresentados na literatura, mostram uma boa concordância entre eles, sendo as diferenças justificadas pelas distintas modelagens da interface radier-estacas-solo adotadas em cada caso (Bacelar, 2003).

### 2.1.3.3 ANÁLISES BASEADO NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Com a evolução dos equipamentos computacionais é mais fácil e rápido fazer uma análise do radier estaqueado baseado M.E.F. Um radier estaqueado se constitui basicamente num problema tridimensional e quando se deseja incorporar características, como a não-linearidade do comportamento do solo, ou um modelo mais sofisticado, a solução pode demandar um enorme tempo de execução (Poulos, 1998).

### ANÁLISES BASEADO EM SOLUÇÕES APROXIMADAS

Buscando simplificar o problema, alguns autores tentaram reduzir o problema tridimensional do radier estaqueado em uma situação de deformação plana ou axisimétrica apresentaram uma solução onde um radier estaqueado quadrado é simplificado por “círculos” concêntricos de estacas equivalentes (ver Figura 2.18). Esta simplificação, embora possa dar bons resultados em alguns casos (Hooper, 1979), tem a grande restrição de só funcionar em problemas de geometria simétrica com carregamentos verticais, e, também, impossibilita a obtenção dos momentos transversais no radier.

Zhang & Small (2000) analisaram radiers estaqueados em perfis de solo estratificados, submetidos a carregamentos verticais e horizontais, por meio de um método que combina o método dos elementos finitos para análise do radier e o método da camada finita para análise do sistema grupo de estacas/solo, sendo o software denominado APPRAF (Analysis of Piles and Piled Raft Foundations). Com base na análise dos resultados, os autores citados observaram que esses métodos podem ser usados com sucesso na análise de radiers estaqueados em perfis de solo estratificados, e que as distribuições de carga ao longo do fuste das estacas nesse tipo de perfil, são afetadas pela espessura relativa e rigidez das diversas camadas de solo que o compõem.

Sales *et al.* (2002) analisaram um radier estaqueado, para o projeto prévio de uma edificação considerando um grande bloco de 25 estacas (5 x 5), com dimensão de 13,6x13,6m, espessura de 2,85m, para suportar 13 pilares que totalizavam uma carga permanente de 43910 kN, alterando a quantidade de estacas. Eles partiram da quantidade de estacas original (25) e foram retirando algumas estacas para ver o comportamento do grupo. Dessa forma, observaram o

efeito do fator de segurança nos recalques, nos momentos gerados no interior dos radiers e a distribuição de carga entre as estacas e o radier.

Al-Baghdadi (2006) realizou por intermédio de análises numéricas, pelo método dos elementos finitos, a análise do comportamento de radiers compostos por 4, 6, 8 e 9 estacas. O autor desenvolveu um programa para análise de radiers estaqueados denominado 3DSPRANO (3-Dimensional Soil Pile Raft Analysis by Nonlinear Finite Element).

Souza (2010) estudou o efeito da interação entre estacas. Para isso, foram utilizados o programa GARP 8 (Programa Híbrido) e o DIANA (Baseado na rotina de cálculo de elementos finitos e desenvolvido pela TNO Building and Construction). O autor realizou análises para radiers estaqueados com número de estacas variável entre 1 e 100 estacas. O elemento finito considerado pelo autor em suas análises é denominado por CTE30, isoparamétrico piramidal com 3 faces e 10 nós, com interpolação quadrática e integração numérica.

### **ANÁLISES BASEADO EM SOLUÇÕES RIGOROSAS**

Bacelar (2003) estudou a influência do arranjo das estacas em radiers estaqueados, com base nos resultados de um estudo paramétrico com análise em 3D a partir do método dos elementos finitos com o uso do programa ABAQUS. O autor estudou um radier estaqueado circular com raio de 10 metros, submetido a um carregamento uniformemente distribuído equivalente a 500 kPa, assentado sobre uma camada de solo homogêneo, que em suas análises foi considerado elástico linear, cuja espessura foi de 40 metros de comprimento. Foram consideradas desde 1 até 25 estacas de 0,5 metros de diâmetro sob o radier, sendo que nas análises envolvendo 9 e 13 unidades, a disposição das estacas sob o radier foi alterada. Os comprimentos das estacas foram de 5,0 metros, 12,5 metros e 25,0 metros e a espessura do radier considerada variou aproximadamente entre 0,2 metros e 11,5 metros, que correspondem a valores de  $K_r$  (rigidez do radier) iguais a 0,01 até 1 e por fim, coeficientes de Poisson de 0,1, 0,3 e 0,5.

Lee *et al.* (2010) utilizaram o software ABAQUS para a análise em radiers estaqueados quadrados com 9, 16 e 25 estacas, com comprimentos de 8, 12 e 16 m assentados sobre argila mole, variando-se os espaçamentos entre as estacas e o tipo de carregamento aplicado sobre o radier estaqueado. Os autores observaram que o aumento no espaçamento entre as estacas

diminui o fator  $\alpha_{pr}$ , e o tipo de carregamento influencia na distribuição de carga nas estacas e no recalque do radier, necessitando de uma melhor distribuição das estacas sob o radier.

Kaltakci (2009) utilizou o software Plaxis de elementos finitos 2D e 3D na análise de radiers estaqueados, a fim de comparar os resultados dessas análises com os fornecidos pelo estudo realizado por Reul e Randolph (2004), que empregou em suas análises 3D, o software de elementos finitos ABAQUS. O autor verificou que ambos os softwares são influenciados pelas variações nas características geométricas das estacas, e também pela intensidade da carga aplicada. Constatou também, que os recalques médios obtidos pelo software Plaxis 3D são geralmente maiores que os obtidos nas análises com o ABAQUS, porém muito próximos entre eles. As comparações feitas entre modelos numéricos 2D e 3D foram discrepantes, onde verifica-se que os softwares, Plaxis e ABQUS, baseados no modelo 3D, são mais precisos que o modelo 2D de elementos finitos.

#### **2.1.4 APLICABILIDADE DA TÉCNICA DE RADIER ESTAQUEADO**

Os fatores mais relevantes que influenciam na escolha e análise do radier estaqueado são: a capacidade de carga e rigidez do radier; a capacidade de carga de ponta e lateral das estacas; a presença de solos moles, expansivos ou colapsáveis; a interação entre cada componente do radier estaqueado e o solo; a solicitação por carregamentos cíclicos e a presença de estacas com dimensões diferentes das previstas em projeto (Cordeiro, 2007). Nesse universo de fatores nessa dissertação optou-se por estudar a interação por atrito lateral entre as estacas compondo o radier estaqueado e o solo circundante.

Para a capacidade de carga do radier que recebe todas as cargas por meio dos pilares e/ou alvenarias da edificação, é recomendável distribuir as cargas de forma uniforme no solo.

A capacidade de carga das estacas tem uma componente de resistência lateral, mobilizada ao longo do fuste e uma componente de base chamada resistência de ponta.

A resistência lateral é teoricamente definida de acordo com o critério de Mohr – Coulomb, em função da tensão efetiva normal à superfície lateral da estaca, também chamada de tensão efetiva radial, e do ângulo de atrito de contato solo – estaca. O ângulo de atrito solo – estaca é função fundamentalmente da granulometria do solo e da rugosidade da superfície da estaca.

A porcentagem de carga a se transferir via atrito lateral depende de vários fatores, como propriedades e estratificação do solo, camada de apoio da ponta, comprimento da estaca (Poulos & Davis, 1980) e ainda da relação de rigidez entre a estaca e o solo e da própria rigidez do maciço. A parcela de atrito lateral atuante na estaca é função das tensões cisalhantes desenvolvidas no contato estaca/solo. Esta tensão cisalhante ( $\tau$ ) pode ser expressa:

$$\tau = a + \sigma_n \operatorname{tg}(\phi^*) \quad (2.8)$$

onde,

$a$  é a aderência estaca/solo, em  $[M L^{-1}T^{-2}]$ ;

$\sigma_n$  é a tensão normal à superfície da estaca, em  $[ML^{-1}T^{-2}]$ ;

$\phi^*$  é o ângulo de atrito estaca/solo, em  $[^\circ]$ .

A aderência entre a estaca e solo pode ser calculada da seguinte maneira

$$a = c\alpha \quad (2.9)$$

onde,

$c$  é a coesão do solo, em  $[M L^{-1}T^{-2}]$ ;

$\alpha$  é um fator adimensional.

As tensões horizontais produzidas pelo software consideram o valor de  $K_0$  (coeficiente de empuxo no repouso) ao mesmo valor teórico. Este pode ser obtido a partir do coeficiente de Poisson do solo, conforme a equação 4.1, em elasticidade.

$$K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (2.10)$$

onde,

$K_0$  é o coeficiente de empuxo no repouso;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se as características do solo do Distrito Federal e os resultados dos ensaios realizados no Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo da Universidade de Brasília.

Apresenta-se também neste capítulo aspectos relacionados ferramenta numérica utilizada nas análises dos radiers estacados analisados nesta Tese.

#### 3.1 SOLOS DO DISTRITO FEDERAL

A avaliação da resistência de ponta das estacas é um problema extremamente complexo. Existem várias teorias para o mecanismo de ruptura da base de estacas, cujas diferenças podem ser substanciais, não só em termos do mecanismo em si, mas também ao nível dos parâmetros do solo considerado. Estas diferenças refletem-se, naturalmente, nos resultados (Sales, 2000).

O Distrito Federal apresenta-se em grande parte recoberto por um manto de solo detritolaterítico de idade Terciária - Quaternária constituído principalmente de latossolos vermelhos amarelos, conforme Figura 3.1. O manto desse solo é resultado do intemperismo, associado aos processos de lixiviação e laterização, que conduziram à formação de uma estrutura bastante porosa, metaestável, com altos índices de vazios e consequentemente baixos pesos específicos, chamado pelos geotécnicos locais de “argila porosa”. A espessura desta cobertura profundamente intemperizada é bastante variada, em função da topografia, da cobertura vegetal e da rocha de origem, podendo variar de centímetros a dezenas de metros (Mendonça *et al.*, 1994; Paixão & Camapum de Carvalho, 1994). Esta camada apresenta baixa capacidade de carga, em especial quando saturada, levando a adoção de fundações profundas na maioria das obras, mesmo para as pequenas edificações.

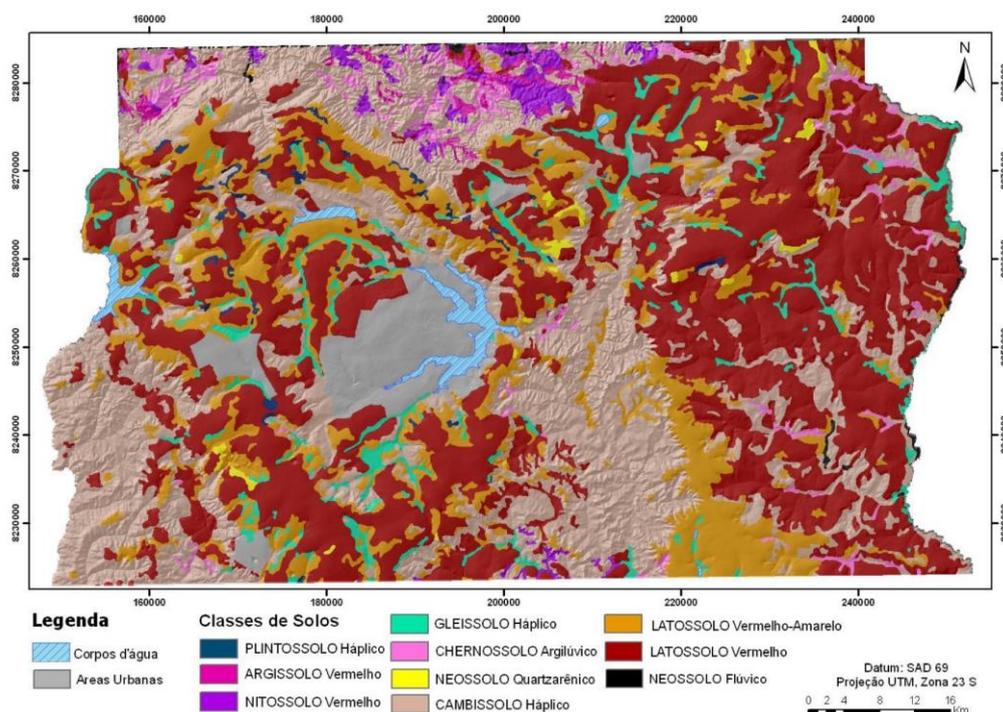


Figura 3.1. Mapa de solos original com legenda simplificada (EMBRAPA, 2006).

A Tabela 3.1 Apresenta diversas pesquisas que têm sido desenvolvidas com objetivo de caracterizar o comportamento dos solos do Distrito Federal.

Tabela 3.1 Resumo do estudo

Autor	Resumo do estudo
EMBRAPA (1978)	Mostraram o mapeamento pedológico dos solos do Distrito Federal realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos. Permiteu verificar que as classes de solos denominadas de Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) e Cambissolo (Cb) recobrem cerca de 86% do território do Distrito Federal.
Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (1987)	Estudaram a colapsividade da argila porosa de Brasília. Concluíram que o aumento do pH do líquido de saturação tende a intensificar o colapso.
Ferreira Jr. (1991)	Afirmaram que os solos lateríticos são abundantes no Distrito Federal, por ser uma região de clima quente e úmido, apresentando estações secas e chuvosas bem definidas.
Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (1993)	A “argila porosa” é constituída por argilas, siltes e areias combinados em diferentes proporções, dependendo do domínio geológico local.

Autor	Resumo do estudo
Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (1994) e Paixão & Camapum de Carvalho (1994)	Mostraram que os solos porosos colapsíveis de Brasília, apresentam estrutura constituída por micro e macro poros, sendo a instabilização desta, o motivo do colapso.
Camapum de Carvalho & Mortari (1994)	No Distrito Federal, as obras subterrâneas rasas geralmente se localizam em horizontes de solos colapsíveis, argilosos de cor vermelha a vermelha-amarelada, denominados pelos geotécnicos da região como “argila porosa”.
Blanco (1995)	As características do solo do Distrito Federal são devidas ao relevo, clima e geologia local. O relevo do DF, em especial do plano piloto, é plano a levemente ondulado, considerando uma chapada devido à elevação maior do que 600 m e um relevo causado pela erosão
Cardoso (1995)	Ressaltou a pouca diferenciação ente os horizontes formadores dos solos do Distrito Federal em termos estruturais, observando-se a presença de elevados teores de Fe e Al e a quase ausência das bases Ca, Mg, K e Na. O pH ácido dos solos desta região favorece a agregação de suas partículas em estado natural.
Araki (1997)	Observou que o solo é formado por microagregados unidos uns aos outros através de pontes de argila e cimentações, sustentando uma estrutura bastante porosa onde estes microagregados não constituem uma estrutura maciça, compacta.
Paranhos (1998)	Apresentou uma caracterização geotécnica dos principais grupos de solos presentes no Distrito Federal, correlacionando as classificações tradicionais de solo (Sistema Unificado de Classificação dos Solos, SUCS e classificação proposta pela metodologia MCT).
Cardoso (2002)	Apresentou informações sobre as propriedades fundamentais dos solos do DF, do ponto de vista mineralógico, químico e de engenharia e analisou a influência imposta a estes solos, em suas propriedades físicas e comportamento mecânico, pelas características químicas e mineralógicas. Apresentou uma nova proposta de descrição dos horizontes em solos lateríticos para uso nas áreas de geotecnia e geologia de engenharia, baseado na análise das várias proposições para descrição de perfis de intemperismo apresentadas e na sua experiência com os solos lateríticos do cerrado brasileiro.
Guimarães <i>et al.</i> (2002)	A camada de argila porosa apresenta, devido a sua alta porosidade e tipo de ligações cimentícias, uma estrutura instável quando submetida ao aumento de umidade e/ou a alteração do estado de tensões, apresentando quase sempre uma brusca variação, denominada colapso.

### 3.1.1 DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL

A análise apresentada nessa dissertação foi feita a partir de resultados dos ensaios realizados no Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo da Universidade de Brasília, localizado em frente ao prédio SG 12, onde fica o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

da Universidade de Brasília. O campo experimental é definido pelas coordenadas 15°46 Latitude Sul e 47°52 Longitude Oeste.

Sobre o solo do campo experimental foram realizados ensaios de caracterização física e mineralógica. No estudo do comportamento mecânico do perfil do solo, foram realizados ensaios oedométricos, ensaios de cisalhamento direto, ensaios triaxiais não-drenado e triaxial tipo  $K_0$ , ensaios de campo (SPT-T, cone, dilatômetro e pressiômetro) e provas de carga (Guimarães, 2002; Mascarenha 2003).

A Tabela 3.2 representa o perfil típico da camada porosa de Brasília, apresentando os parâmetros geotécnicos até aproximadamente 8,80 m de profundidade.

Tabela 3.2. Parâmetros geotécnicos do perfil de intemperismo de Brasília - DF (modificado – Araki, 1997).

Parâmetro	Unidade	Faixa de Valores
Porcentagem de Areia	%	12-27
Porcentagem de Silte	%	8-36
Porcentagem de Argila	%	35-76
Peso específico	kN/m <sup>3</sup>	14-19
Teor de umidade natural (w)	%	20-34
Grau de saturação (S)	%	50-86
Índice de vazios (e)	-	1-2
Limite de Liquidez (LL, w <sub>l</sub> )	%	25-78
Limite de Plasticidade (LP, w <sub>p</sub> )	%	20-34
Índice de Plasticidade (IP)	%	5-44
Coesão (c)	kPa	10-34
Ângulo de atrito ( $\phi$ )	°	26-34
Módulo de Young (E)	MPa	2-14
Coefficiente de empuxo no repouso (K <sub>0</sub> )	-	0.44-0.54
Coefficiente de permeabilidade (k)	cm/s	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup>

### 3.1.2 CARACTERÍSTICA GEOTÉCNICAS DO CAMPO EXPERIMENTAL

O campo experimental apresenta um perfil de solo típico do Distrito Federal sendo em sua parte mais intemperizada composto por uma camada de solo laterítico vermelho, argiloso, denominada de “argila porosa”, que apresenta baixa resistência à penetração (SPT variando de 1 a 6 golpes), baixa resistência de ponta (CPT variando de 0,6 a 2,3 MPa), baixa capacidade de suporte, baixo nível de saturação e alta permeabilidade ( $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  m/s). Devido a sua alta porosidade e tipo de ligações cimentíceas, apresenta uma estrutura altamente instável quando submetida a aumento de umidade e/ou a alteração do estado de tensões, apresentando quase sempre uma brusca variação de volume quando colapsa (Mota, 2003). Maiores detalhes sobre as características geotécnicas do campo experimental podem ser vistos Blanco (1995), Cardoso (1995), Pastore (1996), Perez (1997), Rodrigues *et al.* (1998), Jardim (1998), Peixoto (1999), Sales (2000), Cardoso (2002) e Guimarães (2002). Os estudos mais relevantes para essa pesquisa são apresentados na Tabela 2.3 o perfil de solo característico do campo experimental escolhido para a realização da pesquisa será o apresentado por Mota (2003), devido ao fato de se fundamentar nos resultados de ensaios realizados por ela e por outros pesquisadores levando a uma mais completa síntese das características do solo (Figura 3.2).

Tabela 3.3. Resumo dos estudos do perfil de solo do campo experimental da UNB

Autor	Resumo do estudo
Pastore (1996)	O perfil de solo do campo experimental da UnB mostra horizontes bem distintos: camada de 0 a 8,8 m onde apresenta horizonte de solo residual laterítico, que sofreu processo de intemperismo, sendo constituído por uma argila arenosa vermelho escura (0 a 5 m) e uma argila pedregulho arenosa vermelho escura (5 a 8,8 m). Camada de 8,8 a 10,3 m de horizonte de transição, composto de um solo laterítico (8,8 a 9,8 m). Camada de 10,3 a 15 m de horizonte de solo saprolítico de ardósia, constituído por intercalações de quartzo (10,3 a 11,3) e um silte argiloso vermelho (11,3 a 15,0 m).
Guimarães (2002)	Concluiu que existe uma boa relação das propriedades físicas com as características mineralógicas e microestruturais, sendo que o conjunto de resultados permite dividir o subsolo do campo experimental da UnB nas seguintes subcamadas: Camada de 0 a 3,5 m de areia argilo-siltosa porosa, com predominância de gibbsita, macroporos e muitos agregados, com alto índice de vazios (entre 1,27 e 1,60), peso específico dos sólidos em torno de 26,5 kN/m <sup>3</sup> e IP médio de 10. Camada de 3,5 a 8,5 m de argila areno-siltosa, zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m. A partir da camada de 8,5 m o solo assume textura mais siltosa, caracterizada pelo aumento do índice de vazios (0,96 a 1,08), do peso específico dos sólidos (em torno de 27,4 kN/m <sup>3</sup> ) e do IP (valor médio 17) com distribuição de poros mais homogênea.

Autor	Resumo do estudo
Mota (2003)	<p>Concluiu com base nos resultados dos ensaios realizados pela autora e por outros, uma boa relação das propriedades físicas com as características mineralógicas, sendo que os resultados permitiram dividir o subsolo do campo experimental da UnB nas seguintes camadas, com características bem definidas:</p> <p>A camada I, de 0,0 a 3,0 m de areia argilo-siltosa porosa, com predominância de gibbsita, com alto índice de vazios (entre 1,27 e 1,60), peso específico dos sólidos em torno de 26,5 kN/m<sup>3</sup> e IP médio de 10.</p> <p>Camada II de 3,1 a 8,0 m, de argila areno-siltosa, zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m. Neste trecho, o teor de gibbsita, a porosidade e a macroporosidade vão paulatinamente diminuindo, com índice de vazios decrescente (1,27 para 0,89), peso específico dos sólidos e índice de plasticidade semelhante à camada anterior.</p> <p>Camada III de 8,0 a 12,0 m de silte argiloso a partir da qual o solo assume textura mais siltosa, caracterizada pelo aumento do índice de vazios (0,96 a 1,08), do peso específico dos sólidos (em torno de 27,4 kN/m<sup>3</sup>) e do IP (valor médio 17) com distribuição de poros mais homogênea.</p> <p>Camada IV: 12,0 a 24,0 m com distribuição de poros mais homogênea.</p>

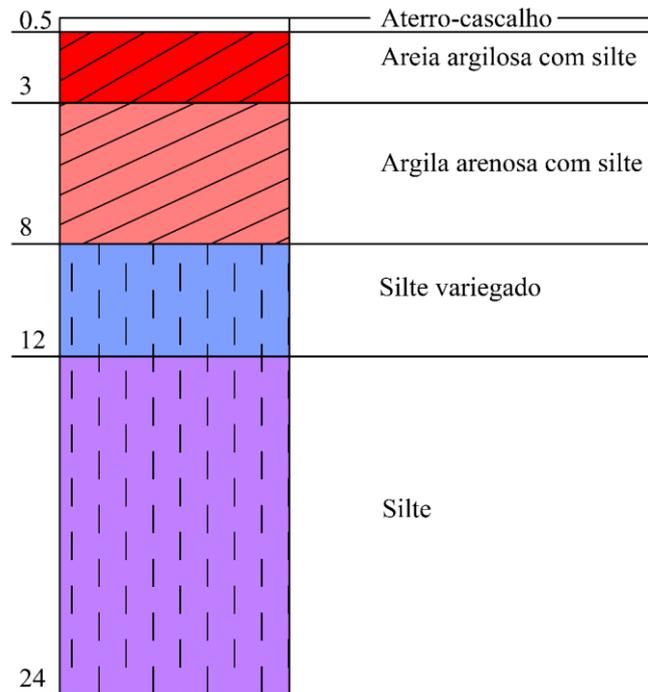


Figura 3.2. Perfil de solo do campo experimental da UnB (Modificado de Mota, 2003).

### 3.2 REVISÃO DE MODELOS CONSTITUTIVOS

Um modelo constitutivo permite relacionar as tensões com as deformações unitárias, produzidas no interior do material em função de um número determinado de parâmetros que dependem das propriedades mecânicas do material. Para que o modelo seja realmente útil, deve

possuir parâmetros identificáveis (mediante um número reduzido de ensaios simples) e deve ser capaz de reproduzir fisicamente a resposta do material (frente a qualquer mudança de tensões ou deformações). O presente capítulo visa apresentar de forma mais realística o comportamento dos solos.

Nesta dissertação os materiais foram representados pelos modelos: o radier estaqueado pelo elástico linear e o solo pelos modelo elástico linear e elástico-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, de acordo com os dados disponíveis dos solos compondo o perfil considerado. Desta forma, será apresentada uma descrição destes modelos.

Torna-se necessário que se tenha conhecimento das teorias que representam as condições dos materiais em determinado estado, no presente caso, as teorias da elasticidade e plasticidade. Elas podem ser encontradas com maior detalhamento, no trabalho de Lautenschläger e Righetto (2008). Nesse trabalho foi apresentada uma revisão fundamental sobre determinados modelos constitutivos, em conjunto com tópicos sobre a teoria do estado crítico, baseado principalmente nas pesquisas detalhadas dos modelos constitutivos representativos do comportamento dos solos, recomendando as leituras de: Ibañez, 2003; Mendonça, 2005; e Farias, 2014.

### **3.2.1 MODELOS DE COMPORTAMENTO PARA SOLO**

Os solos se comportam e reagem segundo a sua formação e/ou história geológica, isto é, de acordo com a própria história.

O comportamento mecânico dos materiais geotécnicos é geralmente associado a três fenômenos básicos: influência do histórico de tensões, mudando o limite entre o comportamento elástico e o comportamento elasto-plástico; deformações plásticas irreversíveis, ao ultrapassar o domínio elástico definido pela superfície de plastificação; diminuição de volume por compressão, ao mesmo tempo em que endurece ou aumento de volume por dilatação, ao mesmo tempo em que amolece (González, 2014). No entanto, no caso dos solos tropicais intemperizados a história relevante não é aquela ligada às alterações de tensões sofridas, mas sim, as alterações químico-mineralógicas e estruturais sofridas pelo material ao longo do tempo, ou seja, o fator influente não é a energia externa (história de tensões), mas sim a energia interna de natureza eletromagnética (alterações químico-mineralógica e estruturais). Nesses solos intemperizados o comportamento tensão deformação é distinto do normalmente considerado

(Ozelim *et al.* 2014). Vale salientar, que a inclusão da influência das alterações químico-mineralógicas nas modelagens ainda é uma tarefa muito complicada e, em alguns casos, impossíveis.

A teoria da plasticidade, que foi desenvolvida inicialmente para metais, poderia ser apropriada para a descrição do comportamento dos solos e rochas, descrevendo adequadamente fenômenos presentes nos materiais geotécnicos que são induzidos por tensões cisalhantes, tais como: influência do histórico de tensões, fluência, deformações plásticas irreversíveis, dilatância, entre outros.

Esses fenômenos são descritos por meio de três conceitos básicos: função de plastificação, a qual determina o limite do domínio elástico para o elasto-plástico, função de potencial plástico ou lei de fluxo plástico, a qual determina o vetor e a direção dos incrementos das deformações plásticas, e a lei de endurecimento, a qual determina o tamanho do domínio elástico ou da superfície de plastificação.

O comportamento do solo pode ser representado sob condições não drenadas a volume constante, ou drenadas variando o volume, assim como sob carregamento isotrópico sem tensões desviadoras, ou cisalhante aplicando tensões de desvio.

Conjuntamente, o M.E.F permite tratar o solo como meio contínuo e dá a ferramenta matemática para abordar a solução do problema em termos de forças e deslocamentos, assim como tensões e deformações (Carter *et al.* 2000).

## MODELO ELÁSTICO LINEAR

O modelo elástico-linear representa a lei de Hooke de elasticidade linear isotrópica, e é muito limitado para uma simulação mais abrangente do comportamento do solo. A matriz tensão-deformação no modelo, para o caso de deformações planas, é dada por:

$$D = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde,

$K$  é o módulo volumétrico;

$G$  é o módulo de cisalhamento.

O módulo volumétrico pode ser determinado através da seguinte formulação.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.2)$$

onde,

$E$  é o módulo Young;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson.

O módulo de cisalhamento pode ser determinado da seguinte maneira.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.3)$$

Os modelos elásticos lineares apresentam limitações em relação às suas capacidades para representarem consistentemente os processos de escoamento e os estados de descarregamento / recarregamento.

## MODELOS ELASTO-PLÁSTICO

O princípio básico de elasto-plasticidade é que as deformações e razões de deformação são decompostas em duas frações, uma elástica (reversível)  $\varepsilon_{ij}^e$  e outra plástica (irreversível)  $\varepsilon_{ij}^p$  (Eq. 3.4). No comportamento elástico o corpo recupera todas as deformações, enquanto que a plasticidade está associada com o desenvolvimento de deformações irreversíveis.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (3.4)$$

Três princípios básicos regem os problemas que envolvem deformações plásticas, a função de plastificação, a lei de endurecimento e a lei de fluxo.

A função de plastificação ( $f$ ) define o limite da região, na qual todos os pontos localizados no seu interior representaram um estado de tensões, onde ocorreram unicamente as deformações elásticas. No caso mais geral a função de plastificação é definida como uma função dos seis componentes do tensor de tensão ( $\sigma_{ij}$ ), e indica o início da ocorrência das deformações plásticas.

$$f(\sigma_{ij}) = f(I_1, I_2, I_3) = 0 \quad (3.5)$$

A função  $f(\sigma_{ij}) < 0$  representa a região onde ocorrem unicamente deformações elásticas, e para  $f(\sigma_{ij}) > 0$ , uma situação impossível de ocorrer.

Devido ao fluxo plástico, ocorre o endurecimento por trabalho e por deformação. Existem duas hipóteses para definir o grau de endurecimento. Na primeira hipótese assume-se que o endurecimento depende unicamente do trabalho plástico ( $W_p$ ) e independe da trajetória de tensões. Isto implica que a resistência após a plastificação, depende unicamente do trabalho plástico realizado pelo material. Na segunda hipótese assume-se que o endurecimento está relacionado às deformações plásticas.

