

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

**ESTUDO DA TÉCNICA DE SISTEMAS EM RADIER ESTAQUEADO
PARA FUNDAÇÕES DE SILOS GRANELEIROS DO CENTRO-OESTE**

HUMBERTO LARANJEIRA DE SOUZA FILHO

ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D.

COORIENTADOR: JUAN CARLOS RUGE, D.Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-316/18

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2018

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

**ESTUDO DA TÉCNICA DE SISTEMAS EM RADIER ESTAQUEADO
PARA FUNDAÇÕES DE SILOS GRANELEIROS DO CENTRO-OESTE**

HUMBERTO LARANJEIRA DE SOUZA FILHO

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

APROVADA POR:

RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)

JUAN CARLOS RUGE, D.Sc. (UMNG)
(COORIENTADOR)

JUAN FÉLIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, Dr. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

RAYDEL LORENZO REINALDO, D.Sc. (UFT)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 DE SETEMBRO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA FILHO, HUMBERTO LARANJEIRA DE

Estudo da Técnica de Sistemas em Radier Estaqueado Para Fundações de Silos Graneleiros do Centro-Oeste. [Distrito Federal] 2018

xxi, 131 p., 279 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1. Radier Estaqueado | 2. Silos Graneleiros |
| 3. Fundações Mistas | 4. Modelagem Numérica |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA FILHO, H. L. (2018). Estudo da Técnica de Sistemas em Radier Estaqueado Para Fundações de Silos Graneleiros do Centro-Oeste. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-316/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Humberto Laranjeira de Souza Filho

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo da Técnica de Sistemas em Radier Estaqueado Para Fundações de Silos Graneleiros do Centro-Oeste

GRAU/ANO: Mestre/2018

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.

Humberto Laranjeira de Souza Filho

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

humbertolar@gmail.com

DEDICATÓRIA

A minha família por todo amor, especialmente a meus pais, minha tia Paula e meu avô José Soares, por sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

A meus pais, Humberto e Luciana, meus irmãos Analu e Filipe, e a minha afilhada Ana Beatriz, pelo amor, paciência e apoio de sempre.

A meus tios, Luzia e Arcênio, por todo o suporte ofertado desde a época do colégio até o fim do mestrado, a vocês serei eternamente grato.

A minhas primas e irmãs, Caline, Conça e Ceanne pelo amor e companhia, bem como por todos os momentos de apoio durante toda minha estadia em Brasília.

A meus avós, Nemésia e José (*in memoriam*) pelo simples fato de me amarem e apoiarem incondicionalmente em todas as etapas de minha vida. Em especial a meu vô Zé que hoje faz uma falta imensa, mas sei o quão orgulhoso estaria se aqui estivesse.

Aos professores de toda a vida, em especial aqueles da graduação, que sempre foram fonte de inspiração e conhecimento, especialmente a Waldete Japiassu e Fabrício Macedo pelo constante ensinamento e suporte.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, por todos os ensinamentos e orientações procedidas ao longo dos dois anos de mestrado, em especial ao professor Juan Félix, Manoel, Gregório e Ennio.

A meu professor e orientador Renato Pinto da Cunha por todo o apoio, orientação e paciência a mim desprendidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Maurício Sales pelo imenso suporte e conhecimento compartilhado ao longo da maior parte desta pesquisa.

Aos amigos conquistados ao longo do mestrado, por todo o apoio dedicado durante o período das disciplinas e da elaboração deste trabalho, com carinho especial à Giovanna, Ana Paola, Andrea e Igor. Agradecendo também com muito amor aos amigos do mestrado do grupo BT, Thaís, Ana Luisa, Marcone e Rogério, por terem tornado os dois anos de mestrado um pouco menos exaustivos e mais cheio de alegria.

A Francisco Mário pelo simples fato de sempre estar lá para tudo e todas as horas que mais necessitei. Nenhuma palavra será suficiente para agradecer tudo o que fez, faz e dedica a mim.

A Matheus Praciano e Emerson Batista pelo imenso suporte ofertado, principalmente nas etapas finais deste trabalho.

A José Abreu pelo forte apoio dado em todas as etapas da elaboração desta dissertação, sem o qual não seria possível sua realização.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro disponibilizado.

Por fim, agradeço à Universidade de Brasília (UnB) e ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia por terem me proporcionado esta experiência ímpar em minha vida.

RESUMO

Silos graneleiros são estruturas construídas com a finalidade de garantir a preservação e durabilidade de produtos agrícolas armazenados após o período de safra. A estrutura dos silos impõe ao terreno um carregamento rápido e cíclico, o que por muitas vezes podem comprometer os requisitos de segurança, devido as altas deformações que ocorrem no terreno. Sendo assim, em muitos casos são necessárias técnicas de melhoria do sistema de fundações que garantam a estabilidade sem comprometer a completa operacionalidade dos silos. Entre estas técnicas, ganha espaço no cenário atual o sistema em radier estaqueado, que consiste no estaqueamento da laje de fundo dos silos. Neste contexto, o presente trabalho analisa a viabilidade técnica da utilização do radier estaqueado para obras de silos. Em uma etapa preliminar, procedeu-se uma simulação das safras referentes a dois anos de um conjunto real de oito silos graneleiros por meio do programa GARP. Para esta fase, o programa demonstrou-se eficaz em simular a situação de primeiro carregamento do solo, porém para a fase de novo carregamento, a análise por meio do *software* não foi suficiente para a correta modelagem. Em uma etapa posterior, realizou-se uma análise paramétrica como forma de avaliar a influência da variação dos parâmetros referentes as estacas e radier no comportamento do sistema. Para tanto, variou-se o número de estacas, configurando em sete casos de estaqueamento, e trabalhou-se com distintos diâmetros e comprimentos destas, assim como espessuras de radier. Os resultados obtidos mostraram que a influência da variação dos parâmetros geométricos das estacas, diâmetro e comprimento, apresentou-se de maneira mais notória em termos de redução de recalques totais, distorção angular e carga nas estacas. Considerando a variação da espessura do radier, a maior influência apresentou-se para distorção angular e momento fletor atuante na laje de fundo. De maneira geral, constatou-se que o aumento do número de estacas sob a laje de fundo acarretou em um efeito benéfico para o desempenho técnico do conjunto, de forma que, a partir de certa quantidade de estacas, houve redução deste efeito, podendo assim ser escolhido um número ótimo de estacas para o projeto que atendesse todos os critérios necessários para garantir a segurança e adequada operacionalidade dos silos.

ABSTRACT

Bulk grain silos are structures constructed with the purpose of ensuring the preservation and durability of agricultural products stored after the harvest period. The structure of the silos imposes a rapid and cyclical load on the ground, which can often compromise safety requirements due to the high deformations occurring on the ground. Therefore, in many cases, techniques for improving the foundation system are necessary to guarantee stability without compromising the complete operation of the silos. Among these techniques, there is a space in the current scenario, the piled raft system, which consists of piling the bottom slab of the silos. In this context, the present work analyzes the technical viability of the use of the piled raft system for silo constructions. In a preliminary stage, a simulation of the two-year harvests of a real set of eight grain silos was carried out through the GARP program. For this stage, the program proved to be effective in simulating the situation of first loading of the soil, but for the new loading period, the analysis through the software was not sufficient for the correct modeling. In a later stage, a parametric analysis was performed as a way of evaluating the influence of the variation of the parameters related to the piles and raft in the behavior of the system. In order to do so, the number of piles was varied, setting in seven cases of piling, and worked with different diameters and lengths of these, as well as thicknesses of raft. The results showed that the influence of the variation of the geometric parameters of piles, diameter and length, was most noticeable in terms of reduction of total displacement, angular distortion and load on the piles. Considering the variation of raft thickness, the greatest influence was presented for angular distortion and bending moment acting on the bottom slab. In general, it was verified that the increase in the number of piles under the bottom slab resulted in a beneficial effect for the technical performance of the system, so that, from a certain amount of piles, this effect was reduced, thus an optimal number of piles for the project would be chosen that would meet all the necessary criteria to guarantee the safety and adequate operation of the silos.

ÍNDICE

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. SILOS DE ARMAZENAMENTO.....	5
2.1.2. Partes Constituintes De Uma Unidade Armazenadora	8
2.1.3. Peculiaridades e Recomendações de Projeto.....	11
2.1.4. Aspectos Geotécnicos de Obras de Silos Graneleiros.....	14
2.2. SISTEMAS DE FUNDAÇÕES	16
2.3. METODOLOGIA DO RADIER ESTAQUEADO	18
2.3.1. Conceitos e Abordagem do Sistema Em Radier Estaqueado	18
2.3.2. Trabalhos Recentes Em Radier Estaqueado No Centro-Oeste.....	22
2.3.3. Mecanismos de Interação Entre os Elementos do Radier Estaqueado.....	24
2.3.4. Etapas do Projeto Em Radier Estaqueado	26
2.3.5. Radier Estaqueado Em Solos Colapsíveis.....	30
2.4. FERRAMENTA NUMÉRICA HÍBRIDA	31
2.4.1. O Programa GARP	31
2.4.2. O Programa DEFPIG	33
Capítulo 3 – METODOLOGIA.....	35
3.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	35
3.1.1 O Complexo de Estocagem	35
3.1.2 Deslocamentos Decorrentes das Safras de 2015 e 2016	38
3.2 INVESTIGAÇÃO DO TERRENO E ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	42
3.2.1 Sondagens À Percursão	42
3.2.2 Ensaio de Laboratório.....	45
3.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROJETO	49
3.3.1 Estado de Tensões na Massa de Solo	49
3.3.2 Módulo de Elasticidade	51
3.3.3 Coesão e Ângulo de Atrito	52

3.3.4 Capacidade de Carga do Radier	54
3.3.5 Capacidade de Carga das Estacas.....	55
3.3.6 Inércia Equivalente dos Elementos da Laje	58
3.4 CONCEPÇÃO DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	59
3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS SAFRAS	65
3.5.1 Parâmetros da Primeira Safra.....	65
3.5.2 Parâmetros da Segunda Safra.....	68
3.6 ANÁLISE PARAMÉTRICA	71
Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1 RECALQUES TOTAIS DA PRIMEIRA SAFRA	79
4.2 RECALQUES TOTAIS DA SEGUNDA SAFRA	82
4.2.1 Recalques a Partir do GARP	85
4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA	87
4.3.1 Recalques Totais	89
4.3.2 Distorção Angular	96
4.3.3 Momentos Fletores na Laje	107
4.3.4 Carga nas Estacas	113
4.3.5 Pressão de Contato do Solo-Radier.....	118
4.4 RESUMO DAS ANÁLISES	119
Capítulo 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	124
5.1 CONCLUSÕES.....	124
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura típica dos silos metálicos atuais. (Kepler Weber, 2017).	6
Figura 2.2. Principais componentes de um silo metálico. (Scalabrin, 2008).	10
Figura 2.3. Exemplo de Silo com Galeria ou Túnel para a Saída dos Grãos. (Adaptado de Leite, 2008).	11
Figura 2.4. Esquema da célula de cisalhamento de Jenike, utilizada na determinação das propriedades dos materiais ensilados. (PALMA, 2005).	13
Figura 2.5 Patologias comumente encontradas em silos: a) Região da espera do montante danificada b) Desnível do fundo do silo em relação ao anel (Conciani, 2016).	15
Figura 2.6. Principais tipos de sistemas de fundações: a) grupo de estacas, b) radier estaqueado, c) radier estaqueado combinado, d) radier isolado, e) estaca isolada (Castillo, 2013).	17
Figura 2.7. Sistemas de Fundações e suas Divisões de Cargas. (Mandolini, 2003).	20
Figura 2.8. Mecanismos de Interação entre os Elementos do Radier Estaqueado (Modificado de Hain & Lee, 1978, apud Cordeiro, 2017).	25
Figura 2.9. Curva Tri-Linear Carga-Recalque do Método PDR (Modificado de Poulos, 2001).	27
Figura 2.10. Rigidez de uma estaca a partir da curva carga x recalque (Sales, 2000).	34
Figura 3.1. Localização de São Félix do Araguaia - MT (IBGE, 2015).	35
Figura 3.2.Complexo de Armazenamento visto em Planta (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	36
Figura 3.3. Complexo de Armazenamento visto em Corte (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	36
Figura 3.4. Base do silo, composta pela laje, sistema de aeração, túnel central e anel circular externo, vista em plana e em corte. (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	37
Figura 3.5. Locação das estacas no túnel central e no anel externo em um silo padrão (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	38
Figura 3.6. Parte inferior dos silos vista em corte.	38
Figura 3.7. Trincas e deslocamentos gerados após o carregamento dos silos (EPF Geotecnia, 2017).	40
Figura 3.8. Resultado da sondagem SPT realizada previamente à construção dos silos (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	42
Figura 3.9. Mapa de retirada de amostras para os ensaios de laboratório, e dos furos da segunda campanha de sondagem (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	43

Figura 3.10. Resultado da sondagem SPT realizada após à primeira safra e surgimento de patologias no silo (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	44
Figura 3.11. Perfil geotécnico do terreno, considerando a camada de aterro compactado com solo natural.	45
Figura 3.12. Resultado do ensaio oedométrico para a amostra com saturação à 150 kPa (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	46
Figura 3.13. Resultados do ensaio oedométrico cíclico para condição de umidade natural: a) AM-01 b) AM-02 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	47
Figura 3.14. Resultados do ensaio triaxial CU _{sat} - AM-01 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	48
Figura 3.15. Resultados do ensaio triaxial CU _{sat} - AM-02 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	48
Figura 3.16. Configuração de carregamento para determinação das tensões verticais ao longo do solo.	49
Figura 3.17. Variação da Tensão Vertical com a Profundidade para Primeiro Carregamento dos Silos.	50
Figura 3.18. Definição da envoltória de Mohr-Coulomb e reta K _f (Palmeira, 2016).	52
Figura 3.19. Gráfico q' x p' para a amostra 01.	53
Figura 3.20. Gráfico q' x p' para a amostra 02.	53
Figura 3.21. Seções transversais dos elementos adjacentes à laje dos silos: a) túnel central b) aeração longitudinal à laje c) aeração de maior dimensão transversal à laje d) aeração de menor dimensão transversal à laje (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).	58
Figura 3.22. Malha prismática utilizada para simulação da laje do fundo, ou radier.	60
Figura 3.23. Malha completa para simulação da laje dos 8 silos em conjunto.	61
Figura 3.24. Laje de fundo com respectivas espessuras equivalentes utilizadas na análise numérica.	63
Figura 3.25. Malha de um silo com estacas locadas para modelagem das safras.	65
Figura 3.26. Variação do módulo de elasticidade (E) com a profundidade para a primeira safra.	66
Figura 3.27. Variação do módulo de elasticidade (E) com a profundidade para a segunda safra estimada pelo ensaio SPT.	69
Figura 3.28. Configuração de estaqueamento C1.	74
Figura 3.29. Configuração de estaqueamento C2 - 48 estacas na laje de fundo.	75
Figura 3.30. Configuração de estaqueamento C3 - 76 estacas na laje de fundo.	75

Figura 3.31. Configuração de estaqueamento C4 - 96 estacas na laje de fundo.	76
Figura 3.32. Configuração de estaqueamento C5 - 116 estacas na laje de fundo.	76
Figura 3.33. Configuração de estaqueamento C6 - 140 estacas na laje de fundo.	77
Figura 3.34. Configuração de estaqueamento C7 - 172 estacas na laje de fundo.	77
Figura 4.1. Recalques totais médios ao longo dos silos carregados pela primeira safra.	82
Figura 4.2. Configuração superior e inferior dos silos para a análise da segunda safra.	84
Figura 4.3. Variação do recalque médio total versus fator geométrico.	89
Figura 4.4. Variação do recalque total do anel externo versus fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.	91
Figura 4.5. Variação do recalque total do túnel central versus fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.	91
Figura 4.6. Variação do recalque total da laje de fundo versus fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.	92
Figura 4.7. Variação do recalque total do anel externo versus fator geométrico, para cada comprimento de estaca.	93
Figura 4.8. Variação do recalque total do túnel central versus fator geométrico, para cada comprimento de estaca.	93
Figura 4.9. Variação do recalque total da laje de fundo versus fator geométrico, para cada comprimento de estaca.	94
Figura 4.10. Variação do recalque total do anel externo versus fator geométrico, para cada espessura do radier.	95
Figura 4.11. Variação do recalque total do túnel central versus fator geométrico, para cada espessura do radier.	95
Figura 4.12. Variação do recalque total da laje de fundo versus fator geométrico, para cada espessura do radier.	96
Figura 4.13. Distorção angular nas direções principais dos silos versus fator geométrico.	97
Figura 4.14. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C2.	98
Figura 4.15. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C2.	98
Figura 4.16. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C3.	100
Figura 4.17. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C3.	100
Figura 4.18. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C4.	101
Figura 4.19. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C4.	102
Figura 4.20. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C5.	103
Figura 4.21. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C5.	103

Figura 4.22. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C5.	104
Figura 4.23. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C6.	105
Figura 4.24. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C7.	106
Figura 4.25. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C7.	106
Figura 4.26. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico.	107
Figura 4.27. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção X, para diferentes diâmetros de estaca.	109
Figura 4.28. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção Y, para diferentes diâmetros de estaca.	109
Figura 4.29. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção X, para diferentes comprimentos de estaca.	110
Figura 4.30. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção Y, para diferentes comprimentos de estaca.	111
Figura 4.31. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção X, para diferentes espessuras de radier.	112
Figura 4.32. Variação do momento fletor máximo versus fator geométrico na direção Y, para diferentes espessuras de radier.	112
Figura 4.33. Variação da carga nos elementos versus fator geométrico.	113
Figura 4.34. Variação da carga nas estacas versus fator geométrico, por diâmetro de estaca. .	115
Figura 4.35. Variação da carga nas estacas versus fator geométrico, por comprimento de estaca.	116
Figura 4.36. Variação da carga nas estacas versus fator geométrico, por espessura de radier. .	117
Figura 4.37. Variação da pressão de contato solo-radier, com o número de estacas sob a laje de fundo.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Estocagem por silo referente as safras de 2015 com respectivos tempos de armazenagem (EPF Geotecnia, 2017).	39
Tabela 3.2. Estocagem por silo referente as safras de 2016 com respectivos tempos de armazenagem (EPF Geotecnia, 2017).	39
Tabela 3.3. Recalques médios totais medidos para cada safra de armazenagem.	41
Tabela 3.4. Coeficiente α (Teixeira & Godoy, 1996).	51
Tabela 3.5. Coeficiente K (Teixeira & Godoy, 1996).	52
Tabela 3.6. Coesão e angulo de atrito efetivos das amostras coletadas a 5 m e 6 m de profundidade.	54
Tabela 3.7. Fatores de Capacidade de Carga, para Ruptura Localizada, Utilizados.	55
Tabela 3.8. Inércia real total dos elementos da laje e altura de um elemento sólido retangular com inércia equivalente.	59
Tabela 3.9. Carregamento utilizado na concepção da simulação da primeira safra e das análises paramétricas no programa GARP.	63
Tabela 3.10. Carregamento utilizado na concepção da simulação da segunda safra no programa GARP.	64
Tabela 3.11. Capacidade última das estacas do anel externo e túnel central - 1ª safra.	67
Tabela 3.12. Parâmetros gerais do solos e estacas utilizados na análise numérica.....	67
Tabela 3.13. Parâmetros em valores médios utilizados na análise da primeira safra, por camada.	68
Tabela 3.14. Capacidade última das estacas do anel externo e túnel central - 2ª safra.	70
Tabela 3.15. Parâmetros em valores médios utilizados na análise da segunda safra, por camada.	70
Tabela 3.16. Parâmetros utilizados para a análise paramétrica nos programas DEFPIG e GARP.	72
Tabela 3.17. Configurações de distribuição de estacas ao longo da laje e parâmetros utilizados.	73
Tabela 4.1. Recalque médio por silo e recalque médio total da safra de 2015.	79
Tabela 4.2. Rigidez e fatores de interação para a primeira safra, via parâmetros obtidos pelo ensaio SPT.	80
Tabela 4.3. Configuração de recalques por silo, medidos em campo, para a segunda safra.	83

Tabela 4.4. Rigidez média das partes superior e inferior medidas em campo.	85
Tabela 4.5. Rigidez e fatores de interação para a segunda safra, via parâmetros obtidos pelo ensaio SPT.	85
Tabela 4.6. Rigidez média das partes superior e inferior calculadas a partir dos recalques obtidos pelo programa GARP, por meio dos parâmetros obtidos via ensaio SPT.	86
Tabela 4.7. Comparação da Rigidez Média Aferida em Campo e Pela Análise no GARP.	87
Tabela 4.8. Configurações de estaqueamento utilizadas.	88
Tabela 4.9. Porcentagem de carga nas estacas para cada fator geométrico.	114
Tabela 4.10. Porcentagem de carga nas estacas para cada diâmetro de estaca analisado.	115
Tabela 4.11. Porcentagem de carga nas estacas para cada comprimento de estaca analisado.	116
Tabela 4.12. Porcentagem de carga nas estacas para cada espessura de radier analisada.	117
Tabela 4.13. Resultado da análise paramétrica efetuada.	119

LISTA DE NOMENCLATURA, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

a	Raio do Elemento Carregado
a'	Interseção da Reta Kf com o Eixo Vertical
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	Área da região de adição das estacas
α'	Inclinação da Reta Kf
$\alpha_{PG,ult}$	Fator de Eficiência do Grupo de Estacas
α_{PP}	Fator de Interação Estaca-Estaca
α_{pr}	Fator de Distribuição de Carga
α_{PS}	Fator de Interação Estaca-Superfície
α_{RP}	Fator de Interação Radier-Estaca
$\alpha_{R,ult}$	Fator de Eficiência do Radier Isolado
α_{SP}	Fator de Interação Carga-Estaca
α_{SS}	Fator de Interação Carga-Superfície
AM-01	Amostra Retirada do Furo 01
AM-02	Amostra Retirada do Furo 02
Ap	Área da Ponta da Estaca
b	Base de Cada Elemento do Silo
β	Coefficiente que Depende do Tipo de Solo para o Método de Capacidade de Carga de Decourt-Quaresma
c	Coesão do Solo

c'	Coesão Efetiva do Solo
C	Coeficiente que Depende do Tipo de Solo e da Estaca para o Método de Capacidade de Carga de Decourt-Quaresma
C1	Configuração de Estaqueamento C1
C2	Configuração de Estaqueamento C2
C3	Configuração de Estaqueamento C3
C4	Configuração de Estaqueamento C4
C5	Configuração de Estaqueamento C5
C6	Configuração de Estaqueamento C6
C7	Configuração de Estaqueamento C7
cap	Bloco do Grupo de Estacas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ξ	Relação Entre o Módulo de Young do Solo na Cota da Ponta da Estaca e a Cota Abaixo da Ponta da Estaca
CU _{sat}	Condição Adensada Não-Drenada Saturada
D	Diâmetro da Estaca
D30	Diâmetro da Estaca do Silo D = 30 cm
D40	Diâmetro da Estaca do Silo D = 40 cm
D50	Diâmetro da Estaca do Silo D = 50 cm
DEFPIG	Deformation Analysis of Piles Groups
δ	Recalque do Radier Estaqueado
Δ_e	Varição do Índice de Vazios na Amostra

Δ_L	Espessura da Camada de Solo Referente ao Comprimento L da Estaca
$\delta_{m\acute{a}x}$	Recalque Máximo Adotado de Projeto
e	Espessura do Radier
e_0	ndice de Vazios Inicial no Ensaio Oedométrico
η	Fator de Eficiência do Grupo de Estacas
E	Módulo de Young do Solo
E_{av}	Módulo de Young Médio do Solo ao Longo do Fuste da Estaca
E_{sb}	Módulo de Young do Solo na Cota Abaixo da Ponta da Estaca
E_{sl}	Módulo de Young do Solo na Cota da Ponta da Estaca
F1, F2	Fatores de Correção de Escala do Método de Aoki-Velloso
FENF	Ferramenta Numérica para Análise de Fundações
FG	Fator Geométrico da Relação Entre a área do Radier e do Espaçamento Entre Eixo de Estacas
GARP	Geotechnical Analysis of Rafts with Piles
h	Altura de Cada Elemento do Silo
H	Altura do Silo
i	ndice de Colapso do Terreno
I	Inércia dos Elementos da Base do Silo
K_f	Envoltória de Ruptura que Intercepta o Centro do Círculo de Mohr
K_{p0}	Rigidez da Estaca em Comportamento Linear
K_{p1}	Rigidez da Estaca em Comportamento Não-Linear

K_P	Rigidez da Estaca Isolada
K_{PG}	Rigidez do Grupo de Estacas
K_{PR}	Rigidez do Radier Estaqueado
K_R	Rigidez do Radier Isolado
L	Comprimento da Estaca
L16	Comprimento da Estaca do Silo L = 16 m
L20	Comprimento da Estaca do Silo L = 20 m
L24	Comprimento da Estaca do Silo L = 24 m
M.E.C.	Método dos Elementos de Contorno
M.E.F.	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
N_c, N_q, N_γ	Fatores de Capacidade de Carga da Equação de Terzaghi
N_c', N_q', N_γ'	Fatores de Capacidade de Carga Corrigidos da Equação de Terzaghi
N_L	Índice de Resistência à Penetração, N_{SPT} , Médio na Camada de Solo de Espessura Δ_L
N_{SPT}	Índice de Resistência à Penetração do ensaio SPT
ν	Coefficiente de Poisson do Solo
p	Carregamento Uniforme Aplicado na Superfície do Terreno por Unidade de Área
p'	Coordenada da Trajetória de Tensões dada por $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$
PDR	Método Poulos-Davis-Randolph

P_u	Carga Última das Estacas
q'	Coordenada da Trajetória de Tensões dada por $(\sigma'1 - \sigma'3)/2$
$Q_{estaca, i}$	Carga de uma Estaca i
Q_{pg}	Carga Resultante no Grupo de Estacas
$Q_{PG,ult}$	Capacidade de Carga do Grupo de Estacas
Q_{pr}	Carga Estrutural Aplicada
$Q_{PR,ult}$	Capacidade de Carga do Radier Estaqueado
Q_r	Força Resultante no Radier
$Q_{SP,ult}^i$	Capacidade de Carga da Enésima Estaca em um Grupo Composto Por n Estacas
Q_{ult}	Capacidade de Carga das Estacas do Silo
$Q_{UR,ult}$	Capacidade de Carga do Radier Isolado
r_c	Raio do Radier Associado a uma Estaca
r_m	Raio Máximo de Influência da Estaca
r_0	Raio da Estaca
R_c	Razão Entre o Recalque de Uma Estaca com “Cap” e Outra Similar Sem o “Cap”
R_f	Fator Hiperbólico de Variação da Rigidez da Estaca
R_G	Relação Entre o Recalque Médio do Radier Estaqueado e o Recalque de Uma Estaca Isolada sem “Cap”
$\overline{R_G}$	Razão Entre o Recalque Médio do Radier Estaqueado e o Recalque de Uma Estaca Isolada, com “Cap”

ρ	Relação Entre Módulo de Young Médio do Solo ao Longo do Fuste da Estaca e na Cota da Ponta da Estaca
ρ_1	Recalque de Uma Estaca sob Carga Unitária
s	Espaçamento Entre Eixos de Estacas
S1	Silo de Armazenamento 1
S2	Silo de Armazenamento 2
S3	Silo de Armazenamento 3
S4	Silo de Armazenamento 4
S5	Silo de Armazenamento 5
S6	Silo de Armazenamento 6
S7	Silo de Armazenamento 7
S8	Silo de Armazenamento 8
σ_1	Tensão Principal Maior
σ_3	Tensão Principal Menor
σ_z	Tensão Vertical Devido a um Carregamento em uma Profundidade z
SoFIA	Soil-Foundation Interaction Analysis
SPT	Standard Penetration Test
ϕ'	Ângulo de Atrito Efetivo do Solo
z	Profundidade de Cálculo de Tensão Vertical no Maciço
U	Perímetro do Fuste da Estaca
ζ	Fator Geométrico Entre Raio Máximo de Influência da Estaca e o Raio da Estaca

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O Brasil, de modo geral, é um país tipicamente agrário em seu contexto econômico, ou seja, uma razoável parcela de sua economia se baseia na produção de *commodities* agrícolas, principalmente no que se refere à produção de grãos como soja, milho, arroz, entre outros.