A lei de fluxo é a relação tensão x incremento de deformação plástica, durante a ocorrência de fluxo plástico, definida por meio da função potencial plástico. Caso o potencial plástico coincida com a superfície de escoamento, a lei de fluxo é dita associada, caso contrário é chamada de não associada. Na teoria da plasticidade a direção do vetor de deformações plásticas é definida através de uma lei de fluxo, assumindo-se que existe uma função do potencial plástico, no qual os incrementos de deformação plástica são ortogonais. Estes incrementos podem ser expressos como:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.6)$$

onde,

$g$  é a função de potencial plástico;

$\lambda$  é um fator de proporcionalidade também conhecido como multiplicador plástico.

Para alguns materiais a função de potencial plástico coincide com a função de plastificação, considerando-se que o material segue uma lei de fluxo associada. No caso contrário, considera-se que o material segue uma lei de fluxo não-associada.

O modelo Mohr-Coulomb é um modelo elástico perfeitamente plástico, amplamente utilizado para a análise geotécnica, graficamente representado na Figura 3.3 na qual a resistência ao cisalhamento  $\tau$  na iminência da ruptura, no plano de ruptura, é determinada por:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3.7)$$

onde,

$c$  é a coesão;

$\phi$  é o ângulo de atrito.

Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno pode-se determinar a partir do ensaio de compressão triaxial convencional (CTC), levando o material até a condição de ruptura.

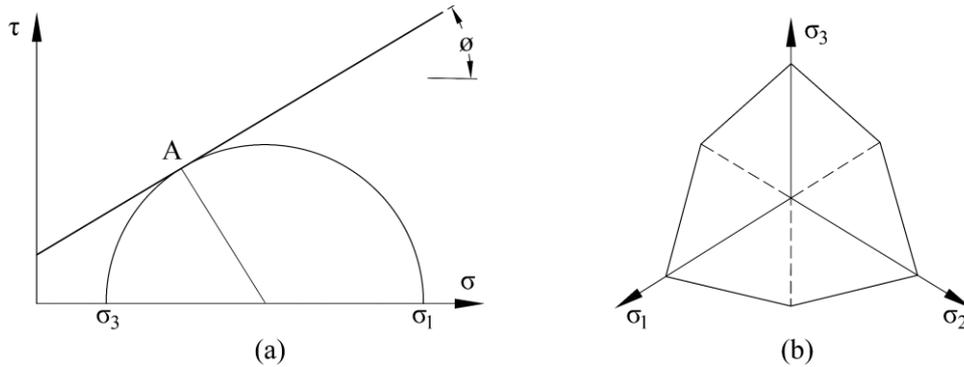


Figura 3.3. Critério de escoamento de Mohr-Coulomb: a) no plano  $(\sigma, \tau)$ ; b) em plano octaédrico.

Este modelo é empregado para representar ruptura por cisalhamento de solos e rochas. O modelo Mohr-Coulomb é assim denominado porque é assumido que o material se comporta como linear elástico até atingir a ruptura, não havendo a ocorrência de endurecimento devido ao fluxo plástico, ou seja, a superfície de plastificação é fixa.

A Figura 3.4 representa a relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb, onde o material apresenta um comportamento linear elástico (recuperável) até atingir uma determinada tensão de escoamento, que se mantém constante para acréscimo de deformações plásticas (irrecuperáveis).

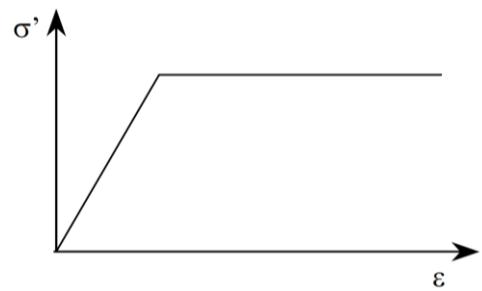


Figura 3.4. Relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb

A condição de Mohr-Coulomb é uma extensão da lei de atrito de Coulomb. De fato, esta condição assegura que a Lei de atrito de Coulomb é obedecida em qualquer plano dentro de um elemento do material. A condição de Mohr-Coulomb pode ser definida por três funções formuladas em termos de tensões principais (Smith & Griffith, 1982):

$$f_{1a} = \frac{1}{2}[\sigma'_2 - \sigma'_3] + \frac{1}{2}[\sigma'_2 + \sigma'_3] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.8)$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}[\sigma'_3 - \sigma'_2] + \frac{1}{2}[\sigma'_3 + \sigma'_2] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.9)$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}[\sigma'_3 - \sigma'_1] + \frac{1}{2}[\sigma'_3 + \sigma'_1] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.10)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}[\sigma'_1 - \sigma'_3] + \frac{1}{2}[\sigma'_1 + \sigma'_3] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.11)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}[\sigma'_1 - \sigma'_2] + \frac{1}{2}[\sigma'_1 + \sigma'_2] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.12)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}[\sigma'_2 - \sigma'_1] + \frac{1}{2}[\sigma'_2 + \sigma'_1] \text{sen}\phi - c \cos\phi \leq 0 \quad (3.13)$$

Os dois parâmetros plásticos que aparecem nas funções são o ângulo de atrito  $\phi$  e a coesão  $c$ . Essas funções, juntas, representam um cone hexagonal no espaço de tensões principais, que está apresentado na Figura 3.5.

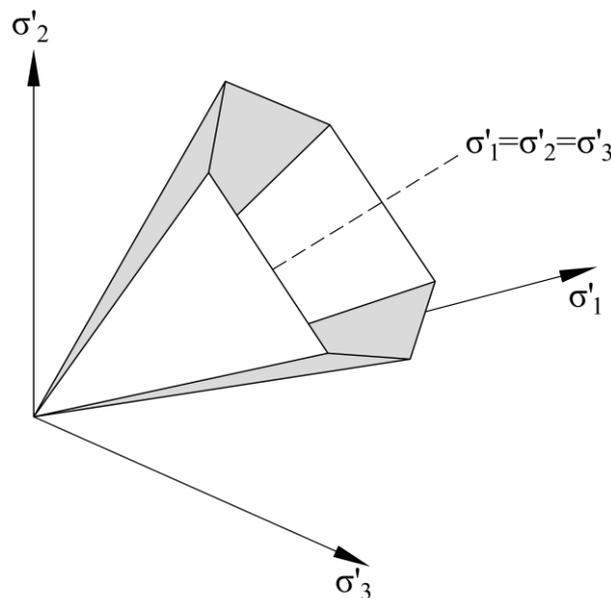


Figura 3.5. Superfície de Mohr-Coulomb no espaço de tensões principais ( $c = 0$ ).

O uso de uma lei de fluxo associada no critério de Mohr-Coulomb, leva a uma superestimativa da dilatância. Por isso, as funções potenciais plásticas contêm um terceiro parâmetro de plasticidade, o ângulo de dilatância. Este parâmetro é requerido para modelar incrementos de deformação volumétrica plásticas (dilatância). As funções de potencial plástico incluindo este parâmetro são apresentadas a seguir:

$$g_{1a} = \frac{1}{2}[\sigma'_2 - \sigma'_3] + \frac{1}{2}[\sigma'_2 + \sigma'_3] \operatorname{sen}\psi \quad (3.14)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}[\sigma'_3 - \sigma'_2] + \frac{1}{2}[\sigma'_3 + \sigma'_2] \operatorname{sen}\psi \quad (3.15)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}[\sigma'_3 - \sigma'_1] + \frac{1}{2}[\sigma'_3 + \sigma'_1] \operatorname{sen}\psi \quad (3.16)$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}[\sigma'_1 - \sigma'_3] + \frac{1}{2}[\sigma'_1 + \sigma'_3] \operatorname{sen}\psi \quad (3.17)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}[\sigma'_1 - \sigma'_2] + \frac{1}{2}[\sigma'_1 + \sigma'_2] \operatorname{sen}\psi \quad (3.18)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}[\sigma'_2 - \sigma'_1] + \frac{1}{2}[\sigma'_2 + \sigma'_1] \operatorname{sen}\psi \quad (3.19)$$

### 3.2.2 MODELO DE COMPORTAMENTO LINEAR-ELÁSTICO PARA AS ESTACAS

Esse modelo é simples. Para sua caracterização são necessárias duas propriedades do material: o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. O mesmo descreve o comportamento de materiais chamados Hookeanos, em homenagem a Robert Hooke, denotando uma relação proporcional entre a tensão e a deformação dada pelo módulo de elasticidade.

O modelo linear-elástico tem sido amplamente utilizado para modelagem de estacas carregadas verticalmente à compressão, independentemente do material da mesma. Assume-se como válida essa hipótese ainda para o caso de estacas de concreto comprimidas, levando em conta a natureza das cargas ao minimizar, em grande medida, o fenômeno da fissuração do material.

### 3.3 FERRAMENTA NUMÉRICA USADA – PROGRAMA ABAQUS

O programa ABAQUS®, desenvolvido pela HKS Inc de Rhode Island é um software de elementos finitos apto a criar, editar, monitorar e visualizar avançadas modelagens numéricas. É relevante citar que este programa aplica três fases distintas de uma análise típica de elementos finitos, as quais são: pré-processamento, simulação ou análise de elementos finitos e pós-

processamento. Esses três estágios são conectados por meio de arquivos como mostra a Figura 3.6.

O pré-processamento envolve criar um arquivo de entrada que contém a geometria em estudo, e onde são definidas as diversas propriedades do modelo que se deseja adotar.

Na simulação ou processamento, o problema descrito no pré-processamento é resolvido através do uso de equações diferenciais ordinárias e equações diferenciais parciais.

Por fim, na etapa de pós-processamento, o ABAQUS retorna os campos de tensões, deformações, status de contato, através de uma interface renderizada, onde é possível realizar animações, plotar gráficos, etc.



Figura 3.6. Estágios de análise do ABAQUS/Standard.

No caso desta pesquisa, as modelagens aplicadas são apresentadas no Capítulo 3. Ressalta-se que o programa retrata as interações entre os materiais aplicados nesta pesquisa, sendo eles: concreto e solos. Por fim, cita-se esta ferramenta como adequada para este estudo devido a sua capacidade de simular o processo.

O software ABAQUS 3D tem sido amplamente empregado em pesquisas acadêmicas no campo da engenharia, utilizando os elementos finitos para modelar o problema real alcançando resultados ótimos.

### 3.3.1 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

As análises numéricas do radier estaqueado foram realizadas pelo método de elementos finitos (MEF), com a utilização do programa ABAQUS, e contemplam estruturas 3D.

O Método dos Elementos Finitos tem sido muito utilizado na engenharia, pois permite desenvolver projetos de grande complexidade obtendo resultados confiáveis pelo fato de representar adequadamente o problema real.

Os fundamentos do MEF consistem no desenvolvimento de uma equação integral de um domínio complexo (de volume  $V$ ), o qual possa ser substituído pela somatória de um conjunto de subdomínios de geometria mais simples (de volume  $V_i$ ). Isto pode ser descrito como segue:

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (3.20)$$

pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.21)$$

Cada sub domínio  $V_i$  corresponde a um elemento finito de geometria simples (e.g., segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O somatório indicado na equação (3.20) vai dar origem à operação designada *assemblagem*, que apresenta muitas semelhanças com a que é efetuada nas estruturas reticuladas (Raposo, 2016).

A formulação mais intuitiva, ao se tratar da análise de estruturas, é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais. Neste princípio é considerado um conjunto de deslocamentos, os quais são provocados por um carregamento qualquer. Estes deslocamentos são chamados de deslocamentos virtuais. Depois o trabalho virtual, realizado pelas tensões internas na deformação virtual e pelas forças externas nos deslocamentos virtuais, é igual (Azevedo, 2003). Tavares em 2005, citado por Rocha (2014), expõe que as principais vantagens do MEF são: As propriedades dos materiais não precisam ser as mesmas em elementos adjacentes, o que

possibilita utilizar diversos materiais permitindo a simulação de um meio heterogêneo. Os elementos finitos irregulares podem ser aproximados utilizando fronteiras curvas. O tamanho dos elementos pode ser variado.

### 3.3.2 CARACTERÍSTICAS DO MODELO

A geometria básica usada nesse trabalho é definida por três componentes distintas: o solo (uma camada e quatro camadas), o radier, as estacas (em número variável). Para modelagem do radier foram utilizados elementos de placa de quatro nós (Figura 3.7 (a)) com integração reduzida, enquanto que para modelagem do conjunto estacas/solo foram utilizadas elementos sólidos tridimensionais de 8 nós (Figura 3.7 (b)) com integração completa.

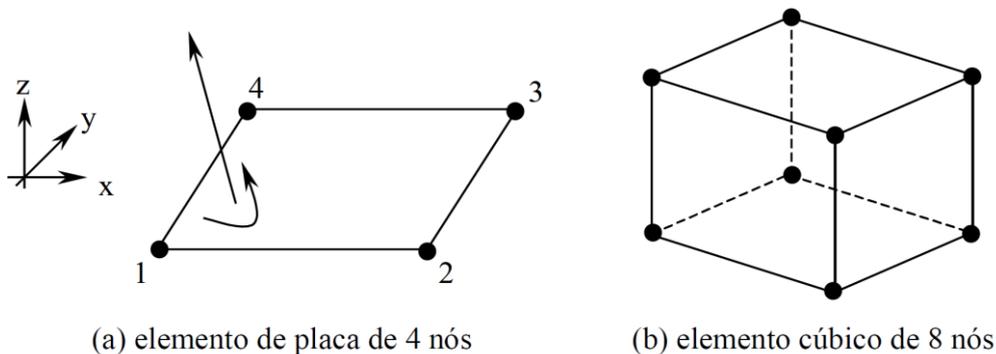


Figura 3.7. Elementos utilizados na modelagem do radier estaqueado.

As propriedades dos materiais foram definidas em termos dos respectivos módulos de Young e coeficientes de Poisson, admitindo-se como elástico-linear e isotrópico o comportamento das estacas, do solo e do radier, também define-se os parâmetros do solo para o modelo Mohr-Coulomb. A distribuição do carregamento na superfície do radier, assim como as condições de contorno aplicadas à geometria do problema, serão devidamente explicitadas para cada caso analisado.

### 3.3.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DA MODELAGEM

A modelagem do contato entre a base do radier, a superfície do solo e o topo das estacas é feita através de restrições (“ties”) impostas entre os diferentes graus de liberdade do modelo, fazendo com que todos os graus de liberdade ativos sejam iguais em dois nós distintos. Se existirem

graus de liberdade ativos diferentes nesses dois nós, somente aqueles de mesma natureza serão restringidos, ou seja, nesse caso apenas os deslocamentos (Bacelar, 2003).

O contato entre corpos é então definido em termos de duas superfícies deformáveis que podem interagir, chamadas “par de contato”. Para cada nó da primeira superfície do par de contato (“superfície escrava”) o ABAQUS busca o nó mais próximo da segunda superfície (“superfície mestre”) onde a normal à essa superfície passa através do nó na “superfície escrava” (Figura 3.8). A interação é então discretizada entre os nós da “superfície mestre” e da “superfície escrava”. No caso em questão, onde ambas as superfícies são deformáveis, o usuário deve definir qual delas será a “superfície mestre” e qual será a “superfície escrava”. Geralmente, a “superfície mestre” deve ser escolhida como a superfície do corpo mais rígido ou como a superfície que possui a malha mais grosseira, se ambas as superfícies pertencerem a estruturas com rigidez comparáveis. Dessa forma, sendo o radier a estrutura mais rígida, a sua base foi definida como “superfície mestre”, enquanto que a outra superfície de contato (conjunto estacas/solo) foi definida como “superfície escrava” (ABAQUS).

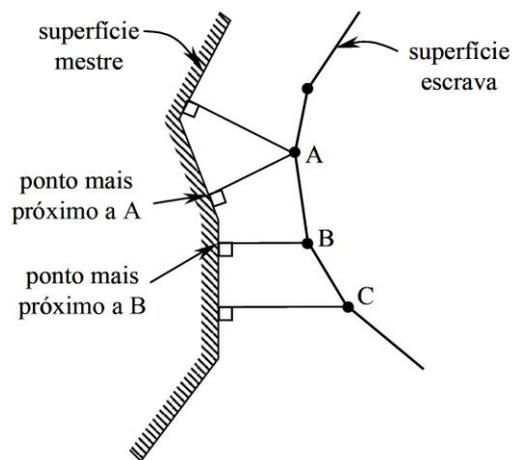


Figura 3.8. Discretização da interação e do contato entre as superfícies “mestre” (base do radier) e “escrava” (topo da superfície do conjunto estacas/solo).

## 4 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Este trabalho procurou aplicar a metodologia do radier estaqueado sobre os solos tropicais do Distrito Federal, combinando assim com o sistema de fundação em um solo homogêneo, pouco intemperizado, e outro solo intemperizado e composto de camadas variando entre profundamente intemperizado e pouco intemperizado, com a finalidade de estudar as tensões horizontais atuantes sobre o solo que circunda as estacas. Para a análise considerou-se apenas o ponto em princípio mais sensível correspondente ao centro do radier.

Neste trabalho avaliou-se os recalques máximos no centro do radier estaqueado, com o modelo Elástico linear e de Mohr-Coulomb para o solo homogêneo e para um perfil de solo composto de quatro camadas. Para avaliar a influência do número de estacas foram usados radier estaqueado com 1, 5, 9, 13, 17, 21 e 25 estacas. Os parâmetros adotados para o perfil de solo multicamadas foram obtidos de estudos anteriores realizados sobre o solo proveniente do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (Mota, 2003; Castilho, 2013).

Foi atingida a calibração numérica do modelo idealizado para o radier estaqueado e para o solo, considerando as condições de borda, o modelo constitutivo empregado, e a quantidade de estágios para representar o processo construtivo, entre outros. Esta parte foi conseguida com ajuda do método dos elementos finitos em 3D implementado no pacote ABAQUS.

### 4.1 PROCESSO DE MODELAGEM

O desenvolvimento desse capítulo versa sobre o aspecto vinculado ao processo de Modelagem. Para isso tratam-se as questões relativas à modelagem dos materiais, às condições de contorno, os tipos de cargas e às análises consideradas. No processo de calibração numérica, realizam-se várias análises iniciais associadas à escolha da forma ou da geometria do domínio estudado, suas dimensões, o tipo de elemento finito e a densidade da malha de elementos a ser utilizada em relação ao custo computacional.

Assim que o processo de modelagem é validado, é possível estudar diferentes cenários, geometrias, solos, cargas, condições iniciais, entre outros. A possibilidade de variar numericamente essas condições permite conhecer o comportamento do solo, sem a necessidade

de utilizar grandes e sofisticados laboratórios para obter uma resposta adequada do comportamento desse tipo de fundação.

As simulações numéricas foram realizadas com auxílio do programa ABAQUS 6.12 com o método de elementos finitos, o computador usado para a realização das simulações conta com um processador de 2.2 GHz e uma memória de 3.00 GB. Durante as simulações foi estipulado um uso máximo de memória padrão de 70%.

#### **4.1.1 MODELOS DE COMPORTAMENTO PARA O SOLO**

O tipo de modelo constitutivo deve ser definido para cada solo utilizado. Nesta pesquisa usaremos dois tipos de distribuições uma com solo uniforme (uma camada) e outra com solo em camadas (quatro camadas) representando o solo do campo experimental.

A escolha do modelo que será utilizado nas simulações do comportamento do material é de grande relevância para que os resultados obtidos sejam realistas. As simulações numéricas foram realizadas com o programa ABAQUS com o modelo Elástico – Linear e modelo Elasto-Plásticos “Mohr-Coulomb”.

Levando em consideração que o modelo constitutivo mencionado, não considera o estado de colapso nos solos.

##### **4.1.1.1 MODELO DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO LINEAR**

No modelo de comportamento elástico-linear implementado no programa ABAQUS, o solo estudado consiste de camadas com comportamento elástico linear, isotrópica, de espessura  $h$  (Tabela 4.1). Os parâmetros elásticos (módulo de Young,  $E$ , coeficiente de Poisson,  $\nu$ ) são considerados constantes para toda a massa, o que pode caracterizar um meio homogêneo (Figura 4.1) e um meio heterogêneo com quatro camadas (Figura 4.2).

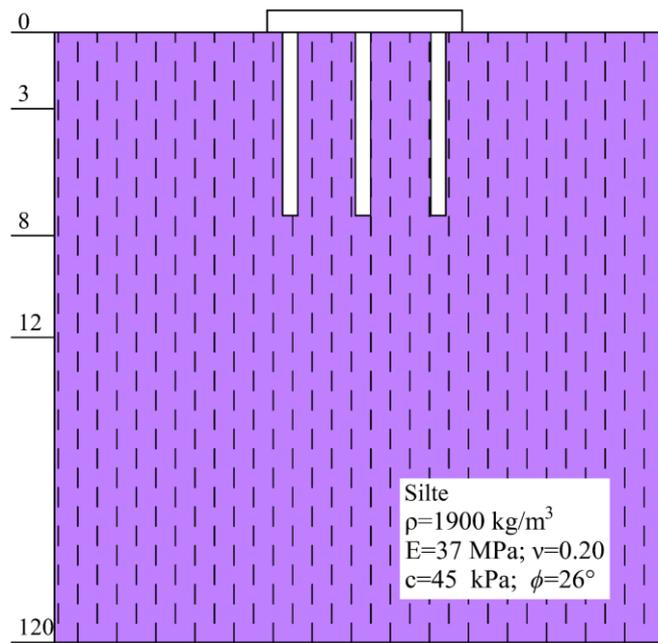


Figura 4.1. Perfil estratigráfico e parâmetros do modelo de uma camada

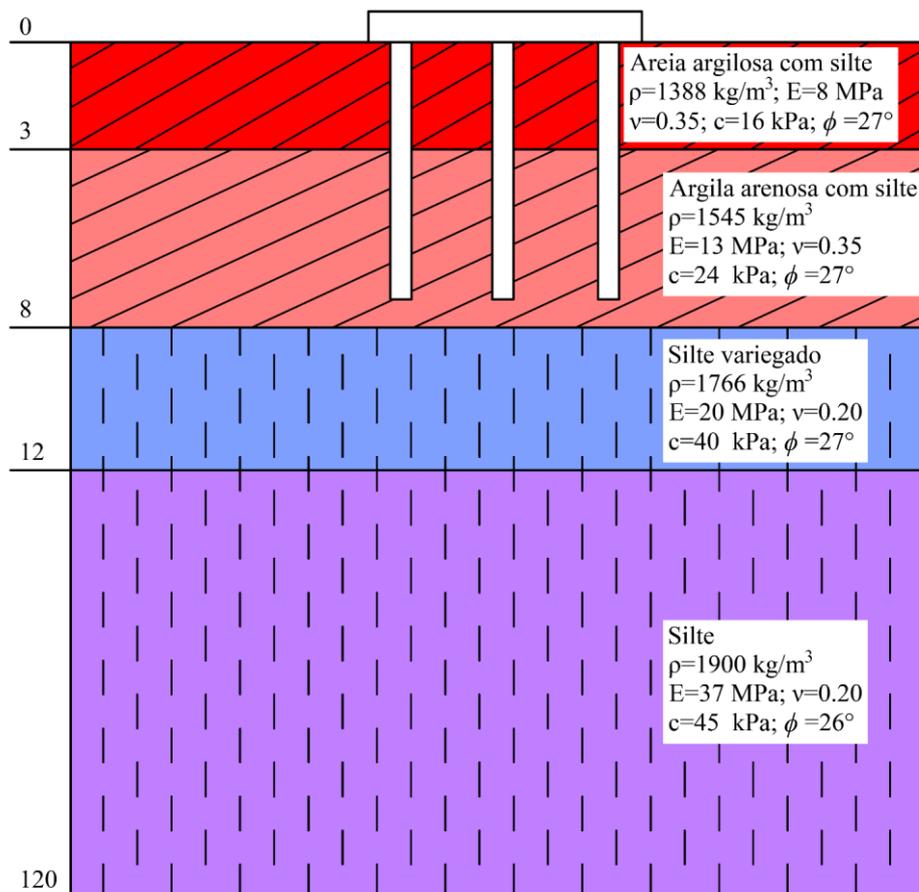


Figura 4.2. Perfil estratigráfico e parâmetros do modelo de 4 camadas

Tabela 4.1. Propriedades e parâmetros do solo, para o modelo de Elástico - Linear.

Modelo	Espessura	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Poisson
1 Camada	0-120	1900	37	0,20
4 Camadas	0-3	1388	8	0,35
	3-8	1545	13	0,35
	8-12	1766	20	0,20
	12-120	1900	37	0,20

#### 4.1.1.2 MODELO DE COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO MOHR-COULOMB

No modelo de comportamento de Mohr-Coulomb implementado no programa ABAQUS considera-se o material isotrópico com comportamento linear-elástico até a superfície de plastificação, onde começam deformações plásticas não recuperáveis. Os dados usados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Propriedades e parâmetros do solo, para o modelo de Morh-Coulomb.

Modelo	Espessura	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Poisson	Coesão (kPa)	$\phi$ (°)
1 Camada	0-120	1900	37	0,20	45	26
4 Camadas	0-3	1388	8	0,35	16	27
	3-8	1545	13	0,35	24	27
	8-12	1766	20	0,20	40	27
	12-120	1900	37	0,20	45	26

#### 4.1.2 O MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO

A geometria do problema abordada neste estudo de caso, foi realizada através do programa AutoCAD e exportada para o formato “.sat”, a fim de que seja possível, a correta leitura dos elementos pelo programa ABAQUS/CAE. Para simular o comportamento de estacas rígidas, indeformável com comportamento linear-elástico como no caso de estacas e radier, considerou-se o modelo linear-elástico. Dos casos simulados, as estacas e radier foram consideradas rígidas. A Tabela 4.3 apresenta as propriedades do solo para o modelo citado.

Tabela 4.3 Propriedades e parâmetros do concreto para o modelo de Elástico – Linear.

(Castillo, 2013)

Material	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Poisson
Concreto	2500	15	0,20

### 4.1.3 MODELAGEM DA INTERFACE

Para a modelagem da interface, o programa ABAQUS permite o contato entre os elementos que compõem o sistema, considerando-se o fenômeno de interação. No problema analisado, a interface representa um dos aspectos mais importantes a ser levado em consideração para a modelagem do comportamento de estacas carregadas lateralmente.

Para a interação entre a ponta da estaca e o solo, considerou-se um contato normal (Hard Contact) e para o caso do fuste considerou-se um contato friccional (Penalty), seguindo a Lei de Coulomb, definindo um coeficiente de atrito e uma tensão máxima cisalhante no fuste. Esses parâmetros foram considerados dependendo do tipo de solo e suas propriedades.

## 4.2 PARÂMETRO QUE DEFINEM O CARREGAMENTO APLICADO

O projeto da edificação analisada do artigo de Sales *et al.* (2002) prevê um grande bloco com dimensão de 13,6x13,6m, espessura de 2,85m, para suportar uma carga permanente de  $q=237$  kPa de uma carga uniformemente distribuída sobre uma fundação quadrada, como pode ser observado na Figura 4.3.

## 4.3 PARÂMETROS QUE DEFINEM A FUNDAÇÃO

A fundação é constituída por dois elementos: o radier e as estacas (Figura 4.3). O radier pode ser definido pelas dimensões em planta com a espessura usada na dissertação. Considerando os dados do artigo de Sales *et al.* (2002) onde analisaram um radier estaqueado, para o projeto prévio de uma edificação e apresenta um radier quadrado ele é definido pelo lado  $L$ , espessura  $H$ , módulo de Young,  $E$ , e coeficiente de Poisson  $\nu$ . Enquanto as estacas são definidas pelo diâmetro  $d$ , comprimento  $l$ , módulo de Young,  $E$ , e coeficiente de Poisson  $\nu$ . Embora possam

ser construídas com outros materiais no presente estudo o radier e as estacas são construídos em concreto armado. A Tabela 4.4 apresenta as propriedades e parâmetros do concreto.

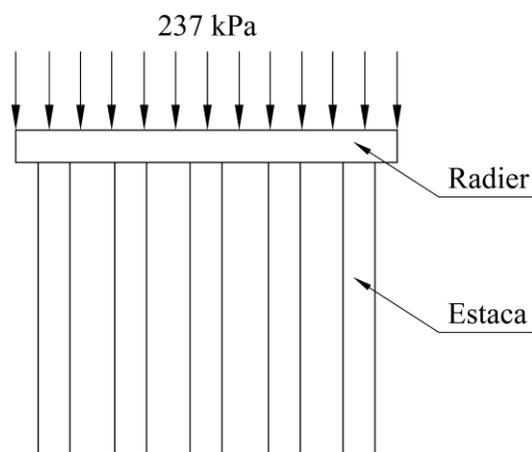


Figura 4.3. Parâmetros que definem o carregamento aplicado

Tabela 4.4. Propriedades do concreto de fundação do radier estaqueado (modificado Mota, 2013; Castillo, 2013)

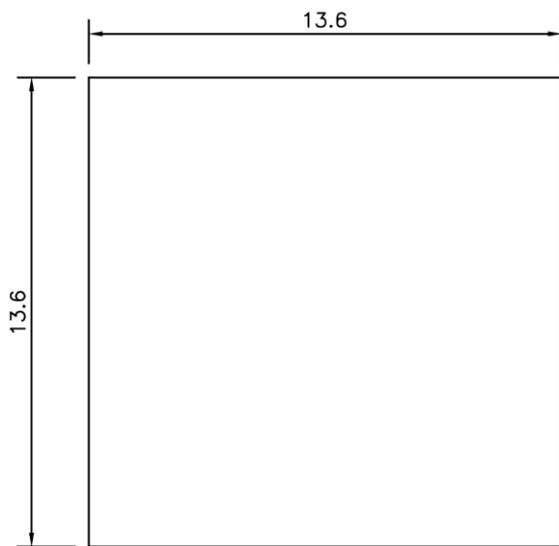
Módulo de elasticidade do concreto na estaca e radier	15 GPa
Coefficiente de Poisson do concreto	0.20
Densidade do concreto	2500 kg/m <sup>3</sup>

Para a modelagem numérica, as propriedades geométricas do radier e das estacas, estão apresentadas na Tabela 4.5.

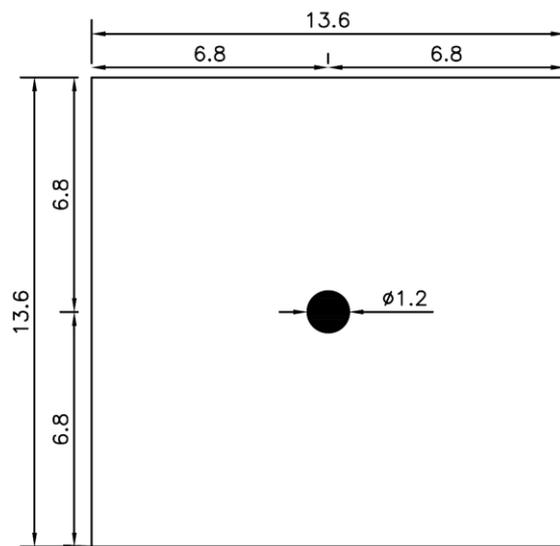
Tabela 4.5. Propriedades Geométricas da estaca e radier (Sales *et al.* 2002)

Tipo de estrutura	Propriedades Geométricas	
Estaca	Diâmetro das estacas, $d$	1.2 m
	Comprimento das estacas, $l$	13.0 m
Radier	Comprimento do radier, $L$	13.6 m
	Largura do radier	13.6 m
	Espessura do radier, $H$	2.85 m

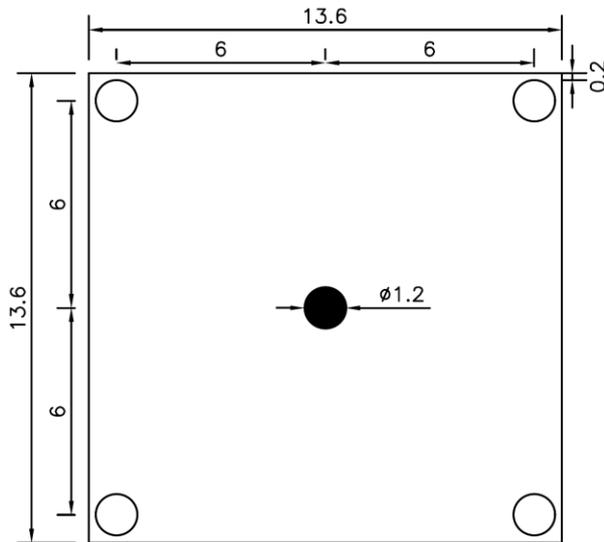
A geometria dos modelos usados nessa pesquisa apresentada em oito desenhos em planta, com a finalidade de analisar a influência da posição da estaca na capacidade de carga da mesma, no radier estaqueado (Figura 4.4).



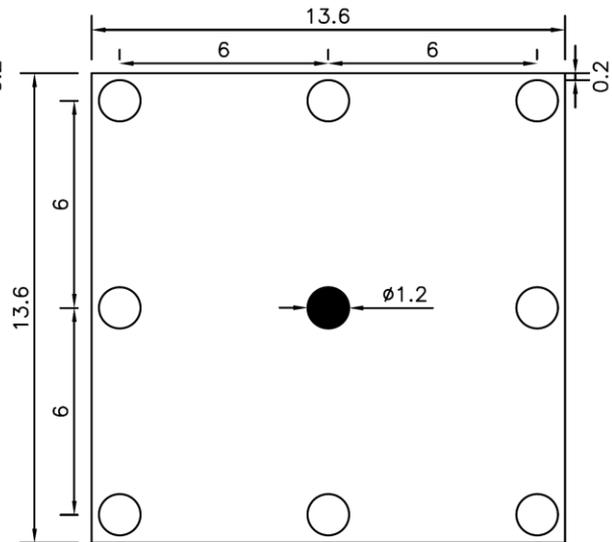
RADIER



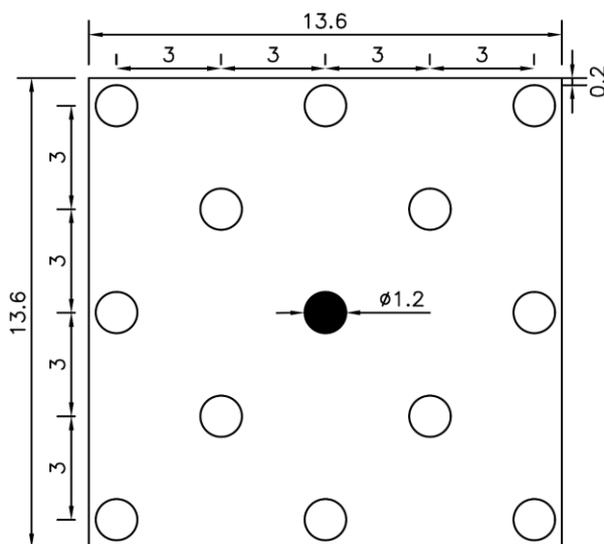
RADIER COM 1 ESTACA



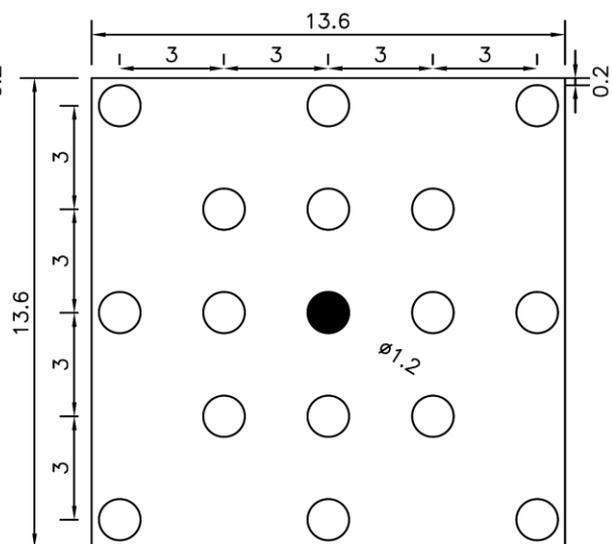
RADIER COM 5 ESTACAS



RADIER COM 9 ESTACAS



RADIER COM 13 ESTACAS



RADIER COM 17 ESTACAS

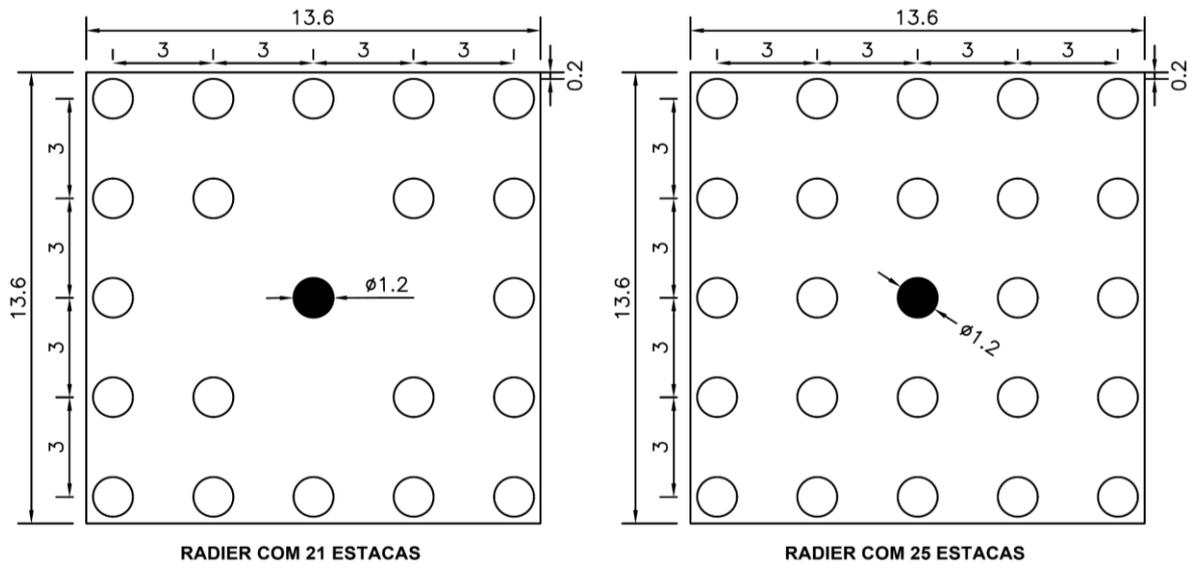


Figura 4.4. Diversas configurações para o radier estaqueado.

#### 4.4 PROCESSO DE SIMULAÇÃO OU PASSOS DA ANALISE

Para as análises foram realizadas o passo Geostático (Geostatic), onde é considerado o estado inicial de tensões no solo. Esta análise é executada a fim de assegurar o equilíbrio para as cargas gravitacionais. Na primeira etapa consegue-se o ajuste do solo ao radier estaqueado e a transferência de tensões de um ao outro, de modo a assegurar que as tensões verticais sejam iguais a uma mesma profundidade para iniciar a segunda etapa de carga, como mostra a Figura 4.5. O estado de tensões iniciais é importante no comportamento subsequente, uma vez que aumenta a rigidez no início do passo correspondente aos carregamentos, de acordo com os resultados do presente estudo.

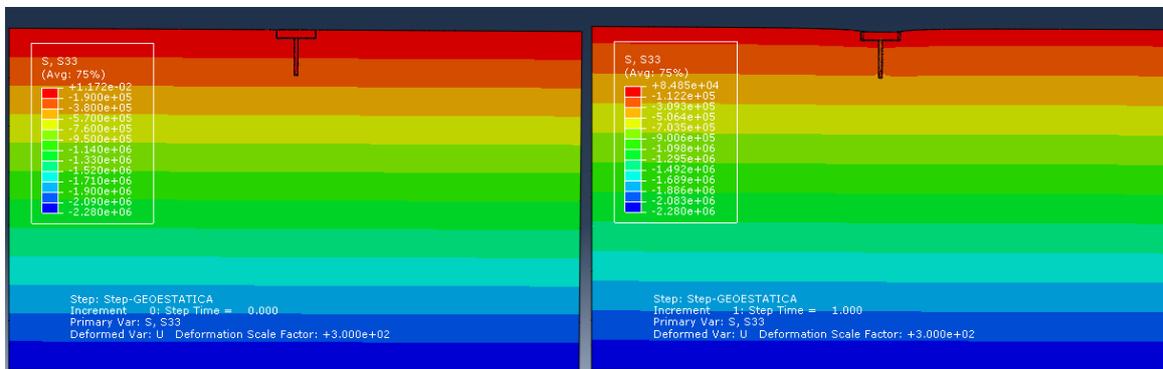


Figura 4.5. Estado de tensões horizontais a) Início do passo Geostático b) Final do passo Geostático.

## 4.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O objetivo das análises para a concepção e calibração do processo de modelagem numérica, assim como as formas e dimensões do domínio e densidade da malha é de reproduzir o comportamento do radier estaqueado com o solo. É por isso que a geometria, as condições de bordas e as propriedades dos materiais consideradas para a calibração dos modelos são relevantes.

Os critérios para levar em consideração a calibração numérica do modelo foram realizados inicialmente três análises. Na primeira definição de dimensões, estudou-se o tamanho mínimo do modelo para minimizar os efeitos de proximidade das bordas. Na segunda análise do tipo de elemento finito, foram estudadas diferentes topologias dos elementos finitos. Na terceira e última análise de densidade da malha, foram estudados diversos tamanhos dos elementos finitos.

Para o estudo utilizou-se o programa com base no método dos elementos finitos ABAQUS (SIMULIA, 2016). Considerou-se o comportamento do solo, da estaca e a interação solo-estaca para descrever o comportamento do sistema.

Os critérios considerados em cada análise foram aqueles para os quais, se obtiveram as melhores respostas com o menor custo computacional, ou seja, a quantidade de nós por elemento, o tempo de processamento, entre outros, sempre tendo como referência o modelo da malha mais densa que se conseguiu analisar.

### 4.5.1 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO MODELO

As análises das dimensões do modelo permitem obter o menor tamanho do modelo a considerar, minimizando o custo computacional.

Para efetuar as análises foram definidos um tamanho para o domínio do solo em relação a horizontal (250mx200m) e a vertical (200mx200m).

Para análise horizontal, a dimensão sugerida foi verificada em relação ao deslocamento, que é praticamente zero nas fronteiras do problema, como mostrado na Figura 4.6.

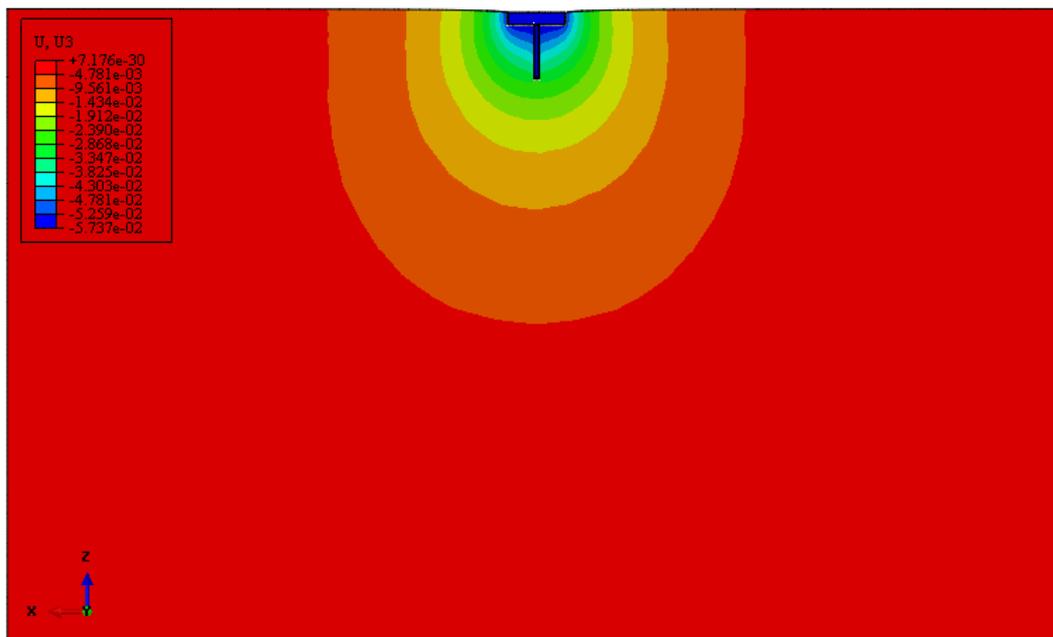


Figura 4.6. Vista transversal do radier estaqueado para o cálculo dos deslocamentos na horizontal.

Para análise vertical, a dimensão sugerida foi verificada em relação ao recalque vertical, que é praticamente zero nas fronteiras do problema, como mostrado na Figura 4.7.

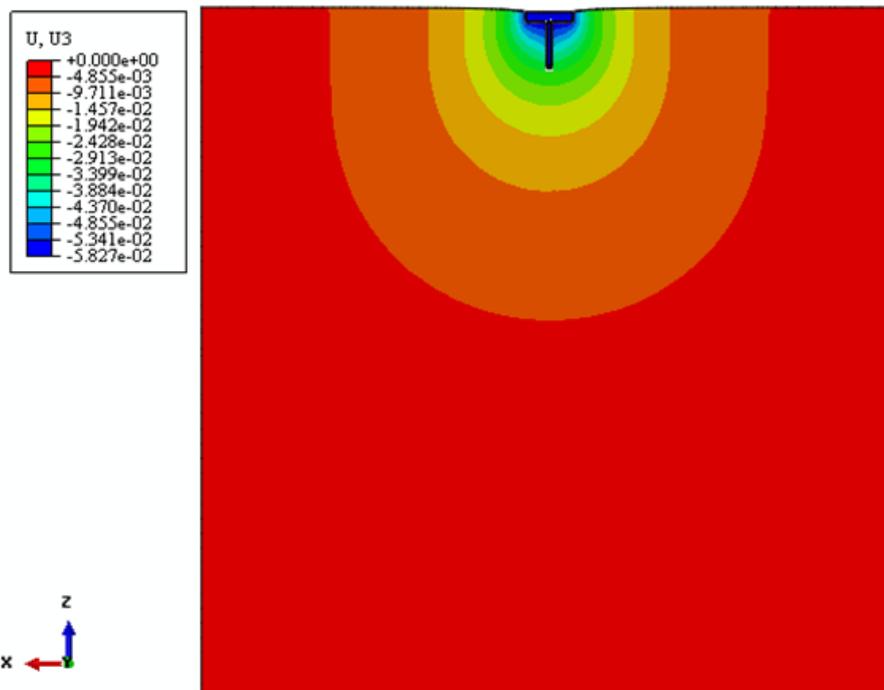


Figura 4.7. Vista transversal do recalque vertical.

## RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS DIMENSÕES DO MODELO

Para análise horizontal, como apresentado na Figura 4.8, o deslocamento é quase zero nas bordas, considerando os limites do estudo do modelo. Para o análise vertical na Figura 4.9 mostras que o recalque na profundidade de 120 m e desprezível.

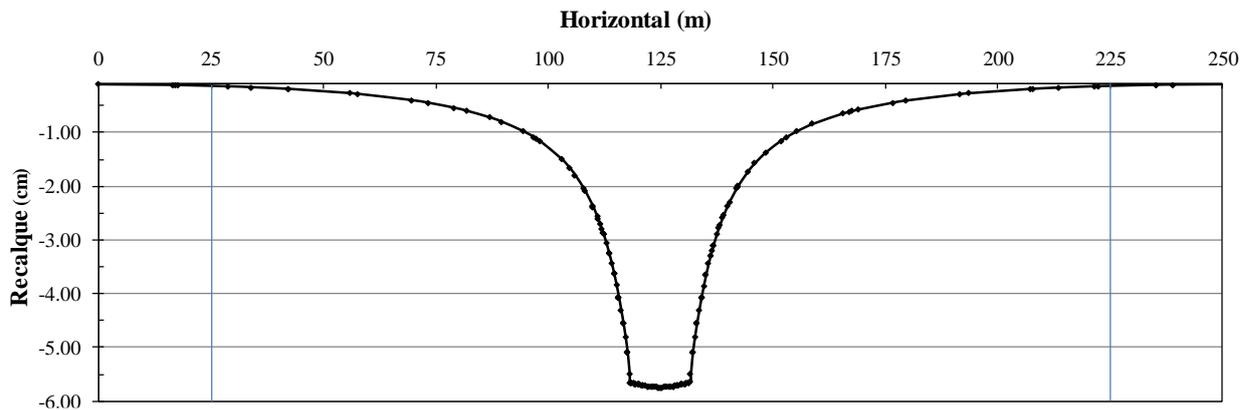


Figura 4.8. Deslocamentos horizontais a partir das fronteiras do modelo

Então as dimensões do modelo apresentam uma boa margem para o estudo, considerando no final, o horizontal (200 m) e o vertical (120 m). Reforça a validade do limite de profundidade vertical o fato de que o extrato rochoso, pouco deformável quase sempre se encontra em profundidades bem mais superficiais.

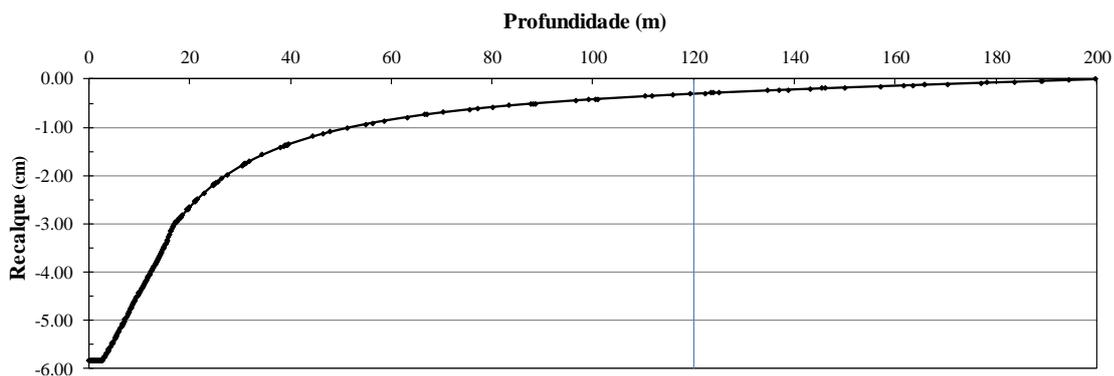


Figura 4.9. Recalques a partir do meio do radier estaqueado até a fronteira do modelo -  
Fronteira vertical.

#### 4.5.2 ANÁLISE DA FORMA DO DOMÍNIO

Logo após obter as dimensões do modelo paralelepípedo 200 x 200 x 120m, foram feitas as análises da forma. Na modelagem foi efetuada a análise da simetria do modelo e foi obtida a análise da quarta parte do modelo, que reflete o estudo de todo o modelo inicial. Os modelos estudados estão apresentados na Figura 4.10.

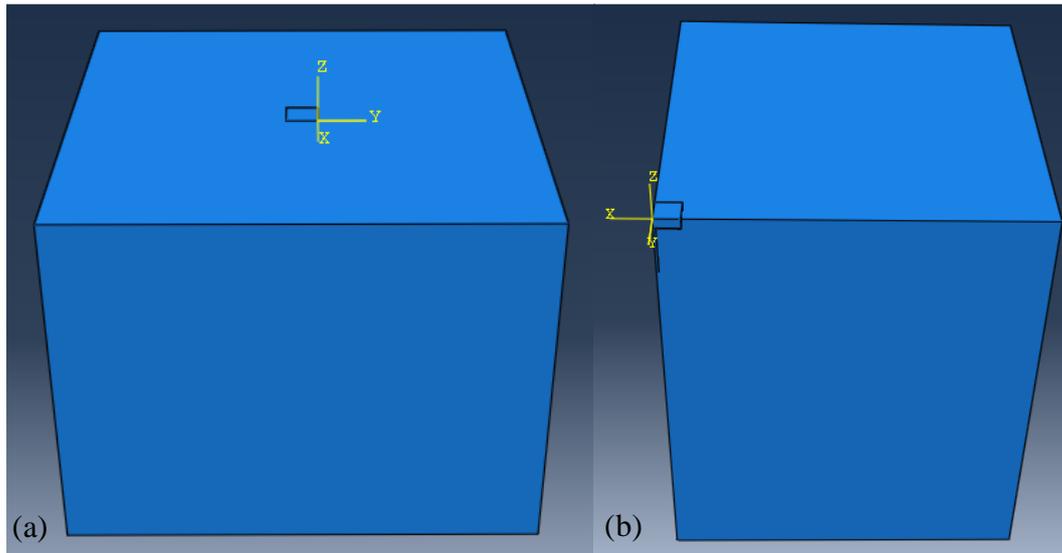


Figura 4.10. Geometria considerada no estudo da forma (a) total, (b) quarta parte do domínio.

Trabalhos semelhantes considerando um domínio cúbico foram encontrados em: Brown & Shie (1990), Martin & Chen (2005), Karthigeyan *et al.* (2006), Tuladhar *et al.* (2008), Bourgeois *et al.* (2010), Voottipruex *et al.* (2011), Giannakos *et al.* (2012).

#### RESULTADOS DAS ANÁLISES DA FORMA DO DOMÍNIO

Para avaliação da forma do domínio, foi efetuada a análise das formas total onde se encontra o deslocamento máximo no valor de 5.59 cm como está apresentado na Figura 4.11 e para o deslocamento máximo no domínio da quarta parte tem-se o valor de 5.58 cm como apresentado na Figura 4.12. A diferença dos valores é considerada muito pequena, o que indica a convergência. E assim justifica-se o uso do domínio só na quarta parte do modelo.

É importante ressaltar que a utilização do artifício do plano de simetria diminui o número de elementos finitos para a quarta parte, reduzindo assim o custo computacional.

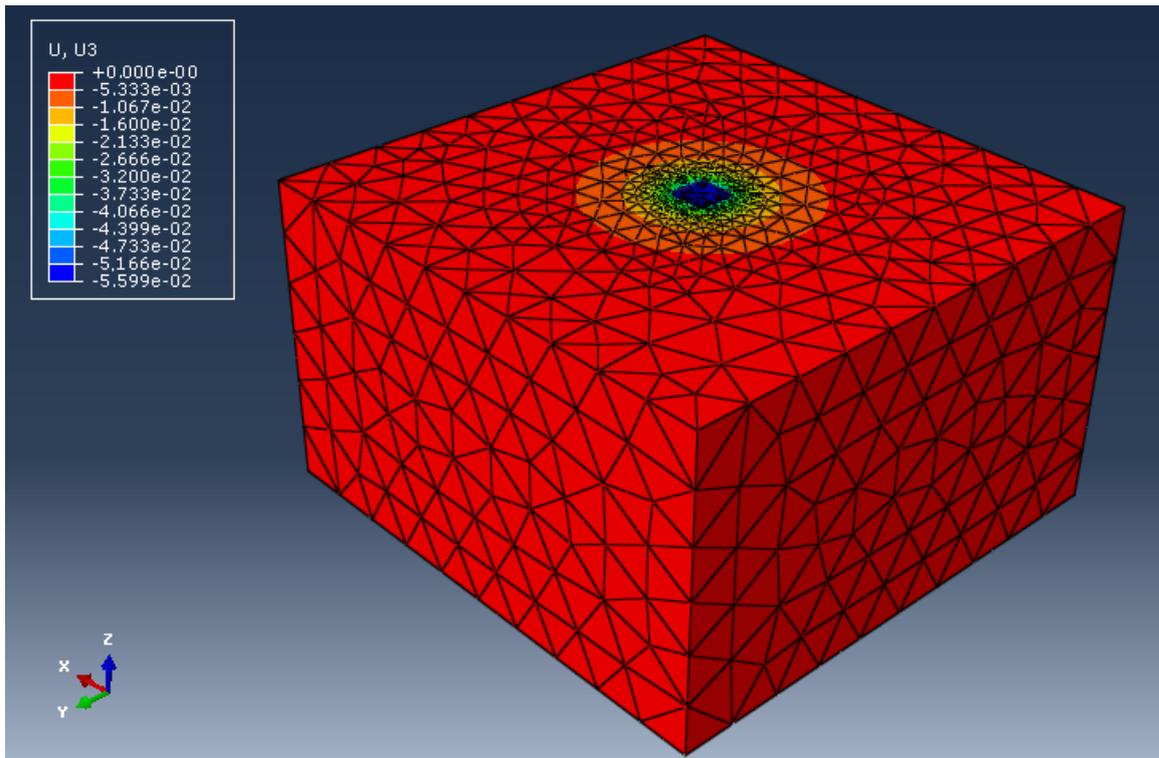


Figura 4.11. Geometria da forma total

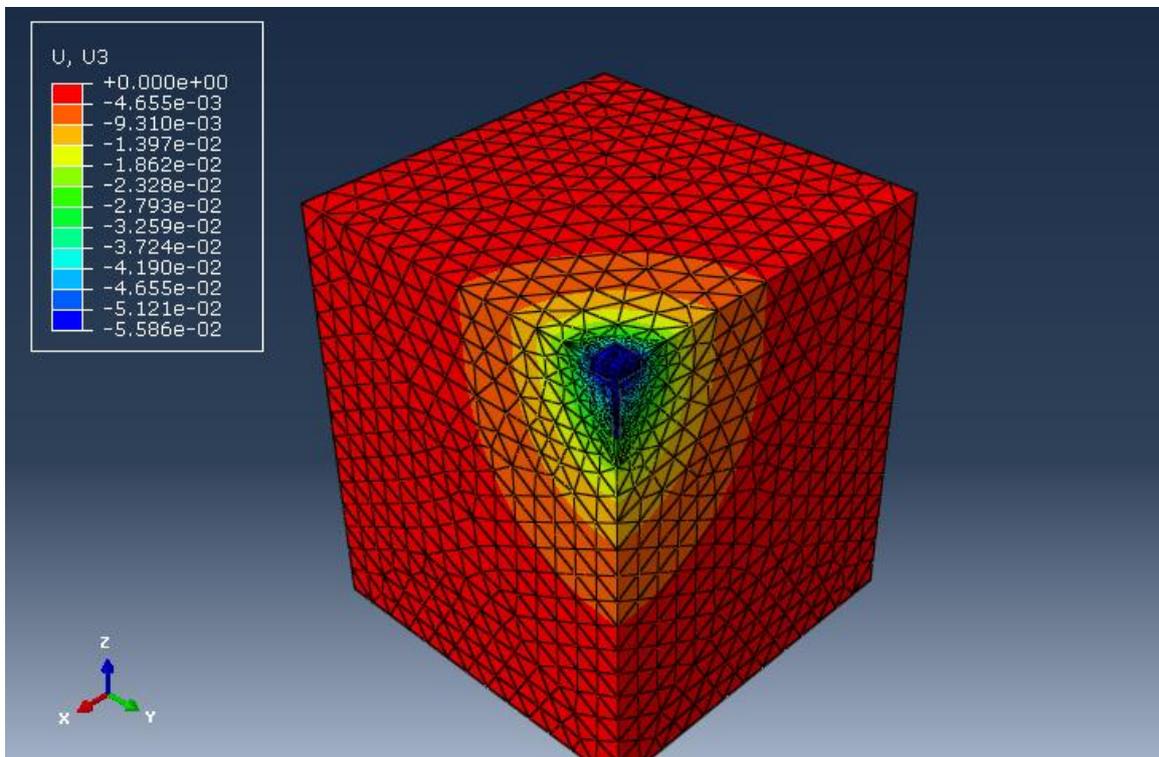


Figura 4.12. Geometria da forma quarta parte.

### 4.5.3 ANÁLISES DE DENSIDADE DE MALHA

Uma vez concluídas as análises de forma e dimensões do modelo, foram analisados diferentes tamanhos para os elementos, definindo a densidade da malha ideal para ser usada na modelagem. Foram avaliadas malhas de diferentes tamanhos para o elemento, como mostrado na Figuras 4.13 a 4.18.

A simulação foi feita considerando um caso hipotético de um radier estaqueado com 5 estacas, trabalhando com a quarta parte (como definido anteriormente), em um maciço homogêneo com parâmetros elásticos e condições típicas encontradas em escavações profundas, com módulo de elasticidade igual a 37000 kPa e coeficiente de Poisson igual a 0.2. Além disso, foram consideradas tensões verticais de 237403 Pa. A malha utilizada foi feita empregando elementos tetraédricos.

Para o estudo de densidade da malha são testadas cinco densidades de malha (M1 até M6) e os tamanhos médios dos elementos do modelo de cada uma delas são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Tamanho dos elementos adotados nas cinco malhas

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Radier</b>	1	0.9	0.8	0.4	0.3	0.25
<b>Estacas</b>	1	0.9	0.8	0.4	0.3	0.25
<b>Solo</b>	30	20	15	7.5	5	2.50
<b>Número de elementos</b>	14690	17625	21990	81375	196330	580038

A figura 3.13 a 3.18 mostram todas as malhas, primeiro com uma vista geral (a) que evidenciam os elementos maiores, depois com uma aproximação da região do radier estaqueado (b).