De acordo dado do levantamento agropecuário 2018 realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), somente durante o período de 2016-2017 o país produziu cerca de 237 milhões de toneladas de grãos, com uma estimativa de produção para o período de 2017-2018 na faixa de 232 milhões de toneladas; sendo destes totais, uma expressa parcela, 43%, produzida pela região Centro-Oeste.

Diante deste cenário, torna-se necessária uma preocupação com a conservação do produto, como forma de garantir sua qualidade final, o que solicita cuidados no que se refere a aspectos ligados à produção, como também ao armazenamento dos grãos. Assim sendo, uma alternativa que se mostra viável e necessária para a estocagem é a construção de silos graneleiros.

Silos são construções as quais têm por finalidade o armazenamento de produto sólido, granular ou pulverulento, a granel. Podem ser projetados e construídos em diversas formas e tamanhos dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos (Alves, 2001).

Silva (2000, *apud* Rezel, 2007) define os silos agrícolas ou graneleiros como estruturas que apresentam condições necessárias para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas a granel por longos períodos de armazenamento, especificamente grãos e sementes.

Em sua configuração mais corriqueira, os silos são, de acordo a sua geometria, verticais, e geralmente feitos por chapas metálicas, além de serem compostos por elementos que auxiliam no processo de armazenagem, transporte, e também são responsáveis em garantir a estabilidade da estrutura.

Do ponto de vista do projeto de tais estruturas, os silos em geral estão submetidos a altas faixas de carregamento cíclicos e com uma mobilização rápida dos esforços, de forma que a carga transferida ao terreno requer um projeto de fundações eficaz, capaz de suportar todo o carregamento de forma a não comprometer o bom funcionamento da estrutura, o que além de causar prejuízos econômicos, colocaria em risco a segurança de trabalhadores locais.

1.1. MOTIVAÇÃO

Conciani (2016) aponta que as construções de silos se encontram, muitas vezes, em locais afastados dos grandes centros urbanos, e desta forma, de difícil acesso para tecnologias e equipamentos de construções mais modernos e adequados para a execução do projeto. Portanto, não é raro o caso de patologias em obras de armazenagem.

Ainda de acordo Conciani (2016), as patologias apresentadas pelos conjuntos de armazenagem são, em sua maioria, devidas às fundações. Destacando os recalques das lajes de fundo, recalque dos anéis, surgimento de trincas nos anéis e túneis, infiltração nos túneis e poços, deformações nas linhas de transportes sobre os silos, e deformações laterais causadas ou por força do vento ou por recalques diferenciais.

Uma configuração usual do sistema de fundações em silos é o estaqueamento em torno apenas do anel de concreto, como forma de garantir a capacidade de carga do sistema e evitar possíveis recalques da estrutura. Desta forma, a laje de fundo fica “livre” para se deslocar e sob a ação de um alto carregamento, o que pode comprometer o desempenho da estrutura, caso o solo não tenha boa capacidade de carga, gerando grande partes dos recalques sofridos pelos silos.

Assim sendo, uma solução proposta seria o aproveitamento da capacidade estrutural da laje com a associação de estacas sob ela como forma de amenizar os recalques dos silos, denominando um conjunto misto conhecido por radier estaqueado. Sales (2000), define o termo como o sistema de fundação que envolve a associação de um elemento superficial (radier ou sapata) com uma estaca ou grupo de estacas, sendo ambas as partes responsáveis pelo desempenho da fundação quanto a capacidade de carga e recalques.

Desta forma, a utilização deste sistema em obras de silos graneleiros pode se tornar uma alternativa interessante, principalmente sob condições de subsolo não favoráveis, pois devido ao alto carregamento derivado dos grãos, os recalques gerados na estrutura podem vir a inutilizá-la. Há, portanto, um ganho em questões de segurança global da estrutura e também de economia com possíveis reparos futuros, e perdas de safra por falta de local adequado para a armazenagem.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica, bem como o comportamento, da utilização do sistema de fundações em radier estaqueado em obras de silos graneleiros, verificando sua performance e buscando a otimização do sistema, baseado no bom desempenho da estrutura e economia para o projeto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Simular duas safras distintas de armazenagem de um complexo de armazenamento de grãos, por meio do programa GARP, a partir de ensaios de campo e laboratório realizados, como forma de proceder a modelagem simplificada do carregamento do terreno provindo das safras;
- Estudar o comportamento dos silos a partir da adição de estacas sob sua laje de fundo para distintas configurações de estaqueamento, de forma a considerar o sistema atuando como um radier estaqueado, procedendo uma análise paramétrica a partir da variação dos parâmetros dos elementos que compunham a estrutura principal do silo, como o comprimento e diâmetro das estacas da base, e a espessura da laje de fundo;
- Estudar o efeito de um possível fenômeno de colapso do terreno, por meio dos ensaios oedométricos realizados, com o intuito de estabelecer uma relação entre o colapso e os deslocamentos ocorridos no terreno;
- Determinar a configuração de estaqueamento que melhor atenda a critérios de segurança, visando um adequado cenário de deslocamentos e esforços atuantes nos elementos, bem como uma economia no projeto, ao se obter um número ótimo de estacas a se utilizar.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A priori, no capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica que abrange toda a temática necessária ao entendimento deste trabalho. Portanto, aborda-se conceitos referentes ao projeto e concepção dos silos graneleiros, necessários ao entendimento do problema envolvido no estudo de caso. Trata-se também sobre os principais sistemas de fundações utilizados

atualmente, mais especificamente sobre a metodologia do radier estaqueado. E por fim, aborda-se as principais considerações acerca das ferramentas numéricas utilizadas.

No capítulo 3, apresenta-se o estudo de caso escolhido para análise neste trabalho, bem como a discretização do procedimento realizado para simulação das safras de armazenamento e para a análise paramétrica efetuada. Ainda, apresenta-se a avaliação dos principais resultados dos ensaios de campo e laboratório realizados por uma empresa privada responsável, e a influência de tais resultados nos parâmetros determinados para o projeto.

No capítulo 4, apresenta-se e discute-se os resultados alcançados para os recalques obtidos em campo e por meio da simulação efetuada no programa GARP para as safras. E em uma etapa posterior, ilustra-se os resultados das análises paramétricas efetuadas, apresentando valores de recalques totais, distorção angular, momentos fletores atuantes, cargas nas estacas e pressão de contato radier-solo, para distintas configurações de estaqueamento, bem como diferentes comprimentos e diâmetros de estacas, e espessuras da laje de fundo.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões alcançadas no trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras na área.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto de fundação de um silo graneleiro requer atenção especial quando comparado aos demais casos de sistemas de fundações convencionais. Em geral, os silos estão submetidos a altas faixas de carregamento, e que devido ao efeito de sucessivas safras de armazenagem, submetem o terreno a cargas cíclicas, fatores que quando combinados, podem carregá-lo de maneira acentuada e não prevista em projeto, provocando o acúmulo de deformações residuais, podendo ocasionar a ruptura do maciço, principalmente em condições de suporte não favoráveis, como é o caso, por exemplo, de solos colapsíveis e expansivos.

Por sua vez, a ruptura do terreno acarreta na alteração da forma de distribuição dos esforços da estrutura para este, bem como na capacidade de suporte do sistema de fundação, comprometendo a integridade e bom funcionamento do silo. Portanto, tais situações levam muitas vezes à problemas de operação e de segurança do sistema de armazenagem, levando-o a consequências tanto no âmbito financeiro quanto técnico.

Em muitas situações do projeto de silos, o terreno disponível não apresenta condições favoráveis a implementação de fundações rasas sobre o solo, que pode ter baixa capacidade de suporte, ou apresentar condições especiais como ser colapsível ou expansivo. Desta forma, tem-se a necessidade de se optar pelo uso de fundações profundas, mistas, e/ou pelo uso de técnicas convencionais de melhoria do terreno, como é o caso de aterros compactados sob a laje de fundo do silo.

2.1.SILOS DE ARMAZENAMENTO

Silos são construções que têm por finalidade armazenar produto sólido, granular ou pulverulento, a granel. Para isso podem ser projetados e construídos em diversas formas e tamanhos dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos (Alves, 2001).

Conforme Freitas (2001) silo é o nome atribuído a todos os tipos de construção para armazenamento de produtos granulares ou pulverulentos, e que geralmente são equipados com dispositivos de descarga, o que o torna capaz de ser esvaziado por gravidade, preferencialmente, ou por meio de instrumentos mecânicos ou pneumáticos.

Os silos caracterizam-se por apresentar células ou compartimentos estanques e herméticos ou semi-herméticos, e que possibilitam o mínimo de influência do meio externo com o ambiente de estocagem, oferecendo condições técnicas de conservação do produto estocado por período de tempo normalmente prolongado (Calil Junior, 1978).

Em sua maioria, os silos são construídos com os mais diversos materiais, tais como concreto, madeira, argamassa armada, alvenaria estrutural, entretanto há no Brasil a predominância da utilização de chapas metálicas corrugadas galvanizadas para a construção destas estruturas, Figura 2.1. (Nascimento, 2008).



Figura 2.1. Estrutura típica dos silos metálicos atuais. (Kepler Weber, 2017)

O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço físico, mão-de-obra, e custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado (Palma, 2005).

De acordo Freitas (2001) uma unidade armazenadora, desde que bem projetada e conduzida, apresenta as seguintes vantagens:

- Obtenção de um produto final bem conservado, longe do ataque de animais;
- Estocagem racional, segura e principalmente econômica, onde o produtor evita gastos com sacarias e mão-de-obra para o ensacamento;
- Economia de transporte, pois os preços do frete aumentam durante o período de safra;

- Diminuição do custo de transporte haja vista a eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem dos grãos.

A finalidade do armazenamento de produtos agrícolas tem como objetivo manter sua integridade ao longo de longos períodos de tempo preservando a sua duração, sua qualidade biológica, química e física, imediatamente após a colheita. Silva Neto (2013) afirma que o armazenamento prolongado de um produto só pode ser realizado quando se adotam corretamente as práticas de colheita, limpeza, secagem e combate a insetos, fungos e roedores, bem como um processo eficiente de aeração. Assim sendo, as etapas de operação em silos devem garantir a menor degradação possível de forma a obter uma melhor qualidade final do produto.

Dentre as várias classificações dos silos, ressalta-se neste trabalho aquelas relacionadas à construção em relação ao solo, quanto à sua forma geométrica, e por fim quanto à troca de ar com o meio externo.

Cheung (2007) classifica os silos em 3 categorias quanto à construção em relação ao solo:

- Silos elevados ou aéreos: são caracterizados por serem construídos acima do nível do solo;
- Silos subterrâneos: são aqueles em que os compartimentos para a estocagem se localizam abaixo do nível do solo. Em relação aos silos elevados são construções mais simples, porém mais suscetíveis à infiltração e apresentam descarregamento mais difícil;
- Silos semi-subterrâneos: apresentam características intermediárias aos tipos anteriores.
- De acordo Palma (2005), quanto à sua geometria, os silos podem ser classificados em:
- Silos esbeltos: silos onde a relação entre a altura da célula e seu diâmetro é superior ou igual a 1,5 ($H/D \geq 1,5$);
- Silos baixos: silos em que a relação altura da célula e seu diâmetro é inferior a 1,5 ($H/D < 1,5$).

Cheung (2007) classifica ainda os silos quanto à entrada de ar:

- Silos herméticos: silos que não permitem a troca de ar entre o interior da célula e o exterior;
- Silos não-herméticos: silos que permitem a troca de ar com o exterior.

2.1.2. Partes Constituintes De Uma Unidade Armazenadora

Fortes Filho (1985) buscou de maneira simplificada agrupar as principais partes constituintes de uma unidade armazenadora, definindo esta como o conjunto que engloba tanto os depósitos propriamente ditos, onde fica o material armazenado, como a construção que envolve as máquinas para transporte, conservação, beneficiamento, mistura e demais operações do produto ensilado. Assim, os principais elementos que compõe uma estrutura corriqueira de silos são compostos por:

- **Célula:** a célula é um compartimento destinado ao armazenamento do material a ser preservado. Em sua forma mais comum são prismáticas e cilíndricas cujo eixo coincide com a vertical. Um silo pode ter uma ou mais células, denominando-se no primeiro caso, silo unicelular ou de célula única, e no segundo caso, silo multicelular ou de várias células. De maneira geral, os silos multicelulares têm maior altura que os unicelulares. Alguns fatores que limitam a altura da célula são a capacidade de carga do solo, o processo de carga e descarga, o tipo e volume de material armazenado e fatores econômicos. As células são construídas com os mais diversos materiais de construção sendo os mais utilizados o concreto armado e chapas metálicas lisas, onduladas e corrugadas. (Fortes Filho, 1985).
- **Fundo da célula:** o fundo da célula pode ser plano, ou ter a forma de um funil, recebendo então a denominação de tremonha. Normalmente o fundo da célula é construído com concreto armado ou com chapas metálicas. É pelo fundo de célula, por uma saída denominada abertura de descarga ou orifício de saída, que o material ensilado deixa a célula, sendo descarga a denominação dada à retirada do material do interior da célula, podendo ser realizada por ação da gravidade ou por meio de equipamentos apropriados. Quando o centro do orifício coincide com o eixo da célula tem-se uma descarga centrada, caso contrário, tem-se uma descarga excêntrica (Fortes Filho, 1985).
- **Fundações:** é comum o uso de vários tipos de fundações para a sustentação dos silos, como sapatas, radiers, estacas, entre outros. De modo geral, os silos de pequeno porte com uma única célula estão geralmente assentados sobre sapata corrida, que recebe o peso das paredes da célula, enquanto que o fundo do silo, está diretamente apoiado no solo, havendo também casos de se ter a placa sustentada por estacas. No caso de as paredes estarem apoiadas por vigas e pilares, estes transmitem as forças que suportam através de sapatas ou conjunto de estacas. No caso dos silos de várias células, as cargas

são transmitidas ao solo por meio de sapatas, radiers, estacas ou tubulões (Fortes Filho, 1985).

- Pilares ou apoios: o silo propriamente dito pode está apoiado diretamente no solo, ou afastado deste apoiando-se em pilares que levam às fundações e estas ao solo o carregamento da estrutura. Quando há a presença de pilares, a distribuição destes é condicionada pela distribuição das células do silo, pela localização da maquinaria e do acesso de veículos a determinado ponto abaixo das células (Fortes Filho, 1985).
- Cobertura: em silos de concreto e de chapas metálicas é comum a cobertura ser constituída pelo mesmo material das paredes das células. As coberturas de silos unicelulares são comumente placas, cúpulas, ou telhados convencionais, possuindo em alguns casos aberturas para enchimento e entradas de pessoas na célula. Nos silos multicelulares de concreto tem-se quase sempre uma placa cobrindo todas as células e acima desta vir a cobertura propriamente dita, que é formada por outra placa de concreto. Nos silos multicelulares de chapas corrugadas, cada célula tem sua cobertura (Fortes Filho, 1985).
- Torre: denominada por coração do silo, abriga o centro de controle do silo e a totalidade ou parte dos vários equipamentos necessários para as operações básicas de armazenamento, podendo localizar-se em posição central ou lateral ao conjunto de células (Fortes Filho 1985).

No que tange um único silo, Scalabrin (2008) define duas partes constituintes como principais: o telhado e o corpo do silo, Figura 2.2. O telhado é composto por telhas que podem ser autoportantes, ou podem estar apoiadas sobre a estrutura do mesmo. Já o corpo do silo é dividido em algumas partes principais:

- Chapa lateral: chapas perfiladas que são montadas nos silos, formando anéis cuja espessura varia conforma a carga que deverão resistir (Scalabrin, 2008).
- Montantes: denominação dada às colunas dos silos que podem ser montadas no interior ou exterior do corpo do silo, funcionando como pilares deste (Scalabrin, 2008).
- Anéis de reforço: elementos utilizados com o objetivo de enrijecer o silo quando este encontra-se sujeito a pressões de vento que não podem ser absorvidas somente pela chapa e montante, auxiliando estes na absorção dos esforços e os distribuindo para a fundação (Scalabrin, 2008).



Figura 2.2. Principais componentes de um silo metálico. a) Telhado b) Chapas e Montantes (Scalabrin, 2008)

Conciani (2016) detalha ainda mais sobre a forma de ligação entre os elementos que compõem um silo metálico em si, por ser atualmente os mais utilizados para a armazenagem de grãos, citando as chapas metálicas que são assentes sobre um anel de concreto que suporta toda a carga do conjunto e recebe os chamados montantes. Os montantes funcionam como “pilares” que recebem a carga vertical do produto e da própria estrutura e são fixos em uma espora metálica ancorada no anel. As cargas do anel são transferidas ao solo principalmente por fundação profunda.

Uma solução comumente utilizada em silos é a escavação de uma galeria ou túnel abaixo da célula, Figura 2.3, que abrigará a correia transportadora para retirada dos grãos no sentido horizontal. De acordo Leite (2008) a disposição de túneis abaixo dos silos é feita ao longo de um dos eixos do sistema de células e torna-se uma solução muito vantajosa ao permitir o escoamento dos grãos por gravidade.

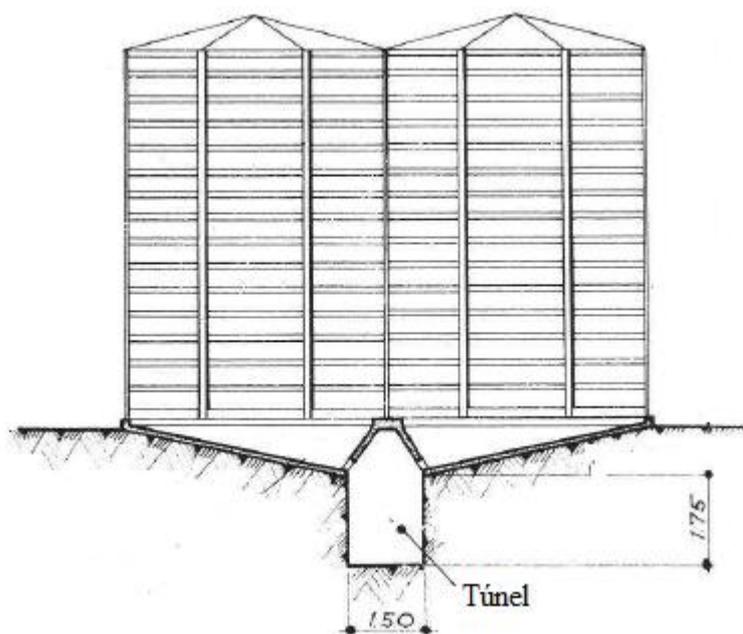


Figura 2.3. Exemplo de Silo com Galeria ou Túnel para a Saída dos Grãos. (Adaptado de Leite, 2008)

2.1.3. Peculiaridades e Recomendações de Projeto

De acordo Madrona (2008) o projeto completo de uma unidade armazenadora inclui o projeto estrutural e o projeto de fluxo. O projeto estrutural diz respeito a garantia de segurança e estabilidade da edificação para que esta resista aos esforços solicitantes de maneira a não atingir os estados limites último e de serviço. O projeto de fluxo relaciona-se com a funcionalidade da unidade, garantindo a completa descarga do produto sem que ocorram problemas de obstrução de fluxo.

Atualmente não há no Brasil uma norma reguladora para o projeto de sistemas de armazenagem, de forma que é comum os projetos se basearem em estudos realizados na área ou normativas internacionais. De acordo Silva Neto (2013) a não existência de um sistema de codificação brasileiro para projetar silos, não se tornou um fato limitante ao desenvolvimento da indústria construtora de silos, porém se faz necessário seguir um roteiro seguro, quando do projeto de um silo.

A correta determinação das ações que atuam em silos é fator de extrema relevância para a obtenção de estruturas seguras e econômicas. Para tanto se faz necessário o entendimento da operacionalidade do silo, uma vez que o fluxo da massa estocada é um item de grande

importância no dimensionamento de estruturas de armazenamento e é influenciado principalmente pela geometria do silo, o tipo de fundo e as propriedades físicas do produto a ser armazenado (Silva Neto, 2013).

Ensaio em silos reais, mostram que as ações devido ao armazenamento podem ser distribuídas de maneira assimétrica, e que as ações de fluxo são sujeitas a grandes variações inerentes ao processo (Nascimento, 1996).

Nascimento (1996) afirma que as principais ações a serem consideradas no projeto de silos são aquelas provenientes dos produtos armazenados, possíveis de ocorrerem durante sua vida útil, de forma que se torna necessário avaliar as combinações destas, seguindo o grupo de ações prescritos na NBR 8681/1984 - Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento, que classifica as ações em permanentes, variáveis e excepcionais.

As ações permanentes são aquelas constituídas pelo peso próprio da estrutura, da plataforma e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e/ou suspensos pela tremonha (Nascimento, 1996).

As ações variáveis são compostas pela carga acidental devido ao produto armazenado (analisando as fases de carregamento do silo e do fluxo do material), forças das correias transportadoras presas à estrutura do silo, pressão ou sucção interna dos gases ou pós extraídos dos grãos, forças de contenção lateral, força de fixação de elementos externos na estrutura, ação do vento, ações devido ao recalque diferencial da fundação, ação devido ao diferencial de temperatura, e expansão do produto devido a variação de sua umidade (Nascimento, 1996).

As ações excepcionais incluem o possível impacto de veículos que trafeguem na área, e também a pressão de explosão de pós, onde alguns produtos armazenados podem possuir partículas finas inflamáveis ou emitir gases incendiáveis durante o armazenamento (Nascimento, 1996).

Os esforços devido ao peso do material ensilado, dependem primordialmente das características deste. Assim sendo, é de extremamente relevante a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados. Palma (2005) cita como principais propriedades a densidade do material, granulometria, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede, e propriedades de fluxo.

Conforme Leite (2008), um silo é sempre dimensionado para determinado material, e caso haja armazenamento de múltiplos materiais ao longo da vida útil do silo, deve-se dimensionar para a pior situação, ou seja, para o material que apresente propriedades que afetem de maneira mais danosa ao silo.

A caracterização das propriedades dos materiais ensilados é atualmente feita através de testes de cisalhamento, por meio de um aparelho denominado aparelho de Jenike ou “*Jenike Shear Cell*”, como ilustrado na Figura 2.4.

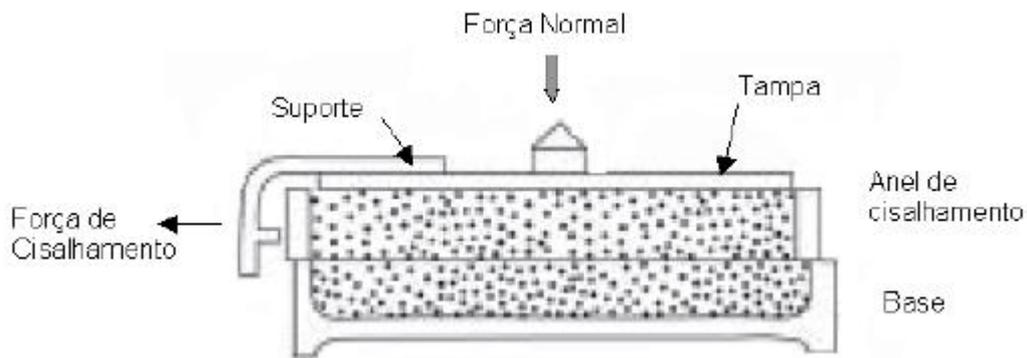


Figura 2.4. Esquema da célula de cisalhamento de Jenike, utilizada na determinação das propriedades dos materiais ensilados. (Palma, 2005)

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos produtos agrícolas é de fundamental importância para uma correta conservação e para o projeto de dimensionamento, construção e funcionamento dos diversos equipamentos utilizados nas principais operações após à colheita (Silva Neto, 2013).

Calil Junior *et al.* (1997) apontam que a caracterização física do material é o primeiro passo para o projeto de fluxo e estrutural dos silos, devendo ser realizada em condições mais severas daquelas que podem ocorrer efetivamente, de forma que envolva a determinação de parâmetros como densidade do material, granulometria, ângulo de atrito, bem como os limites superior e inferior de tais propriedades, que influenciarão no cálculo das pressões que ocorrerão na estrutura.

De maneira geral, Conciani (2016) aponta informações técnicas gerais que são relevantes na elaboração do projeto de estruturas de armazenagem:

- Tecnologias construtivas disponíveis na região;
- Formato da obra e dimensões do empreendimento para determinação das características mecânicas dos materiais de construção escolhidos;
- Características físicas dos materiais a serem estocados para cálculo dos esforços atuantes;

- Perfil detalhado do solo incluindo o nível freático para eventual ajuste do projeto e dimensionamento das fundações.

2.1.4. Aspectos Geotécnicos de Obras de Silos Graneleiros

Os silos são estruturas relativamente esbeltas com um pequeno diâmetro comparado com sua altura. Como resultado, são produzidas altas tensões axiais em sua base devido ao peso do material ensilado e da estrutura, fazendo com que o solo de suporte fique geralmente sujeito a altas pressões de compressão uniformes, oriundas da aplicação das cargas (Dogangun *et al.*, 2009).

De acordo Fortes Filho (1985), nos silos, diferente do que acontece em edificações corriqueiras, grande parte da carga no solo é aplicada após a conclusão da construção, em um período de tempo relativamente curto, o que pode acarretar ruptura de solos argilosos com baixa permeabilidade, ou recalques imediatos consideráveis.

As sucessivas faixas de carregamento e descarregamento das células do silo, ocasionam variações nos valores das tensões no solo, que provocam alteração no valor do módulo de deformabilidade deste e o surgimento de deformações residuais e permanentes. O módulo de deformação tende a aumentar com as sucessivas variações de tensões, até atingir um valor estável superior ao inicial, sendo que as deformações acumuladas durante as variações de tensões podem ser consideráveis (Fortes Filho, 1985).

É comum, em silos compostos por mais de uma célula, algumas ou todas as células estarem carregadas com um nível de material ensilado diferente, o que pode acarretar grandes variações de pressões no solo, conduzindo ao aparecimento de recalques diferenciais danosos à estrutura; assim sendo, deve-se analisar as várias combinações de carga no cálculo da fundação (Fortes Filho, 1985).