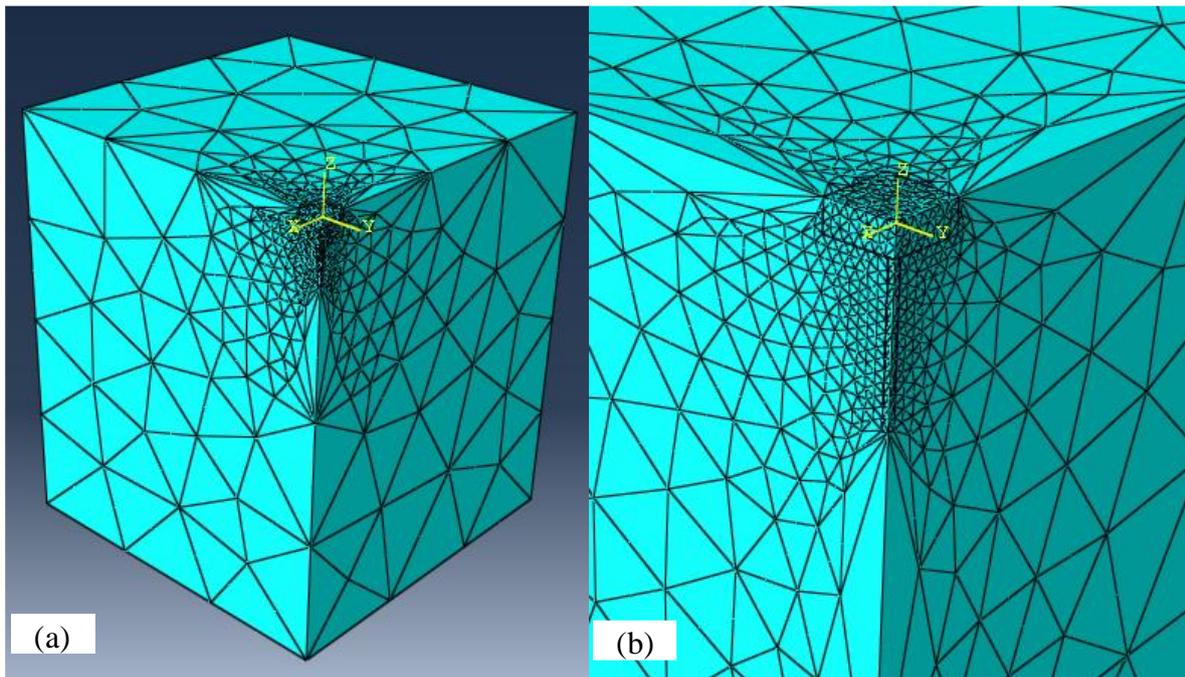


Figura 4.13. Malha M1 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

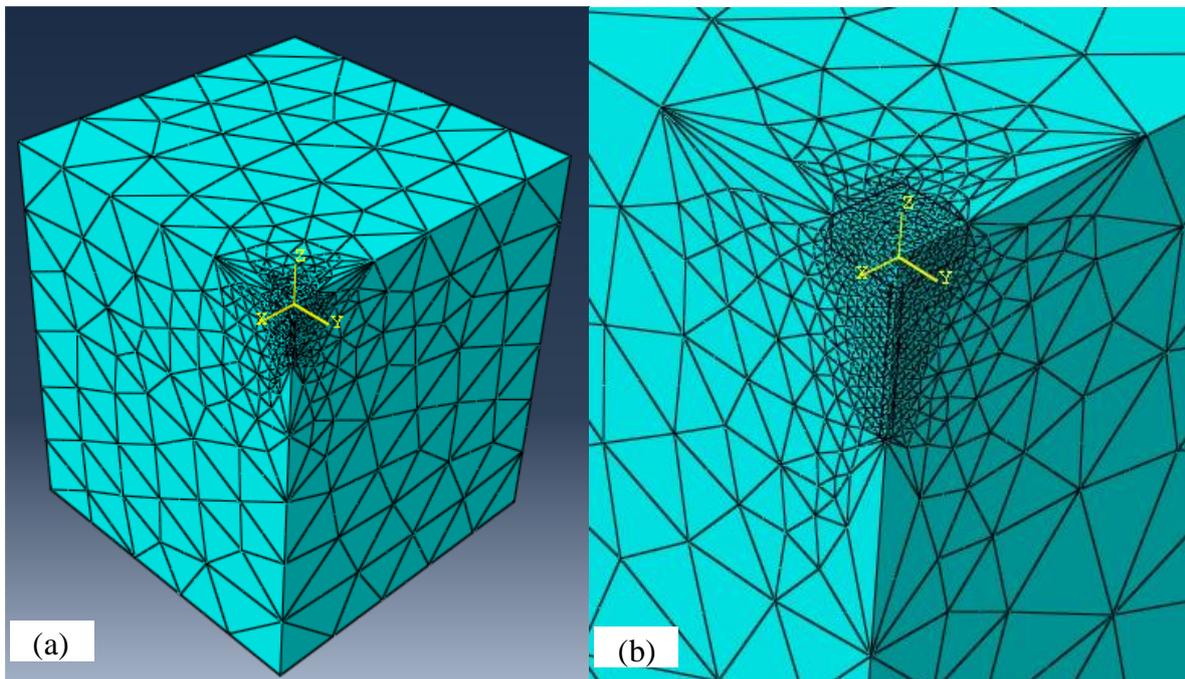


Figura 4.14. Malha M2 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

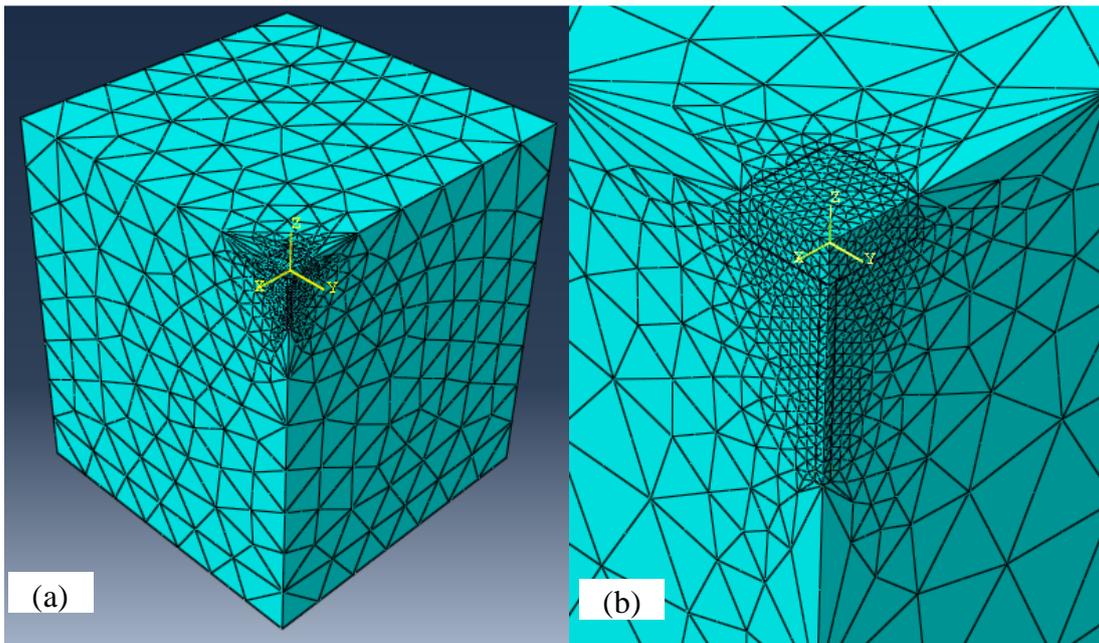


Figura 4.15. Malha M3 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

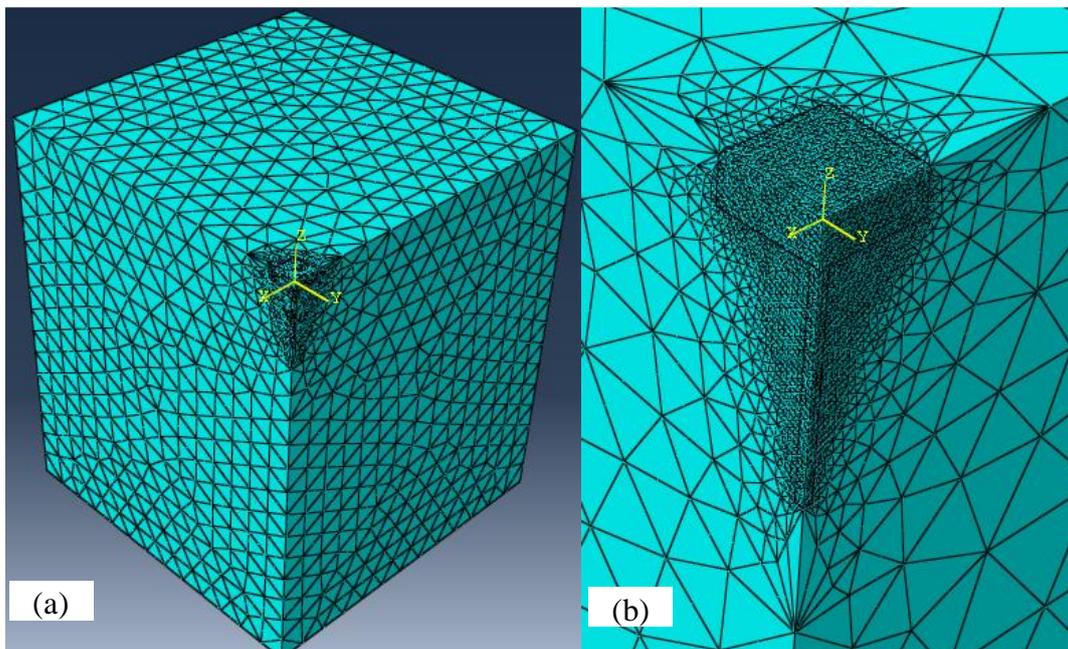


Figura 4.16. Malha M4 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

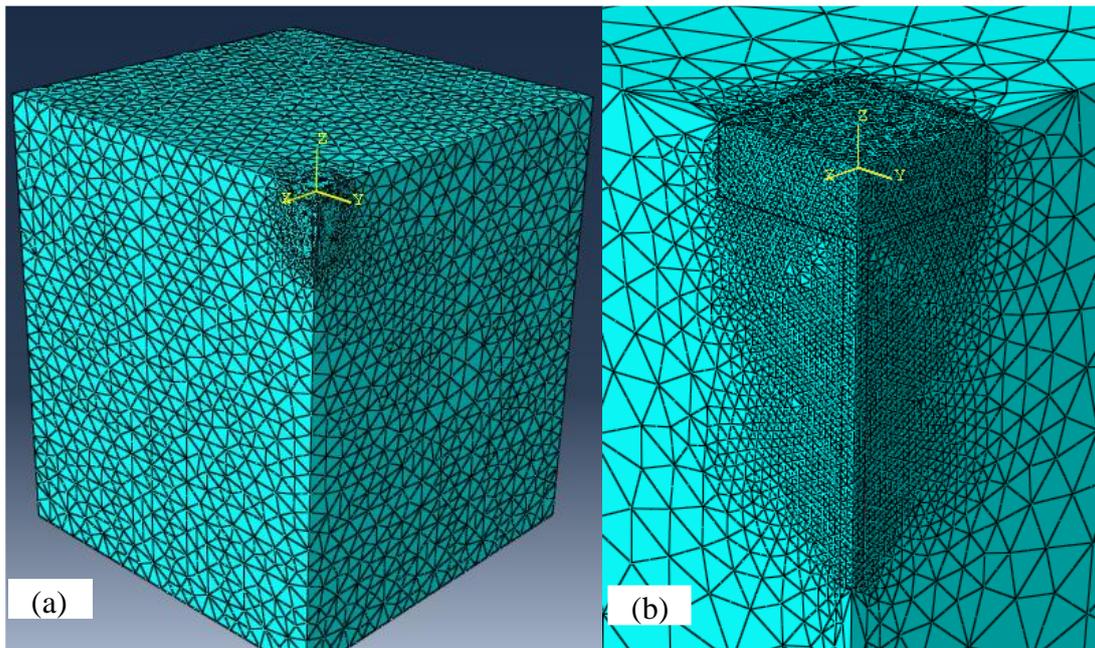


Figura 4.17. Malha M5 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

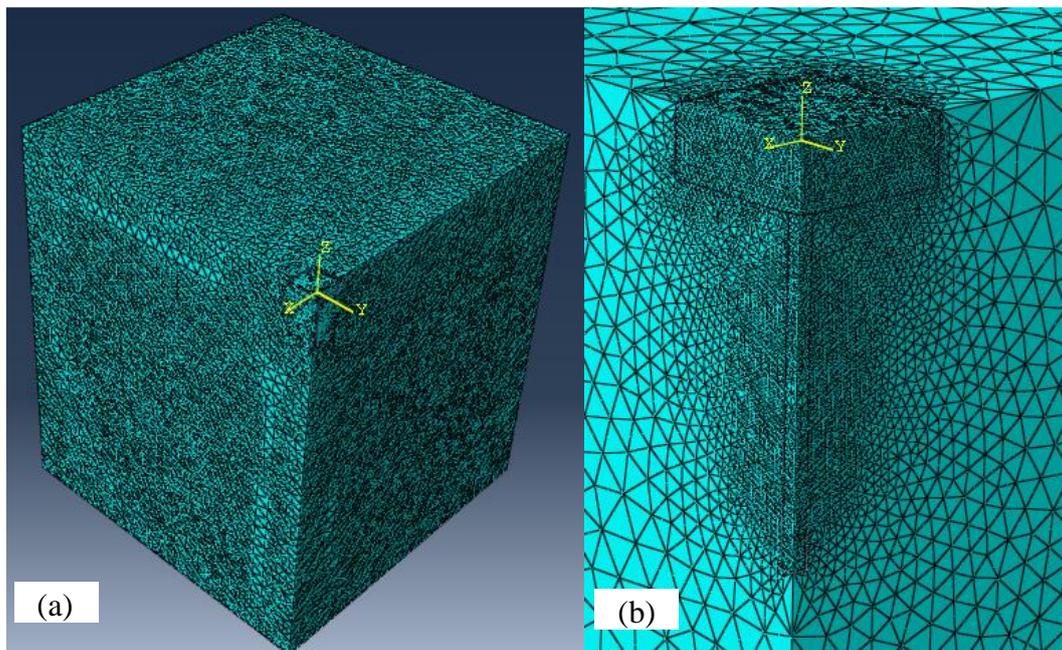


Figura 4.18. Malha M6 gerada: (a) visão geral e (b) região do radier estaqueado.

O controle do deslocamento é feito em 3 nós que possuem posição coincidente em todas as malhas definidos nas subdivisões. Foram escolhidos: um nó sobre a linha da fronteira do radier e dois nós sobre a linha vertical na fronteira da estaca solo (Figura 4.19).

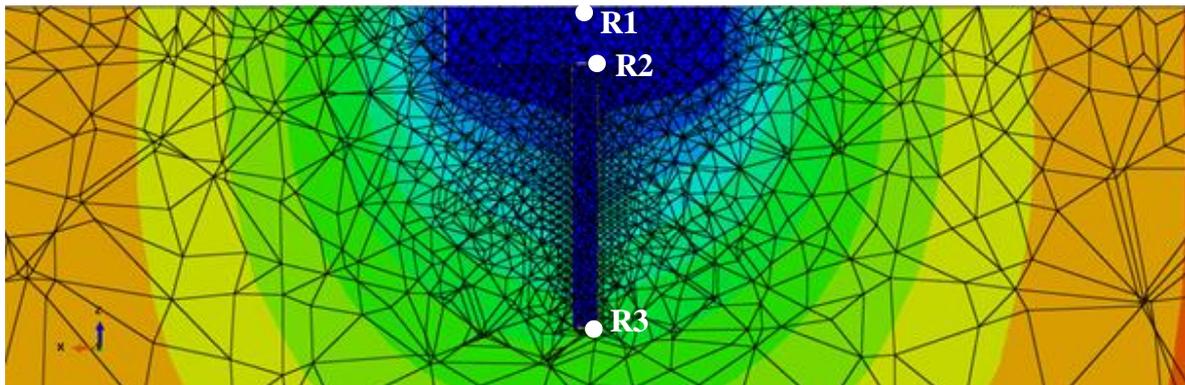


Figura 4.19. Nós para controle de deslocamento.

### RESULTADO DAS ANÁLISES DE DENSIDADE DE MALHA

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de deslocamento nos 3 nós em cada uma das seis malhas. Observa-se que as variações de deslocamentos entre as malhas M3, M4, M5 e M6 são muito pequenas, que indica a convergência. O deslocamento de um dos nós em respeito ao número de nós pode ser visualizado nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

Tabela 4.7. Deslocamentos nos Nós (m).

Malha	Deslocamento (m)		
	R1	R2	R3
M1	0,055376	0,055376	0,054497
M2	0,055756	0,055654	0,054872
M3	0,055840	0,055748	0,054963
M4	0,055855	0,0557538	0,054964
M5	0,055856	0,0557538	0,054965
M6	0,055856	0,0557539	0,0549650

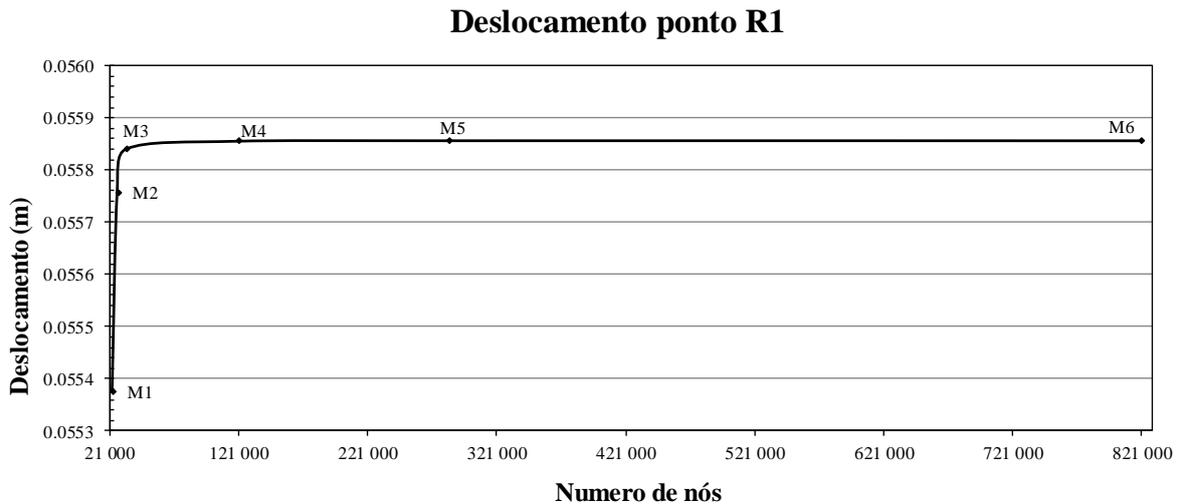


Figura 4.20. Deslocamento do nó R1 versus número de nós.

A propriedade de controle é o deslocamento, medido em 3 nós que coincidem nas seis malhas. O resultado dos nós é apresentado nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22. De maneira geral, é muito pequena a diferença entre os deslocamentos da malha M3, M4, M5, M6 ou seja, a partir da densidade da malha M3, o erro pode ser considerado muito pequeno. É importante ressaltar que é o tempo de processamento da malha M4 é mais de vinte oito vezes menor que o da malha M6 (processador de sete núcleos reais e frequência de 4.71 GHz), comportamento que reforça a escolha da malha M4 como a ideal para este modelo. A Tabela 4.8 e a Figura 4.23 mostram os tempos de processamento.

Tabela 4.8. Tempo de processamento para as malhas analisadas

Malha	Número de nós	Número de Elementos	Tempo de cálculo (s)
M1	23032	14690	129
M2	26959	17265	146
M3	34028	21990	227
M4	120919	81375	1507
M5	283863	196330	7863
M6	820579	580038	43504

### Deslocamento Ponto R2

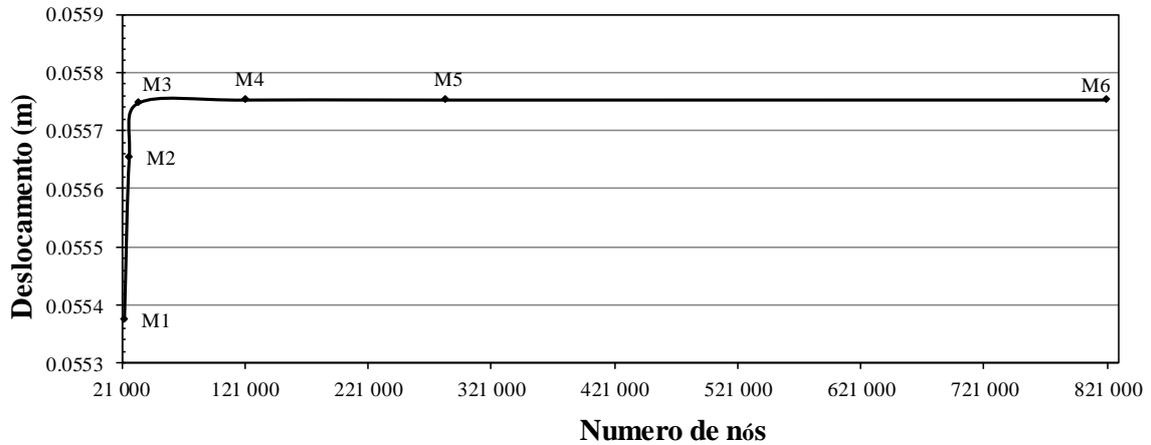


Figura 4.21. Deslocamento do nó R2 versus número de nós.

### Deslocamento Ponto R3

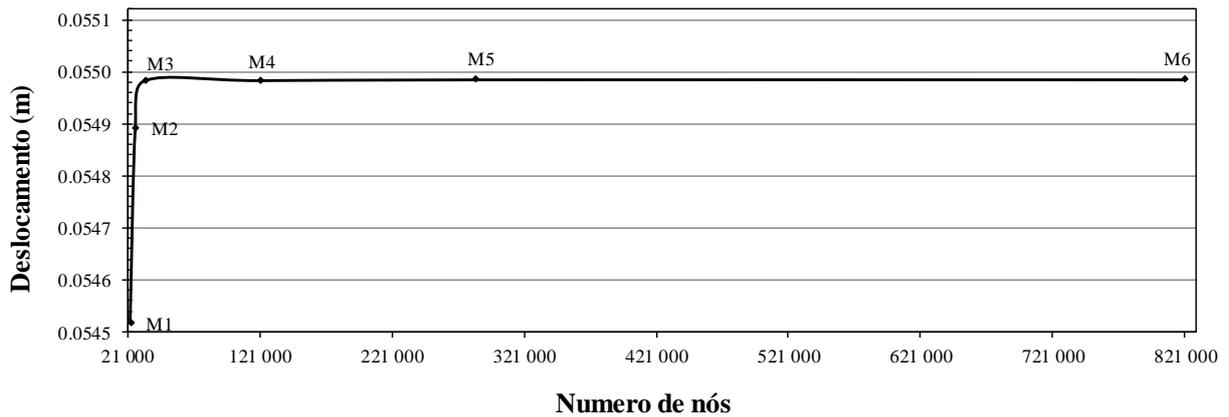


Figura 4.22. Deslocamento do nó R3 versus número de nós.

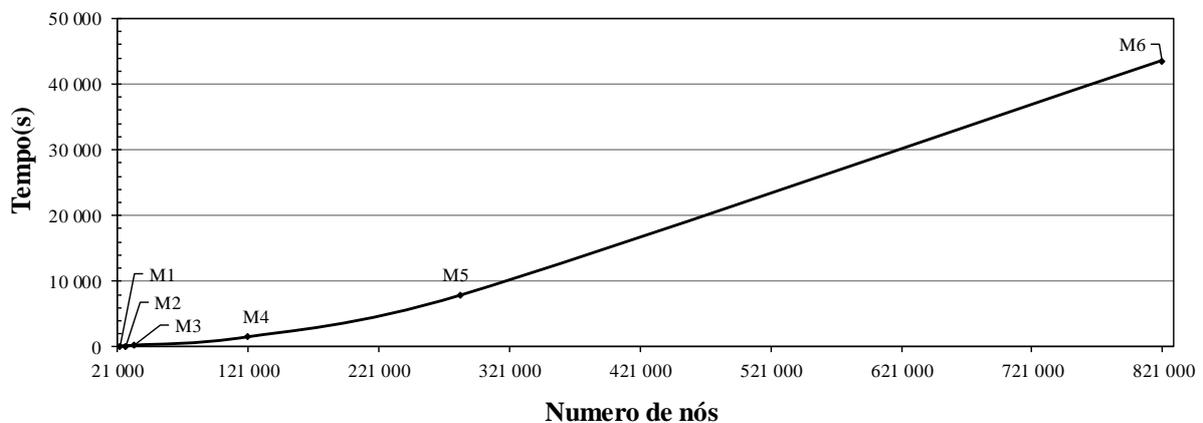


Figura 4.23. Tempos de cálculo versus número de nós para as cinco malhas.

## DISCRETIZAÇÃO DA MALHA PARA SOLO DE UMA CAMADA

### MODELO DO RADIER

Em alguns gráficos típicos do modelo tridimensional gerado, como por exemplo na Figura 4.24 (a), mostra-se como foi feita a modelagem do radier e do solo no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada referente ao radier e ao solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier de 0,4 m. para fazer a discretização da malha.

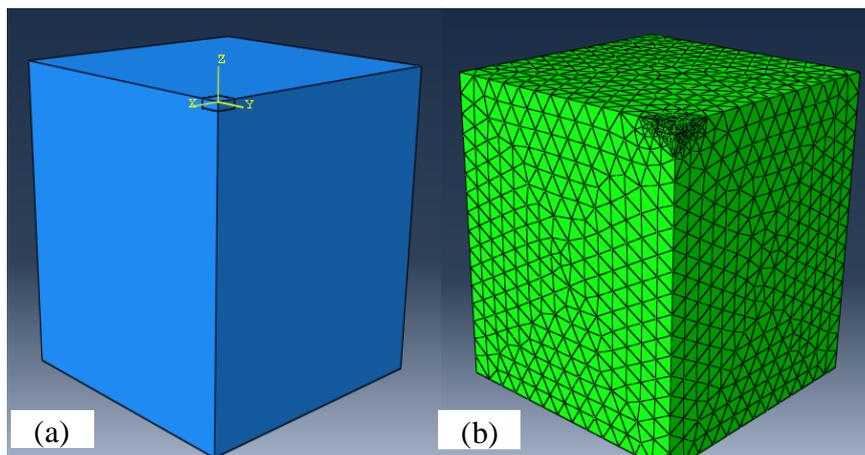


Figura 4.24. (a) Modelo em 3D do radier; (b) Malha gerada.

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE UMA ESTACA

Apresenta-se, na Figura 4.25 (a) como foi feito a modelagem do radier estaqueado com uma estaca e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com uma estaca e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica do radier estaqueado com uma estaca.

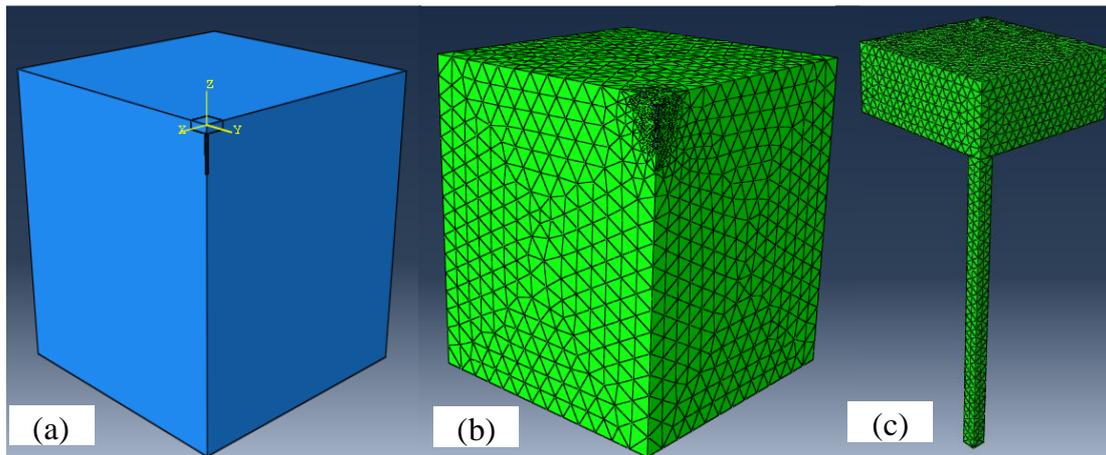


Figura 4.25. (a) Modelo em 3D para 1 estaca; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE CINCO ESTACAS

Apresenta-se na Figura 4.26 (a) como foi feita a modelagem do radier estaqueado de cinco estacas e o solo modelado no programa ABAQUS, (b) vista da malha gerada para o radier estaqueado com cinco estacas e solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com cinco estacas.

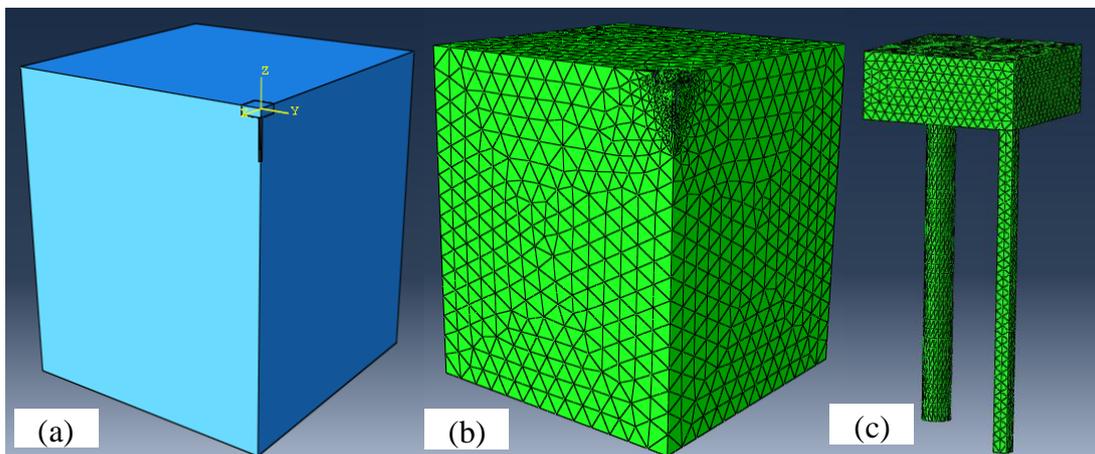


Figura 4.26. (a) Modelo em 3D para 5 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO POR NOVE ESTACAS

É apresentado na Figura 4.27 (a) a modelagem do radier estaqueado de nove estacas e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado

com 9 estacas e o solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com nove estacas.