No que tange o projeto de fundações, Conciani (2016) aponta que de forma geral, estes elementos são projetados com base em modelos empíricos ou semiempíricos, e atribui este aspecto ao fato de haver grande dificuldade na obtenção de parâmetros de projeto. Este fato atribui-se principalmente à resistência cultural entre empreiteiros, que ainda existe, em se realizar ensaios de investigação adequados à caracterização do terreno, bem como, em alguns casos, devido à distância do local de construção dos silos para os locais de realização de ensaios.

Devido às limitações de acesso para equipamentos e materiais, muitas soluções que estão disponíveis em grandes cidades não chegam às regiões de produção agrícola. Assim sendo, as soluções mais comumente empregadas para as fundações limitam-se a estacas escavadas, devido a simplicidade de equipamento e facilidade de concretagem (Conciani, 2016).

O projeto de fundação dos silos deve ser elaborado de maneira mais cuidadosa quando comparado aos demais tipos de estruturas. Dogangun *et al.* (2009) apontam algumas hipóteses passíveis de ocorrer durante o processo de carregamento, armazenamento e descarregamento, como por exemplo o carregamento não uniforme do silo pode gerar uma distribuição de pressões irregulares na base e gerar danos à estrutura, devido ao peso do material, o que provoca distorção do bulbo de pressões abaixo do silo, e enfim a concentração de tensões localizadas no solo abaixo da fundação pode causar inclinação da estrutura, recalques diferenciais e até mesmo colapso.

De acordo Conciani (2016) as patologias apresentadas pelos conjuntos de armazenagem são, em sua maioria, devidas às fundações. As patologias mais comuns são recalques da laje de fundo, recalque dos anéis externos, trincas nos anéis e nos túneis centrais, infiltrações nos túneis e poços, deformações nas linhas de transportes sobre os silos, situações que podem comprometer ou até mesmo interromper o funcionamento dos silos, como pode ser observado na Figura 2.5.

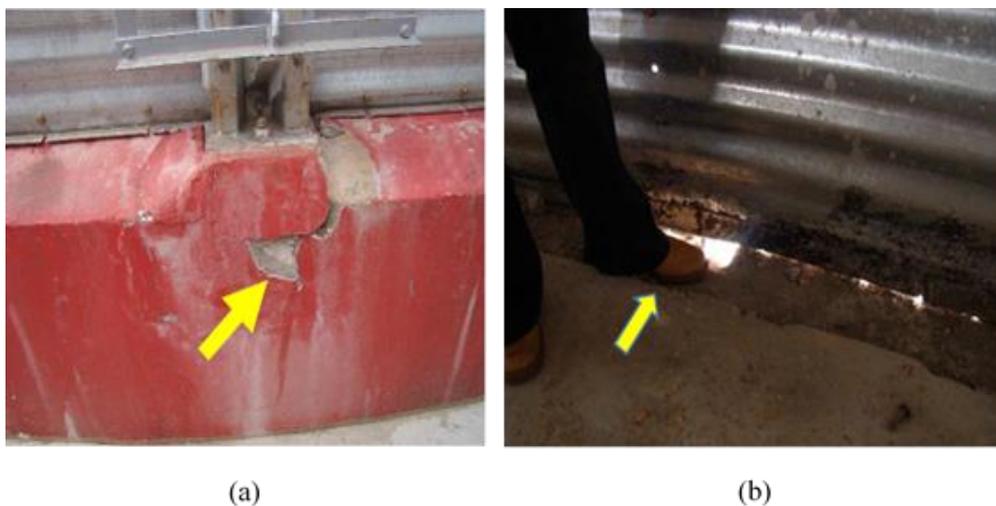


Figura 2.5. Patologias comumente encontradas em silos: a) Região da espera do montante danificada b) Desnível do fundo do silo em relação ao anel (Conciani, 2016)

Um aspecto importante na solução de fundações empregadas na construção de silos é a construção de um aterro para elevação do piso geralmente com o próprio material disponível no terreno. Este aterro, cuja altura pode variar de algumas dezenas de centímetros até alguns metros, tem a finalidade principal de nivelar o solo onde o conjunto será construído e de reduzir a profundidade de escavação para a instalação dos túneis (Conciani, 2016). Em alguns casos, este componente auxilia no melhoramento das condições geotécnicas de alguns maciços, como é o caso de regiões com solos colapsíveis ou expansivos.

2.2. SISTEMAS DE FUNDAÇÕES

Os elementos de fundação são os responsáveis por transmitir ao terreno a carga advinda da superestrutura. Esta forma de transmissão pode se dar de distintas maneiras a depender das dimensões e geometria do elemento, bem como das características geotécnicas do perfil de solo. Atualmente, para a escolha do sistema de fundações mais adequado a cada situação, o projetista conta com uma gama de possibilidades de elementos e deve se atentar na escolha que apresente melhor desempenho com o menor custo.

De maneira geral, a NBR 6122 (ABNT, 2010) que trata do projeto e execução de fundações, contextualiza os dois principais tipos de fundações utilizados em projetos:

- Fundação superficial (rasa ou direta): elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao nível de referência do terreno é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Exemplo: sapatas, blocos e radiers;
- Fundação profunda: elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por meio de sua superfície lateral (resistência de fuste) ou ainda por uma combinação das duas, de modo que sua ponta ou base deve estar assente em profundidade superior ao sobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo à 3 metros. Exemplo: estacas e tubulões.

Castillo (2013) apresenta e conceitua os principais tipos de sistemas de fundações empregados atualmente, Figura 2.6, considerando um carregamento horizontal (H), vertical (P) e de momento (M):

- Estacas isoladas: elementos de fundação profunda que são cravados ou escavados no terreno, transmitindo os esforços da superestrutura para este em forma de resistência lateral do fuste e da ponta;
- Radier isolado: são placas de concreto que recebem as cargas provenientes de todos os pilares da estrutura e as transmitem para o terreno de forma direta, são geralmente empregados quando o terreno apresenta aceitável resistência geotécnica;
- Grupo de estacas: designação atribuída à união de estacas por meio de um bloco de concreto de elevada rigidez, que ajuda a distribuir as cargas para as estacas de maneira proporcional, de forma que não se leva em consideração o contato entre o bloco e o solo para a distribuição das tensões no terreno;
- Radier estaqueado: é o elemento formado a partir da associação de estacas com o radier ou placa. Difere-se do grupo de estacas convencional por considerar em projeto o contato entre o bloco ou radier com o solo, assim sendo, o elemento superficial passa a contribuir na absorção de cargas derivadas da superestrutura;
- Radier estaqueado combinado: Aplica-se aqui a mesma definição anterior, porém neste caso há a presença de uma camada de solo melhorada, aterro compactado, que funciona como reforço superficial caso o terreno não apresente características geotécnicas favoráveis, incrementando desta forma a rigidez em conjunto e absorvendo uma porcentagem dos esforços atuantes sobre o solo.

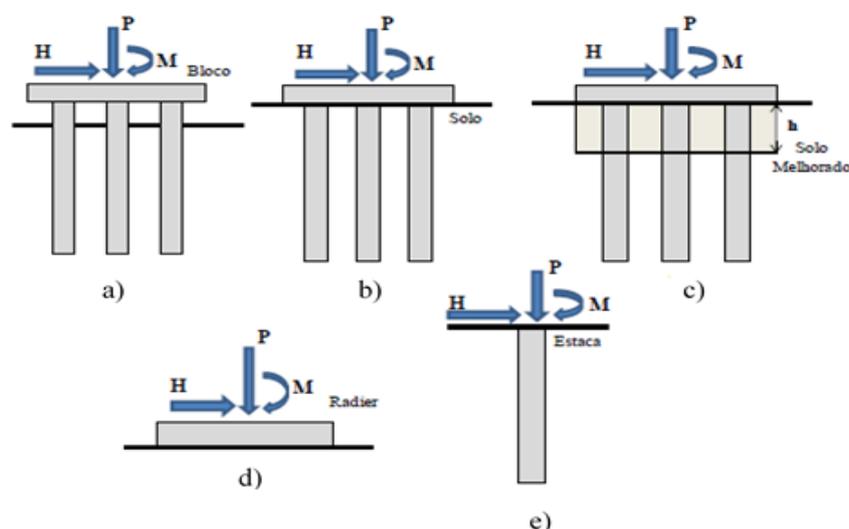


Figura 2.6. Principais tipos de sistemas de fundações: a) grupo de estacas, b) radier estaqueado, c) radier estaqueado combinado, d) radier isolado, e) estaca isolada (Castillo, 2013)

2.3. METODOLOGIA DO RADIER ESTAQUEADO

2.3.1. Conceitos e Abordagem do Sistema Em Radier Estaqueado

Um sistema de fundação em radier estaqueado constitui-se pela associação de um elemento superficial, o radier, com elementos profundos, as estacas, constituindo assim um sistema misto. Desta forma, o elemento final apresenta comportamento diferente daquele característico da estaca e radier isolados, haja vista a interação entre seus elementos que apresentam desempenho distintos.

Janda *et al.* (2009) definem o sistema em radier estaqueado como aquele em que ambos os componentes estruturais (estacas e radier) interagem entre si e com o solo circundante para suportar cargas verticais, horizontais e de momento advindas da superestrutura.

Conforme Soares (2011) a premissa do uso do radier estaqueado é obter vantagem do contato entre o solo e o bloco ou radier, de forma que este último pode ser dimensionado, tanto para aumentar o suporte de carga da fundação, como para reduzir o número de estacas necessárias no controle de recalques.

Mandolini & Di Laora (2017) afirmam que a inclusão de estacas sob um radier tem entre outros objetivos específicos aumentar a resistência e rigidez global do radier, e reduzir o recalque total e diferencial do conjunto.

De acordo Cordeiro (2017) o uso do radier estaqueado vem ganhando cada vez mais espaço tanto devido ao aumento de edifícios mais altos em áreas de projeção menores, como também em pequenos edifícios, pois a adição de estacas ao sistema de fundação contribui na melhora da capacidade de carga e no controle dos recalques.

Segundo Poulos *et al.* (2011) a aplicação mais efetiva para o uso do radier estaqueado se dá quando o radier apresenta por si só a capacidade de carga adequada para o problema, porém seu desempenho quanto a recalques totais e/ou diferenciais é inadequado. Uma vez instaladas sob o radier, as estacas são então utilizadas para controle de recalque, trabalhando com a maior parte da rigidez do sistema para as cargas de trabalho.

Katzenbach *et al.* (1998, apud Poulos *et al.*, 2011) comentam que a pressão aplicada pelo radier no solo pode aumentar a tensão lateral entre as estacas subjacentes e o solo, e assim aumentar a capacidade de carga última das estacas quando comparadas as estacas isoladas.

De acordo Sousa & Cunha (2005) o bloco ou radier ao exercer tensões sobre o solo, compartilha com as estacas a divisão de cargas que antes eram absorvidas somente pelas estacas no caso de grupos sem contato radier/solo. A partir do momento em que há o contato, maior interação ocorrerá entre os elementos de fundação, proporcionando ao radier maior capacidade de suporte e melhor desempenho quanto a recalques.

Como em todo o projeto de fundação, o projeto de um radier estaqueado requer a consideração de questões como a capacidade de carga última do sistema, recalques máximos, recalques diferenciais, momentos e esforços cortantes no radier para seu projeto estrutural, bem como as cargas e momentos nas estacas (Poulos, 2001).

Após uma série de análises em solos com diferentes perfis, Poulos (2000) aponta alguns casos em que o uso do radier estaqueado é recomendado, como no caso de solos compostos por argilas relativamente rígidas ou areias relativamente compactas. Em ambos os casos o radier pode fornecer uma significativa parcela da capacidade de carga requerida e rigidez do sistema, de forma que as estacas agem melhorando a performance da fundação.

Da mesma forma, Poulos (2000) cita casos desfavoráveis para o uso do sistema como por exemplo solos contendo argilas moles ou areias fofas perto da superfície, solos que contém camadas compressíveis moles em profundidades rasas, solos que são mais prováveis de sofrer recalques por adensamento, solos colapsíveis e solos expansivos. Contudo em condições desfavoráveis de terreno, onde o projetista ainda optar pela adoção do sistema em radier estaqueado, torna-se passível a utilização de técnicas de melhoramento da capacidade de suporte do terreno, como é o caso de aterros compactados.

Cordeiro (2017) afirma que quando o solo competente não estiver na superfície do terreno, a decisão de incluir estacas na fundação pode ser feita com base nos recalques excessivos de fundações em radiers isolados.

Embora o desempenho de um radier estaqueado seja baseado na redução de recalque do sistema de fundação, a economia do projeto advém do número de estacas utilizadas. Cabe então ao projetista decidir um número ótimo de estacas a partir da distribuição de carga entre o radier e os elementos profundos (Cordeiro, 2017).

Conforme Mandolini (2003) uma fundação em radier estaqueado é composta por um sistema formado por três elementos: radier, estacas e solo. Quando sujeito a uma carga estrutural vertical, Q_{pr} , o radier a distribui para o solo por meio de pressão de contato, gerando uma força resultante Q_r , assim como o grupo formado por n estacas, com uma força resultante Q_{pg} , desta

forma a carga total aplicada no radier estaqueado é composta por duas parcelas, conforme ilustrado na Equação 2.1:

$$Q_{pr} = Q_r + Q_{pg} = Q_r + \sum_{i=1}^n Q_{estaca,i} \quad (2.1)$$

Por meio da expressão anterior, Mandolini (2003) pode definir o coeficiente α_{pr} , um fator de distribuição de carga, que descreve a proporção de carga compartilhada entre as estacas e o radier, sendo descrito pela Equação 2.2:

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{estaca,i}}{Q_{pr}} \quad (2.2)$$

Desta forma, uma fundação composta por um radier isolado sem estacas apresenta um coeficiente $\alpha_{pr} = 0$, fundações compostas por grupo de estacas onde o bloco ou radier não se encontram em contato com o solo possuem coeficiente $\alpha_{pr} = 1$, e por fim as fundações em radier estaqueado apresentam o coeficiente na taxa $0 < \alpha_{pr} < 1$, como pode ser ilustrado na Figura 2.7.

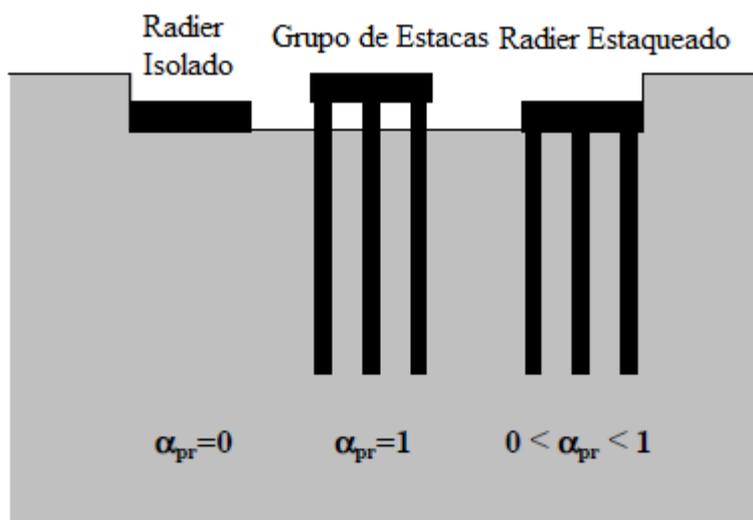


Figura 2.7. Sistemas de Fundações e suas Divisões de Cargas. (Mandolini, 2003).

Tradicionalmente dimensiona-se o grupo de fundações para trabalhar por meio de suas estacas, sem considerar qualquer contribuição do *cap* (radier ou bloco) na capacidade de carga do conjunto (Cordeiro, 2017). Porém, a técnica do radier estaqueado, ao trabalhar com a interação entre os elementos que compõem o sistema, leva em conta o auxílio de todos os elementos no desempenho do conjunto final. Pode-se assim dizer que a metodologia consiste em um grupo de estacas dimensionado de maneira mais adequada quando comparada à abordagem tradicional. Portanto, a diferença entre o radier estaqueado e o grupo de estacas convencional é atrelada apenas quanto ao projeto, não havendo discrepância no quesito executivo.

Conforme recomendado por Mandolini (2003), a capacidade de carga do sistema em radier estaqueado é dada pela Equação 2.3:

$$Q_{PR,ult} = \alpha_{R,ult} \cdot Q_{UR,ult} + \alpha_{PG,ult} \cdot Q_{PG,ult} \quad (2.3)$$

Onde,

$Q_{UR,ult}$ = capacidade de carga do radier isolado;

$\alpha_{R,ult}$ e $\alpha_{PG,ult}$ = fatores de eficiência do radier isolado e do grupo de estacas, respectivamente, sendo assumidos valores menores do que um.

$Q_{PG,ult}$ = capacidade de carga do grupo de estacas, sendo expressa pela Equação 2.4:

$$Q_{PG,ult} = \eta \cdot \sum_{i=1}^n Q_{SP,ult}^i \quad (2.4)$$

Onde,

$Q_{SP,ult}^i$ = capacidade de carga da i -ésima estaca em um grupo composto por n estacas;

η = fator de eficiência do grupo de estacas, que depende do tipo de estaca e de solo.

2.3.2. Trabalhos Recentes Em Radier Estaqueado No Centro-Oeste

Cordeiro (2017), em seu trabalho “Modelagem Física de Radiers Estaqueados Com e Sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia”, avaliou o comportamento do sistema em radier estaqueado por meio da realização de provas de carga em escala reduzida com tensões 1g. Para tanto, utilizou placas rígidas e tubos de alumínio assentes em areia e realizou 20 testes em radiers com 4, 9 e 16 estacas sob carregamento vertical, em tanque de ensaio cilíndrico metálico, com o intuito de avaliar qualitativamente o comportamento do sistema com e sem a presença de estacas defeituosas, simulando os danos por meio da variação do comprimento das estacas em 50%L e 0%L, sendo “L” o comprimento da estaca íntegra.

Após a variação de parâmetros como a posição do dano ao longo do radier, geometria do sistema e nível de carregamento, Cordeiro (2017) concluiu que para a configuração de radier com 4 estacas houve uma perda superior a 20% na capacidade de carga do sistema, independente da intensidade do dano. Para a configuração composta por 9 estacas, a maior perda de capacidade de carga foi da ordem de 10%, sendo a situação mais crítica aquela onde houve a retirada de uma estaca de canto, 0%L, ou seja, considerando perda total do comprimento da estaca. O comportamento do grupo de 16 estacas apresentou menor variação em relação ao sistema composto por estacas íntegras, mesmo em relação a posição e nível do dano, atingindo cerca de 6,5% de perda de capacidade de carga.

Collantes (2017) analisou a influência da posição e do número de estacas que integravam um sistema em radier estaqueado em um solo do Distrito Federal, bem como a quantidade de camadas inseridas no modelo (uma e quatro camadas), através da utilização do método dos elementos finitos, por meio do programa ABAQUS, aplicando no sistema um carregamento vertical e horizontal, como forma de se obter os resultados em relação a recalques e distribuições de tensões no maciço. Para critérios de calibração do modelo, realizou análise por meio de dois modelos constitutivos, o primeiro deles o modelo elástico-linear, e o segundo o modelo elasto-plástico de Mohr Coulomb.

Como resultado, Collantes (2017) encontrou razoável precisão na análise com a modelagem feita pelo ABAQUS e os modelos constitutivos, onde como esperado o recalque do sistema diminuiu com o aumento do número de estacas, até atingir um número ótimo de estacas onde já não se haveria incremento significativo na redução dos recalques. No caso do solo composto por uma única camada, os recalques máximos no centro do radier variaram de 5,9 cm, no caso

do radier isolado, para 4,6 cm, considerando um total de 25 estacas ao longo do radier. Houve um alívio nas tensões verticais no maciço com o incremento do número de estacas acima da cota de 10 m de profundidade, tanto no centro do radier quanto a uma distância de 1,5 m deste. Quanto às tensões horizontais, houve uma diminuição destas, com o aumento do número de estacas, até uma profundidade acima da ponta da estaca de aproximadamente 2 vezes o seu diâmetro, onde em profundidades inferiores a esta, o processo se inverteu.

Rincon (2016) estudou a influência do processo de adensamento em solos moles no comportamento de sistemas em radier estaqueado, principalmente no que tange aos esforços desenvolvidos nas estacas e os recalques obtidos com a variação da condição de saturação da camada de solo, do carregamento imposto a esta, bem como dos parâmetros das estacas. Para tanto, o autor procedeu testes em escala reduzida por meio de centrífuga geotécnica, simulando uma camada impermeável sobre uma camada permeável de argila, variando a poropressão desta.

Os principais resultados obtidos por Rincon (2016) demonstram que durante o abatimento da poropressão os recalques para o radier isolado foram maiores do que aqueles para o caso do radier estaqueado. Ainda, para o radier estaqueado, os recalques devido ao adensamento apresentaram influência sobre o espaçamento entre as estacas, de modo que, a deformação medida foi maior para as configurações em que as estacas estavam agrupadas no centro do radier, quando comparada àquela em que as estacas se encontravam distribuídas por toda a sua área. Por fim, à medida em que se permitiu o adensamento das camadas de solo, devido à perda de contato entre radier-solo, o incremento do número de estacas e seu espaçamento, deixa de ser eficiente na redução dos recalques totais do sistema.

Sousa (2014) realizou estudos em radier estaqueado prevendo o comportamento do solo a partir de análises lineares e não lineares, através do programa FENF, *Ferramenta Numérica para Análise de Fundações*, variando o número de estacas no radier em, 4, 16 e 36 estacas, e a composição do solo, sendo este em condição homogênea ou heterogênea.

Para a condição de solo homogêneo, ao se analisar o recalque do conjunto, bem como apenas do radier, este aumentou em torno de 200% para a análise não-linear do solo quando comparado à análise linear. Quanto aos esforços no radier, Sousa (2014) encontrou comportamento razoavelmente semelhante para a análise linear e não-linear, tanto em questões de momentos quanto em relação a tensões ao longo do bloco. Para a distribuição de carga nas estacas, aplica-se a mesma conclusão encontrada para os esforços no radier, comportamento semelhante para

a análise linear e não-linear, diminuindo a carga ao longo da profundidade, de forma que as estacas de canto apresentaram maior carregamento em relação as estacas centrais, nas duas análises.

Para a condição de solo heterogêneo, feita apenas para a configuração com 16 estacas e variando a deformabilidade das camadas, Sousa (2014) encontrou recalques inferiores quando comparados ao mesmo bloco sobre condições de maciço homogêneas. Para a parcela de carga distribuída entre as estacas e o radier, o autor encontrou discrepância significativa para as análises realizadas com diferentes camadas, quando comparadas as análises feitas em condições de solo homogêneo, as quais não apresentaram grande variação.

Bernardes (2017) propôs uma metodologia híbrida de análise para radiers estaqueados e a implementou no programa SoFIA (*Soil-Foundation Interaction Analysis*). Nela, o radier é analisado por meio de elementos finitos de placa, e o sistema estacas-solo analisado por meio de uma série de nós e seus respectivos fatores de interação calculados por uma análise de elementos finitos axissimétricos, considerando o solo como um meio elástico contínuo. O comportamento não-linear das estacas foi feito pela inclusão de uma função hiperbólica, K_p , modelada por Sales (2000), onde K_p é a rigidez das estacas que varia com o nível de carregamento aplicado.

A ferramenta desenvolvida por Bernardes (2017) permite a discretização do solo em múltiplas camadas, a limitação das tensões na interface radier-solo e a análise de estacas inclusas no radier com diferentes geometrias, propriedades e comportamento não-linear. Como forma de validação, o autor comparou a utilização do software com rigorosas ferramentas de análises numéricas tridimensionais, bem como com modelos de provas de cargas em miniatura, analisando curvas carga-recalque, encontrando por fim resultados bem semelhantes entre as metodologias analisadas.

2.3.3. Mecanismos de Interação Entre os Elementos do Radier Estaqueado

Sales (2000) afirma que a análise do sistema em radier estaqueado não é feita de forma simples e direta, por se tratar de um problema tridimensional, no qual o mecanismo de transferência de carga e a resposta carga-recalque apresentam natureza complexa, por envolver diferentes mecanismos de interação entre os elementos envolvidos (solo, radier e estacas), que modificam as tensões normais atuantes na face das estacas, e alteram o deslocamento das estacas e do solo.

Hain & Lee (1978) propuseram para a análise de um radier estaqueado a consideração de quatro interações entre os elementos, conforme demonstrado na Figura 2.8, onde representa-se uma estaca submetida a um carregamento centrado (P), ou distribuído (q) em uma área (a).

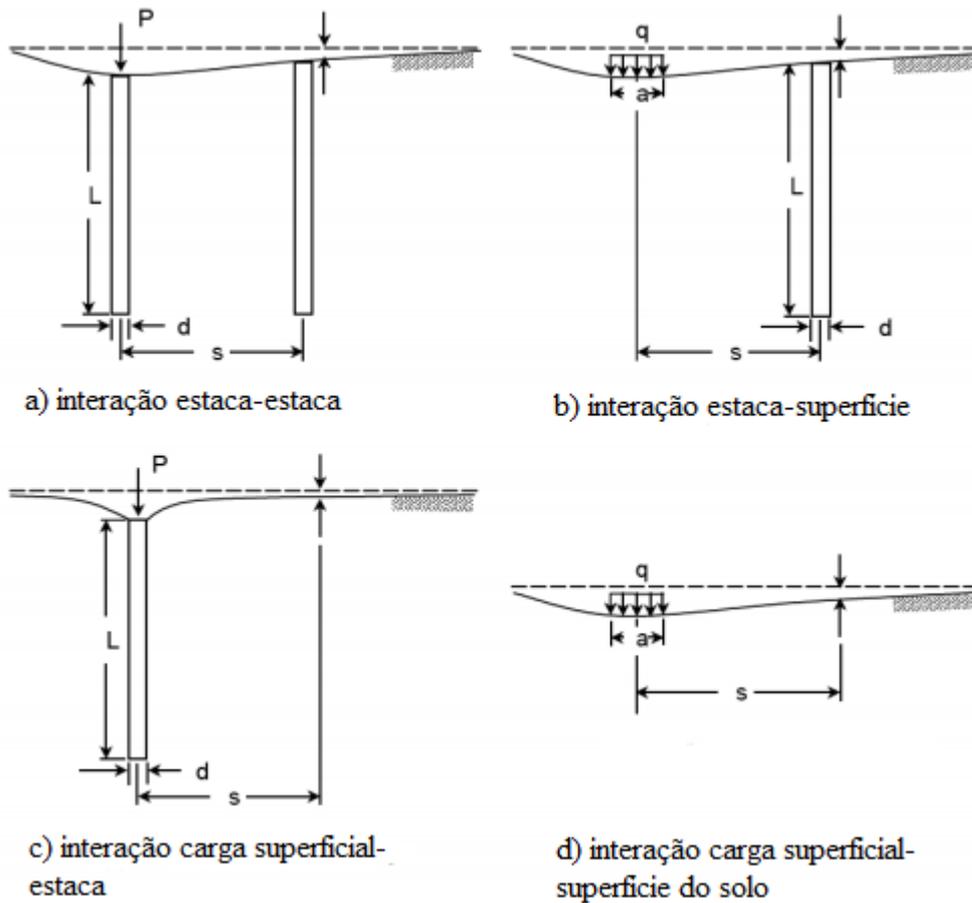


Figura 2.8. Mecanismos de Interação entre os Elementos do Radier Estaqueado (Modificado de Hain & Lee, 1978, *apud* Cordeiro, 2017).