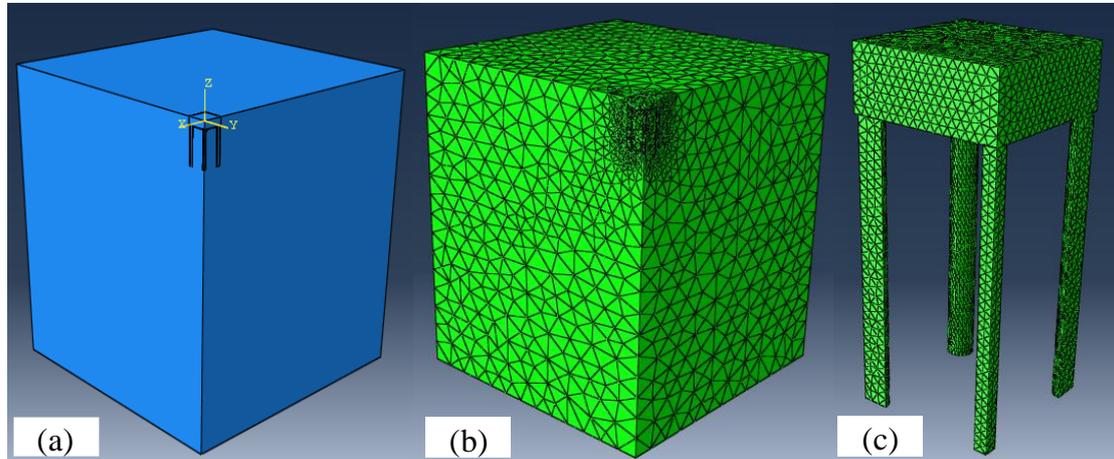


Figura 4.27. (a) Modelo em 3D para 9 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

#### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE TREZE ESTACAS

Já a Figura 4.28 (a) mostra como foi feita a modelagem do radier estaqueado de treze estacas e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com treze estacas e o solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com treze estacas.

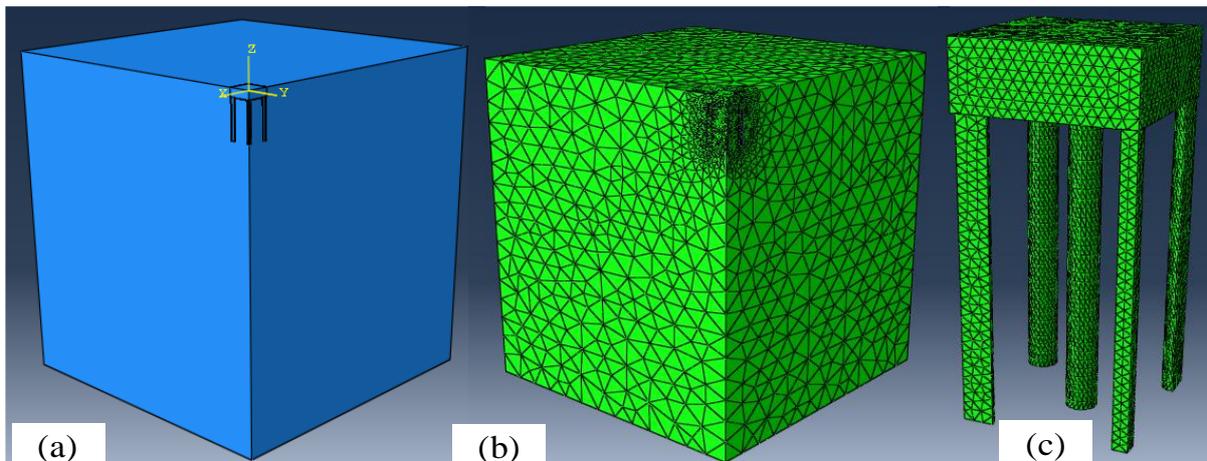


Figura 4.28. (a) Modelo em 3D para 13 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE DEZESSETE ESTACAS

Na Figura 4.29 (a) apresenta-se a modelagem do radier estaqueado de dezessete estacas e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com dezessete estacas e o solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com dezessete estacas.

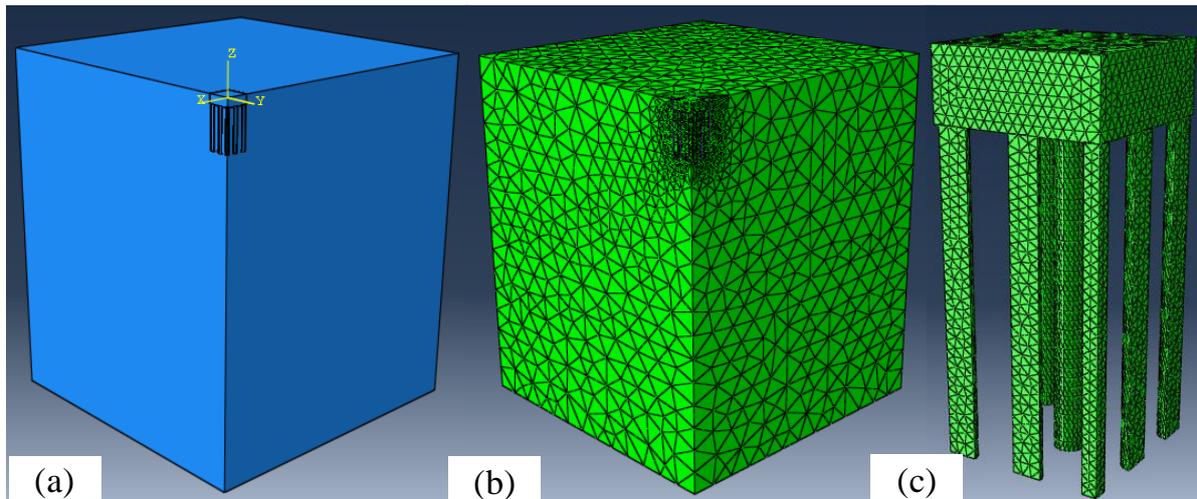


Figura 4.29. (a) Modelo em 3D para 17 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE VINTE E UMA ESTACAS

A Figura 4.30 (a) apresenta como foi feita a modelagem do radier estaqueado de vinte e uma estacas e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com vinte e uma estacas e o solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com vinte e uma estaca.

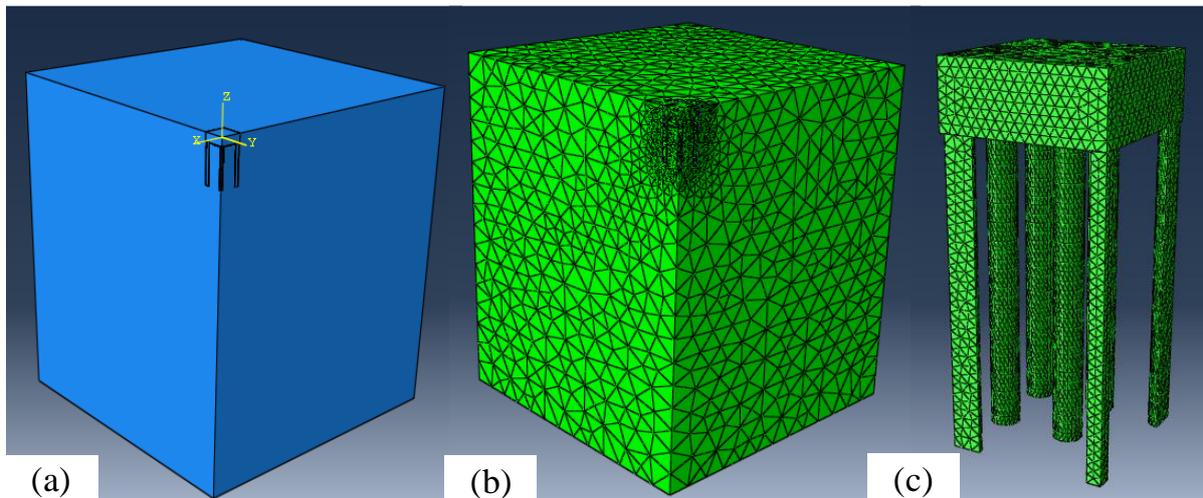


Figura 4.30. (a) Modelo em 3D para 21 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

#### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE VINTE E CINCO ESTACAS

Por fim, a Figura 4.31 (a) apresenta como foi feita a modelagem do radier estaqueado de vinte e cinco estacas e o solo modelado no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com vinte e cinco estacas e o solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com vinte e cinco estacas.

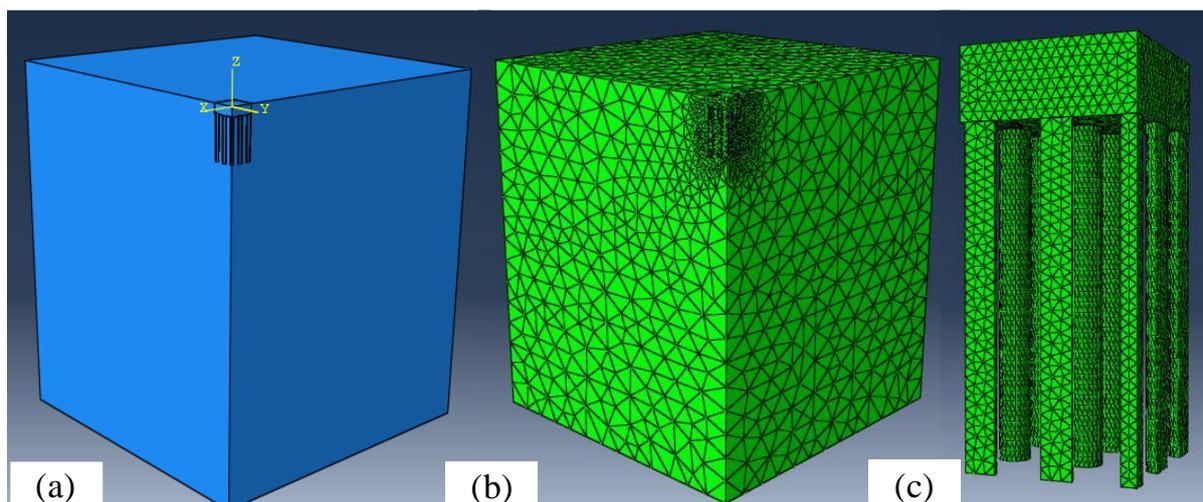


Figura 4.31. (a) Modelo em 3D para 25 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

## DISCRETIZAÇÃO DA MALHA PARA O SOLO DE VÁRIAS CAMADAS

### MODELO RADIER

A seguir são apresentados alguns gráficos típicos do modelo tridimensional. Na Figura 4.32 (a) é possível verificar como foi feita a modelagem do radier e do solo com várias camadas no programa ABAQUS e em (b) vista da malha gerada para o radier e o solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier de 0.4 m para fazer a discretização da malha.

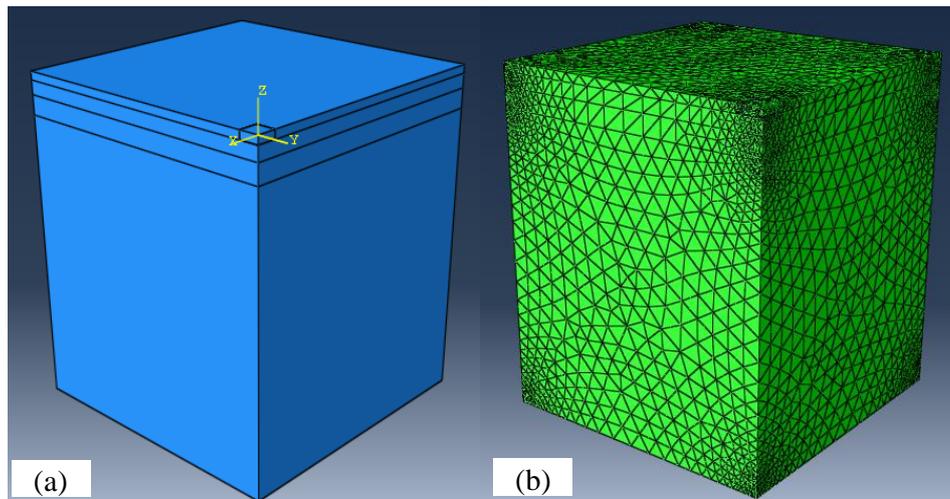


Figura 4.32. (a) Modelo em 3D radier; (b) Malha gerada.

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE 1 ESTACA

Na Figura 4.33 (a) foi feita a modelagem do radier estaqueado com 1 estaca e solo com várias camadas no programa ABAQUS e em (b) é apresentada a vista da malha gerada para o radier estaqueado com uma estaca e o solo, em que se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) é apresentada a vista isométrica do radier estaqueado com uma estaca.

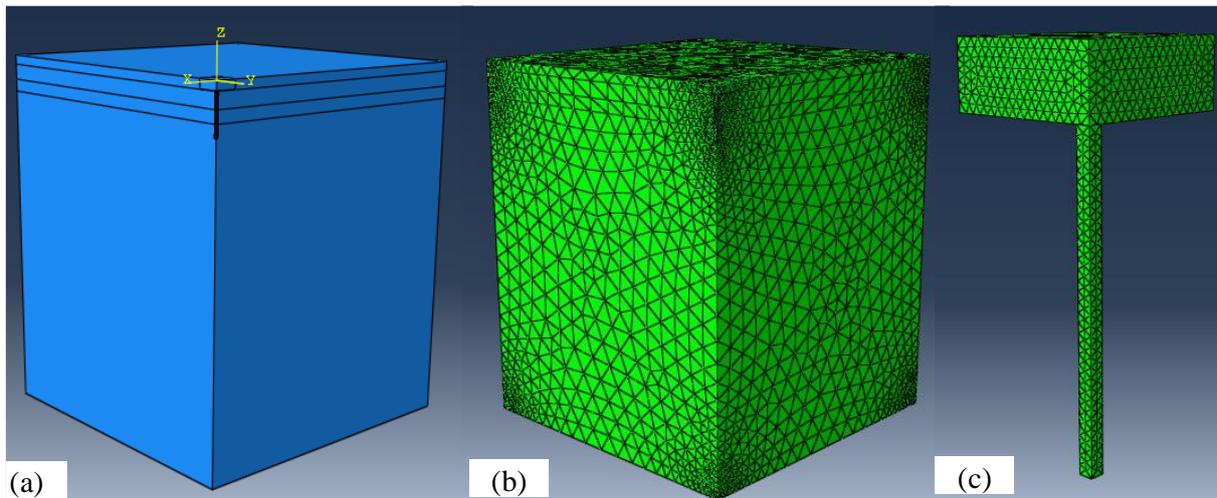


Figura 4.33. (a) Modelo em 3D para 1 estaca; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE CINCO ESTACAS

Apresenta-se, na Figura 4.34 (a) como foi feita a modelagem do radier estaqueado com cinco estacas e solo com várias camadas modelado no programa ABAQUS e (b) vista da malha gerada para o radier estaqueado com cinco estacas e solo. em que se tomaram elementos no solo de 7.5 m e no radier estaqueado de 0.4 m para fazer a discretização da malha. Em (c) apresenta-se a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com 5 estacas.

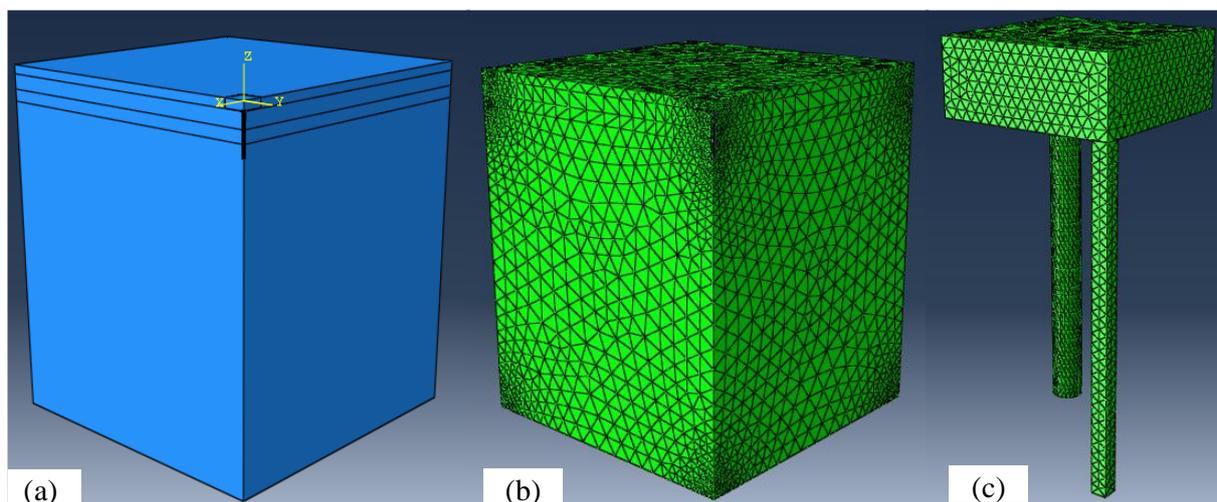


Figura 4.34. (a) Modelo em 3D para 5 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE NOVE ESTACAS

É apresentado na Figura 4.35 (a) como foi feita a modelagem do radier estaqueado com 9 estacas e solo com várias camadas no programa ABAQUS e na Figura 4.23 (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com nove estacas e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m. Na Figura 4.23 (c) é mostrada a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com nove estaca.

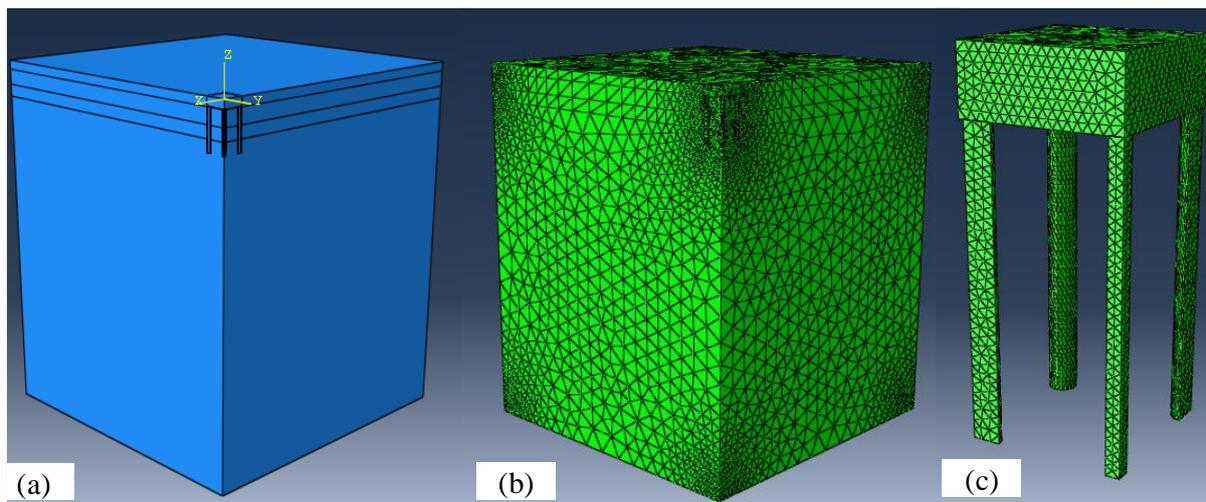


Figura 4.35. (a) Modelo em 3D para 9 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE TREZE ESTACAS

Já a Figura 4.36 (a) mostra como foi feita a modelagem do radier estaqueado com treze estacas e solo com várias camadas no programa ABAQUS e (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com treze estacas e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m. A Figura 4.24 (c) mostra a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com treze estacas.

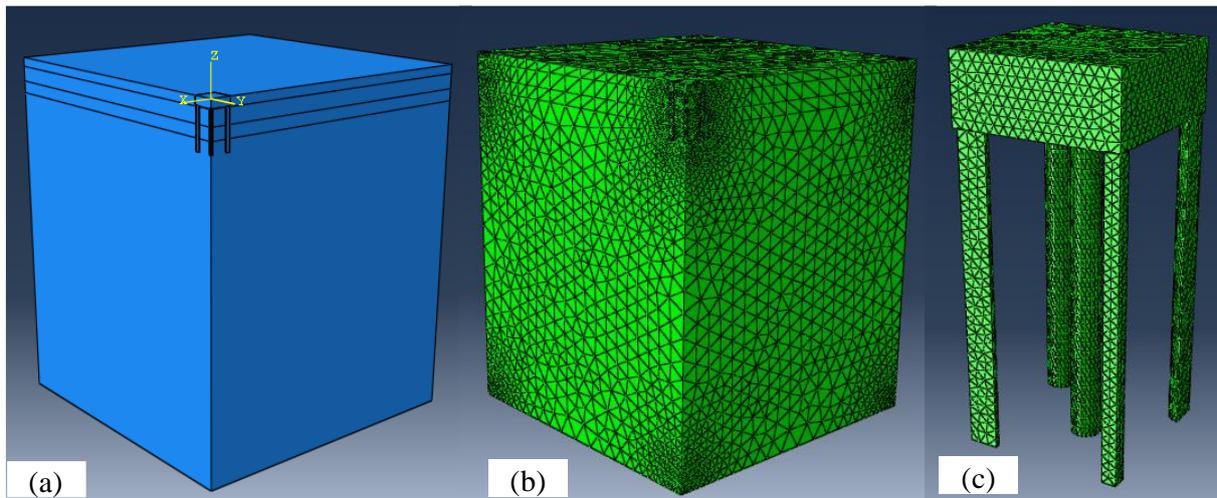


Figura 4.36. (a) Modelo em 3D para 13 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

#### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE DEZESSETE ESTACAS

Na Figura 4.37 (a) apresenta-se a modelagem do radier estaqueado com dezessete estacas e solo com várias camadas no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com dezessete estacas e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m. A Figura 4.25 (c) mostra a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com dezessete estacas.

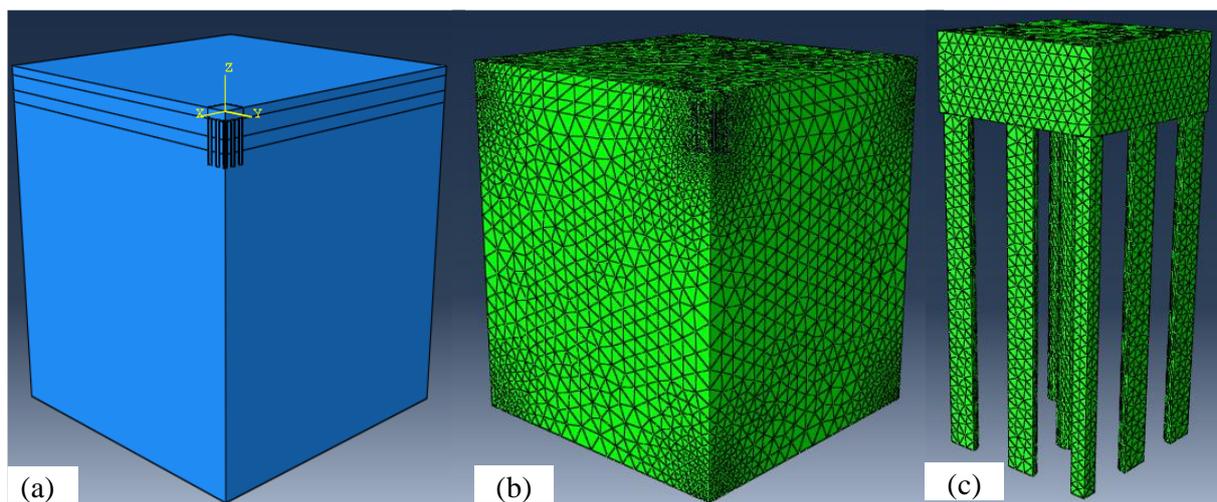


Figura 4.37. (a) Modelo em 3D para 17 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica.

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE VINTE E UMA ESTACAS

A Figura 4.38 (a) mostra como foi feita a modelagem do radier estaqueado com vinte e uma estacas e solo com várias camadas no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com vinte e uma estacas e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m. A Figura 4.26 (c) mostra a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com vinte e uma estacas.

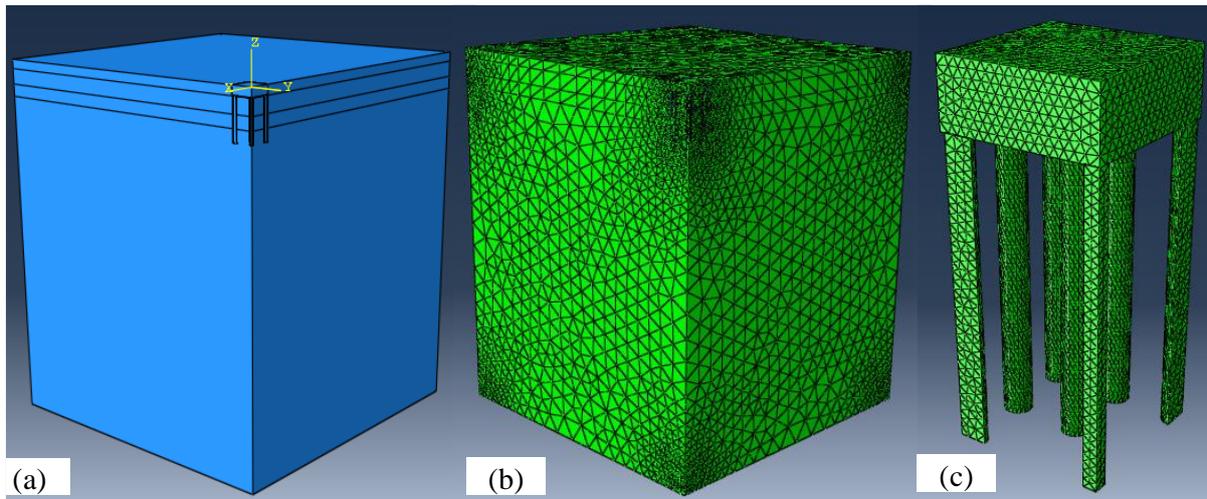


Figura 4.38. (a) Modelo em 3D para 21 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

### MODELO RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO DE VINTE E CINCO ESTACAS

Por fim, a Figura 4.39 (a) mostra como foi feita a modelagem do radier estaqueado com vinte e cinco estacas e solo com várias camadas no programa ABAQUS e em (b) a vista da malha gerada para o radier estaqueado com vinte e cinco estacas e solo, onde se tomaram elementos no solo de 7,5 m e no radier estaqueado de 0,4 m. Na Figura 4.27 (c) se tem a vista isométrica da quarta parte do radier estaqueado com vinte e cinco estacas.

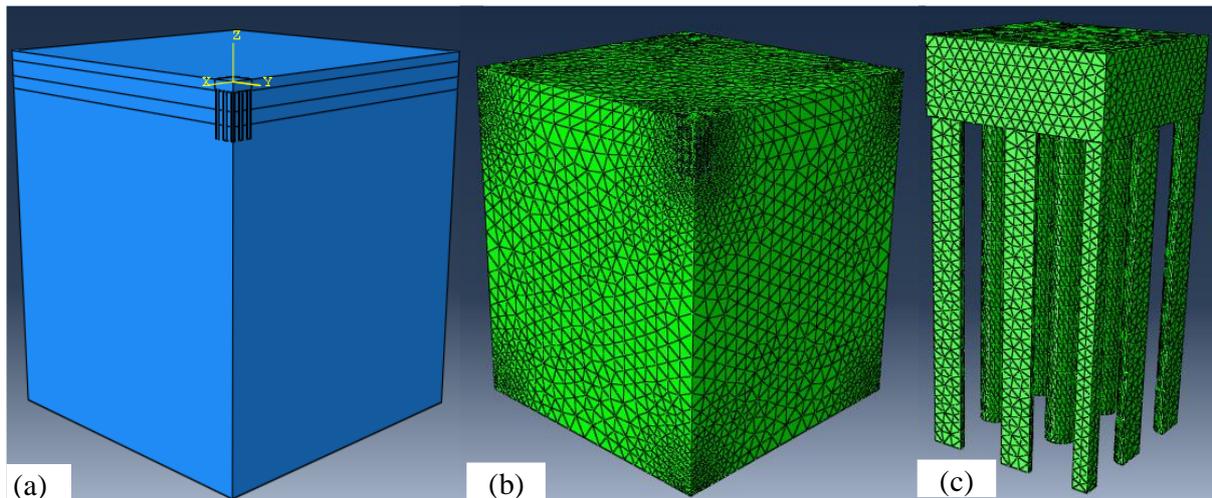


Figura 4.39. (a) Modelo em 3D para 25 estacas; (b) Malha gerada; (c) Vista isométrica

#### 4.5.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

São consideradas de modo a não permitir uma distorção do modelo, não influenciando assim no comportamento tensão- deformação do mesmo. Para o presente trabalho foram consideradas as condições que se amostram na Figura 4.40. No plano horizontal inferior se restringe todas as rotações e recalques e nos planos verticais se restringe os recalques horizontais e liberam-se os verticais.

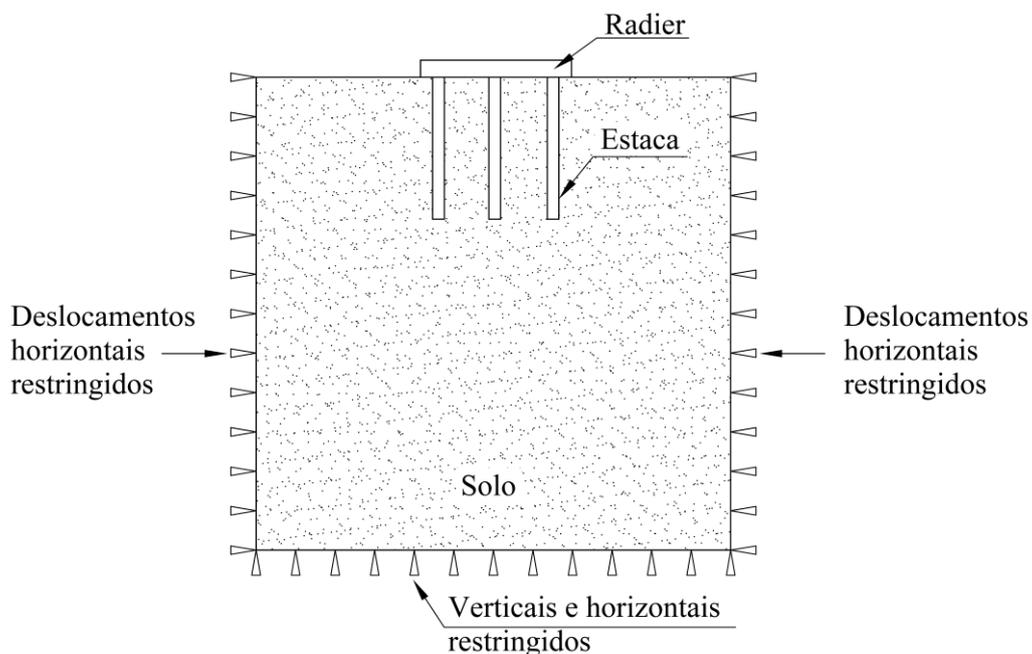


Figura 4.40. Condições de contorno para radier estaqueado (Modificado de Figueredo, 2010)

#### 4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO

Ao finalizar as análises de forma, dimensões e densidade de malha, é possível formular algumas conclusões parciais em relação ao processo de modelagem e calibração do radier estaqueado. São elas:

- Os resultados dos métodos numéricos dependem das propriedades do material e do modelo constitutivo. Logo, é muito importante que a simulação utilizada represente corretamente o problema real;
- Utilizar modelo de dimensões igual a quarta parte do paralelepípedo gera os mesmos resultados, otimizando o menor custo computacional;
- Os deslocamentos entre as malhas M3, M4, M5 e M6 são muito pequenos, o que indica a convergência e o tempo de processamento da malha M4 como sendo mais de vinte oito vezes menor que o da malha M6, por isso a escolha da malha M4 como a ideal para este modelo analisado;
- Utilizar malha variável progressiva, resultando em um menor erro, menor custo computacional e maior eficiência ao compará-la com a malha constante.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A simulação numérica de solos demonstra caráter diferenciado em relação à simulação de estruturas compostas por materiais “convencionais” como aço e concreto, pois na maioria das situações, a resposta real do solo não pode ser aproximada por leis constitutivas lineares-elásticas, uma vez que a resistência e a deformabilidade do solo são também dependentes, de variáveis plásticas, conforme apresentado nos capítulos anteriores. Neste contexto, observa-se a importância de aspectos como: a entrada criteriosa de parâmetros no software e a construção de um modelo numérico apropriado, resultando em simulações mais realistas.

Simulação de problemas de interação solo-estrutura apresentam algumas características críticas, que devem ser observadas no momento da construção do modelo em elementos finitos, conjuntamente com a escolha do modelo constitutivo e malhas apropriadas. Neste estudo, foram estabelecidos alguns aspectos de maior relevância, no que se refere a construção do modelo geomecânico, como a consideração de contato entre solo e estaca e das tensões geostáticas do solo.

No presente capítulo, apresentam-se os resultados e as análises numéricas que foram feitas usando o programa ABAQUS, versão 6.16, aos radiers estaqueados com 1, 5, 9, 13, 17, 21 e 25 estacas. Para as análises foram utilizados o modelo elástico linear e o modelo elastoplástico de Mohr- Coulomb.

Por meio da realização do modelo com o programa, obteve-se o comportamento da curva recalque máximo x número de estacas para cada modelo estudado.

Outro caso analisado foi o estudo do comportamento das tensões horizontais atuantes na massa de solo, subjacente às estacas. Também foi feita uma análise das tensões verticais para o modelo elástico linear, considerando apenas uma camada.

No comportamento das simulações, houve necessidade de se considerar o efeito da ação gravitacional na massa de solo considerada.

O software ABAQUS considera a ação da gravidade como um carregamento, o qual é aplicado em um passo (*step*) próprio, logo após a atribuição do contato. Os materiais somente são

sensíveis à ação da gravidade quando possuem uma densidade, atribuída ao solo e também à estaca, sendo consideradas como parâmetros constantes neste estudo, conforme apresentado no capítulo versando sobre o programa de simulações numéricas. Geralmente ocorre o crescimento das tensões verticais no solo com a profundidade, após a aplicação do campo gravitacional sobre uma porção de solo de base 100m x 100m e altura 120m.

## **5.2 MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO PARA UMA CAMADA**

O radier e as estacas são construídos em concreto armado com módulo de Young (E) igual 15 GPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,2. As estacas apresentam comprimento igual a 13 m e diâmetro igual a 1,20 m.

O solo foi admitido com comportamento elástico linear adotando-se Mohr-Coulomb, apresentando módulo de Young de 37 MPa e coeficiente de Poisson de 0,2, constantes em toda a camada, o que pode caracterizar um meio homogêneo estruturado, equivalente ao encontrado no solo de Brasília.

Para o processo de modelagem foi utilizado modelos de dimensões iguais a quarta parte do paralelepípedo, otimizando o menor custo computacional, como foi demonstrado no capítulo anterior.

### **5.2.1 CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA UMA CAMADA DO MODELO ELÁSTICO LINEAR**

O programa permite visualizar recalques, tensões, a forma da deformada da estrutura, etc. Na presente análise, os parâmetros de saída priorizados são os recalques máximos. O recalque em qualquer nó é facilmente determinado.

Os recalques máximos no centro do radier estaqueado, para cada arranjo de estacas, foram obtidos diretamente da saída gráfica do programa ABAQUS. O efeito do arranjo das estacas é apresentado nas Figuras 5.1 a 5.4, onde apresentam-se os recalques máximos no centro do radier, segundo sua configuração e comprimento das estacas.

Para o solo analisado na Figura 4.1 mostra o perfil estratigráfico e parâmetros do modelo de uma camada, observa-se que o valor máximo de recalque com vinte e cinco estacas é 4,61 cm e para um radier estaqueado com uma estaca é de 5,86 cm. Logo, o recalque diminui em 1,25

cm. Vale salientar que em ambos os casos foi considerando uma distribuição uniforme de tensões gerada pelo radier e distribuída igualmente entre as estacas.

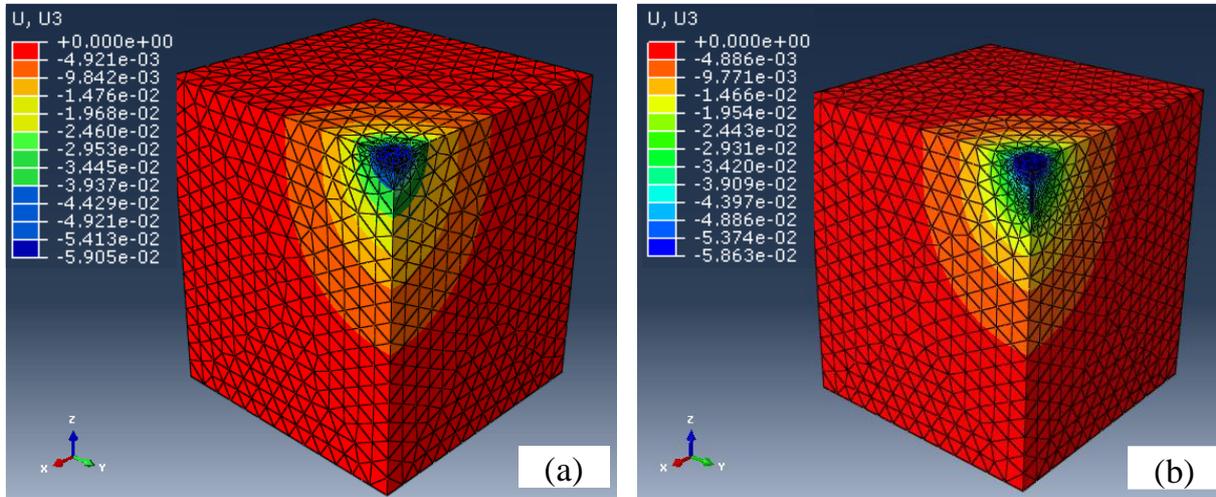


Figura 5.1. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca.

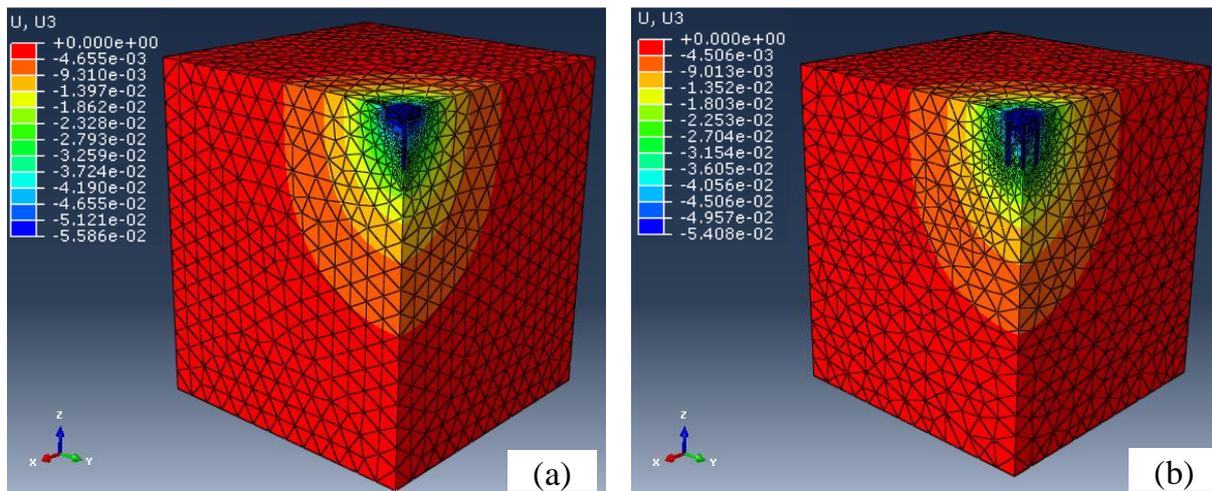


Figura 5.2. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.

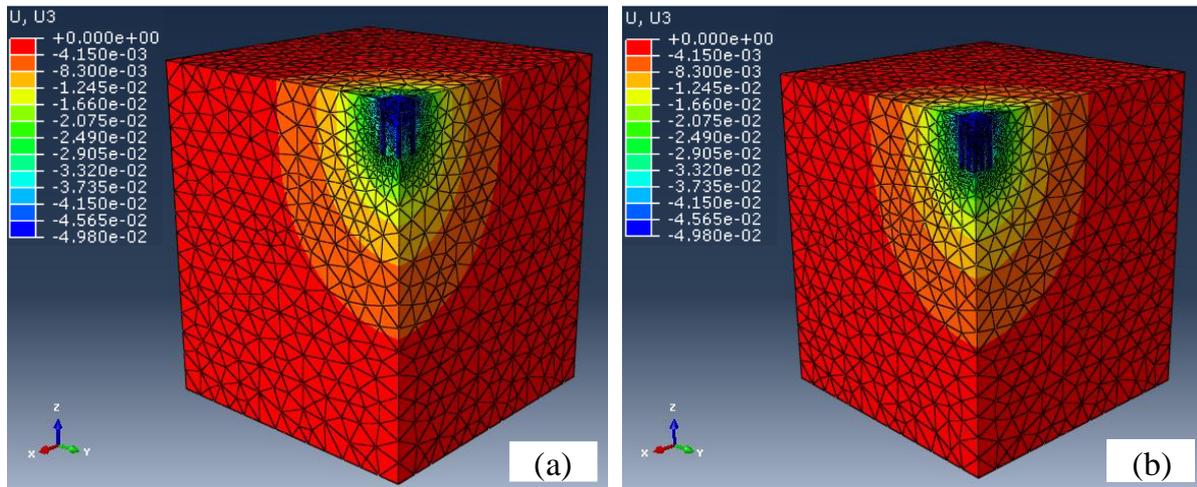


Figura 5.3. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas.

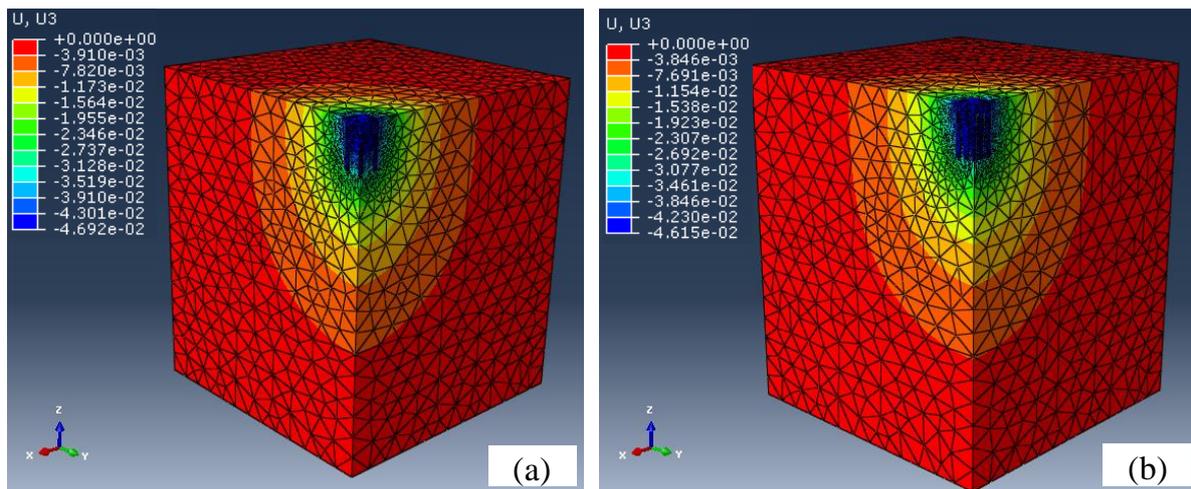


Figura 5.4. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas.

A Tabela 5.1 mostra o recalque para diferentes configurações variando o número de estacas. Pode-se observar que o efeito do incremento do número das estacas não é bastante significativo no recalque do radier e das estacas. A partir de comparações, é importante ressaltar o efeito da configuração geométrica das estacas na distribuição de cargas no radier, em que o recalque se chegou a 4,61 cm.

Tabela 5.1. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Elástico linear

<b>Elástico linear</b>	
<b>Número de estacas</b>	<b>Recalque no centro do radier (cm)</b>
0	5,905
1	5,863
5	5,586
9	5,408
13	5,180
17	4,980
21	4,692
25	4,615

Avaliando-se as tensões verticais atuantes no maciço sob o centro do radier e afastado 1,50 m deste, a uma profundidade medida a partir da base do radier observa-se, Figuras 5.5 e 5.6 respectivamente, que acima da cota aproximada de 10 m de profundidade ocorre um alívio das tensões com a ampliação do número de estacas ocorrendo o inverso a partir dessa profundidade.

Os resultados obtidos na avaliação dos recalques nesse modelo elástico linear assim como se observará no de Mohr-Coulomb são coerentes com as distribuições de tensões verticais apresentadas por Terzaghi & Peck (1976), Figura 5.7. Observa-se nessa figura que com a introdução das estacas ocorre uma redução das tensões verticais nas camadas mais superficiais e um certo aprofundamento do campo de atuação das tensões verticais reflexo das tensões impostas ao radier.

A exemplo do mostrado para o modelo elástico linear considerando-se apenas uma camada de solo as variações de recalque aqui obtidos em função do número de estacas compondo o radier igualmente se explicam pelas variações de tensões verticais que ocorrem sob o radier.

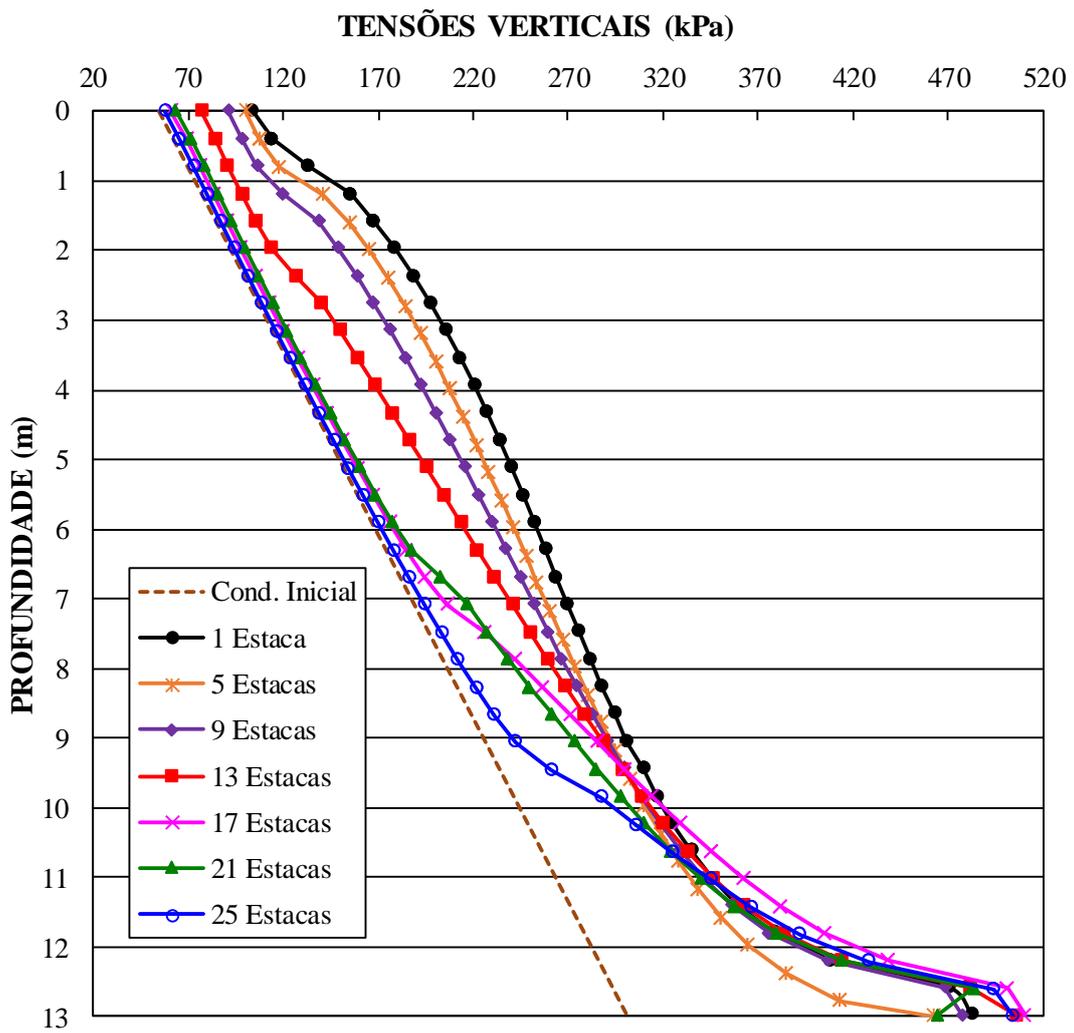


Figura 5.5. Tensões verticais atuantes sob o centro do radier.

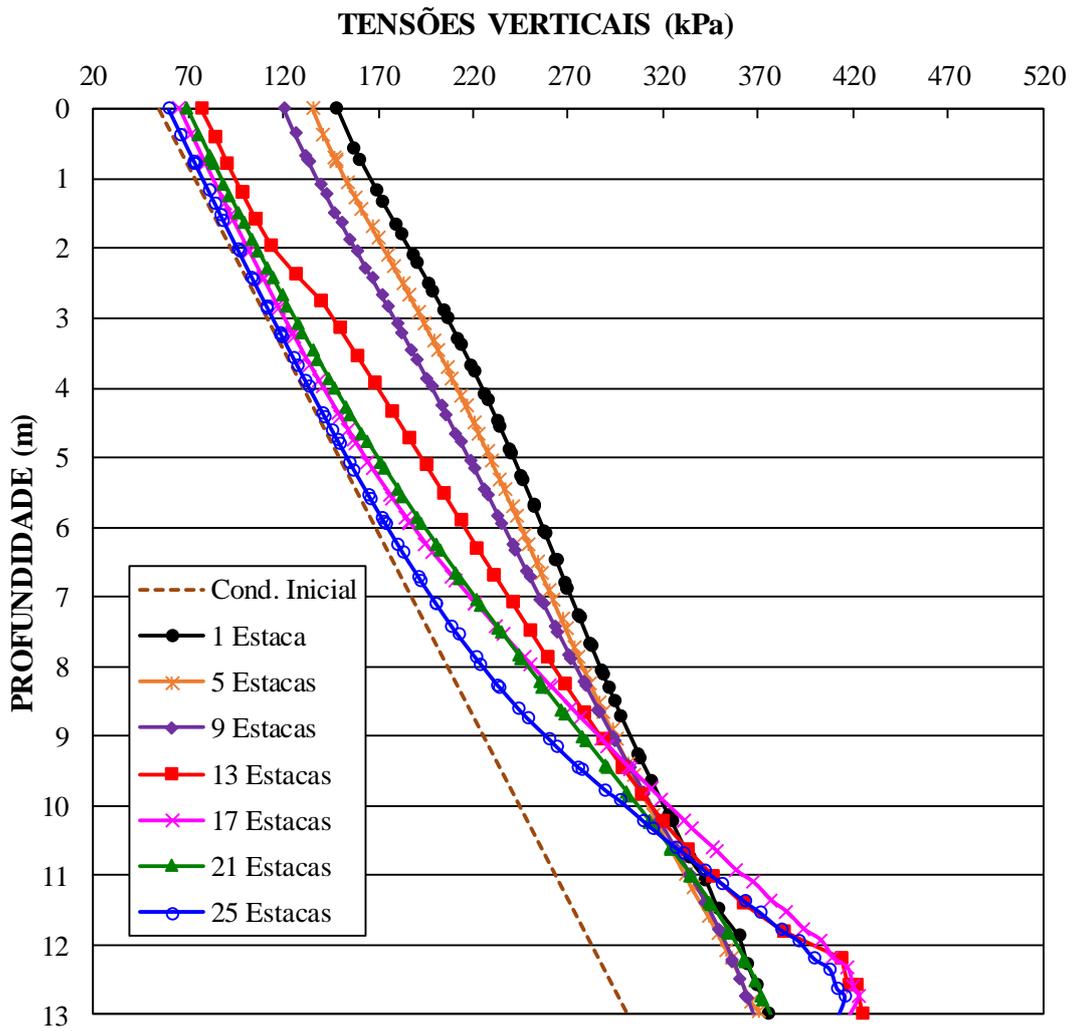


Figura 5.6. Tensões verticais atuantes a 1,50 m do centro do radier.

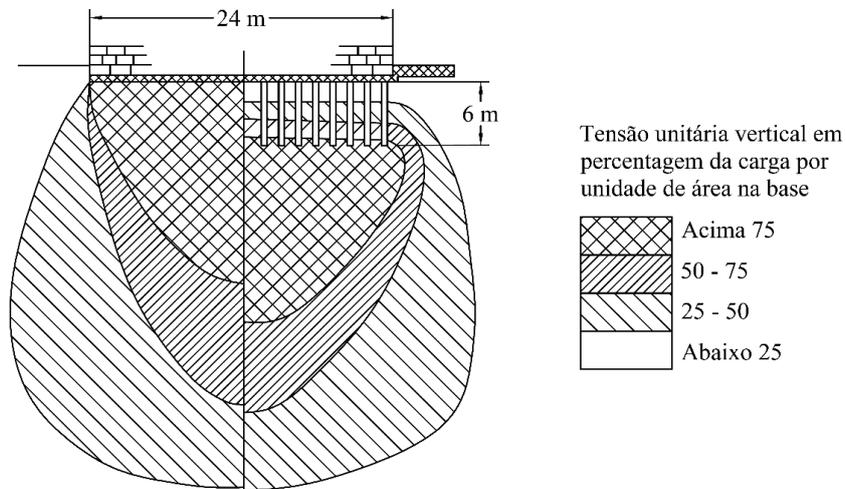


Figura 5.7. Diagrama de tensões verticais sob fundações estaqueadas (Terzaghi & Peck, 1976).

## 5.2.2 CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA UMA CAMADA NO MODELO ELÁSTICO LINEAR

A Figura 5.8 apresenta as tensões horizontais atuantes no solo circundante à estaca localizada no centro do radier. Observa-se no gráfico que as tensões horizontais atuantes na estaca central do sistema de radier estaqueado, diminui com o aumento do número de estacas até a profundidade de 9,45 m quando o comportamento tende a inverter-se. Considerando-se que as estacas utilizadas nas simulações apresentam comprimento de 12 m e diâmetro igual a 1,20 m, a inversão de comportamento se dá a aproximadamente 2 vezes o diâmetro acima da ponta da estaca. Cabem ainda as seguintes observações sobre os resultados mostrados na Figura 5.8

- A redução das tensões horizontais com o aumento do número de estacas que ocorre ao longo da estaca central para profundidades inferiores a 9,45 m indicam que a interposição de estacas no sistema reduz o atrito lateral nas estacas até um determinado limite de número de estacas, limite esse certamente função de fatores como o tipo de solo e diâmetro e distribuição das estacas sob o radier;
- O aumento das tensões horizontais a partir de 9,45 m de profundidade se intensifica com o aumento do número de estacas sendo muito pequeno para um pequeno número de estacas, no caso estudado, menos que 9 estacas. Isso indica que o fator ampliador das tensões horizontais nessa parte da estaca se deve a tensões geradas por estacas vizinhas.
- Com base no comportamento analisado para a estaca central é possível concluir que a contribuição do atrito lateral das estacas sob o radier tende a diminuir com o aumento do número de estacas, sendo relevante considerar a distribuição das mesmas, aspecto que merece ser melhor analisado.

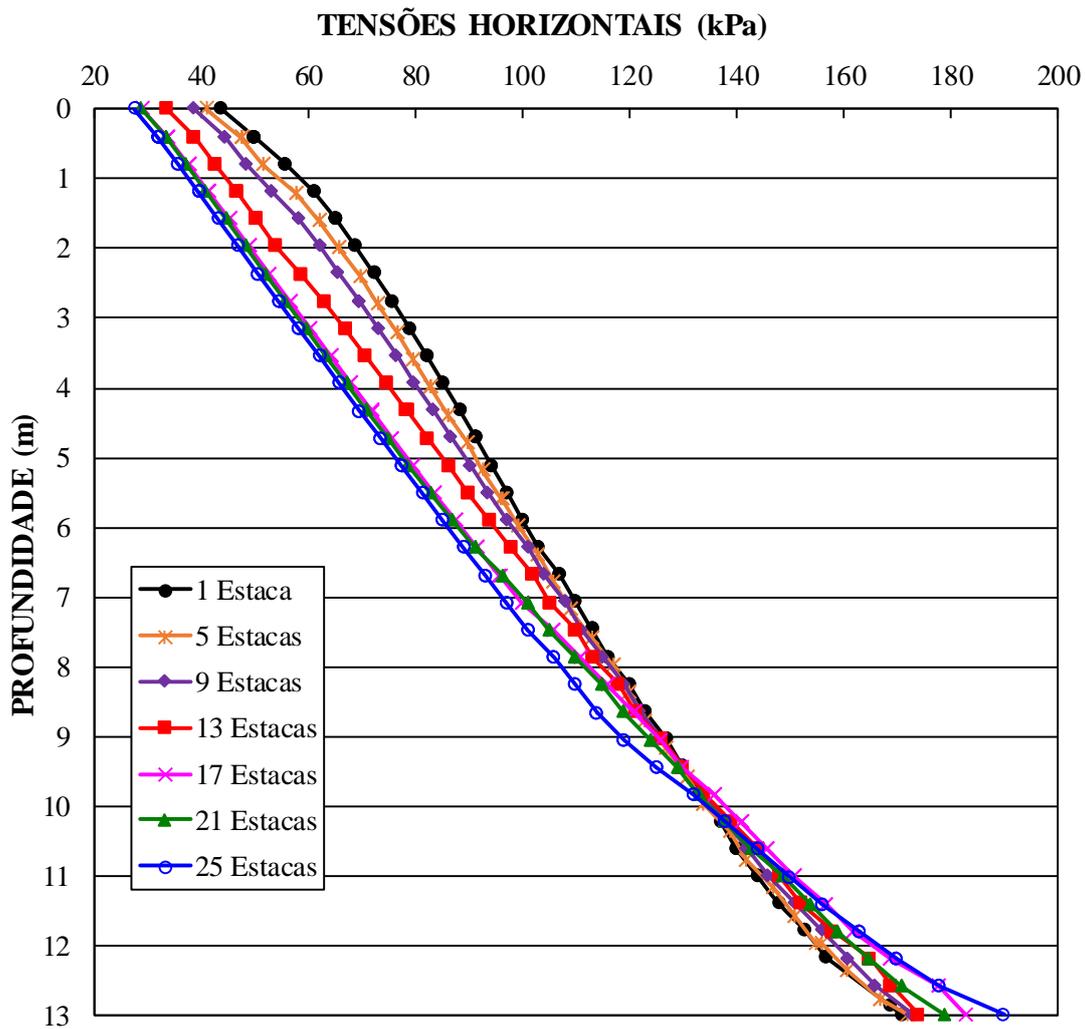


Figura 5.8. Tensões horizontais x profundidade ao longo da estaca em uma camada do solo no modelo elástico linear

### 5.2.3 CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA UMA CAMADA DO MODELO MOHR-COULOMB

Os recalques máximos no centro do radier estaqueado, para cada arranjo de estacas, foram obtidos diretamente da saída gráfica do programa ABAQUS. O efeito do arranjo das estacas é apresentado nas Figuras 5.9 a 5.12 onde apresentam-se os recalques máximos no centro do radier, segundo a sua configuração e comprimento das estacas.