Como exposto por Curado (2015), o fator de interação estaca-estaca (α_{PP}) é estimado supondo o efeito do carregamento de uma estaca sobre outra não carregada, com espaçamento eixo-a-eixo “s”, podendo estas terem propriedades diferentes como seu diâmetro “d” e comprimento “L”. O fato de interação estaca-estaca é apresentado na Equação 2.5.

$$\alpha_{PP} = \frac{\text{recalque adicional em uma estaca devido à carga de outra adjacente}}{\text{recalque da estaca devido ao carregamento}} \quad (2.5)$$

Os demais fatores de interação, estaca-superfície (α_{PS}), carga superficial-estaca (α_{SP}) e carga superficial-superfície do solo (α_{SS}), são estimados com base no mesmo princípio da relação do

deslocamento de um elemento devido ao carregamento de outro, com o deslocamento do elemento carregado, e são expressos pelas equações 2.6, 2.7 e 2.8.

$$\alpha_{PS} = \frac{\text{recalque adicional na superfície do solo não carregado}}{\text{recalque de uma estaca isolada devido ao carregamento}} \quad (2.6)$$

$$\alpha_{SP} = \frac{\text{recalque adicional de uma estaca não carregada}}{\text{recalque da superfície do solo devido ao carregamento}} \quad (2.7)$$

$$\alpha_{SS} = \frac{\text{recalque adicional da superfície do solo não carregada}}{\text{recalque da superfície do solo devido ao carregamento}} \quad (2.8)$$

Conforme Cordeiro (2017), os fatores de interação podem ser influenciados por muitas variáveis, e, portanto, variar o comportamento do sistema de fundação em radier estaqueado, dentre as quais se destaca a heterogeneidade do solo, o fator de rigidez estaca-solo, o atrito lateral da estaca, além da resistência de ponta das estacas.

2.3.4. Etapas do Projeto Em Radier Estaqueado

Conforme Poulos (2001), um projeto racional para radier estaqueado envolve três estágios principais, a se saber:

- a) Estágio preliminar: envolve a avaliação da viabilidade do uso do radier estaqueado e do número de estacas requeridas que satisfaçam os requisitos de projeto, bem como a estimativa do desempenho do radier isolado, por meio de métodos analíticos, para que se defina a melhor metodologia de projeto para o uso das estacas no radier.
- b) Estágio secundário: avaliação mais detalhada para definir onde as estacas são necessárias e suas características gerais.
- c) Estágio final detalhado: obtenção do número ótimo de estacas, sua configuração e localização, bem como o cálculo da distribuição detalhada de recalques, momentos fletores e cortantes no radier, e as cargas e momentos nas estacas. Geralmente demanda o uso de um programa de computador adequado que leve em conta de maneira racional

a interação entre solo, radier e estaca, bem como o efeito da superestrutura, por meio do Método dos Elementos Finitos (M.E.F), Método dos Elementos de Contorno (M.E.C), ou métodos híbridos que combinem os dois últimos para análise do sistema.

Nas duas primeiras etapas anteriores, uma estimativa da curva carga-recalque do radier estaqueado pode ser feita através de uma combinação dos métodos de Poulos & Davis (1980) e Randolph (1994), baseados na teoria da elasticidade, considerando a mobilização total da capacidade das estacas, gerando uma curva tri-linear de carga-recalque, resultado da ferramenta conhecida por método de Poulos-Davis-Randolph (PDR), Figura 2.9.

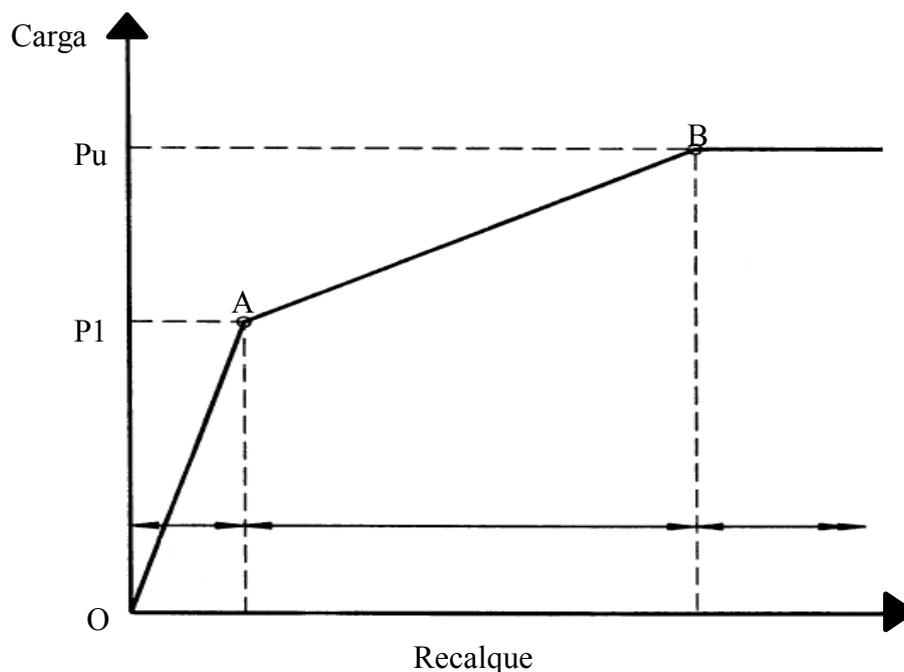


Figura 2.9. Curva Tri-Linear Carga-Recalque do Método PDR (Modificado de Poulos, 2001)

Sales (2000) procedeu a seguinte descrição do método PDR:

- No trecho OA da curva anterior, o comportamento do radier e das estacas é elástico, e considera-se que somente as estacas estarão absorvendo o carregamento, de forma que ainda não há mobilização total destas. Neste trecho, o recalque do sistema é descrito pelas equações 2.9 e 2.10:

$$\delta = R_G \cdot P_G \cdot \rho_1 \quad (2.9)$$

$$R_G = R_C \cdot \overline{R_G} \quad (2.10)$$

Onde,

δ = recalque do radier estaqueado;

R_G = relação entre o recalque médio da fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca isolada, sem “cap”, ou sem bloco, sob carga total atuante no grupo;

P_G = carga total atuante no radier estaqueado;

ρ_1 = recalque de uma estaca, sem “cap”, sob carga unitária;

R_C = razão entre o recalque de uma estaca com “cap” e outra similar sem o “cap”;

$\overline{R_G}$ = razão entre o recalque médio de uma fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca isolada, com “cap”, ou com bloco, sob carga total atuante no grupo;

- Ao se atingir a carga P1 as estacas são totalmente mobilizadas, e qualquer acréscimo de carga será absorvido pelo radier, apresentando comportamento elástico, de forma que este passa a comandar o desempenho do sistema, e todo o recalque excedente gerado a partir da carga P1 seria calculado como o de um radier isolado, por meio de equações elásticas que dependem da forma do radier e do perfil de solo analisado.

- A partir do ponto B, ao atingir a carga Pu, atinge-se a ruptura de todo o radier estaqueado.

A rigidez de todo o sistema, supondo deslocamentos iguais entre o radier e o grupo de estacas, pode ser estimada pela Equação 2.11 de Randolph (1994):

$$K_{PR} = \frac{K_{PG} + (1 - 2\alpha_{RP})K_R}{1 - \alpha_{RP}^2 \left(\frac{K_R}{K_{PG}}\right)} \quad (2.11)$$

Onde,

K_{PR} = rigidez de todo o radier estaqueado;

K_{PG} = rigidez do grupo de estacas;

K_R = rigidez do radier isolado;

α_{RP} = fator de interação entre o radier e as estacas.

Ainda conforme Randolph (1994), o fator α_{RP} pode ser estimado pelas equações 2.12, 2.13 e 2.14:

$$\alpha_{RP} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\zeta} \quad (2.12)$$

Com:

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (2.13)$$

$$r_m = \{0,25 + \xi[2,5\rho(1 - \nu) - 0,25]\} \times L \quad (2.14)$$

Onde,

r_c = raio do radier associado a cada estaca (correspondente a uma área igual a do radier dividida pelo número de estacas);

r_0 = raio da estaca;

$\xi = E_{sl}/E_{sb}$;

$\rho = E_{sav}/E_{sl}$;

E_{sl} = módulo de Young do solo no nível da ponta da estaca;

E_{sb} = módulo de Young do solo no nível logo abaixo da ponta da estaca;

E_{sav} = módulo de Young médio do solo ao longo do fuste da estaca;

ν = coeficiente de Poisson do solo;

L = comprimento da estaca.

2.3.5. Radier Estaqueado Em Solos Colapsíveis

Em solos de baixa densidade, o aumento de umidade resulta numa redução da resistência nos contatos entre as partículas, devido a redução de sucção, um rearranjo estrutural e uma nova condição de equilíbrio sob a carga atuante, o que ocasiona redução no volume da massa de solo. Tal fenômeno é conhecido por colapso, e os solos que o experimentam recebem a designação de solos colapsíveis, de forma que tal redução se dá por umedecimento sob peso próprio e/ou sob a ação de uma sobrecarga adicional (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Poulos (1991) considera o uso do radier estaqueado em solos colapsíveis como inadequado, desde que não se adote alguma condição de melhoria do terreno, pois devido a possibilidade de perda de contato entre o radier e o solo, quando da ocorrência de recalque, a carga aplicada mais o peso próprio do radier será toda transferida ao terreno por meio das estacas, assim sendo o sistema passaria a trabalhar como um mero grupo de estacas.

Deste modo, as únicas alternativas viáveis para o uso do radier estaqueado em solos colapsíveis seriam a implementação de um processo de melhoria das condições de suporte do terreno em que se apoiará o sistema, por meio de compactação, por exemplo, e a consideração dos efeitos de um possível aumento de umidade no estado de tensões, nos recalques e na capacidade de carga da fundação.

Estudos feitos por Sales (2000), com provas de cargas e análise computacional de sapatas estaqueadas no solo colapsível de Brasília-DF, consideraram o efeito do aumento do grau de saturação por meio de um processo de inundação prévio do terreno, e sua influência na relação carga/recalque do sistema. Em seus resultados, o autor indica que a rigidez da estaca pouco é afetada nos níveis iniciais de carregamento, e os recalques são semelhantes para condição de umidade natural ou saturada. A medida em que se aumenta o carregamento, a carga na estaca vai sendo totalmente mobilizada, e com isso aumenta-se o recalque na sapata, a níveis superiores ao caso do solo com umidade natural.

Castillo (2013) analisou um sistema em radier estaqueado também no solo colapsível do Distrito Federal, por meio de retroanálises numéricas a partir de ensaios feitos por outros autores, além de simulações computacionais, considerando a presença de uma camada superficial de solo melhorado.

Na análise das tensões de colapso do solo, obtidas por meio de ensaios oedométricos em estado saturado e natural, Castillo (2013) verificou que a implementação somente do radier estaqueado

provocaria o colapso do terreno devido ao aumento de tensões verticais e seu umedecimento, propondo desta forma a utilização de uma camada superficial de solo compactado. De acordo seus resultados, a presença da camada, de forma geral, aumentou a tensão máxima admissível ao colapso, fazendo com que as tensões atuantes ao longo da profundidade não atingissem os valores máximos permitidos de projeto.

2.4. FERRAMENTA NUMÉRICA HÍBRIDA

2.4.1. O Programa GARP

O programa GARP (*Geotechnical Analysis of Rafts with Piles*) foi desenvolvido por Poulos em 1994, e desde sua concepção original, consistia em um método híbrido, onde o radier era analisado pelo método das diferenças finitas e as estacas representadas por molas equivalentes, onde todos os mecanismos de interação eram considerados através do método de superposição de campos de deformação (Sales, 2000).

Posteriormente, Small & Poulos (1998) por meio de alterações no programa, incorporaram o radier como sendo representados por elementos de placa através do método dos elementos finitos (M.E.F.), criando uma nova versão do programa (GARP6 - versão 6.0 do programa).

Conforme Poulos (2001), o programa considera as seguintes peculiaridades:

- Não-homogeneidade do perfil do solo;
- Limitação das pressões no solo abaixo do radier, tanto para compressão quanto para tração;
- Comportamento não linear da curva carga-recalque da estaca, incluindo a limitação da capacidade de carga desta para compressão e tração;
- Estacas de diferentes rigidezes e capacidades de carga dentro do sistema;
- Facilidade na alteração da locação e do número de estacas;
- Cargas concentradas, momentos e áreas de carregamento uniforme;
- Efeitos do campo de deslocamento do solo devido a recalques por consolidação e/ou expansão.

Sales (2000) realizou as seguintes considerações sobre a concepção do modelo utilizado no programa GARP:

- O radier é discretizado em elementos finitos, do tipo elementos de placa, que podem ter espessuras diferentes, e sobre estes pode-se aplicar combinações de esforços concentrados e/ou distribuídos, bem como de momentos fletores nas duas direções do elemento de placa. Ainda, vale ressaltar a possibilidade de se utilizar radiers de diferentes formatos, incluindo elementos vazados.
- O solo é tomado como um meio elástico contínuo, de forma que os deslocamentos do perfil logo abaixo do radier podem ter duas origens principais: as pressões de contato geradas entre o radier e o solo, e os “campos de deslocamento” impostos ao solo, devido à possibilidade de adensamento, colapso, expansão, entre outros.
- As estacas são modeladas por uma mola de rigidez equivalente, de forma que tal rigidez é fornecida por um outro programa de auxílio, como o DEFPIG (*Deformation Analysis of Pile Groups*), que também fornece os fatores de interação do sistema;
- Para a obtenção do comportamento final do sistema radier estaqueado, impõe-se a compatibilidade de deslocamentos verticais do solo e dos elementos do radier, como forma de encontrar ao final deslocamentos e tensões que satisfazem ao equilíbrio do radier e do sistema estacas/solo.

Até a versão 6.0, quando a estaca atingia seu valor máximo de carga, esta estaca era retirada do sistema de equações, mas sua rigidez era mantida constante, ou seja, com seu valor original. Esta hipótese não permitia que o valor de recalque na estaca aumentasse, pois a rigidez era constante e quando a carga atingia o máximo suportado, o recalque era calculado por dois fatores constantes, rigidez e carga máxima (Lima, 2007).

Posteriormente, Sales (2000) realizou uma série de alterações no programa, dando criação à versão 7.0 deste. Nesta nova versão, o autor pode implementar a consideração da variação da rigidez das estacas com o carregamento, considerando assim o comportamento não-linear das estacas.

De maneira geral, o programa GARP fornece o comportamento de todo o sistema em radier estaqueado, no que compete a relação carga-recalque, distribuição de cargas nas estacas, proporção de cargas transmitidas ao radier e as estacas, momentos fletores nas estacas e no radier, e a configuração de recalques totais e diferenciais ao longo da profundidade, tendo como

principais desvantagens a não incorporação de carregamento lateral, bem como a necessidade de outro programa para cálculo da rigidez das estacas.

2.4.2. O Programa DEFPIG

O programa DEFPIG (*Deformation Analysis of Pile Groups*) foi criado por Poulos (1990) como forma de analisar o comportamento de estacas submetidas a diversas formas de carregamento, seja ele axial, lateral ou de momento fletor, permitindo determinar as deformações, distribuição de cargas e fatores de interação de um grupo de estacas submetido a um carregamento genérico (Bahia, 2015).

Conforme Sales (2000), a análise feita pelo programa DEFPIG é baseada na utilização da Equação de Mindlin (1936) associado à aproximação de Steinbrenner (1934) para o caso da presença de um extrato inferior indeslocável.

Por meio do programa, obtém-se valores da rigidez individual das estacas, ou seja, da relação entre a carga aplicada e o respectivo deslocamento provocado, Equação 2.15, bem como dos fatores de interação entre as estacas que compõe um grupo sujeitas a um carregamento qualquer, utilizados na análise posterior junto ao programa GARP.

$$K_p = \frac{P}{\delta} \quad (2.15)$$

Onde,

K_p = rigidez de uma estaca;

P = carga aplicada à estaca;

δ = deslocamento da cabeça da estaca provocado pelo carregamento P .

A rigidez da estaca pode ser obtida por meio da tangente, ou secante, à curva carga x recalque” desta estaca, como demonstrado na Figura 2.10, (Sales, 2000).

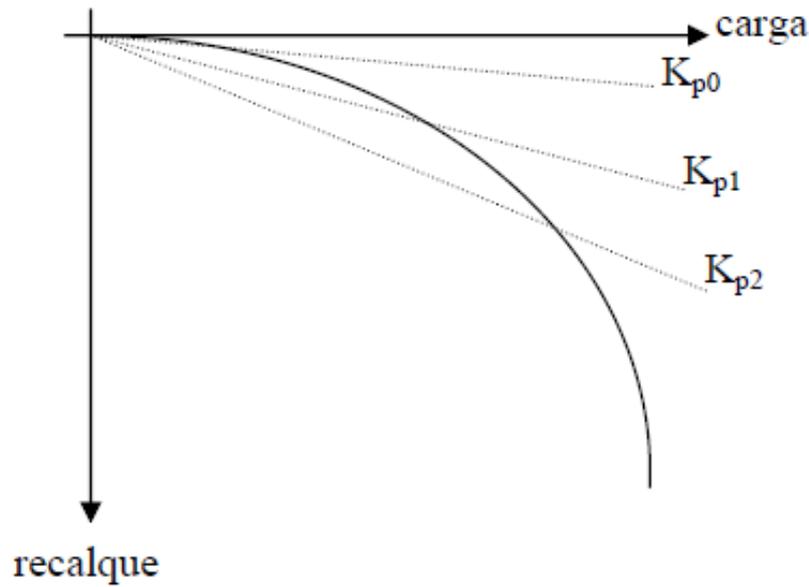


Figura 2.10. Rigidez de uma estaca a partir da curva carga x recalque (Sales, 2000).

Para baixos valores de carregamento a relação carga-recalque ainda permanece linear, e a rigidez (K_{p0}) é obtida pela tangente inicial à curva anterior. A medida em que se aumenta o carregamento na estaca, a relação deixa de ser linear, e a rigidez da estaca para tais casos (K_{p1} , K_{p2} , etc.) é obtida pelas retas secantes à curva carga x recalque (Sales, 2000). Como forma de representar o comportamento não linear das estacas, Poulos (1994) propôs a Equação 2.16, a partir de modelos hiperbólicos:

$$K_p = K_{p0} \left(1 - R_f \left(\frac{P}{P_u} \right) \right) \quad (2.16)$$

Onde,

K_{p0} = rigidez inicial da estaca;

P = carga atuante na estaca;

P_u = carga última da estaca;

R_f = fator hiperbólico de variação da rigidez da estaca.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

O capítulo aqui apresentado tem por fim descrever em uma primeira etapa o estudo de caso analisado, compreendendo um complexo de armazenamento composto por oito tanques de estocagem de soja, os resultados dos ensaios de laboratório e de campo realizados previamente à elaboração deste trabalho por uma empresa contratada.

Em uma etapa posterior, serão descritos os procedimentos para o levantamento de parâmetros utilizados nas análises a partir dos ensaios realizados, bem como a proposta de análise numérica e paramétrica das safras de dois anos de armazenamento do complexo, simulando o comportamento com e sem a presença de estacas sob a placa de fundo dos silos.

3.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

3.1.1 O Complexo de Estocagem

O estudo de caso analisado neste trabalho é formado por um complexo agroindustrial de armazenamento de grãos de soja, situado na zona rural da cidade de São Félix do Araguaia - Mato Grosso, Figura 3.1, localizada a uma latitude de $11^{\circ}37'02''$ e a uma longitude de $50^{\circ}40'10''$, estando a uma altitude de 195 metros, totalizando uma área de 16713,48 km², segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2016).

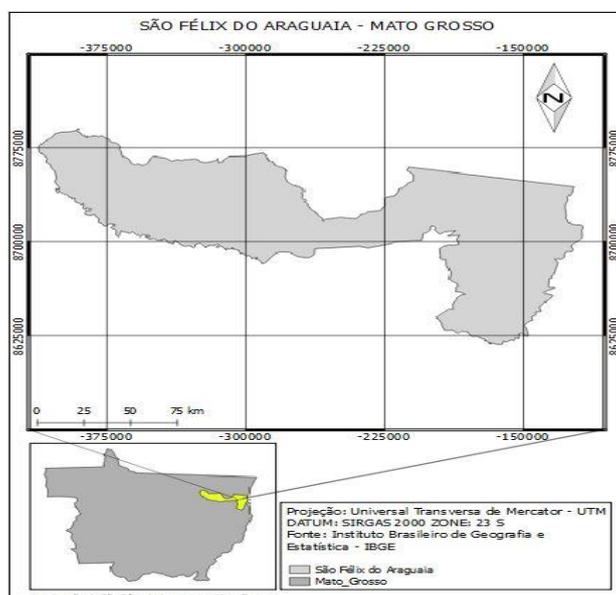


Figura 3.1. Localização de São Félix do Araguaia - MT (IBGE, 2015)

O conjunto, é formado por 8 silos de armazenamento, construídos no ano de 2014, com 32,4 m de diâmetro e aproximadamente 30 m de altura, juntamente com a infraestrutura para preparo e logística dos grãos, somando uma área total de 9104,15 m². As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram a disposição dos silos em planta e corte, respectivamente.

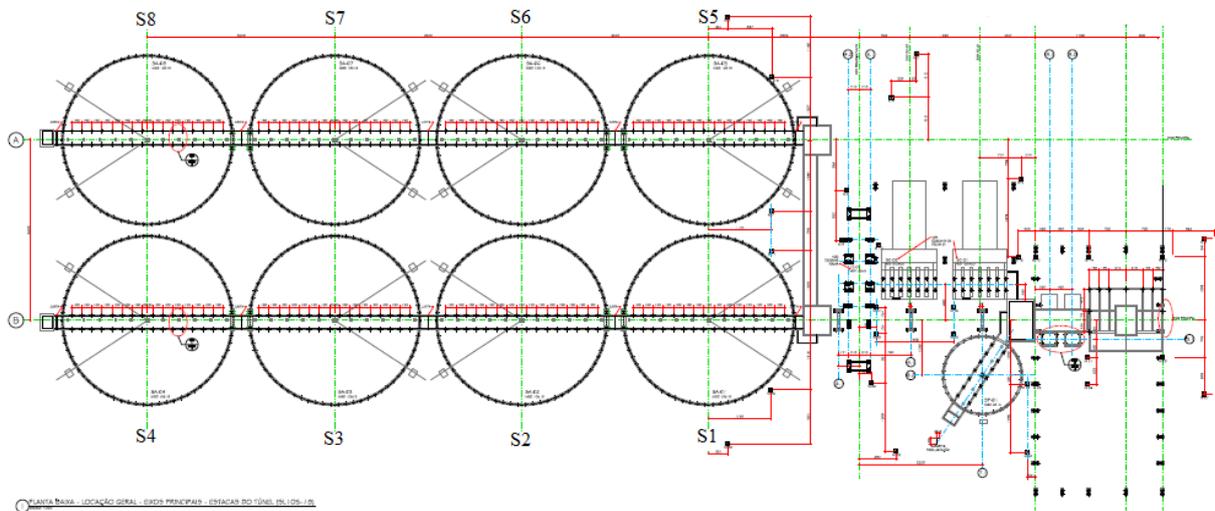


Figura 3.2.Complexo de Armazenamento visto em Planta (Modificado de EPF Geotecnia, 2017)

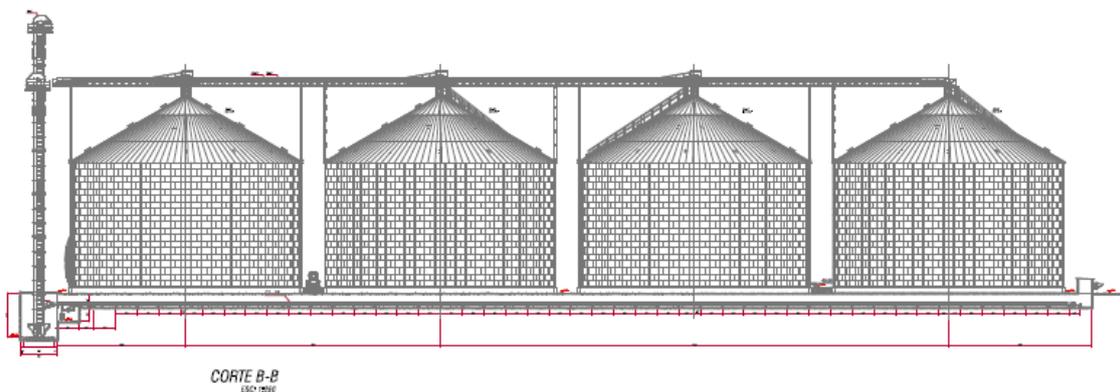


Figura 3.3. Complexo de Armazenamento visto em Corte (Modificado de EPF Geotecnia, 2017)

Todos os oito silos têm formato padrão, e são compostos por chapa metálica corrugada unidas por montantes metálicos compondo a parede do tanque, com cobertura constituída pelo mesmo material das paredes. A capacidade de armazenamento de cada silo é de 12 mil toneladas de grãos, de forma que a entrada destes é feita pela torre superior, e a saída pelas correias transportadoras alocadas no túnel inferior, situado a uma cota de dois metros abaixo do nível do terreno.

A base do silo padrão, Figura 3.4, consiste em uma laje executada em concreto armado, dispondo todo o sistema de aeração nesta, apoiada em uma camada de aterro compactado de 1,5 m de altura, executada com o terreno natural para a elevação do nível do piso ou laje, além do túnel central para saída dos grãos, que conecta toda a linha de silos. As paredes transferem seus esforços para um anel circular externo de concreto de 1,20 m de altura e 0,40 m de largura de base, que não se encontra ligado estruturalmente à laje de fundo.