Da mesma forma referente ao recalque máximo para uma camada do modelo elástico linear, foi feita a análise para o modelo Mohr-Coulomb. O programa permite ingressar para cada camada do solo no modelo Mohr-Coulomb, com os parâmetros de peso específico, coesão e ângulo de atrito na camada do solo.

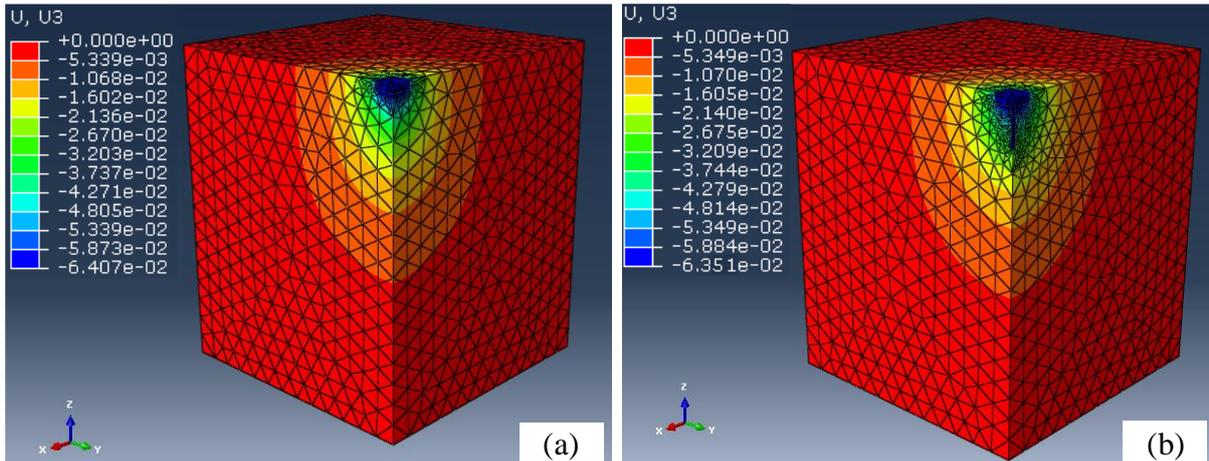


Figura 5.9. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca.

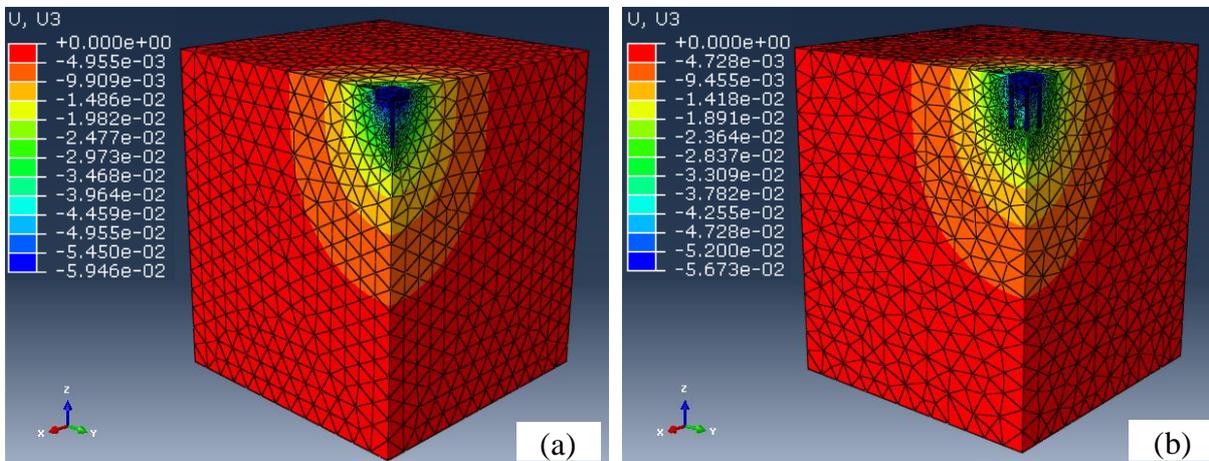


Figura 5.10. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.

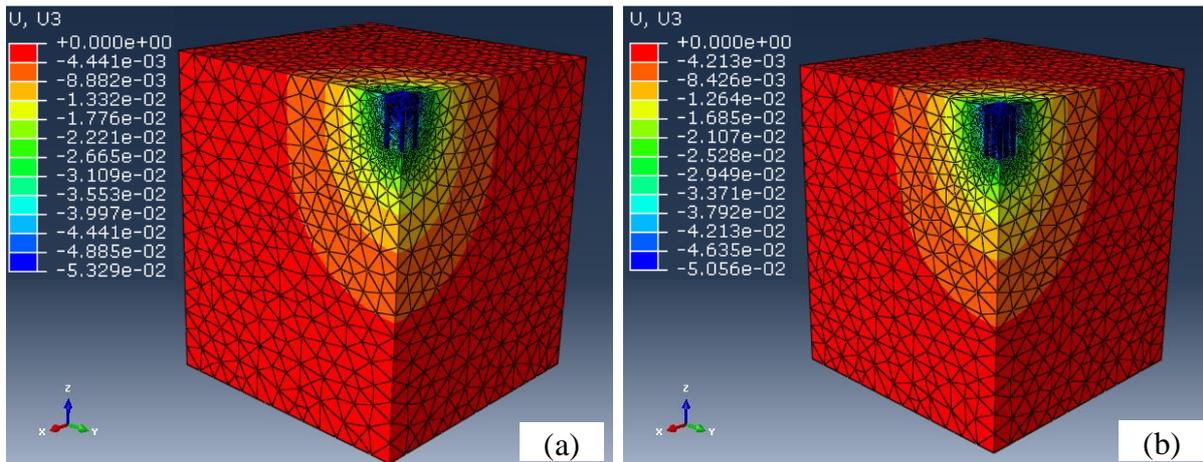


Figura 5.11. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas.

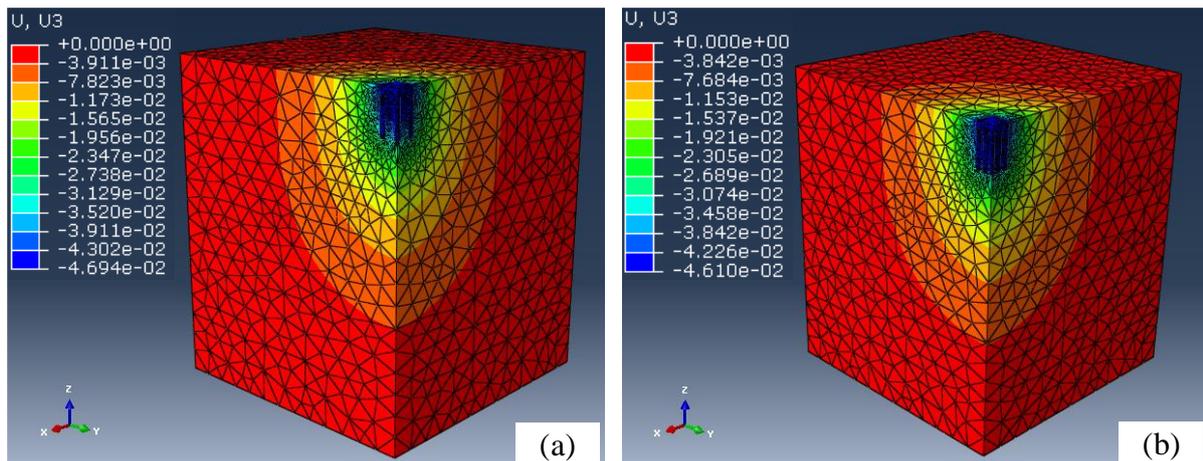


Figura 5.12. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas.

Observa-se na Tabela 5.2, o valor máximo de recalque com 25 estacas (4,61 cm) e para um radier estaqueado com 1 estaca (6,35 cm). O recalque diminuí em 1,8 cm, ao se passar do radier para o radier estaqueado com 25 estacas.

Na Tabela 5.2 mostra o recalque para diferentes configurações em relação ao número de estacas. Pode-se observar que o efeito do incremento no número das estacas não é bastante significativo no recalque do radier e em relação ao radier estaqueado. Fazendo as comparações é importante ressaltar ainda o efeito da configuração geométrica das estacas na distribuição de cargas sob o radier. O recalque chegou a 4,61 cm com 25 estacas.

Tabela 5.2. Recalques máximos no centro do radier estaqueado usando o modelo Mohr-Coulomb.

Mohr-Coulomb	
Número de estacas	Recalque no centro do radier (cm)
0	6,41
1	6,35
5	5,95
9	5,67
13	5,33
17	5,05
21	4,69
25	4,61

Na Figura 5.13 é apresentado um gráfico comparativo dos resultados já analisados, para cada uma das configurações do sistema de fundação em radier estaqueado. Para o cálculo do recalque nos modelos elástico linear e no modelo Mohr-Coulomb.

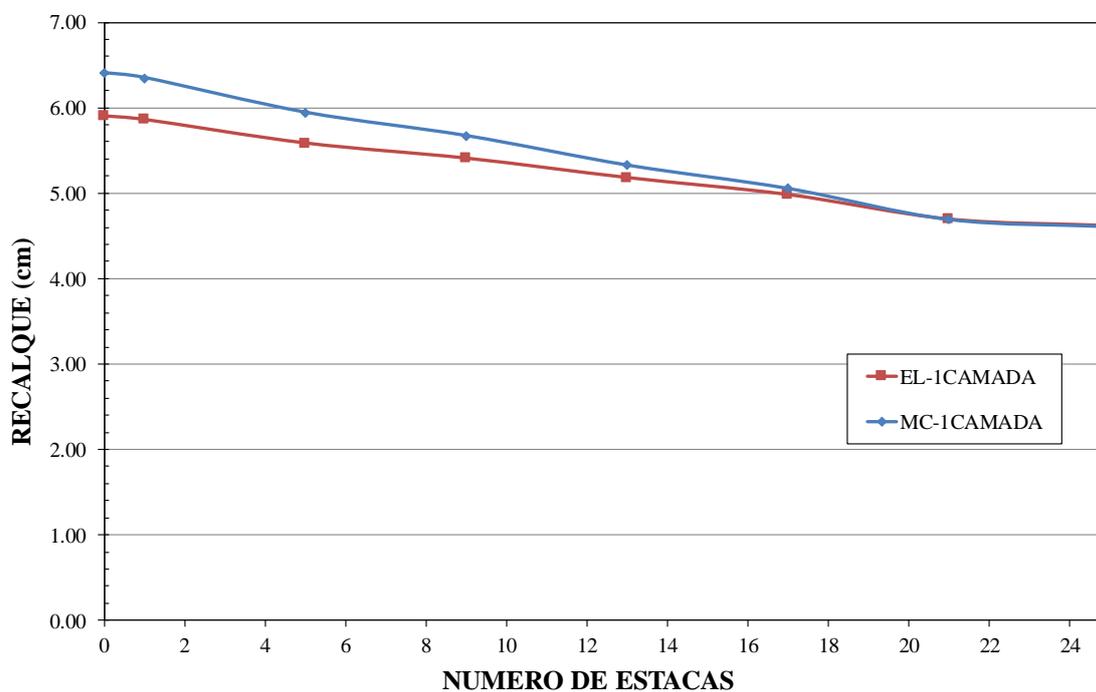


Figura 5.13. Comparação nos valores de recalque no centro do radier no modelo elástico linear e no modelo Mohr-Coulomb.

Analisando os resultados numéricos, observou-se que os valores dos recalques no modelo Mohr-Coulomb são um pouco maiores que no modelo elástico linear, e que os recalques no centro tendem a se aproximar nos dois modelos estudados, quando da adoção de dezessete estacas, vinte e uma estacas e vinte e cinco estacas.

#### **5.2.4 CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA UMA CAMADA DO MODELO MOHR-COULOMB**

Na Figura 5.14, são apresentadas as tensões horizontais atuantes no solo circundante à estaca central, onde é possível notar que no sistema de radier estaqueado, ocorre a redução das tensões horizontais atuantes na massa de solo subjacente com o aumento do número de estacas. Essa redução ocorre até a profundidade de 9,60 m sendo que a partir de 17 estacas praticamente já não ocorre influência do número de estacas. A partir dessa profundidade de 9,60 m essa tendência se inverte passando a ocorrer o aumento das tensões horizontais com o aumento do número de estacas sob o radier estaqueado. Considerando-se que as estacas utilizadas nas simulações apresentam comprimento de 13 m e diâmetro igual a 1,20 m. a inversão de comportamento se dá a aproximadamente 2 vezes o diâmetro acima da ponta da estaca. De um modo geral, tem-se no modelo Mohr-Coulomb comportamento semelhante ao registrado nas análises realizadas por meio do modelo elástico-linear.

#### **5.3 MODELAGEM DO RADIER ESTAQUEADO PARA VÁRIAS CAMADAS**

Da mesma forma da modelagem do radier estaqueado em uma camada, foi realizado também para as análises considerando-se várias camadas de solo subjacente ao radier.

Nas análises o solo foi admitido com comportamento elástico linear e Mohr-Coulomb. Considerou-se nas análises a camada I, de 0,0 a 3,0 m, constituída de areia argilo-siltosa porosa, apresentando módulo de Young de 8 MPa e coeficiente de Poisson de 0.35. A Camada II varia de 3,1 a 8,0 m, de argila areno-siltosa, zona na qual o módulo de Young é de 13 MPa e coeficiente de Poisson de 0.35. A Camada III de 8,0 a 12,0 m de silte argiloso a partir da qual o solo assume textura mais siltosa, apresentando módulo de Young E de 20 MPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0.35. A Camada IV, 12,0 a 120,0 m com distribuição de poros mais homogênea e apresentando módulo de Young E de 37 MPa e coeficiente de Poisson  $\nu$  de 0,2.

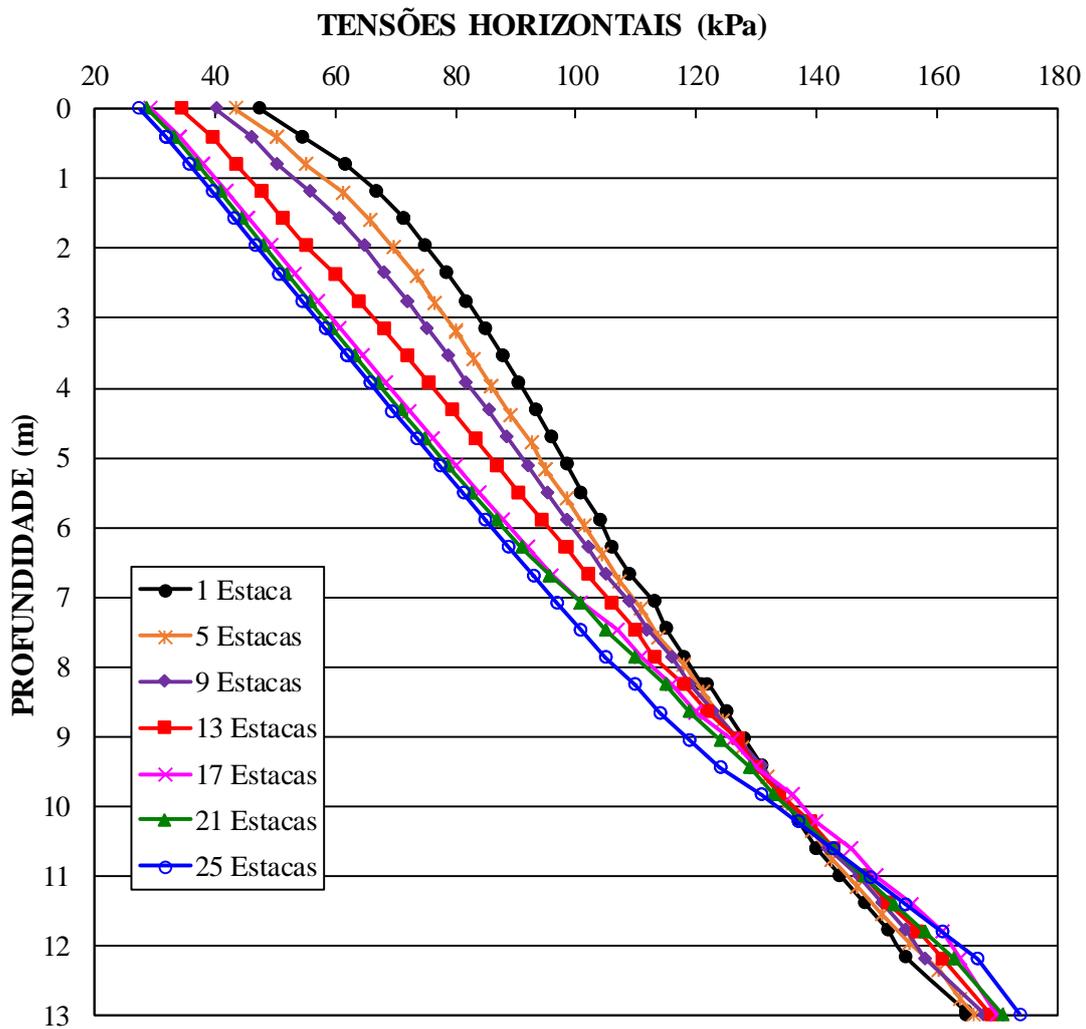


Figura 5.14. Tensões horizontais x profundidade ao longo da estaca em uma camada do solo no modelo Mohr-Coulomb.

### 5.3.1 CÁLCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA VÁRIAS CAMADAS NO MODELO ELÁSTICO LINEAR

Da mesma forma que se determinou o recalque máximo para uma camada do modelo elástico linear foi feita a determinação para o perfil de solo composto de camadas com os parâmetros do solo argiloso de Brasília (Campo Experimental da UnB). O programa permite ingressar com as propriedades de cada camada do solo no modelo elástico linear.

Os recalques máximos no centro do radier estaqueado, para cada arranjo de estacas, foram obtidos diretamente da saída gráfica do programa ABAQUS. O efeito do arranjo das estacas é

apresentado nas Figuras 5.15 a 5.18 onde apresentam-se os recalques máximos no centro do radier segundo sua configuração e considerando estacas com comprimento de 13 m.

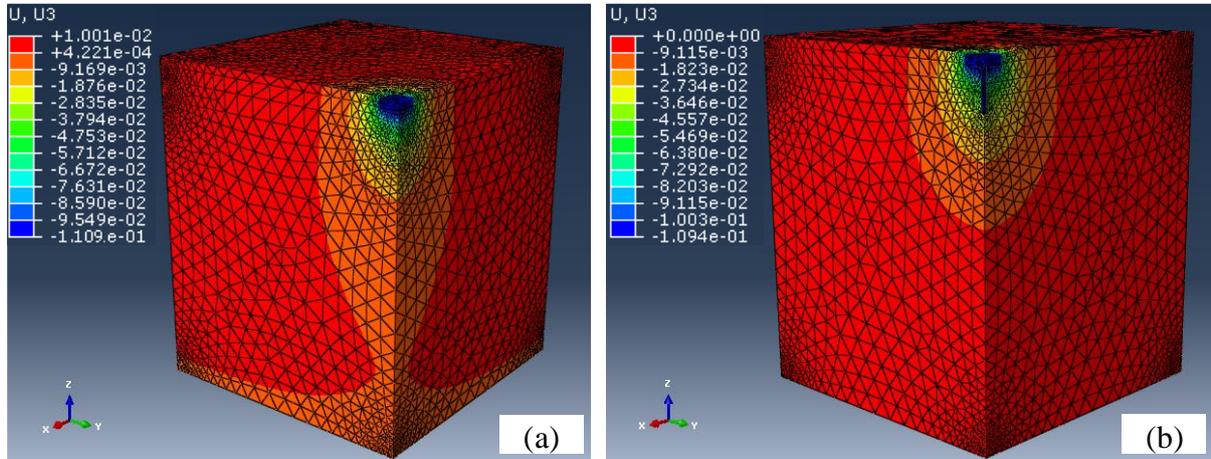


Figura 5.15. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca.

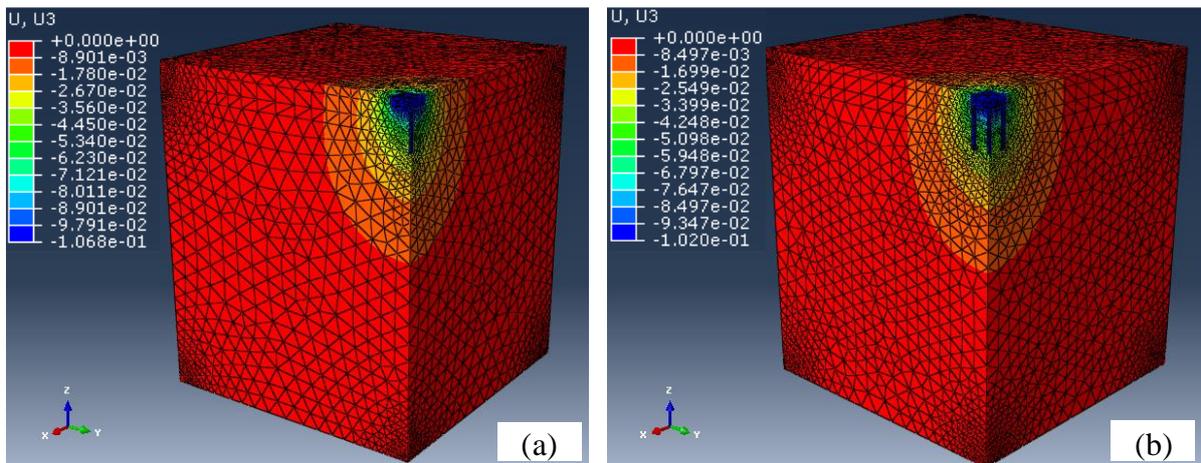


Figura 5.16. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.

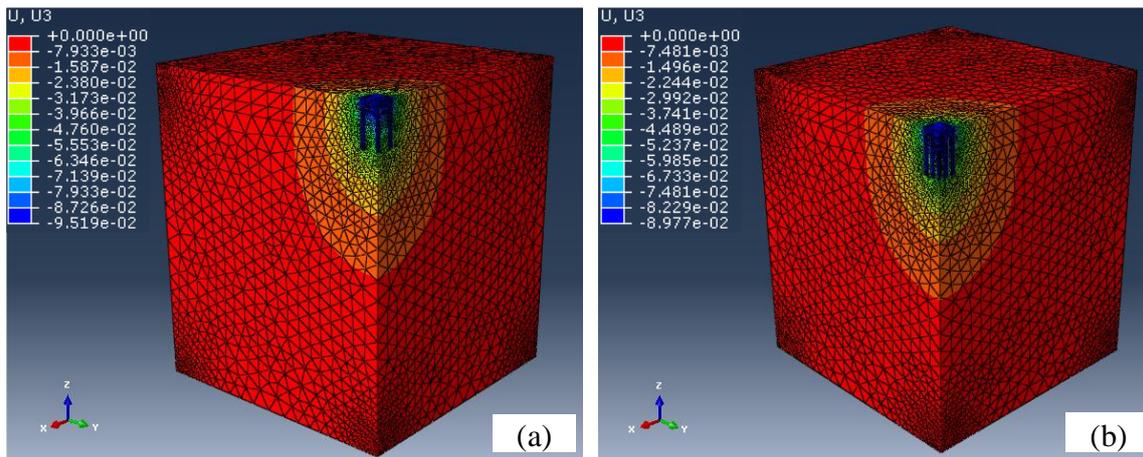


Figura 5.17. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas.

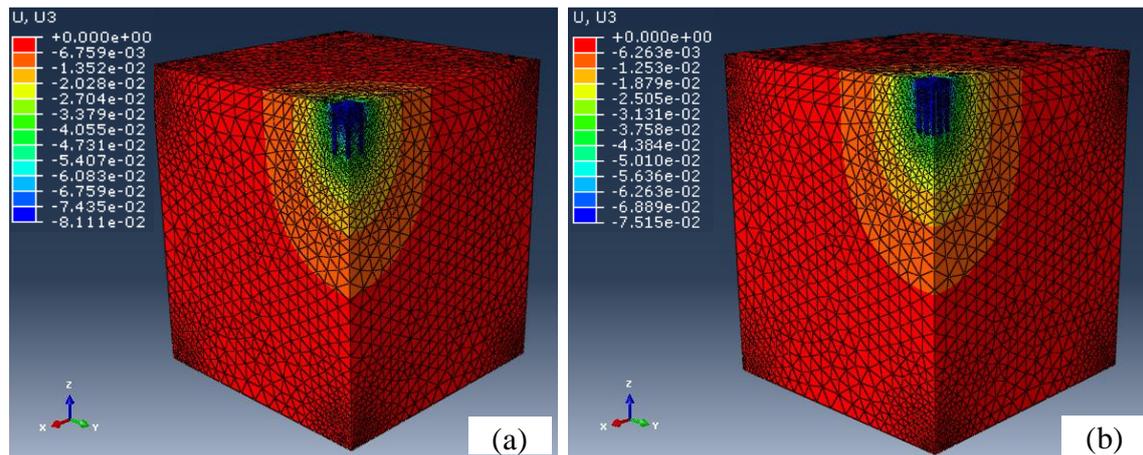


Figura 5.18. Recalque máximo no eixo z, modelo elástico linear: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas.

A Tabela 5.3 mostra o recalque para diferentes configurações quanto ao número de estacas. Pode-se observar então que o efeito do incremento do número das estacas é bastante significativo no recalque do conjunto radier-estacas. É importante ressaltar ainda o efeito da configuração geométrica das estacas na distribuição de cargas no radier, o que aponta para a possibilidade de redução do alterando-se o diâmetro da estaca, o comprimento da mesma ou aumentando o número das estacas. Geralmente nos perfis de solo, em especial nos residuais ocorre a tendência de melhoria do solo com o aumento da profundidade, logo, com base nas análises realizadas ao final do subitem 4.2.1, depreende-se que o aumento do comprimento da

estaca, além da melhoria da capacidade de carga deve contribuir de modo significativo para a redução dos recalques.

Tabela 5.3. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Elástico linear em várias camadas.

Elástico linear	
Número de estacas	Recalque no centro do radier (cm)
0	11,09
1	10,94
5	10,68
9	10,20
13	9,52
17	8,98
21	8,11
25	7,52

Analisado esses resultados se observa na Tabela 5.3 que o valor máximo de recalque passa de 11,09 cm para o radier não estaqueado para 7,51 cm quando se adota 25 estacas como estaqueamento do radier o que corresponde a uma redução de 3,57 cm, ou seja, 32 %.

### 5.3.2 CALCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA VARIAS CAMADAS DO MODELO ELÁSTICO LINEAR

A Figura 5.19 apresenta o crescimento das tensões verticais no solo com o aumento da profundidade após a aplicação da carga sobre o radier e considerando uma porção de solo de base 100m x 100m e altura 120 m. Considerando o peso específico natural para cada camada do solo na determinação das tensões geostáticas ao longo da profundidade observa-se que as tensões horizontais atuantes no solo sob o centro do radier diminuem com o aumento do número de estacas até a profundidade aproximada de 9 m, invertendo-se essa tendência a partir dessa cota. Esse comportamento é semelhante ao já observado para um perfil composto de um único solo, no entanto, aqui aparece o efeito das propriedades das camadas de solo sobre o comportamento. Ao se comparar os resultados da primeira com os da segunda camada, ambas com o mesmo coeficiente de Poisson, porém, com módulos de Young passando de 8 MPa para

13 MPa, se pode observar um efeito mais marcante em materiais menos rígidos, materiais que aliás geralmente apresentam menores valores de coeficiente de empuxo no repouso.

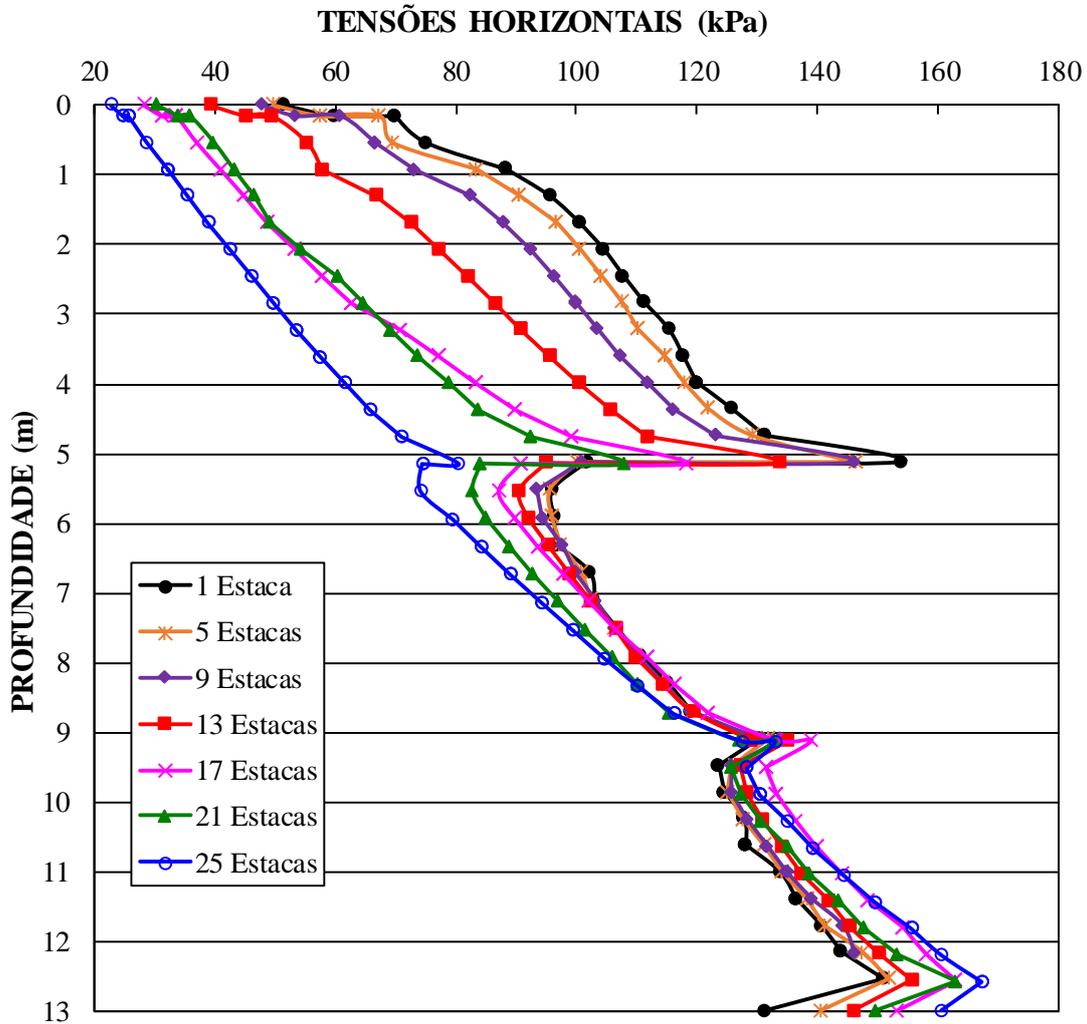


Figura 5.19. Tensões horizontais x posição ao longo da estaca em várias camadas do solo no modelo Elástico linear.

### 5.3.3 CALCULO DO RECALQUE MÁXIMO PARA VARIAS CAMADAS NO MODELO MOHR-COULOMB

Da mesma forma que no caso anterior, os recalques máximos no centro do radier estaqueado, para cada arranjo de estacas, foram obtidos diretamente da saída gráfica do programa ABAQUS. O efeito do arranjo das estacas é apresentado nas Figuras 5.20 a 5.23 onde são apresentados os recalques máximos no centro do radier segundo sua configuração considerando-se

comprimento das estacas igual a 13 m e diâmetro igual 1,20 m. O recalque máximo foi determinado no modelo Mohr-Coulomb de modo semelhante ao adotado para uma camada no modelo elástico linear Mohr-Coulomb. O programa permite ingressar para cada camada do solo no modelo Mohr Coulomb parâmetros de coesão e ângulo de fricção na camada do solo.

A camada I, de 0,0 a 3,0 m constituída por areia argilo-siltosa porosa, foi definida apresentando módulo de Young  $E$  igual a 8 MPa, coeficiente de Poisson  $\nu$  igual a 0,35, coesão igual a 16 kPa e ângulo de atrito igual a  $27^\circ$ . A camada II, de 3,0 a 8,0 m constituída por argila areno-siltosa, zona na qual apresenta o módulo de Young  $E$  é de 13 Mpa, o coeficiente de Poisson  $\nu$  de 0,35, a coesão igual a 24 kPa e o ângulo de atrito igual a  $27^\circ$ . A Camada III, de 8,0 a 12,0 m, constituída de silte argiloso com módulo de Young  $E$  de 20 MPa, coeficiente de Poisson  $\nu$  de 0,35, coesão de 40 kPa e ângulo de atrito de  $27^\circ$ . A Camada IV, 12,0 a 120,0 m, foi admitida como apresentando módulo de Young  $E$  de 37 MPa, coeficiente de Poisson  $\nu$  de 0,2, coesão de 45 kPa e ângulo de atrito igual a  $26^\circ$ . Cabe esclarecer que essa última camada é hipotética sendo em princípio constituída por um saprólito seguida de rocha alterada e rocha sã, ou seja materiais com comportamento mecânico superior ao admitido.

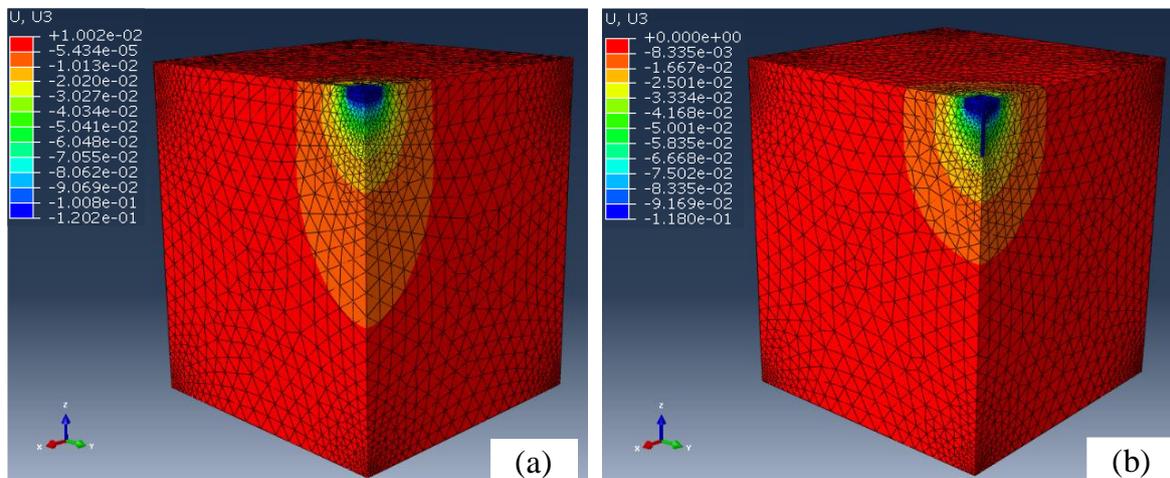


Figura 5.20. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) só do radier; (b) radier com uma estaca.

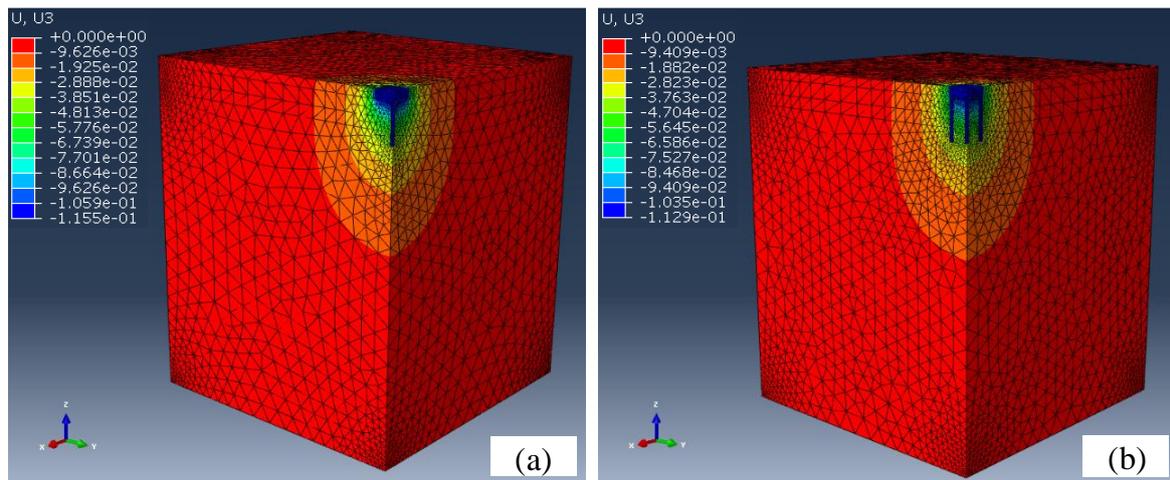


Figura 5.21. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com cinco estacas; (b) radier com nove estacas.

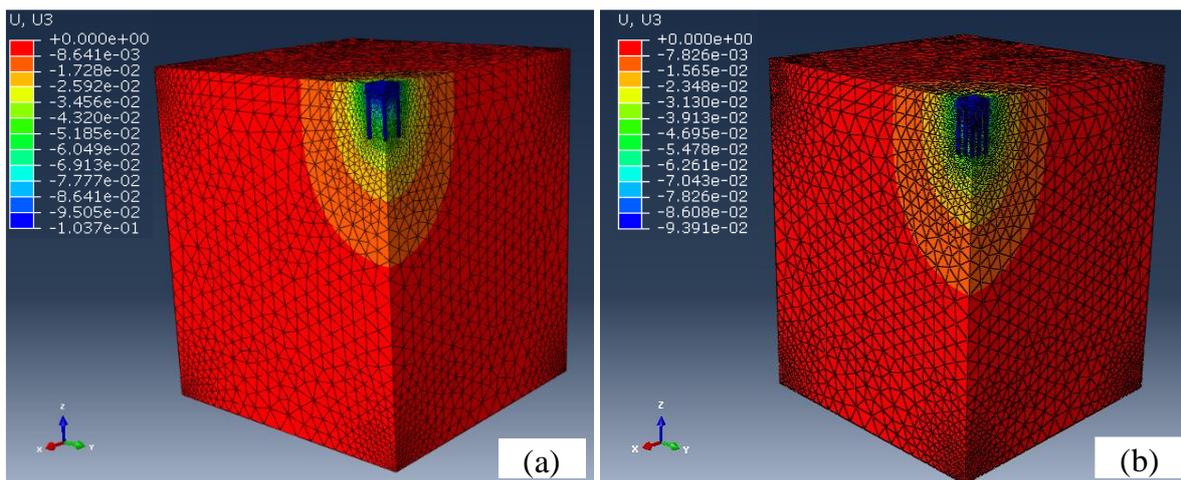


Figura 5.22. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com treze estacas; (b) radier com dezessete estacas.

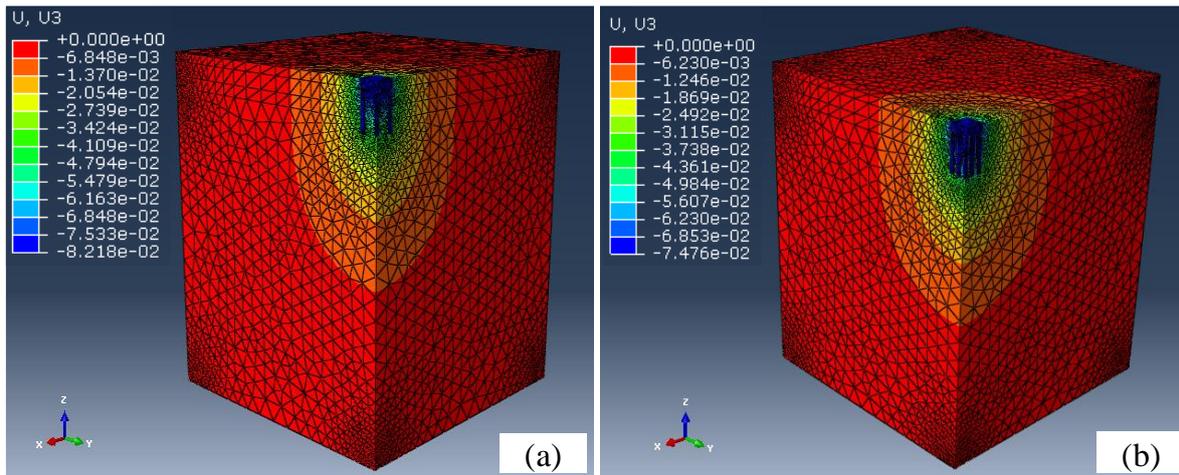


Figura 5.23. Recalque máximo no eixo z, modelo Mohr-Coulomb: (a) radier com vinte e uma estacas; (b) radier com vinte e cinco estacas.

Observa-se na Tabela 5.4 que o valor do recalque com vinte e cinco estacas é igual 7,48 cm e para um radier não estaqueado ele é de 12.02 cm, ou seja o estaqueamento com 25 estacas reduz o recalque em 37.7% resultado esse semelhante ao obtido no modelo elástico linear.

Tabela 5.4. Recalques Máximos no centro do radier estaqueado usando modelo Mohr-Coulomb em várias camadas.

Mohr-Coulomb	
Número de estacas	Recalque no centro do radier (cm)
0	12,02
1	11,80
5	11,55
9	11,29
13	10,37
17	9,391
21	8,218
25	7,476

Analisando esses resultados numéricos, observa-se que os valores dos recalques no modelo Mohr Coulomb são um pouco maiores que os obtidos no modelo elástico linear tendendo, no entanto, a se aproximarem com o aumento do número de estacas. A Figura 5.24, como esperado, mostra ainda ao se comparar o modelo com um uma e quatro camadas que as propriedades do solo são definidoras dos recalques que ocorrerão.

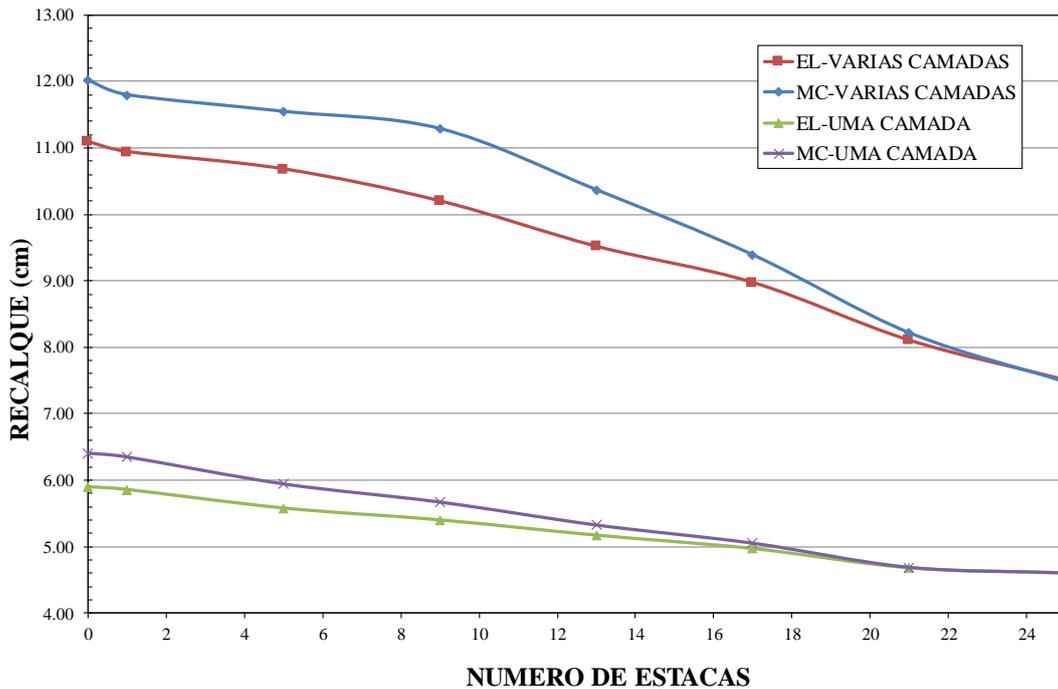


Figura 5.24. Comparação nos valores de recalque no centro do radier no modelo elástico linear e no modelo Mohr Coulomb para uma e para várias camadas.

### 5.3.4 CÁLCULO DAS TENSÕES HORIZONTAIS PARA VARIAS CAMADAS NO MODELO MOHR-COULOMB

Na Figura 5.25 é apresentado o crescimento das tensões horizontais com a profundidade no sistema multicamadas após a aplicação da carga considerando-se uma porção de solo com base 100 m x 100 m e altura 120 m. Considerando-se as propriedades e comportamento de cada camada como já indicado, observa-se nessa figura que a tensão horizontal no centro do radier diminui com o aumento do número de estacas. Essa influência diminui com o aumento da rigidez do solo e tende a zero a 9 m de profundidade, ponto a partir do qual a influência do número de estacas sobre as tensões horizontais tende a se inverter como já observado e discutido nas análises anteriores.

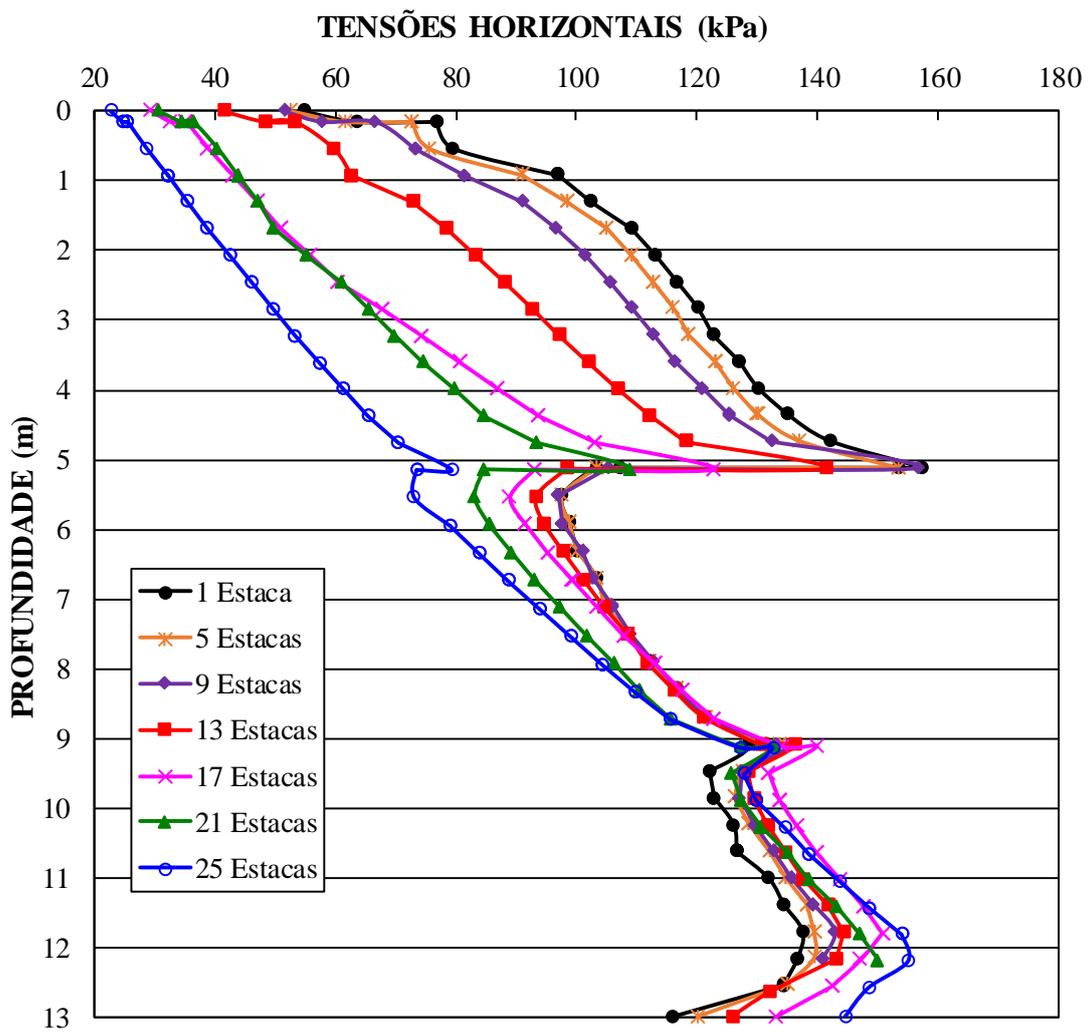


Figura 5.25. Tensões horizontais x posição ao longo da estaca em várias camadas do solo no modelo Mohr-Coulomb.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

As análises realizadas permitem as seguintes conclusões gerais:

- O modelo constitutivo Elástico linear e o modelo Mohr-Coulomb mostraram-se adequados à simulação do comportamento do solo neste estudo, assim como o software de elementos finitos ABAQUS.
- Os resultados obtidos para os dois tipos de perfil de solo e utilizando-se os modelos elástico linear e Mohr-Coulomb, mostram nas análises de recalque compatibilidade com o esperado e indicam, considerando-se os modelos analisados, que o recalque tende a diminuir com o aumento do número de estacas.
- A partir das análises realizadas para o perfil de solo composto de uma única camada depreende-se, ao se considerar os recalques obtidos para 21 e 25 estacas que segundo o tipo de solo existe um determinado número limite de estacas a partir do qual a interposição de mais estacas não contribuirá de modo significativo para a redução dos recalques. Ilustrando, considerando-se o perfil de solo em camada única e modelo Mohr-Coulomb tem-se para 21 estacas um recalque de 4,69 cm e 25 estacas, 4,61 cm. Esses valores são semelhantes aos obtidos para o modelo elástico linear. Os resultados mostram que a diferença entre os dois modelos se amplia na medida em que diminui o número de estacas no radier.
- Quanto à análise da influência do número de estacas existentes no radier sobre as tensões horizontais, e portanto, sobre a contribuição do atrito lateral para a capacidade de carga do radier estaqueado, embora se tenha analisado apenas o efeito sobre a estaca central, fica claro nos resultados obtidos que a interposição de estacas no sistema contribui para a redução do atrito lateral até aproximadamente duas vezes o diâmetro da estaca acima da ponta. Abaixo desse ponto o comportamento se inverte devido a formação do bulbo de pressão. Logo a interferência da presença das estacas na capacidade de carga dependerá do comprimento e do diâmetro das mesmas, além, é claro, da influência do tipo de solo.
- Os resultados mostram ainda que essa influência do número de estacas é maior nos solos menos rígidos.

- Verificou-se que a maior concentração de tensões e deslocamentos no solo está localizada no terço superior da estaca, conforme revisão bibliográfica e resultados obtidos nas simulações.
- A aplicação da força gravitacional para analisar a variação do estado de tensões com a profundidade, é importante neste estudo de fundações profundas, pois é sabido que o nível de tensões de confinamento afeta significativamente a resistência dos solos.

## **6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como tema de pesquisa para trabalhos futuros, recomenda-se que os seguintes tópicos sejam considerados na análise do comportamento de radiers estaqueados:

- Adotar estacas de comprimento variável, sendo estacas mais longas dispostas na região central do radier.
- Avaliar radiers com outras dimensões, aumentando a espessura total do radier ou parcial em direção ao centro do mesmo.
- Variar o espaçamento relativo entre as estacas no radier estaqueado para uma mesma configuração.
- Estudar outros tipos de carregamento, como por exemplo cargas lineares e concentradas, assim como diferentes níveis de carregamento, que provavelmente alteram a rigidez do sistema.
- Realização de simulações numéricas com outros modelos constitutivos mais sofisticados, e conseguindo reproduzir o comportamento do solo e comparando os recalques com o comportamento.
- Utilizar modelos constitutivos com parcial saturação, e considerar o efeito da sucção no comportamento mecânico do radier estaqueado em solo colapsível do DF.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS**

- AL-BAGHDADI, N. H. J. (2006). Soil-Pile-Raft Analysis by the Finite Element Method. Thesis Submitted to the College of Engineering of Kufa University Degree of Master of Science in Civil Engineering (Geotechnical Engineering).
- AZEVEDO, A.F.M. (2003). Método dos Elementos Finitos. 1a Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT – NBR 6122 – Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro, 2010.
- ARAKI, M.S. (1997). Aspectos Relacionados às Propriedades de Solos Colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 121p.
- BACELAR, R.C.J. (2003). Análises de Recalque em Radiers Estaqueados. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 193P.
- BEZERRA, J.E. (2003). Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos E Aplicações. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 193p.
- BLANCO, S.B. (1995) Aspectos de geologia de engenharia da escavação do metro de Brasília – Trecho Asa Sul. Dissertação de mestrado G.DM-019/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p.
- BRITO, J. L.W. (1987). Fundações do edifício. São Paulo, EPUSP, 98p.
- BROWN, P. T. & GIBSON, R. E. (1972). Surface settlement of a deep elastic stratum whose modulus increases linearly with depth. Canadian Geotechnical Journal, v. 9, 467-476.
- BUTTERFIELD, R. & BANERJEE, P.K. (1971). The problem of pile group - pile cap interaction. Geotechnique, 21(2): 135-142.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., NUNES, P.M, BERBERIAM, D. & FERREIRA, E.S. (1987). Influencia del pH del líquido de saturación en la colapsibilidad. VII Congr. Panamericano de Mec. De Suelos e Ing. De Fundacoes, Colombia, vol. 1, p. 1-8.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., MORTARI, D., ARAKI, M.S. & PALMEIRA, E.M. (1994). Aspectos relativos à colapsividade da argila porosa de Brasília-DF. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, vol. 3, p. 1157-1163.
- CARDOSO, F.B.F. (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 139p.

- CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 357p.
- CORDEIRO, A.F.B. (2007). Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-155/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.
- CURADO, T. (2015). Comparação de teorias de interação entre estacas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-155/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 151p.
- EL-MOSSALAMY, Y. & FRANKE, E. (1997). Piled rafts - numerical modelling to simulate the behaviour of piled raft foundations. The authors, Darmstadt, Germany. 182p.
- EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Boletim técnico n° 53. 1. edição. SNLCS. Rio de Janeiro, RJ. 455p.
- FARIAS, M.M. (2014). Teoria da Elasticidade e Plasticidade aplicada aos solos - Notas de aula. Universidade de Brasília - UnB.
- FERREIRA JUNIOR, L.G.F. (1991). Identificação mineralógica e relação sílica/sesquióxidos de dois solos do Distrito Federal. Seminário de Geotecnia de Solos Tropicais, Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, 19 p.
- FRANKE, E., LUTZ, B. & EL-MOSSALAMY, Y. (1994). Measurements and numerical modelling of high-rise building foundations on Frankfurt clay. Conference on Vertical and Horizontal Def. of Found. and Embankments, Texas, ASCE Geot. Special Publ., N. 40(2) : 1325-1336.
- GARCIA, Jean Rodrigo. Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. Tese Doutorado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015.
- GONZÁLEZ, J.R. (2014). Estudo Numérico do Comportamento de Estacas Carregadas Lateralmente. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-239/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- GUIMARÃES, R. C. 2002. Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- HAIN, S. J. & LEE, I. K. (1978). The analysis of flexible raft-pile systems. Géotechnique, v. 28, n. 1, 65-83
- HOOPER, J.A. (1979). Review of behaviour of piled raft foundations. CIRIA. Report 83.

- LEE C.J., LEE J.H. & JEONG S.S. (2010) Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay. *Computers and Geotechnics*; 37(1): 103–114.
- LIMA, B.S. (2007). Otimização de Fundações Estaqueadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-151A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- JANDA, T., CUNHA, R. P., KUKLIK, P. & ANJOS, G.M. (2009). Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil. *Soil and Rocks*, v. 32, n. 1, p. 3-18.
- KALTAKCI, VOLKAN (2009). *Practical Methods for the Analysis of Piled Raft Foundations*. First Edit. Lambert Academic Publishing, 182 p.
- KATZENBACH, R.; ARSLAN, U. & GUTWALD, J. (1994). A numerical study on pile foundation of the 300m high Commerzbank tower in Frankfurt Main. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Balkema, Rotterdam, 271- 277.
- KATZENBACH, R, ARSLAN U., GUTWALD J., HOLZHAUSER J. & QUICK H. (1997). Soil-structure interaction of the 300 m high Commerzbank tower in Frankfurt am Main. Measurements and numerical studies. *Proc. XIV ICSMFE*, vol. 2, p.1081-1084
- KATZENBACH, R. & TUREK, J. (2005). Combined Pile-Raft Foundation subjected to lateral loads. *16th ICSMGE*, Tokyo, 2001-2004.
- KUWABARA, F. (1989). An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. *Soils and Foundations*, Vol. 29(1): 82-92.
- MASCARENHA, M.M.A. (2003). Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- MENDONÇA, A. V. & DE PAIVA, J. B. (2000). A boundary element method for the static analysis of raft foundations on piles. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, v. 24, 237-247
- MENDONÇA, A.F., LIMA, A., BARROS, J.G.C., CORTOPASSI JR., R. & CORTOPASSI, R. (1994). Critérios geológicos e geotécnicos para execução de sondagens na área do Distrito Federal. *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, ABMS, Foz do Iguaçu, PR , 2: 389-395.
- MINDLIN, R.D. (1936). Forces at a point in the interior of a semi-infinite-solid. *Physics* 7, p. 195-202.
- MOTA, N.M.B. (2003). Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.

- OZELIM, L. C. S. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; ARAÚJO, G. L. S.; PALMEIRA, E. M. & CARVALHO, J. C.; (2014) A aplicação de novos paradigmas para o entendimento do fenômeno de adensamento em solos estruturas e colapsíveis. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XVII, 2014. Goiânia. Anais... Goiânia: COBRAMSEG, 6 p.
- PADFIELD, C. J. & SHARROCK, M. J. (1983). Settlement of structures on clay soils. CIRIA 27. (apud Fleming *et al.*, 1992).
- PAIXÃO, M.N.O.N. & Camapum de Carvalho, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. 2o Simpósio Sobre Solos não Saturados, AMFS-UFPE/ABMS-NE, Recife, PE, 1: 105-110.
- PARANHOS, H.S. (1998). Caracterização Geotécnica dos Principais Grupos de Solos do Mapa Pedológico do Distrito Federal (Esc. 1:100.000): Estudos na Área de Dinamização Urbana entre Samambaia e Gama. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.
- PASTORE, E.L. (1996). Descrição do Perfil de Solo do Campo Experimental da UnB. Comunicação Pessoal confirmada em setembro de 2000.
- PEREZ, E.N.P (1997). O uso da Teoria da Elasticidade na determinação do Módulo de Young do solo adjacente a estacas carregadas verticalmente na argila porosa de Brasília. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.
- POULOS, H. G., (1980). Foundation Economy Via Piled-Raft Systems. Keynote Paper of Piletalk International '91. 13-14 August 1991: Kuala Lumpur, Malaysia. p. 97-106.
- POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. (1980). Pile Foundations Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York, 397p.
- POULOS, H. G. (1974). An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., v. 18, 73-92.
- RANDOLPH, M.F. (1983). Design of Piled Raft Foundations. Cambridge University, Eng. Depart. Research Report, Soils TR143.
- RAPOSO, R.S.P. (2016). Estudo Tridimensional dos Efeitos das Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-264/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 153 p.
- ROCHA, M.O. (2014). Estudo da estabilidade da frente de escavação de túneis rasos em solo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 158 p.
- SALES, M. M. (2000). Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 229p.

- SALES, M. M., CUNHA, R.P., CARVALHO, J.C. & SILVA, C.M. (2002). Previsões de comportamento de um radier estaqueado no Distrito Federal. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, São Paulo. Anais do XII COBRAMSEG, v. 3, p. 1459-1469.
- SOUZA, R. S. (2010). Análise dos fatores de interação entre estacas em radier estaqueado: Comparação entre duas ferramentas numéricas. 2010. 180p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás (UFG).
- THERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1976). Mecânica de suelos en la ingeniería práctica. Barcelona: segunda edición, Editorial EL ATENEO S.A., segunda edición. 722 p.
- ZHANG, H. H. & SMALL, J. C. (2000). Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. Computers and Geotechnics, v. 26, 1-21.