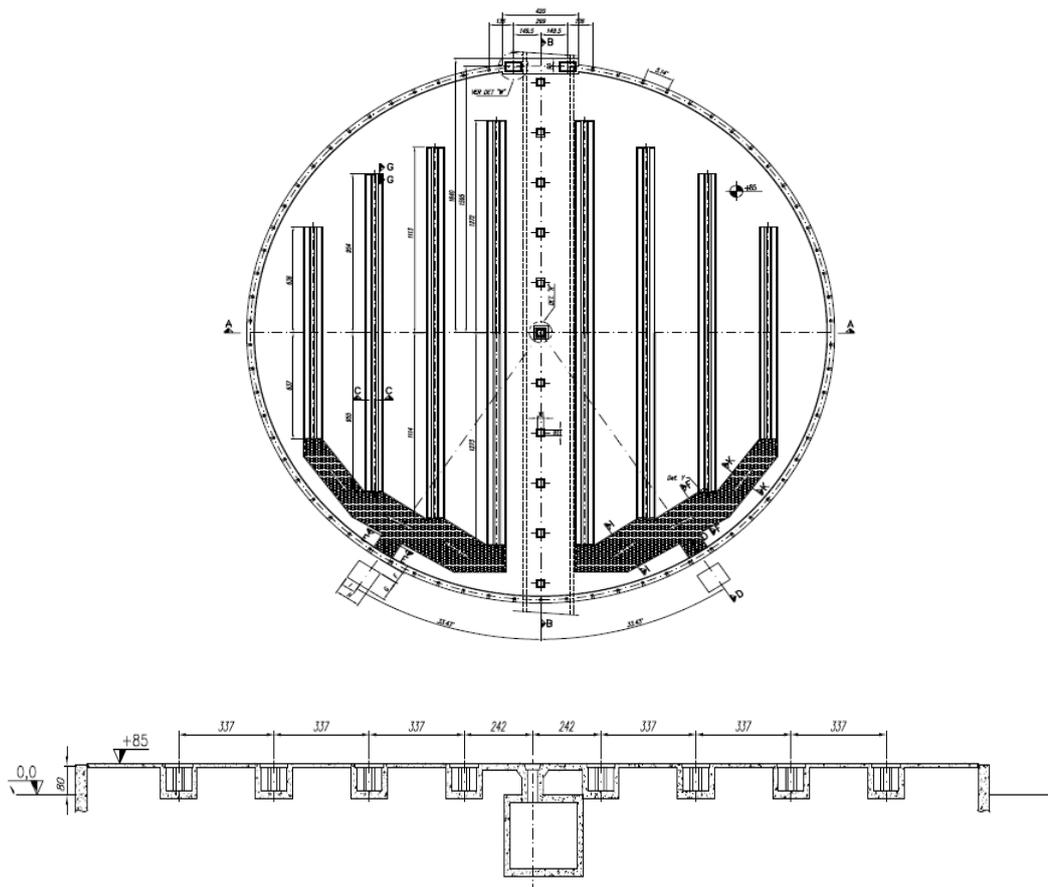


Figura 3.4. Base do silo, composta pela laje, sistema de aeração, túnel central e anel circular externo, vista em plana e em corte. (Modificado de EPF Geotecnia, 2017)

Quando trabalhando em sua capacidade total, a pressão na base do silo é de 135,3 kPa, chegando ao anel um carregamento de 28821 kN. A transferência de carga para o terreno é feita também por meio de estacas hélice-contínua de 20 m de comprimento e 0,35 m de diâmetro, alocadas sob o túnel central e o anel externo ao longo de seus comprimentos, Figura 3.5 e 3.6, em cotas de assentamento distintas, sendo que há no túnel um total de 32 estacas e no anel 68 estacas, dispostas de maneira simétrica.

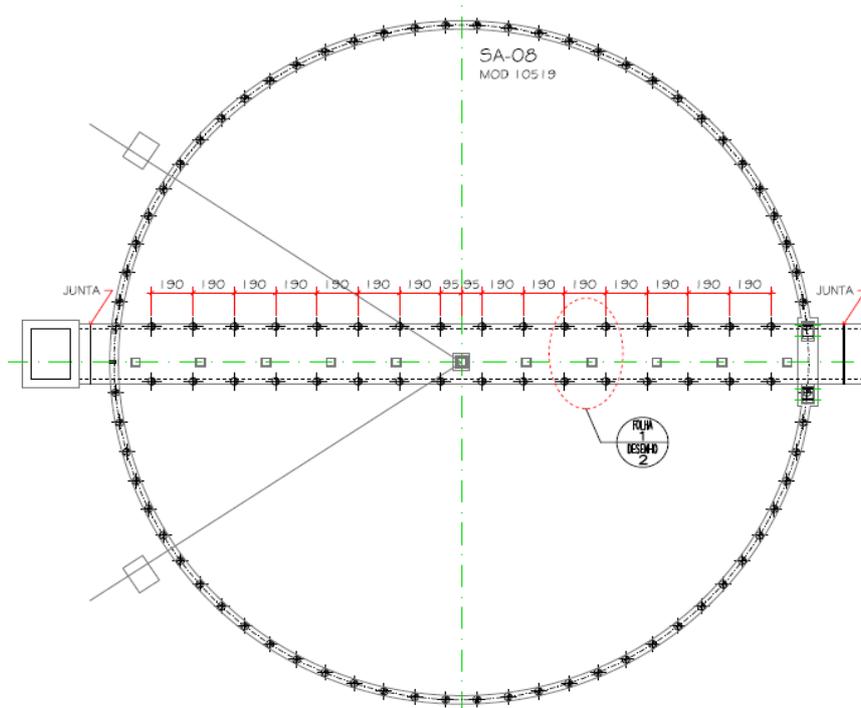


Figura 3.5. Localização das estacas no túnel central e no anel externo em um silo padrão (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

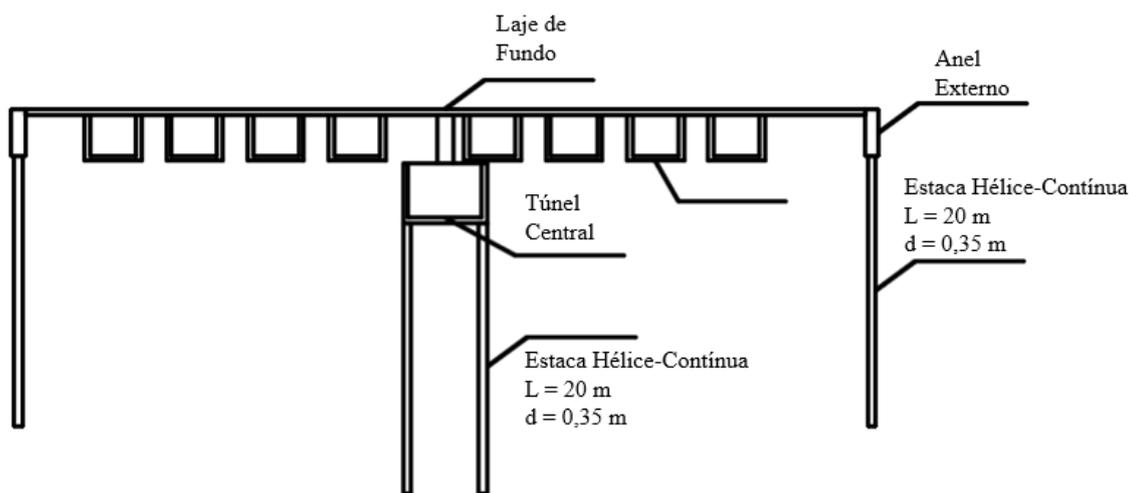


Figura 3.6. Parte inferior dos silos vista em corte.

3.1.2 Deslocamentos Decorrentes das Safras de 2015 e 2016

A estocagem da primeira safra de grãos se deu no ano de 2015, na qual somente os silos S1 à S4 foram utilizados em sua capacidade total, por um período de seis meses, de forma que os demais se encontravam vazios. Para a estocagem da segunda safra, no ano de 2016, todo os

silos, com exceção de um, foram utilizados com armazenamento em quantidade e tempo de armazenamento variáveis. As Tabelas 3.1 e 3.2 fornecem os valores de quantidade estocada por silo em 2015 e 2016, respectivamente, bem como a duração do armazenamento.

Tabela 3.1. Estocagem por silo referente as safras de 2015 com respectivos tempos de armazenagem (EPF Geotecnia, 2017).

Silo	Quantidade estocada (kg)	Tempo de armazenagem (Meses)
1	12×10^6	6
2	12×10^6	6
3	12×10^6	6
4	12×10^6	6

Tabela 3.2. Estocagem por silo referente as safras de 2016 com respectivos tempos de armazenagem (EPF Geotecnia, 2017).

Silo	Quantidade Estocada (kg)	Tempo de Armazenagem (Meses)
1	5×10^6	3
2	$3,5 \times 10^6$	3
3	-	-
4	5×10^6	3
5	9×10^6	4
6	$1,5 \times 10^6$	3
7	9×10^6	3,5
8	9×10^6	3,5

Conforme o relatório técnico da EPF Geotecnia (2017), empresa responsável pela avaliação preliminar do problema, logo após o carregamento proveniente da primeira safra observou-se fenômenos de deslocabilidade acentuada e rotações dos silos de armazenamento, que provocaram deslocamentos nas paredes do túnel principal e nas estruturas adjacentes, Figura 3.7. Como observado na figura, os deslocamentos provocaram desnivelamento da laje do túnel, e desencadearam o surgimento de trincas na laje de fundo do silo, que por não estar ligada aos anéis, encontrava-se em condição de livre deslocamento, comprometendo parcialmente a capacidade de armazenamento dos tanques, o que pode ser observado também pela diferença no carregamento armazenado entre as safras de 2015 e 2016.



Figura 3.7. Trincas e deslocamentos gerados após o carregamento dos silos (EPF Geotecnia, 2017).

Ao se analisar as patologias ocorridas após o período de armazenamento, conclui-se então que a solução de melhoria da condição de suporte do terreno pela execução de aterro compactado não demonstrou-se suficiente para prevenir os danos causados.

Os deslocamentos foram medidos em oito pontos distintos do silo, pela própria unidade de armazenamento para cada safra com o auxílio de nível topográfico, posicionado 10 cm abaixo do topo do anel circular para a safra de 2015 e no topo do anel para a safra de 2016. Os valores

encontrados para o deslocamento médio total já com correção das respectivas cotas de medição são ilustrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Recalques médios totais medidos para cada safra de armazenagem.

Recalque médio total (cm)		
Silo	Safra 2015	Safra 2016
1	4,33	4,99
2	9,05	1,09
3	10,85	1,10
4	12,28	0,26
5	0	2,73
6	0	0,71
7	0	0,95
8	0	0,41

Como observado, os recalques médios totais, medidos ainda na primeira safra do ano de 2015, variaram para cada silo dentro de uma faixa entre 4 cm e 12 cm, e estes foram capazes de comprometer a total operacionalidade dos silos. Assim, adotou-se para critérios de deslocamentos máximos permitidos, para todos os silos, o valor limite de recalque total $\delta_{m\acute{a}x}=3$ cm, utilizado em todas as análises paramétricas posteriores, sendo adotado como valor permitido para assegurar a operação dos silos tanto em estados limites últimos e de serviço.

3.2 INVESTIGAÇÃO DO TERRENO E ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.2.1 Sondagens À Percussão

Para a construção dos silos, no ano de 2014, foi realizado um programa prévio de sondagem de reconhecimento à percussão, através do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) contando com seis furos de sondagem, sendo encontrado nível d'água em 9 metros de profundidade. Os resultados do N_{SPT} dos seis furos, bem como seu valor médio e o perfil geológico das camadas são apresentados na Figura 3.8. Todos furos apresentados foram executados à profundidade do terreno natural. A execução da sondagem foi levada até 26 metros, não atingindo o impenetrável para esta cota.

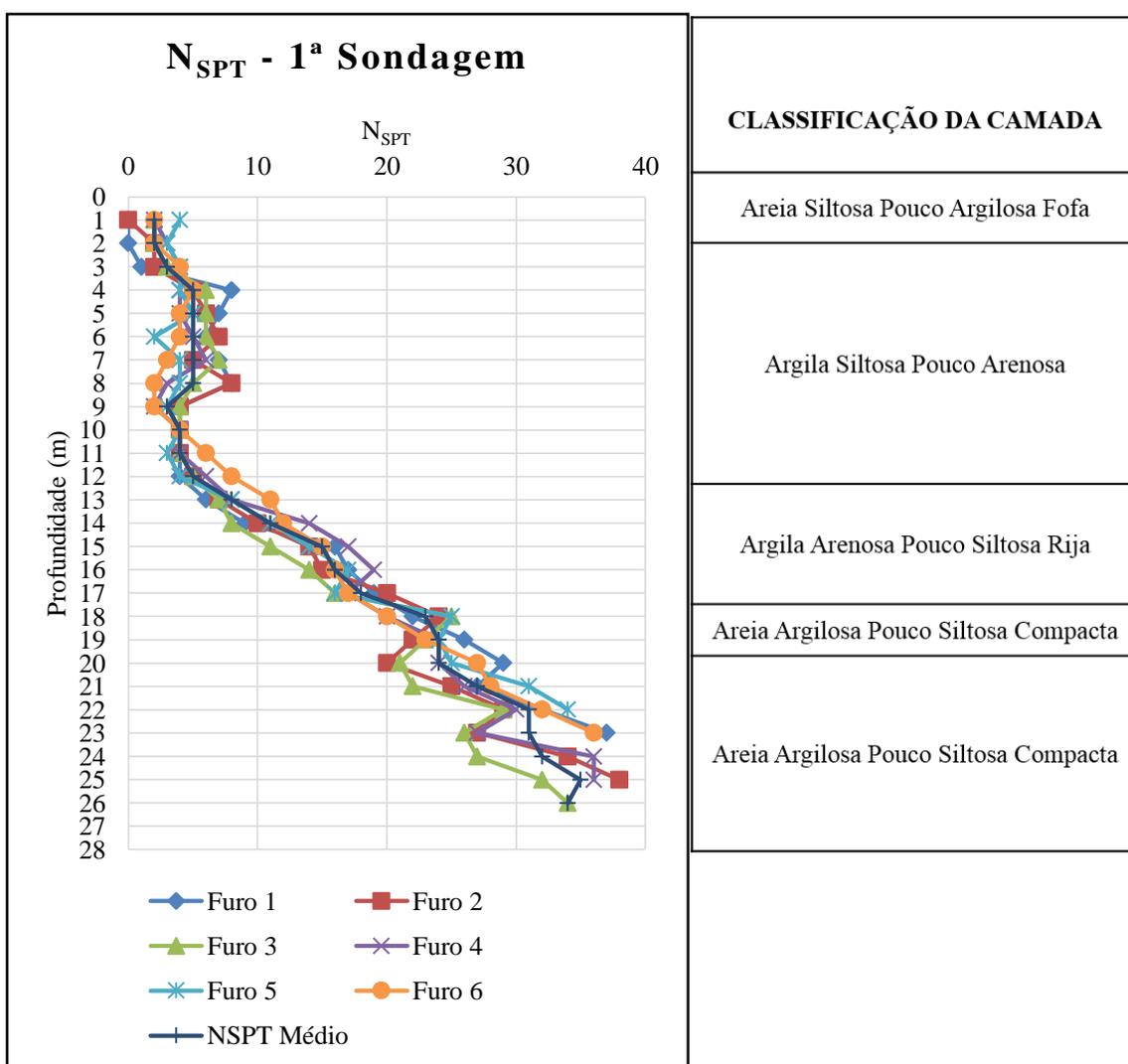


Figura 3.8. Resultado da sondagem SPT realizada previamente à construção dos silos (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

Por meio de uma empresa especializada, contratada pelo complexo agroindustrial dono do conjunto de silos, realizou-se um conjunto de ensaios de laboratório e uma nova bateria de sondagens SPT, após a ocorrência dos sinistros na estrutura dos tanques, como forma de se obter parâmetros para um possível projeto de reforço do terreno e solução do problema. A retirada de amostras do terreno, AM-01 e AM-02, bem como do local dos furos de sondagem, SP-01, SP-02 e SP-03, Figura 3.9, foi distribuída ao longo dos alinhamentos do conjunto dos silos.

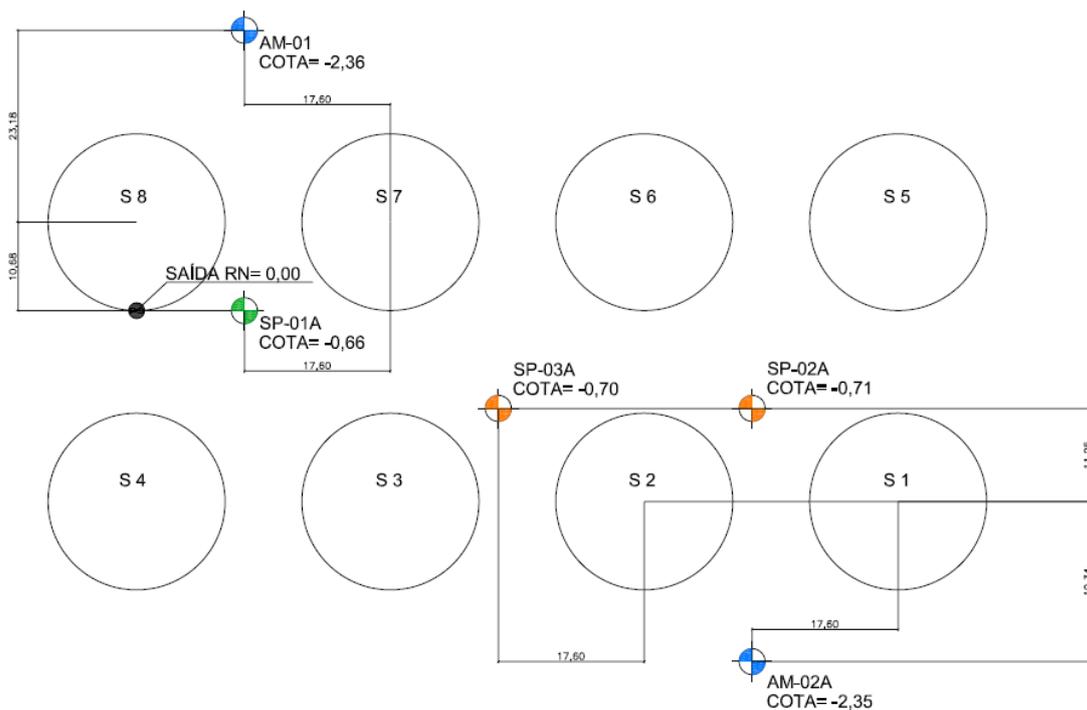


Figura 3.9. Mapa de retirada de amostras para os ensaios de laboratório, e dos furos da segunda campanha de sondagem (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

O novo conjunto de sondagem consistiu em três furos, sendo que a presença do nível d'água foi encontrada em 13 metros. Os resultados do N_{SPT} dos três furos, bem como seu valor médio, são apresentados na Figura 3.10. Para a segunda bateria de sondagens, o primeiro metro do ensaio refere-se à camada de aterro compactado, de forma que a camada impenetrável ao ensaio foi atingida em 40 metros.

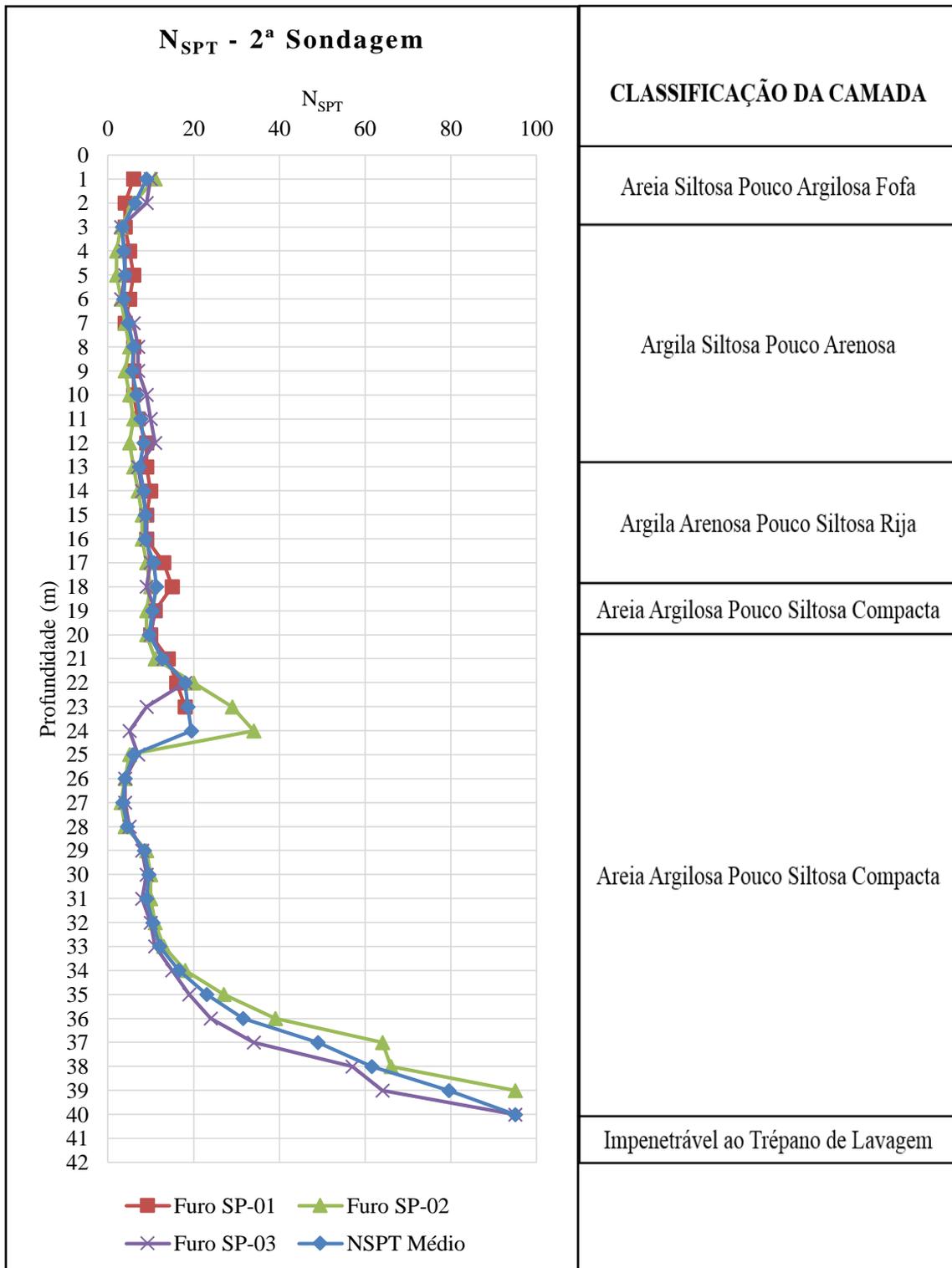


Figura 3.10. Resultado da sondagem SPT realizada após à primeira safra e surgimento de patologias no silo (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

A geologia local, bem como a camada de aterro compactada utilizada para a base, e o N_{SPT} médio de cada camada para a segunda campanha de sondagens, figura 3.11, são apresentados a seguir.

Silo		+ 1,5 m
Aterro Compactado	N_{SPT} médio 9	0,0 m
Areia Siltosa Pouco Argilosa Fofa	N_{SPT} médio 4	- 3,0 m
Argila Siltosa Pouco Arenosa	N_{SPT} médio 7	- 13,0 m
Argila Arenosa Pouco Siltosa Rija	N_{SPT} médio 10	- 18,0 m
Areia Argilosa Pouco Siltosa Compacta	N_{SPT} médio 12	- 20,0 m
Areia Argilosa Pouco Siltosa Compacta	N_{SPT} médio 17	- 40,0 m
Impenetrável ao Trépano de Lavagem		

Figura 3.11. Perfil geotécnico do terreno, considerando a camada de aterro compactado com solo natural.

3.2.2 Ensaios de Laboratório

A partir da retirada de amostras indeformadas à profundidade entre 5 e 6 metros, uma empresa privada responsável realizou ensaios oedométricos simples com saturação e cíclicos, bem como triaxial consolidado não drenado em condições saturadas (CU_{sat}). Os ensaios procuraram simular a situação de carregamento as quais os silos estariam submetidos em campo, e os principais resultados com aplicação neste trabalho são ilustrados a seguir.

- **Ensaio Oedométrico Simples**

O ensaio foi realizado para condição de umidade natural com saturação em 150 kPa. O resultado é apresentado na Figura 3.12.

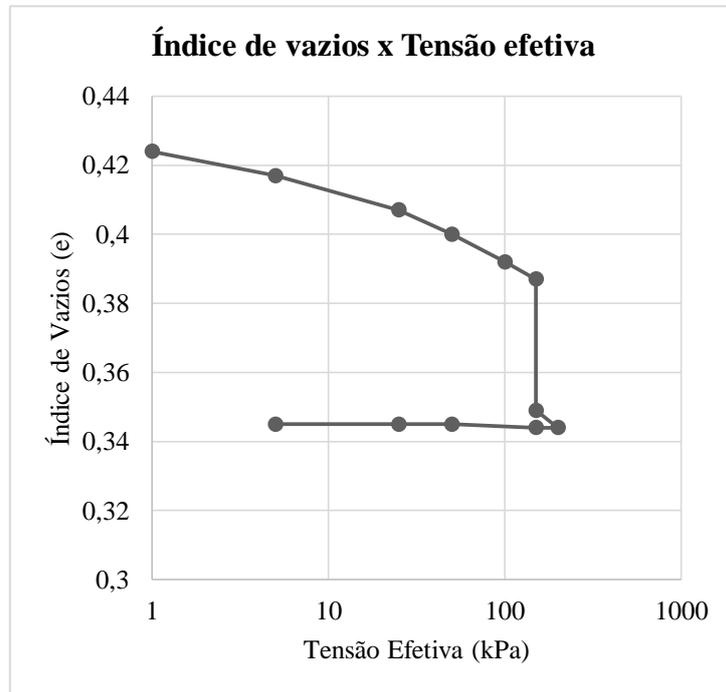


Figura 3.12. Resultado do ensaio oedométrico para a amostra com saturação à 150 kPa (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

Vargas (1978) propôs uma expressão, equação 3.1, para determinação do índice de colapso do terreno (i), a partir de correlações com o ensaio oedométrico. Conforme o autor, solos com índice de colapso superior a 2%, configuram um terreno colapsível.

$$i = \left(\frac{\Delta_e}{1 + e_0} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde,

Δ_e = variação do índice de vazios pela saturação;

e_0 = índice de vazios antes da saturação.

De acordo os resultados do ensaio oedométrico simples realizado, para a profundidade de realização do ensaio, o solo apresenta índice de colapso $i = 9,8\%$, configurando desta forma um perfil de solo colapsível para as condições do ensaio, profundidade da camada igual a 5 m e com saturação em 150 kPa.

- **Ensaio Oedométrico Cíclico**

O ensaio foi realizado com amostras retiradas dos furos AM-01 e AM-02, na condição de umidade natural destas. Os resultados do furo 1 e furo 2 são apresentados na Figura 3.13.

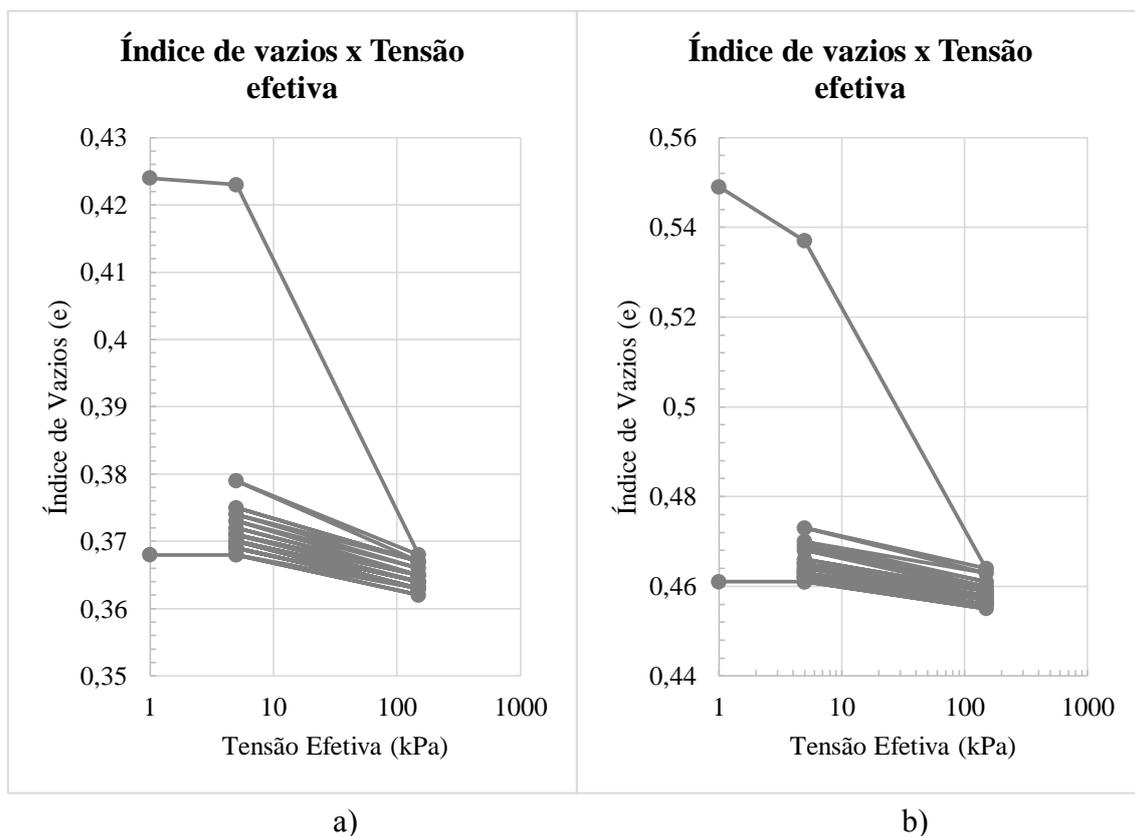


Figura 3.13. Resultados do ensaio oedométrico cíclico para condição de umidade natural: a) AM-01 b) AM-02 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

Como observado pelos resultados dos ensaios oedométricos cíclicos, a situação de recarregamento do terreno, situação análoga ao carregamento das safras de armazenamento, provoca uma vasta diminuição no índice de vazios, de forma que para sucessivas faixas de carregamento, a deformação do solo tende a diminuir.

- **Ensaio Triaxial CU_{sat}**

O ensaio foi realizado com amostras retiradas dos furos AM-01 e AM-02, para tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Os resultados do furo 1 e furo 2 são apresentados nas Figuras 3.14 e 3.15, respectivamente.

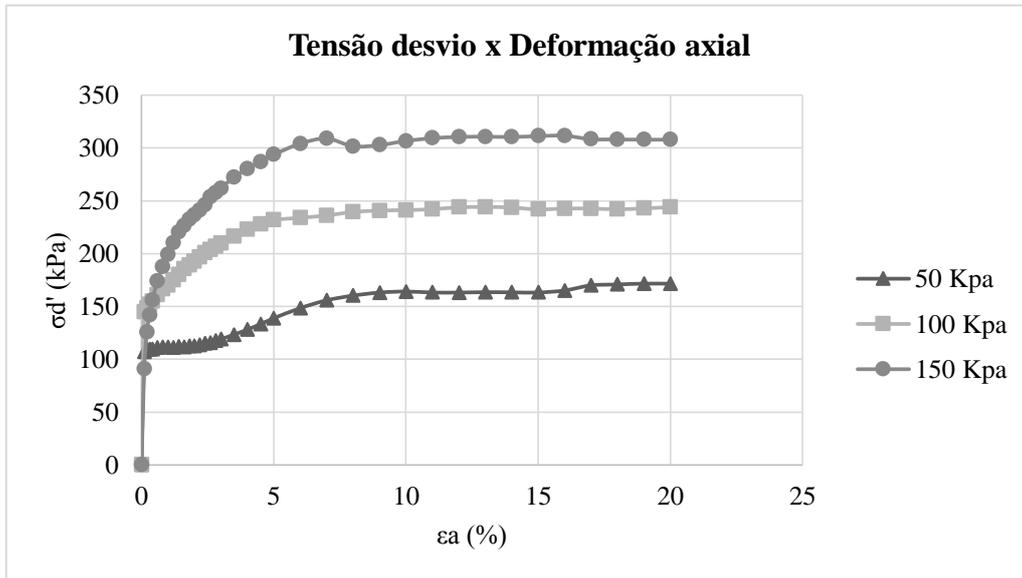


Figura 3.14. Resultados do ensaio triaxial CU_{sat} - AM-01 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

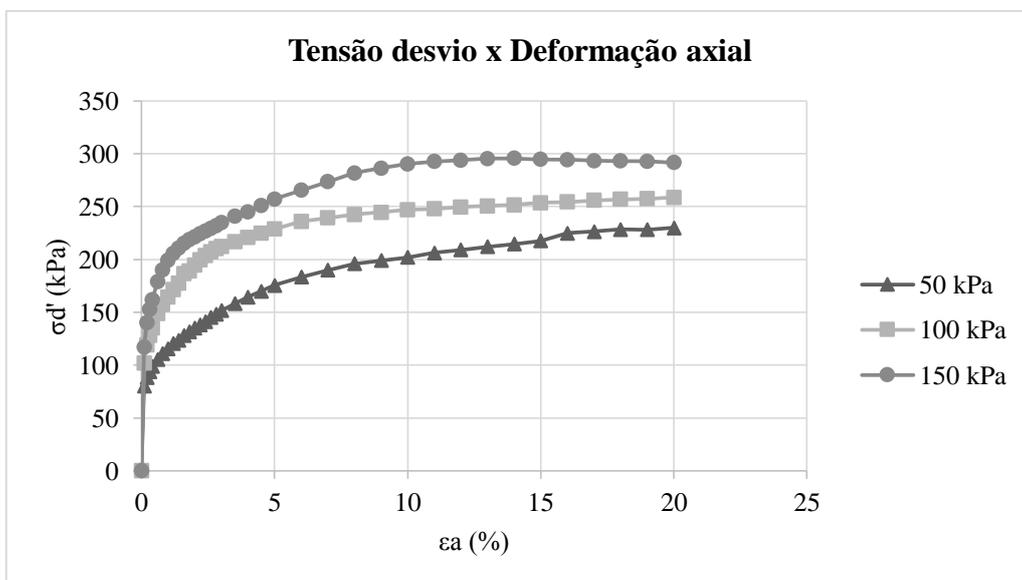


Figura 3.15. Resultados do ensaio triaxial CU_{sat} - AM-02 (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

3.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROJETO

Os parâmetros utilizados nas simulações numéricas deste trabalho consistem basicamente em parâmetros de resistência do solo e das estacas, bem como das seções utilizadas no modelo. Desta forma, procedeu a determinação da distribuição de tensões ao longo da massa de solo, do módulo de elasticidade (E), ângulo de atrito (ϕ') e coesão do solo (c), capacidade de carga das estacas e do radier, e por fim, das seções transversais equivalentes dos elementos da laje.

3.3.1 Estado de Tensões na Massa de Solo

O método utilizado para determinação aproximada das tensões ao longo do perfil do terreno foi o proposto por Poulos & Davis (1974) para o carregamento circular vertical uniforme em uma massa semi-infinita de solo, como forma de simular o mesmo carregamento aplicado ao solo pelos silos, Figura 3.16.

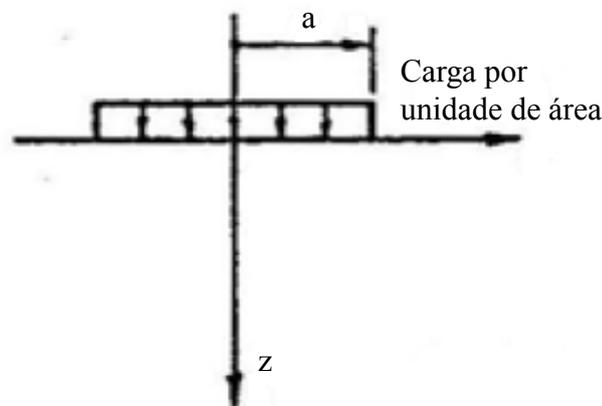


Figura 3.16. Configuração de carregamento para determinação das tensões verticais ao longo do solo (Poulos & Davis, 1974).

Neste método, a tensão vertical ao longo da profundidade na linha central do carregamento é fornecida pela Equação 3.2:

$$\sigma_z = p \left[1 - \left\{ \frac{1}{1 + a/z^2} \right\}^{3/2} \right] \quad (3.2)$$

Onde,

σ_z = tensão vertical na profundidade z devido ao carregamento;

p = carga uniforme por unidade de área;

a = raio do elemento que aplica a carga ao terreno.

O estado de tensões total levou em consideração a soma da tensão geostática com as tensões devido ao carregamento, e os valores de tensões totais para o primeiro carregamento dos silos, ao longo da profundidade, são apresentados na Figura 3.17 a seguir, onde se observa que toda a região do bulbo de tensões da área dos silos, encontra-se carregada

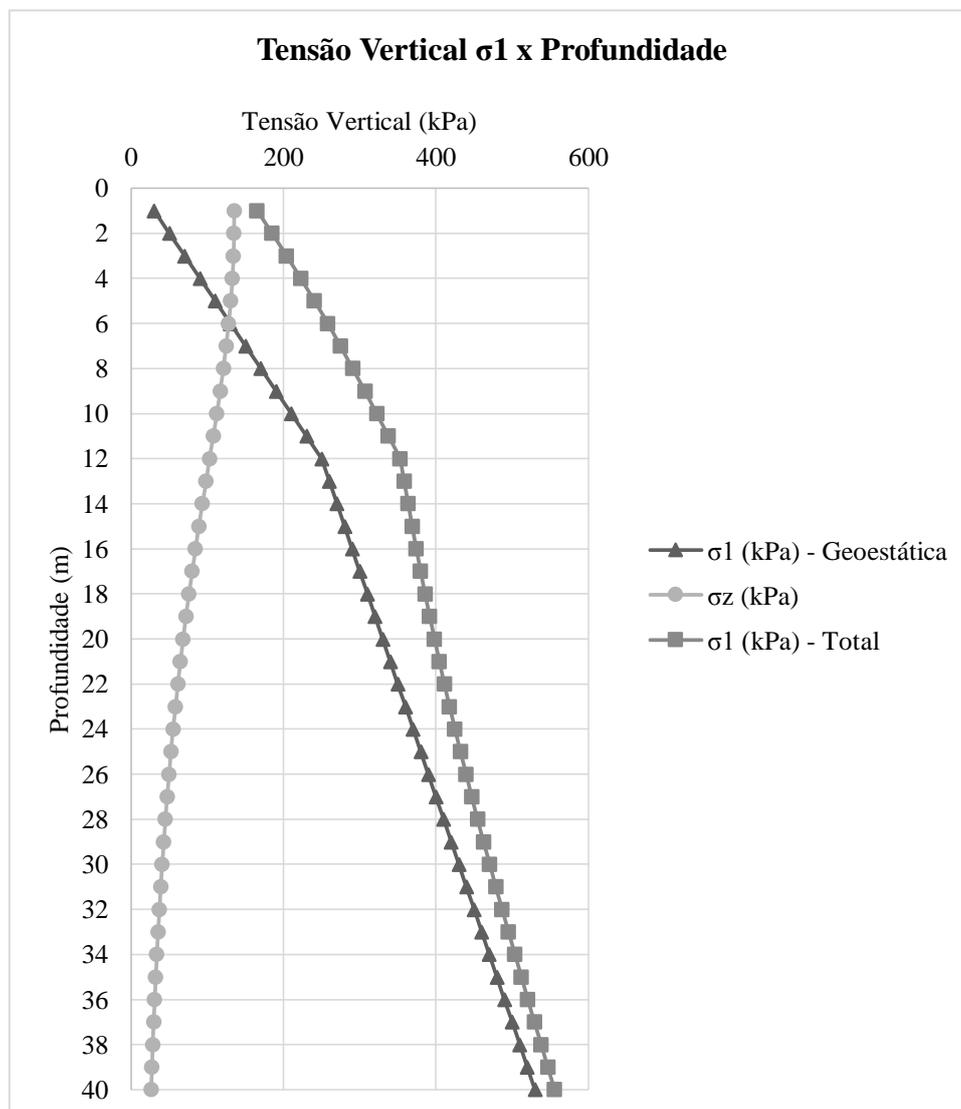


Figura 3.17. Variação da Tensão Vertical com a Profundidade para Primeiro Carregamento dos Silos.

3.3.2 Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade (E) do solo, recorreu-se ao método proposto por Teixeira e Godoy (1996), baseado no número N_{SPT} do ensaio SPT. A escolha do método se deu pela tipologia de ensaio disponível para a determinação dos parâmetros de deformação ao longo da profundidade do terreno.

- **Método de Teixeira e Godoy (1996)**

O método consiste na determinação simplista do módulo de elasticidade do solo a partir de sua correlação com o número N_{SPT} , para quando não se dispõe de ensaios de laboratório ou ensaios de prova de carga, como é o caso da análise da primeira safra. Nele, o módulo de elasticidade é determinado pela Equação 3.3:

$$E = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (3.3)$$

Onde,

α e K = parâmetros empíricos que dependem do tipo de solo e apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5 respectivamente;

Tabela 3.4. Coeficiente α (Teixeira & Godoy, 1996).

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Tabela 3.5. Coeficiente K (Teixeira & Godoy, 1996)

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

3.3.3 Coesão e Ângulo de Atrito

A partir das envoltórias de tensões, obtidas por meio dos ensaios triaxiais, e procedendo a relação da reta K_f , ou envoltória de ruptura que passa pelo estado de tensões onde $\sigma_1 = \sigma_3$ com a envoltória de Mohr-Coulomb, Figura. 3.18, determinou-se o valor de coesão e ângulo de atrito do maciço.

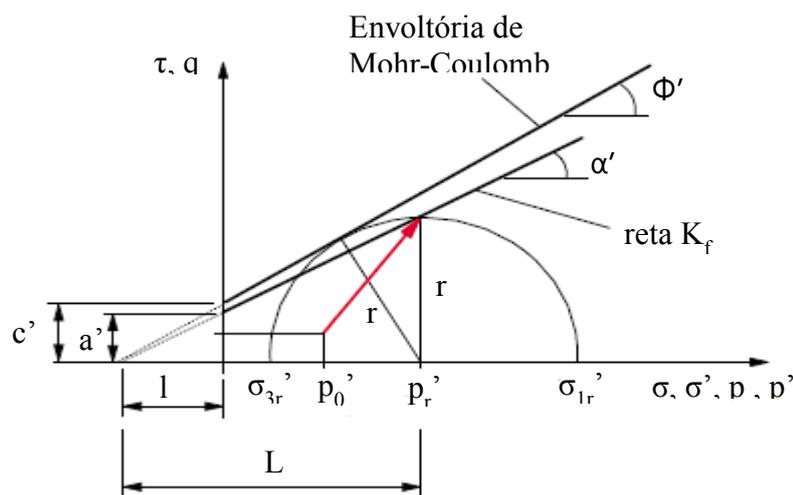


Figura 3.18. Definição da envoltória de Mohr-Coulomb e reta Kf (Palmeira, 2016).

Por meio de relações trigonométricas das envoltórias anteriores, podemos determinar a Equação da reta Kf, sendo ilustrada na Equação 3.4, e por meio desta determinar a coesão c' , e o ângulo de atrito ϕ' do solo.

$$q_r = a' + p'_r \tan \alpha' \quad (3.4)$$

Plotando-se as curvas $p' \times q'$, para cada amostra 01 e 02 do solo estudado, Figuras 3.19 e 3.20, respectivamente, determina-se a coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo para cada amostra.

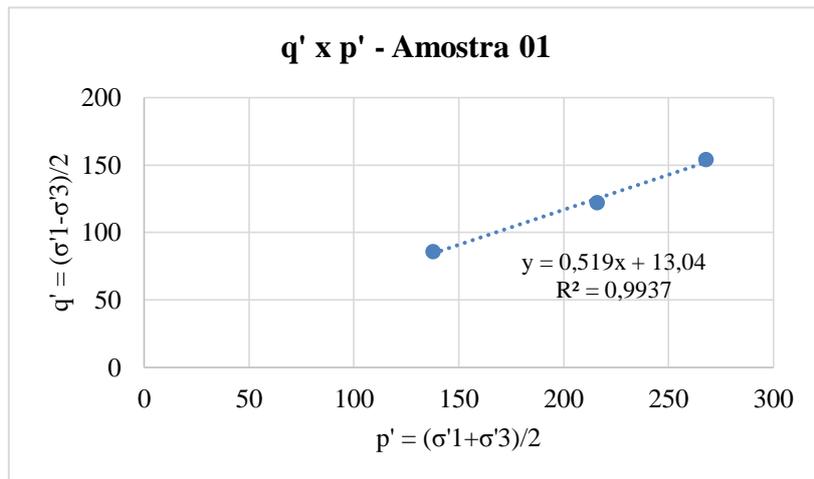


Figura 3.19. Gráfico $q' \times p'$ para a amostra 01.

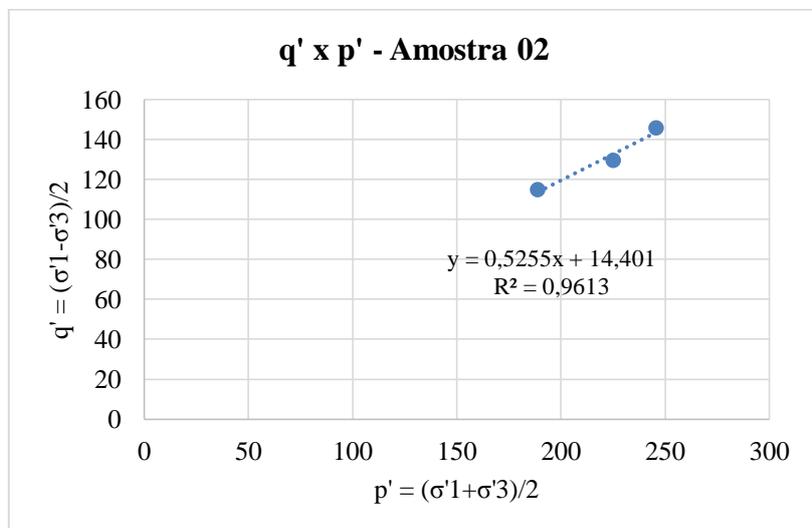


Figura 3.20. Gráfico $q' \times p'$ para a amostra 02.

A partir dos gráficos anteriores, e da Equação da reta Kf, a determinação de c' e ϕ' do solo para cada amostra foi determinada como ilustrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Coesão e ângulo de atrito efetivos das amostras coletadas a 5 m e 6 m de profundidade.

Parâmetros	Amostra 01	Amostra 02	Média
a'	13,04	14,401	-
$\tan(\alpha')$	0,519	0,525	-
ϕ' (graus)	31,26	31,70	31,48
c' (kPa)	15,25	16,92	16,1

Os valores encontrados, foram utilizados para a análise de todas as safras, bem como para a análise paramétrica, mesmo que o ensaio tenha sido efetuado apenas após a segunda safra e o estado de tensões tenha sido alterado, pois as correlações com N_{SPT} , único ensaio disponível para análise da primeira safra, encontradas na literatura para determinação da coesão não expressaram boa representatividade do problema.

3.3.4 Capacidade de Carga do Radier

A capacidade última ou carga de ruptura do radier, Q_{ult} , foi estimada pela Equação 3.5, considerando um elemento de fundação superficial circular apoiado em um maciço semi-infinito, indicada por Terzaghi (1943).

$$Q_{ult} = \pi R^2 (1,3cN_c + \gamma DN_q + 0,6\gamma RN_\gamma) \quad (3.5)$$

Onde,

R = raio do elemento;

c = coesão do solo;

γ = peso específico do solo.

D = cota de assentamento do elemento de fundação;

N_c , N_q e N_γ = fatores adimensionais de capacidade de carga.

Os fatores adimensionais de capacidade de carga N_c , N_q e N_γ são obtidos por meio de ábacos ou Tabelas facilmente encontradas na literatura, que relacionam o ângulo de atrito do solo e a forma de ruptura do terreno quando carregado, se localizada ou generalizada. Considerando-se um modo de ruptura localizada, para o caso de carregamentos rápidos e solos com baixa compactidade, deve-se proceder a correção dos fatores de capacidade de carga, por meio do ângulo de atrito e da coesão, de modo que os valores utilizados para as análises efetuadas neste trabalho foram os apresentados na tabela 3.7 a seguir.

Tabela 3.7. Fatores de capacidade de carga, para ruptura localizada, utilizados.

Fatores de Capacidade de Carga		
N_c'	N_q'	N_γ'
13,2	4,7	2,4

3.3.5 Capacidade de Carga das Estacas

A capacidade de carga ou carga de ruptura das estacas já existentes no silo, bem como daquelas acrescentadas à laje como reforço, foi estimada por meio de três métodos distintos, e por segurança, devido a falta de parâmetros adequados disponíveis, a carga adotada foi aquela correspondente ao menor valor. Os métodos utilizados foram os de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), e Teixeira (1996), e aplicados para as estacas do anel e do túnel de maneira distinta, haja visto o fato de que tais estacas se encontram em cotas de assentamento diferentes.

- **Método de Aoki-Velloso (1975)**

O método baseia-se em relações semi-empíricas com o ensaio SPT como forma de se estimar a resistência da estaca, de modo que a capacidade de carga de uma estaca isolada é dada pela Equação 3.6:

$$Q_{ult} = \frac{KN_p}{F_1} \cdot A_p + \frac{U}{F_2} \cdot \sum_1^n (\alpha \cdot K \cdot N_L \cdot \Delta_L) \quad (3.6)$$

Onde,

Q_{ult} = capacidade de carga da estaca;

N_p = índice de resistência à penetração, N_{SPT} , da cota de apoio da ponta da estaca;

A_p = área da seção transversal da ponta da estaca;

U = perímetro do fuste da estaca;

N_L = índice de resistência à penetração, N_{SPT} , médio na camada de solo de espessura Δ_L ;

K e α = coeficientes que dependem do tipo de solo da camada;

F_1 e F_2 = fatores de correção de escala;

- **Método de Décourt-Quaresma (1978)**

Conforme o método, considerando as alterações propostas por Décourt (1996), a capacidade de carga de uma estaca isolada é estimada pela Equação 3.7:

$$Q_{ult} = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot L \quad (3.7)$$

Onde,

Q_{ult} = capacidade de carga da estaca;

N_p = índice de resistência à penetração médio, N_{SPT} , da cota de apoio da ponta da estaca, correspondente aos valores da ponta, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;

A_p = área da seção transversal da ponta da estaca;

U = perímetro do fuste da estaca;

L = comprimento da estaca

C = coeficiente que depende do tipo de solo;

N_L = índice de resistência à penetração médio, N_{SPT} , ao longo do comprimento da estaca;

β e α = coeficientes que dependem do tipo de solo e da estaca;

- **Método de Teixeira (1996)**

Baseado nos métodos descritos anteriormente, Teixeira (1996) propôs a seguinte expressão para capacidade de carga, fornecida pela Equação 3.8.

$$Q_{ult} = \alpha \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot N_L \cdot U \cdot L \quad (3.8)$$

Onde,

Q_{ult} = capacidade de carga da estaca;

N_p = índice de resistência à penetração médio, N_{SPT} , da cota de apoio da ponta da estaca, correspondente a um intervalo de 4 diâmetros acima da ponta da estaca e 1 diâmetro abaixo;

A_p = área da seção transversal da ponta da estaca;

U = perímetro do fuste da estaca;

L = comprimento da estaca

N_L = índice de resistência à penetração médio, N_{SPT} , ao longo do comprimento da estaca;

β e α = coeficientes que dependem do tipo de solo e da estaca;

3.3.6 Inércia Equivalente dos Elementos da Laje

O programa GARP, utilizado para a análise numérica do problema considera para a modelagem do radier, elementos de chapa retangulares sólidos. Porém, a laje utilizada como piso do silo, é composta em algumas partes de sua seção transversal por elementos vazados de diferentes geometrias por abrigar o túnel central e o sistema de aeração dos tanques, Figura 3.21.

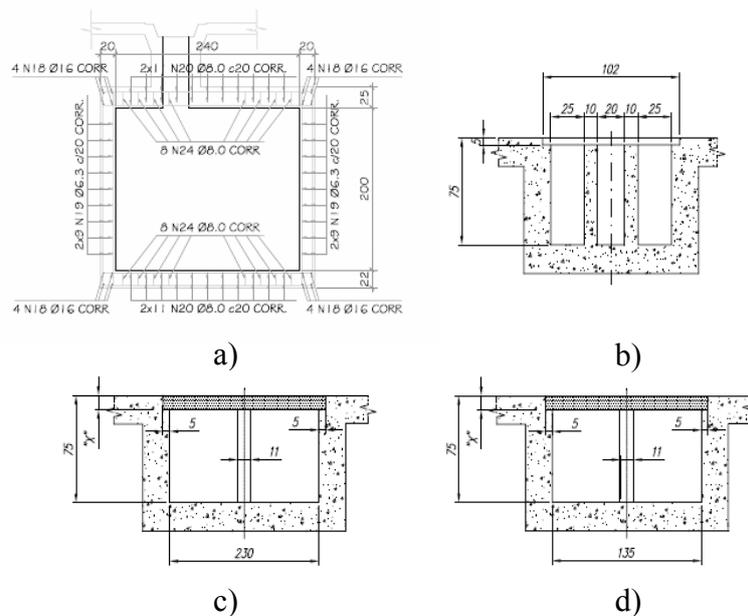


Figura 3.21. Seções transversais dos elementos adjacentes à laje dos silos: a) túnel central b) aeração longitudinal à laje c) aeração de maior dimensão transversal à laje d) aeração de menor dimensão transversal à laje (Modificado de EPF Geotecnia, 2017).

Desta forma, com o intuito de modelar a rigidez correta do elemento de laje como um todo, procedeu-se o cálculo de dimensões de elementos sólidos retangulares com inércias equivalentes, para a região do túnel central e do sistema de aeração. Considerando a inércia de um único elemento pela Equação 3.9:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.9)$$

Onde,

I = inércia de um único elemento em cm⁴;

b = largura do elemento em cm;

h = altura do elemento em cm.

A Tabela 3.8 apresenta a inércia real total dos elementos, e da altura de um elemento sólido retangular com inércia equivalente.

Tabela 3.8. Inércia real total dos elementos da laje e altura de um elemento sólido retangular com inércia equivalente.

Elemento	Inércia real total (cm⁴)	h equivalente (cm)
Túnel	38608453	118
Aerador Longitudinal	1659979	55
Aerador Transversal (Seção Maior)	1405948	42
Aerador Transversal (Seção Menor)	1386260	47

3.4 CONCEPÇÃO DA ANÁLISE NUMÉRICA

O primeiro passo para o desenvolvimento da modelagem numérica no programa GARP foi a elaboração da malha que simularia a laje de fundo, estudada como um radier em contato com o solo, e que seria utilizada para as análises.

Os elementos de placa, os quais o radier é dividido, são discretizados por meio de elementos de placa, que em planta são divididos em elementos retangulares. Porém a laje dos silos apresenta formato circular. Assim sendo, a malha utilizada foi desenvolvida a partir de um elemento prismático com área equivalente a área dos silos, como na Figura 3.22, após um estudo que procurou criar aquela que mais se aproximaria da geometria da laje circular e discretizaria ao máximo o elemento, procurando limitar quando possível o número de elementos e nós como forma de evitar tempos excessivos de processamento ou até mesmo erros na execução do *software*, devido à limitações do próprio programa GARP no que desrespeito a quantidade máxima de elementos possíveis para a elaboração da malha.

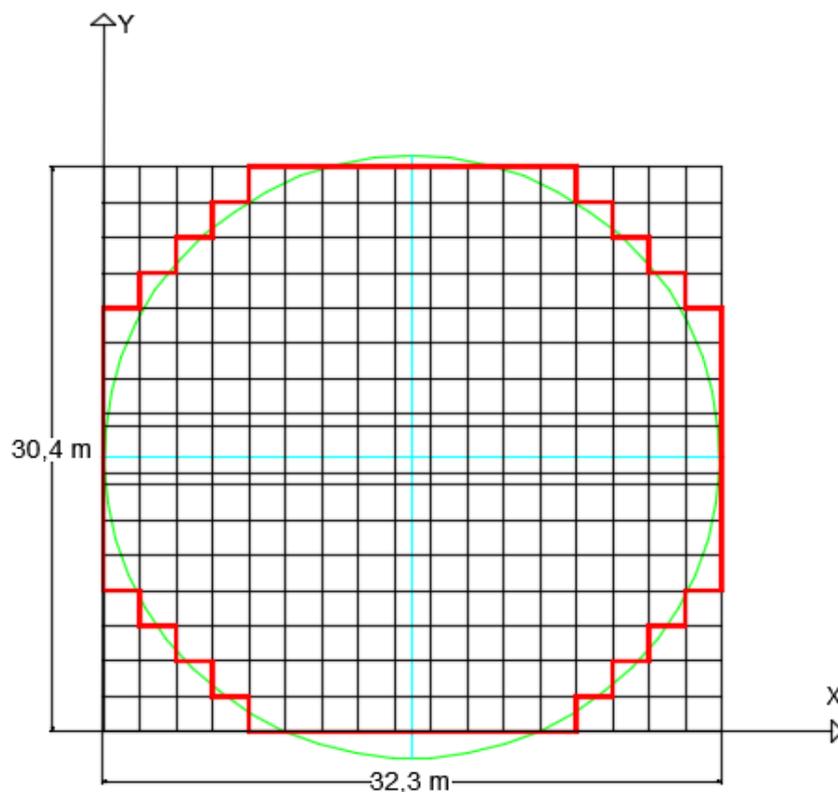


Figura 3.22. Malha prismática utilizada para simulação da laje do fundo, ou radier.

Ao fim, para a simulação dos oito silos em conjunto, a malha contou com 7668 nós e 2485 elementos, dispostos como pode ser visto na Figura 3.23.

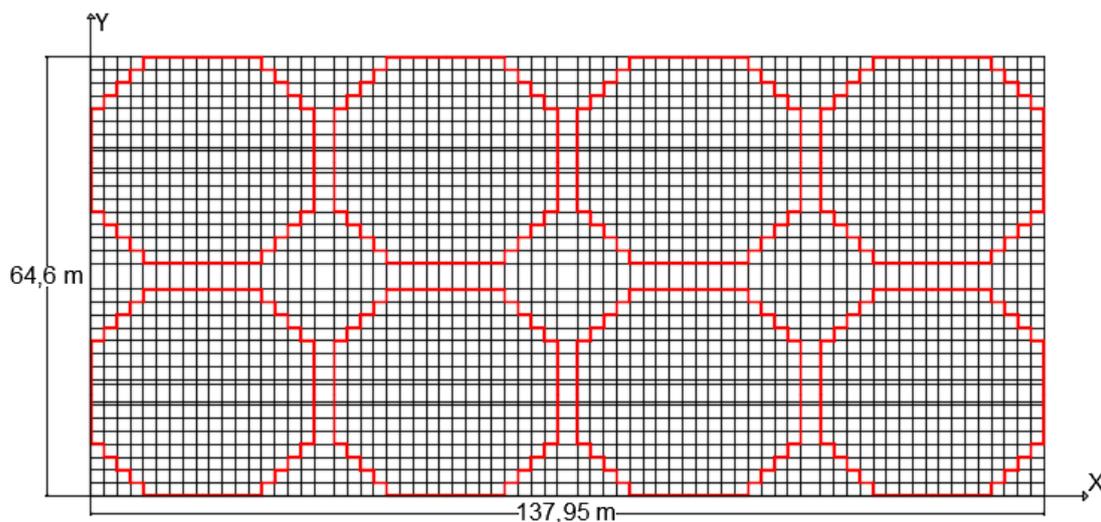


Figura 3.23. Malha completa para simulação da laje dos 8 silos em conjunto.

Após a elaboração da malha procedeu-se à determinação da rigidez das estacas e dos fatores de interação os elementos do sistema de fundação, para cada safra, via o programa DEFPIG. Para tanto, os dados de entrada do programa consistem basicamente em aspectos geométricos da estaca, módulo de elasticidade do material que as constituem, parâmetros de deformabilidade do solo, para cada camada em que se divide o maciço, como seu módulo de elasticidade, e coeficiente de Poisson. Para a discretização do solo, adotou-se camadas de 1 metro, ao longo do comprimento das estacas.

Pelo fato das estacas do anel e da laje estarem em cotas de assentamento diferentes, e desta forma, inseridas em camadas com parâmetros diferentes, procedeu-se análise separada em todas as etapas, para as estacas dos dois elementos.

A configuração do grupo de estacas e seu carregamento no DEFPIG, não influenciam no cálculo da rigidez das estacas nem dos fatores de interação, assim sendo, pode-se proceder o uso de qualquer configuração sujeita a qualquer carregamento. Para todo o trabalho, adotou-se um grupo formado por 9 estacas distribuídas simetricamente ao longo do bloco, sujeito a um carregamento unitário.

Para a concepção da análise em ambos os programas, DEFPIG e GARP, é necessário que o usuário insira valores de distância de interação entre as estacas S/D , razão entre o espaçamento entre elas e seu diâmetro, como forma de se calcular os fatores de interação entre os elementos.

O programa DEFPIG por se basear no método dos elementos de contorno (MEC), considera a interação apenas entre duas estacas de vez, desconsiderando a presença de outras estacas que ali estejam. Estudos feitos por Sales *et al.* (2010) sugerem limitar o valor de S/D para 15, como forma de proceder a correta análise de interação e reduzir o inconveniente citado anteriormente pela análise via MEC. Desta forma, para todas as simulações desenvolvidas neste trabalho, utilizou-se os seguintes valores para S/D: 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, e 15.

Determinada a rigidez das estacas e os fatores de interação, procede-se à análise no programa GARP. A primeira etapa consiste na inserção das coordenadas dos nós que compõe a malha escolhida, em relação aos eixos x e y, e geração da malha junto ao programa.

Após a geração da malha, insere-se os dados referentes as estacas, radier e o solo. O programa permite o uso de mais de um tipo de estaca, onde os dados necessários são seu comprimento, diâmetro, rigidez (calculada pelo programa DEFPIG), capacidade última da estaca à compressão e à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material que a compõe, valores de S/D e por fim, os fatores de interação retirados também da análise prévia feita pelo DEFPIG. Para o radier, deve-se inserir seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

O solo pode ser dividido em quantas camadas necessárias, sendo que o usuário deve fornecer a espessura de cada uma delas, bem como sua resistência à compressão e à tração, seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Uma vez que todos os dados dos elementos do sistema foram inseridos, é necessário que se proceda a locação das estacas ao longo do radier, sendo que estas podem ser posicionadas nos nós da malha, bem como em trechos intermediários entre dois nós.

Após o posicionamento das estacas, deve-se atribuir a cada elemento da malha uma espessura, que equivale à espessura real do radier, e neste trabalho as espessuras equivalentes calculadas a partir da inércia dos elementos que compunham a laje, determinaram um radier com espessuras variáveis ao longo de sua seção, como pode ser visualizado na Figura 3.24. Para os elementos entre os silos, que representavam o solo, adotou-se uma espessura mínima possível, $h = 0,01$ m.

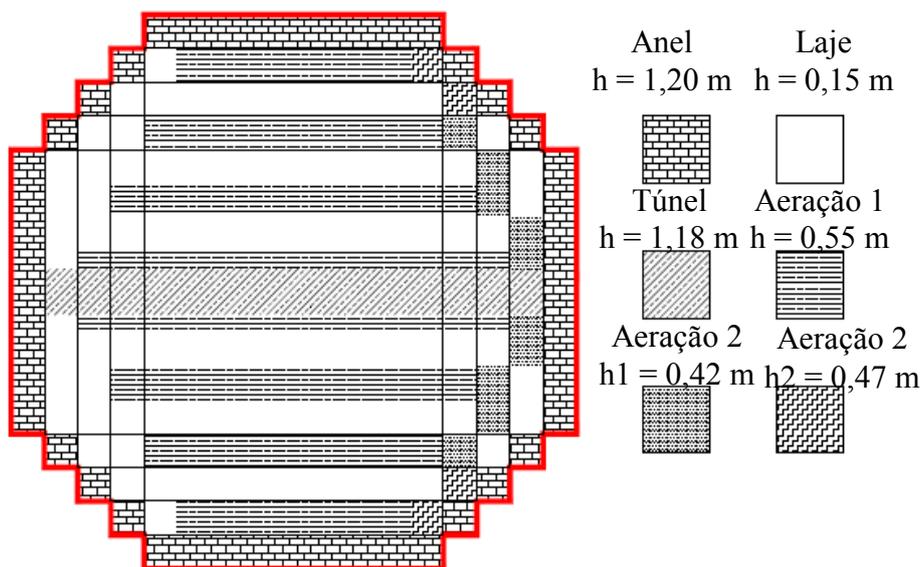


Figura 3.24. Laje de fundo com respectivas espessuras equivalentes utilizadas na análise numérica.

A última etapa consiste na atribuição do carregamento aos elementos do radier, sendo possível atribuir carregamentos distribuídos, momentos e cargas pontuais. Todas as análises aqui desenvolvidas consideraram carregamento vertical distribuído ao longo do radier, devido à falta de informações detalhadas disponíveis a respeito da concepção do carregamento utilizado no projeto original. A carga do anel externo, se tratava de uma força concentrada ao longo de sua superfície, e como forma de simplificar a concepção do carregamento, foi dividida pela área dos elementos que formavam o anel, para que assim todo os elementos da malha estivessem sob o efeito de um carregamento uniformemente distribuído. As cargas aplicadas ao silo, utilizadas nas análises de safra e paramétrica, constam nas Tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9. Carregamento utilizado na concepção da simulação da primeira safra e das análises paramétricas no programa GARP.

Elemento	Carga (kPa)
Laje de fundo	135,3
Anel externo	170,4

Tabela 3.10. Carregamento utilizado na concepção da simulação da segunda safra no programa GARP.

Silo	Elemento	Carga (kPa)
1	Laje de fundo	56,8
	Anel externo	71,6
2	Laje de fundo	39,2
	Anel externo	49,4
3	Laje de fundo	0
	Anel externo	0
4	Laje de fundo	56,8
	Anel externo	71,6
5	Laje de fundo	101,5
	Anel externo	127,8
6	Laje de fundo	17,6
	Anel externo	22,2
7	Laje de fundo	101,5
	Anel externo	127,8
8	Laje de fundo	101,5
	Anel externo	127,8

Por fim, as análises geradas pelo programa GARP, fornecem, tanto em forma de banco de dados quanto de visualização gráfica, as pressões de contato entre o radier e o solo, a carga nas estacas, a configuração dos recalques totais e diferenciais, a distribuição de momentos fletores e esforços cortantes ao longo do radier, bem como o resultado de demais aspectos que não fizeram parte da análise aqui efetuada.

3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS SAFRAS

A análise das safras consistiu em se determinar através do programa GARP, a configuração de recalques totais próximas aquelas medidas em campo. Para tanto, utilizou-se parâmetros de deformabilidade distintos para cada safra, devido ao fato de que haviam ensaios diferentes para cada período.

Manteve-se constantes os demais parâmetros do solo e das estacas para as duas safras, com exceção do carregamento, que como já visto anteriormente, variou para as duas etapas.

A configuração da malha, já com locação das estacas concluída, Figura 3.25, foi a mesma para a análise das duas safras.

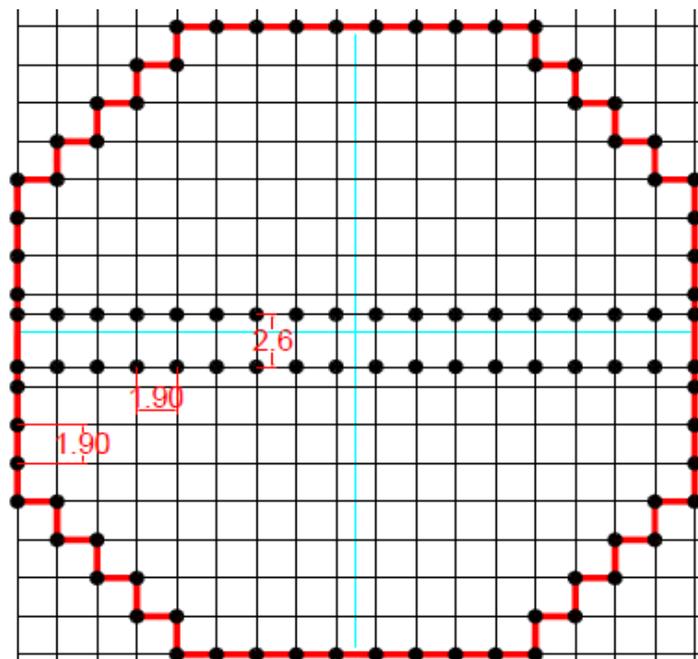


Figura 3.25. Malha de um silo com estacas localizadas para modelagem das safras.

3.5.1 Parâmetros da Primeira Safra

Para a primeira safra, o SPT foi o único ensaio executado e disponível para estimativa dos parâmetros do solo, assim sendo, a determinação do módulo de elasticidade das camadas baseou-se na expressão de Teixeira & Godoy (1996), e foi calculada a partir da média entre os índices de resistência à penetração dos seis furos.

Como forma de considerar o módulo de elasticidade da camada de aterro compactado, camada sem índice N_{SPT} medido pelo ensaio para esta safra, adotou-se uma melhoria de 50% na sua

resistência em relação à camada superficial logo abaixo, mesma taxa de melhoria apresentada no valor de N_{SPT} encontrado para a camada de aterro, perfurada na segunda safra. Portanto, para a primeira camada, ocupada pelo aterro compactado, estimou-se um valor de módulo 50% superior ao da primeira camada de terreno natural.

Já para as camadas com cota superior a 26 m, não alcançadas pelo ensaio, adotou-se de forma simplista, o mesmo índice N_{SPT} encontrado para a última camada. Os valores estimados para o módulo de elasticidade, encontram-se na Figura 3.26.

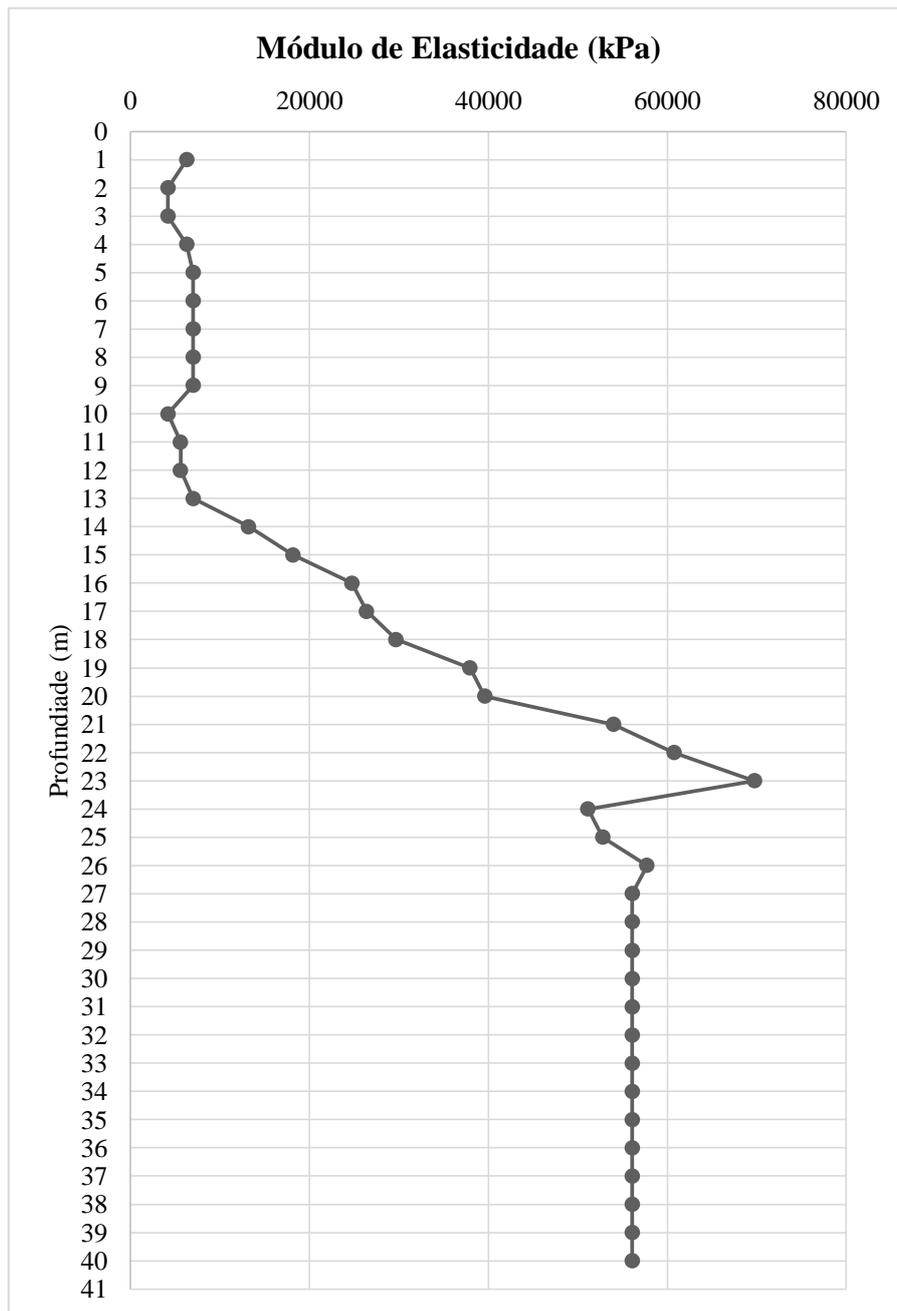


Figura 3.26. Variação do módulo de elasticidade (E) com a profundidade para a primeira safra.

Os resultados para a capacidade de carga à compressão das estacas para os métodos de Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira são apresentados na Tabela 3.11, sendo adotado como dado de entrada para o programa GARP, o menor valor encontrado.

Tabela 3.11. Capacidade última das estacas do anel externo e túnel central - 1ª safra.

Método	Capacidade de carga - Anel (kN)	Capacidade de carga - Túnel (kN)
Aoki-Velloso (1975)	1350,58	1711,12
Décourt-Quaresma (1978)	707,24	806,94
Teixeira (1996)	588,0	699,5
Q_{ult} (compressão)	588,0	699,5
Q_{ult}^1 (tração)	352,8	419,7

1. Q_{ult}^1 (tração) = 60% Q_{ult} (compressão). Referência comumente adotada em projetos de fundações usuais.

Os demais parâmetros adotados para o solo logo abaixo do radier e as estacas utilizados na análise do DEFPIG e do GARP, foram compilados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Parâmetros gerais do solos e estacas utilizados na análise numérica.

Estacas	Solo
Coefficiente de Poisson - $\nu = 0,2$	Coefficiente de Poisson - $\nu = 0,3$
Módulo de elasticidade - $E = 25000$ MPa	$\sigma_{ult}^1 = 669,4$ kPa

1. Tensão última determinada pela capacidade de ruptura obtida pela Equação de Terzaghi dividida pela área de um silo.

De maneira geral, os parâmetros do terreno em valores médios para cada camada em profundidade são ilustrados na Tabela 3.13 a seguir.

Tabela 3.13. Parâmetros em valores médios utilizados na análise da primeira safra, por camada.

Cota (m)	Camada	E (kPa)	c' (kPa)	Φ' (Graus)	N _{SPT}
+1,5	Aterro Compactado	6300 ¹	16,1	31,48	-
0,0	Camada 1	4200	16,1	31,48	2
-3,0	Camada 2	7000	16,1	31,48	5
-13,0	Camada 3	26400	16,1	31,48	8
-18,0	Camada 4	46800	16,1	31,48	17
-20,0	Camada 5	56100	16,1	31,48	34
-40,0	Impenetrável	200000	16,1	31,48	-

1. Valor adotado como 50% do módulo de elasticidade da camada inferior.

3.5.2 Parâmetros da Segunda Safra

Para a análise da segunda safra, a estimativa de parâmetros de deformação do terreno levou em conta os resultados do ensaio SPT que teve início na camada de aterro, atingindo o impenetrável ao trépano de lavagem em 40 metros. A estimativa do módulo de elasticidade em relação à profundidade do terreno foi feita baseando-se novamente na Equação de Teixeira e Godoy (1996), considerando o valor médio de N_{SPT} dos três furos, tal variação pode ser observada na Figura 3.27.

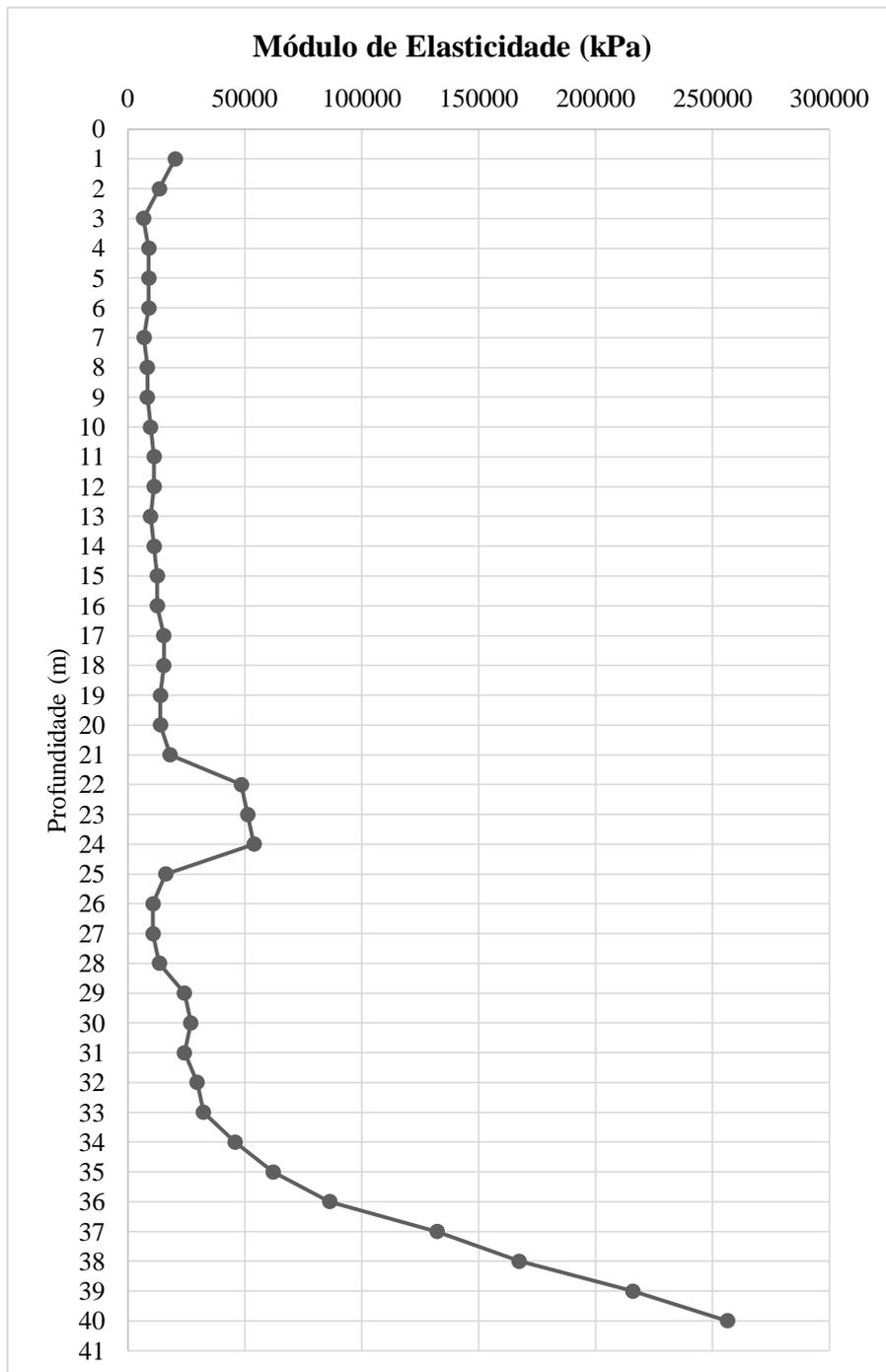


Figura 3.27.Variação do módulo de elasticidade (E) com a profundidade para a segunda safra estimada pelo ensaio SPT.

Os resultados para a capacidade de carga à compressão das estacas foram estimados pelos mesmos métodos utilizados na primeira safra, considerando o novo ensaio à percussão e são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14. Capacidade última das estacas do anel externo e túnel central - 2ª safra.

Método	Capacidade de carga - Anel (kN)	Capacidade de carga - Túnel (kN)
Aoki-Velloso (1975)	517,1	1405,9
Décourt-Quaresma (1978)	615,9	828,4
Teixeira (1996)	535,6	675,0
Q_{ult} (compressão)	517,1	675,0
Q_{ult}^1 (tração)	310,2	405,0

1. Q_{ult}^1 (tração) = 60% Q_{ult} (compressão)

De maneira geral, os parâmetros do terreno em valores médios para cada camada em profundidade, a partir dos parâmetros obtidos pelo ensaio SPT para a segunda safra, são ilustrados na Tabela 3.15 a seguir.

Tabela 3.15. Parâmetros em valores médios utilizados na análise da segunda safra, por camada.

Cota (m)	Camada	E (kPa) SPT	c' (kPa)	Φ' (Graus)	N_{SPT}
+1,5	Aterro Compactado	20250	16,1	31,48	9
0,0	Camada 1	9000	16,1	31,48	4
-3,0	Camada 2	9400	16,1	31,48	7

Cota (m)	Camada	E (kPa) SPT	c' (kPa)	Φ' (Graus)	N _{SPT}
-13,0	Camada 3	14000	16,1	31,48	10
-18,0	Camada 4	16100	16,1	31,48	12
-20,0	Camada 5	45900	16,1	31,48	17
-40,0	Impenetrável	200000	16,1	31,48	-

3.6 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para estudo do efeito da adição de estacas ao longo da laje, procedeu-se de forma simplista, uma análise paramétrica, onde variou-se o número de estacas, seu diâmetro e comprimento, assim como a espessura do radier, como forma de avaliar principalmente o recalque total da laje de fundo, sua distorção angular, momentos fletores totais, carga nos elementos, bem como a pressão de contato da laje com o solo.

Como os recalques provenientes do carregamento das safras do ano de 2016 foram menores do que os do ano de 2015, há possibilidade destes deslocamentos estarem estabilizando-se ao longo do tempo, como observado anteriormente pelos ensaios oedométricos cíclicos. Assim sendo, o acréscimo de estacas ao longo do radier ou da laje após a construção e enchimento dos silos não seria uma solução vantajosa para a redução dos recalques. Com isso, a análise paramétrica desenvolvida neste trabalho procurou de forma preventiva simular o comportamento do conjunto de silos caso sua laje de fundo fosse estaqueada previamente ao primeiro carregamento.

Vale ressaltar que por se tratar de um projeto de reforço preventivo que simularia o comportamento dos silos quando estaqueados antes de seu carregamento inicial, os parâmetros de deformabilidade do solo e de resistência das estacas foram os mesmos já descritos e utilizados para a análise da primeira safra, onde o solo ainda não havia sido carregado anteriormente. Tais parâmetros são resumidos na Tabela 3.16 a seguir.

Tabela 3.16. Parâmetros utilizados para a análise paramétrica nos programas DEFPIG e GARP.

Estacas	
Coeficiente de Poisson (ν) = 0,2	E = 25000 MPa
Anel	Túnel
Q_{ult} (compressão) = 588 kN	Q_{ult} (compressão) = 699,5 kN
Q_{ult} (tração) = 352,8 kN	Q_{ult} (tração) = 419,7 kN
Solo	
Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3	σ_{ult} = 669,4 kPa
Camada	E (kPa)
Aterro Compactado	6300
1	4200
2	7000
3	26400
4	46800
5	56100
Impenetrável	200000

Em todas as análises, trabalhou-se com o pior cenário de carregamento, considerando-se todos os silos 100% carregados simultaneamente, situação provável de ocorrer em períodos iniciais de safra.

A análise foi estruturada com sete configurações distintas, partindo do ponto de configuração original, sem estacas na laje de fundo, apenas no anel externo e túnel, e aumentando o número de estacas ao longo da laje, com distribuição uniforme e espaçamento entre eixos de estacas iguais a 1,90 metros, variando seu diâmetro e comprimento, e a espessura do radier. A Tabela 3.17 resume as principais características das configurações utilizadas e propriedades consideradas para as estacas e radier.

Tabela 3.17. Configurações de distribuição de estacas ao longo da laje e parâmetros utilizados.

Configuração	Número de Estacas na Laje de fundo/ Radier	Comprimento - L (metros)	Diâmetro - D (metros)	Espessura do radier - e (metros)
		-	-	0,10
1	0	-	-	0,20
		-	-	0,30
		16	0,30	0,10
2	48	20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30
		16	0,30	0,10
3	76	20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30
		16	0,30	0,10
4	96	20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30
		16	0,30	0,10
5	116	20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30

Configuração	Número de Estacas na Laje de fundo/ Radier	Comprimento - L (metros)	Diâmetro - D (metros)	Espessura do radier - e (metros)
6	140	16	0,30	0,10
		20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30
7	172	16	0,30	0,10
		20	0,40	0,20
		24	0,50	0,30

Para todas as análises, incluindo a configuração original, foram utilizadas estacas pré-moldadas de concreto na simulação, por sua simplicidade de execução, maior controle de qualidade das propriedades da estaca, e facilidade de transporte até o local de implantação dos silos.

A configuração original de estacas, bem como as demais configurações simuladas, com a distribuição de estacas ao longo da laje pode ser melhor visualizada nas Figuras 3.28 a 3.34.

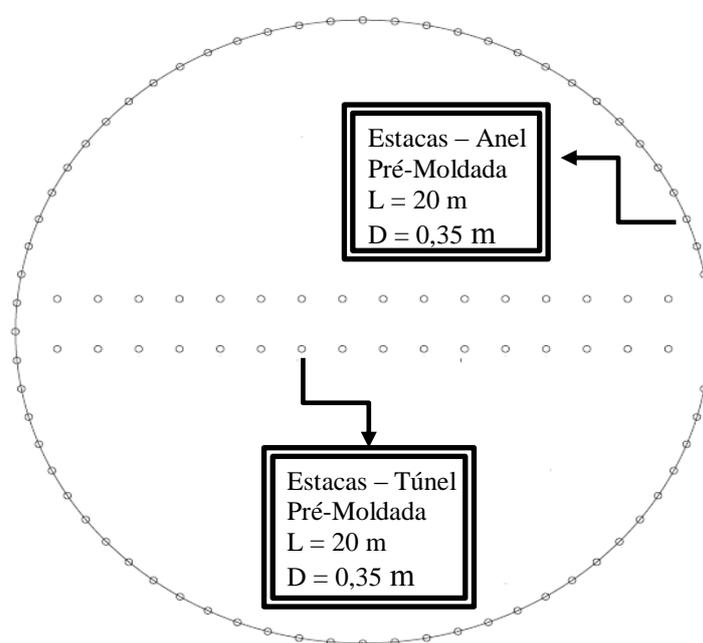


Figura 3.28. Configuração de estaqueamento original - C1.

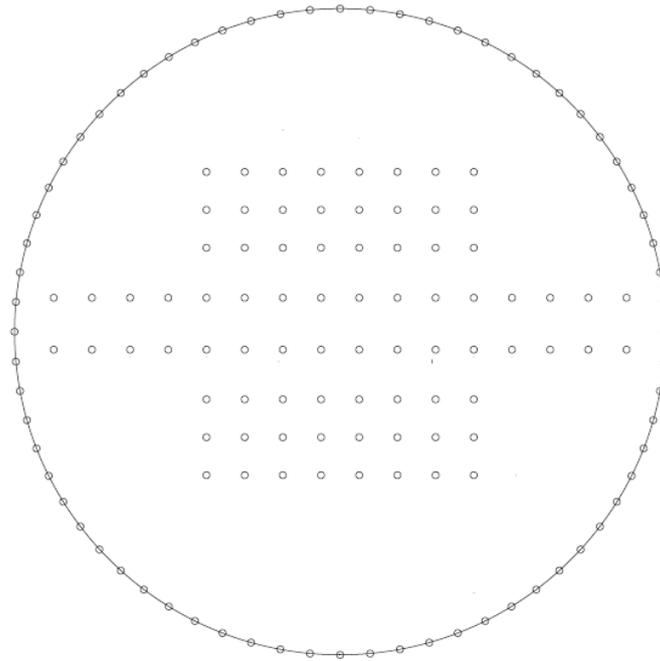


Figura 3.29. Configuração de estaqueamento C2 - 48 estacas na laje de fundo.

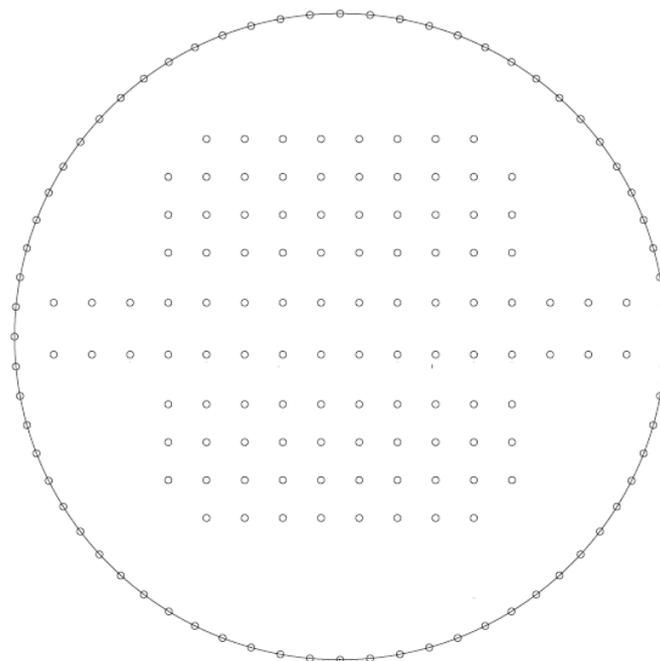


Figura 3.30. Configuração de estaqueamento C3 - 76 estacas na laje de fundo.

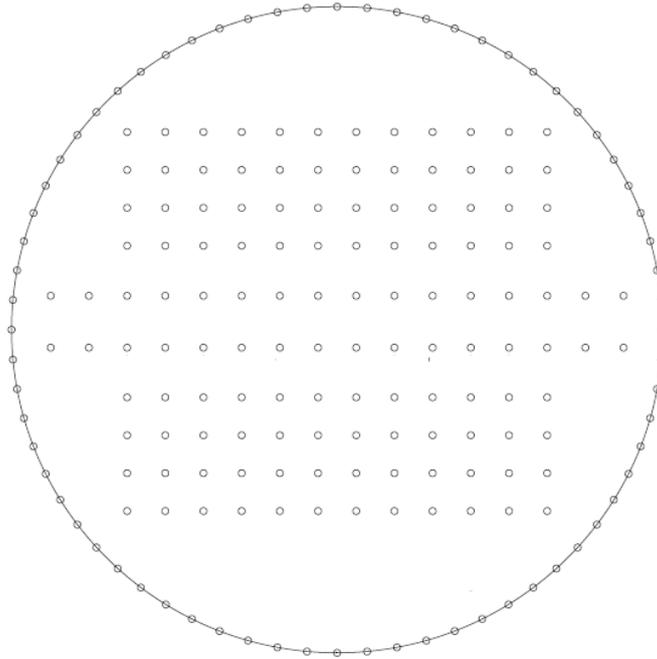


Figura 3.31. Configuração de estaqueamento C4 - 96 estacas na laje de fundo.

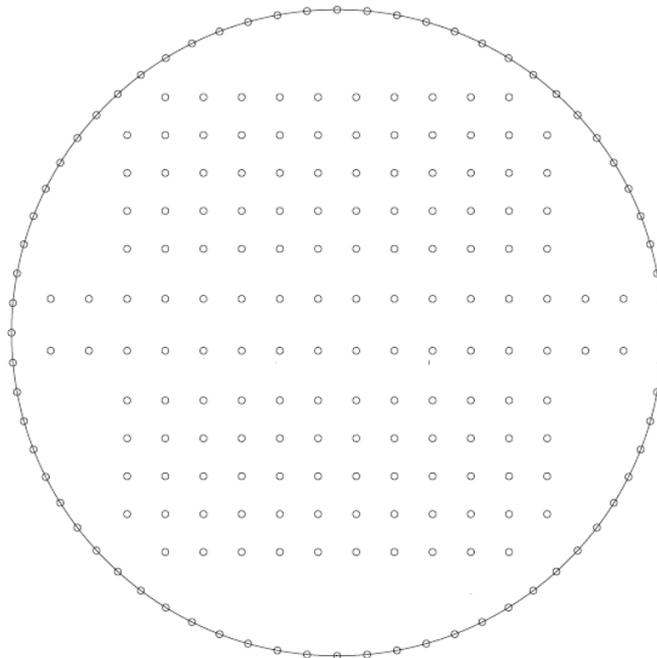


Figura 3.32. Configuração de estaqueamento C5 - 116 estacas na laje de fundo.

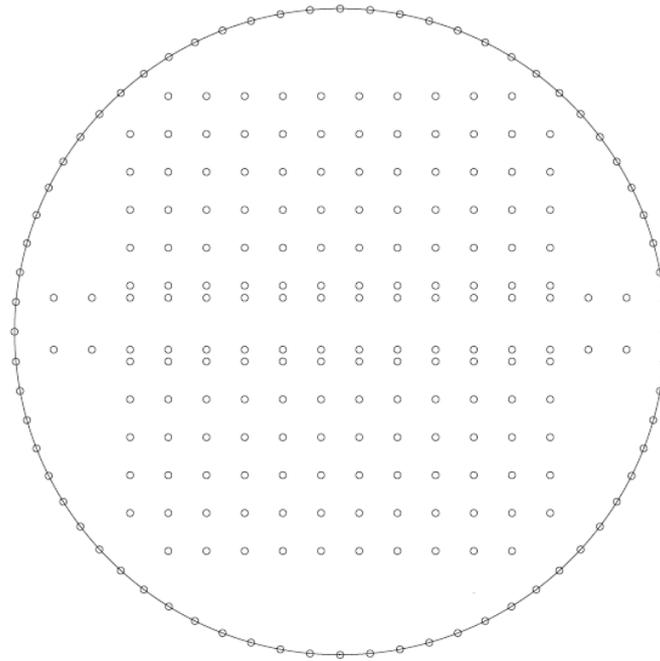


Figura 3.33. Configuração de estaqueamento C6 - 140 estacas na laje de fundo.

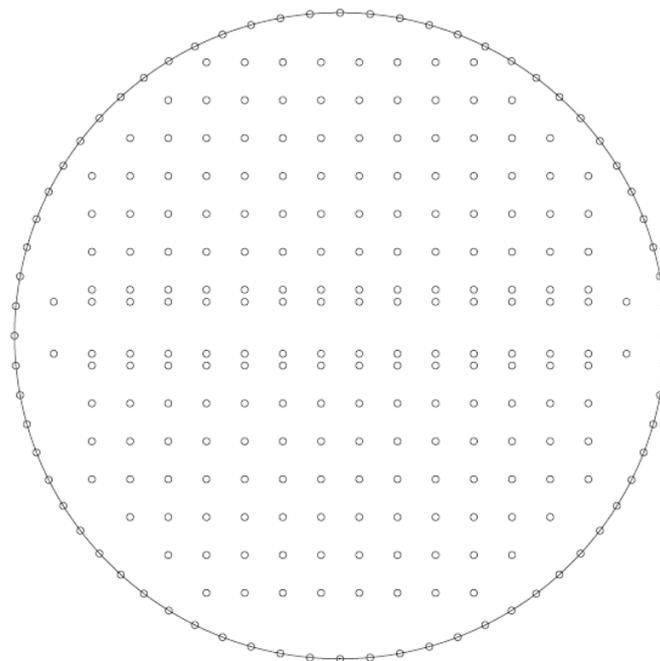


Figura 3.34. Configuração de estaqueamento C7 - 172 estacas na laje de fundo.

Todos os parâmetros de resistência das estacas foram estimados da mesma maneira como procedido na simulação das safras dos anos de 2015 e 2016, calculando-se uma capacidade de carga última para compressão e tração para cada tipo de estaca, assim como os fatores de interação calculados pelo programa DEFPIG.

As análises paramétricas aqui efetuadas tiveram como objetivo avaliar o efeito da variação do número de estacas, seu diâmetro e comprimento, bem como da espessura do radier, nos seguintes aspectos:

- O recalque total nos elementos da laje, túnel e anel externo;
- A distorção angular do túnel em relação ao anel externo;
- Os valores de momentos fletores máximos ao longo da laje de fundo;
- A carga distribuída pelos elementos, estacas e radier;
- A pressão de contato máxima nos elementos da laje de fundo.

Por fim, por meio dos gráficos e resultados encontrados, estimou-se um número ou configuração ótima de estacas que atendesse satisfatoriamente o desempenho de todo o conjunto de silos como forma de prevenir deslocamentos indevidos e fissuras ao longo de seu corpo, o que provocou efetivamente sua utilização parcial ou em alguns casos sua inutilização.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos das análises e simulações das safras são apresentados a seguir. Os fatores de interação entre os elementos, α_{PR} , foram obtidos previamente via programa DEFPIG, e após sua obtenção, foram lançados no programa GARP para a tentativa de simulação do comportamento encontrado em campo, bem como avaliação do comportamento da laje de fundo quando estaqueada.

Para a primeira e segunda safra, objetivou-se alcançar por meio do programa GARP, quando possível, o recalque medido *in situ* nos anéis externos, sendo este o único local de recalques monitorado no campo.

Por fim, para a análise paramétrica, os resultados obtidos procuraram uma proposta de reforço buscando o número ótimo de estacas para um desempenho satisfatório do sistema, por meio dos parâmetros utilizados na primeira campanha de sondagem, realizada previamente ao carregamento dos silos, o que permitiria realizar um estudo preventivo aos sinistros ocorridos nas estruturas do tanque.

4.1 RECALQUES TOTAIS DA PRIMEIRA SAFRA

Por se tratar de carregamento e malha de discretização uniformes, aliados ao fato de que o programa não permite a discretização do solo em planta, apenas em profundidade, o GARP gera valores de recalques uniformes ao longo de sua malha em planta. Assim sendo, trabalhou-se com valores de recalques médios totais medidos em campo, como forma de comparar com aqueles obtidos por meio do *software*. O recalque médio total dos silos carregados medidos em campo da primeira safra é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Recalque médio por silo e recalque médio total da safra de 2015.

Silo	Recalque Médio (cm)
1	4,33
2	9,05

Silo	Recalque Médio (cm)
3	10,85
4	12,28
Recalque Médio Total (m)	9,0

Os fatores de interação entre as estacas e o solo, bem como a rigidez das estacas, encontrados para a primeira safra por meio do programa DEFPIG são ilustrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Rigidez e fatores de interação para a primeira safra, via parâmetros obtidos pelo ensaio SPT.

Estacas - Anel		Estacas - Túnel	
Rigidez (kN/m)	102401,6	Rigidez (kN/m)	117163,1
s/D	Fator α_{PR}	s/D	Fator α_{PR}
1,5	0,330	1,5	0,302
2	0,299	2	0,274
2,5	0,274	2,5	0,251
3	0,254	3	0,234
4	0,224	4	0,206
5	0,201	5	0,185
6	0,183	6	0,169
7	0,168	7	0,155
8	0,156	8	0,144
9	0,145	9	0,134

Estacas - Anel		Estacas - Túnel	
Rigidez (kN/m)	102401,6	Rigidez (kN/m)	117163,1
10	0,136	10	0,125
12	0,120	12	0,111
15	0,102	15	0,094

A diferença entre os valores encontrados para as rigidezes entre as estacas do anel e do túnel reside no fato de tais estacas estarem em cotas de assentamento distintas, de forma que as estacas do túnel se encontram a 2 metros abaixo da cota de assentamento das estacas do anel, ou seja, encontram-se em um perfil composto por uma camada mais rígida, como pode ser observado no resultado da primeira sondagem. Assim sendo, a rigidez destas estacas apresentou maiores valores.

A configuração de recalques do conjunto de silos carregados com a primeira safra, obtidas por meio dos parâmetros obtidos pelo ensaio SPT, e com o auxílio do programa GARP, pode ser vista na Figura 4.1. Os recalques totais médios ao longo do anel externo e do túnel foram de 10 cm e 15 cm, respectivamente.

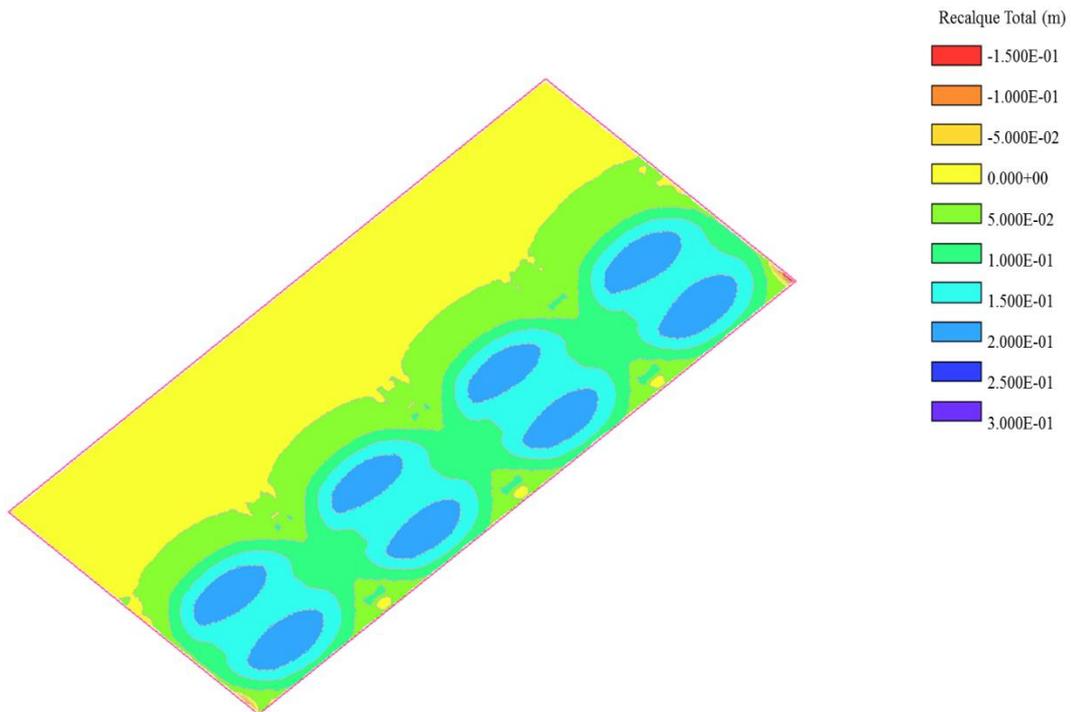


Figura 4.1. Recalques totais médios ao longo dos silos carregados pela primeira safra.

Os recalques médios medidos em campo apresentaram valores em torno de 0,09 m, próximos aos deslocamentos obtidos pela análise no programa GARP, que resultaram em 0,10 m. Assim sendo, apesar das simplificações inerentes ao ensaio SPT, utilizado para obtenção dos parâmetros de deformabilidade, o *software* foi considerado como eficaz na previsão dos recalques reais do anel. Os valores obtidos para os deslocamentos da laje do túnel não foram utilizados como parâmetro de comparação, haja visto que os recalques ao longo destes elementos não foram medidos em campo.

4.2 RECALQUES TOTAIS DA SEGUNDA SAFRA

Para a segunda safra, haja visto o cenário de recalques excessivos que prejudicaram a operação dos silos, mediu-se os deslocamentos tanto na região do anel externo, quanto na região do túnel central. Os valores monitorados são resumidos na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3. Configuração de recalques por silo, medidos em campo, para a segunda safra.

Silo	Recalque Médio (cm)	
	Anel	Túnel
1	4,99	20,8
2	1,09	25,4
3	1,1	26,3
4	0,26	12,4
5	2,72	3,4
6	0,71	0,8
7	0,95	6,6
8	0,41	4,5
Recalque Médio Total (m)	1,53	12,3

Com os valores medidos em campo, pode-se concluir que a região do túnel para todos os silos apresentou maiores deslocamentos, devido à maior concentração de tensões nesta região, quando comparadas à região do anel externo, e de uma forma geral, a região do anel externo tornou-se mais rígida para a segunda safra, configurando uma possível diminuição dos deslocamentos ao longo do tempo.

Na segunda safra, os carregamentos não eram uniformes entre os silos, de forma que os recalques totais não poderiam ser obtidos pelas médias dos recalques de cada silo. Contudo, como já mencionado, o programa GARP não é capaz de discretização das propriedades do solo em planta, apenas em profundidade.

Desta forma, a análise para a segunda safra consistiu de maneira simplificada em duas análises separadas, realizadas em momentos distintos, considerando o estudo dos deslocamentos por meio da rigidez média do solo da parte superior e inferior dos silos, Figura 4.2, sendo a parte

superior composta pelos silos S5, S6, S7, S8, e a parte inferior composta pelos silos S1, S2, S3 e S4.

A escolha da metodologia de análise foi atribuída ao fato de que os recalques da parte inferior e superior se apresentaram relativamente constantes para cada parte, e também ao fato de se terem disponíveis amostras para caracterização, em laboratório, do terreno para cada região.

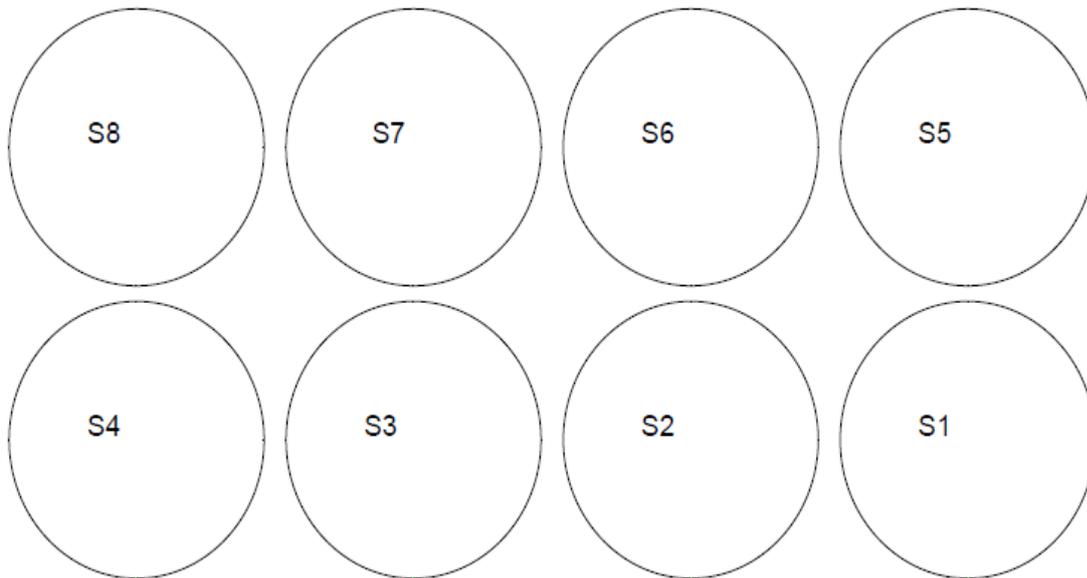


Figura 4.2. Configuração superior e inferior dos silos para a análise da segunda safra.

A rigidez média (mm/kPa) foi obtida pelo recalque médio de cada parte separada, inferior e superior, do conjunto de silos, dividida pelo carregamento médio de cada parte. A rigidez média de campo calculada encontra-se na Tabela 4.4 e procurou-se com as análises realizadas para a segunda safra com o programa GARP atingir, quando possível, os valores de rigidez média apresentados em campo.

Tabela 4.4. Rigidez média das partes superior e inferior medidas em campo.

Rigidez Média (mm/kPa) - Campo		
Elemento/Região	Inferior	Superior
Anel	0,39	0,12
Túnel	5,56	0,43

Os valores de rigidez média calculados pelos deslocamentos medidos em campo, mostram que a camada de solo da parte superior dos silos demonstrou comportamento mais rígido, com menos deslocamentos por carregamento aplicado, tanto para a região do anel, quanto para a do túnel.

4.2.1 Recalques a Partir do GARP

Os fatores de interação entre as estacas e o solo, bem como a rigidez das estacas, encontrados para a segunda safra por meio do programa DEFPIG, a partir dos parâmetros de deformabilidade obtidos pelo ensaio SPT, são ilustrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Rigidez e fatores de interação para a segunda safra, via parâmetros obtidos pelo ensaio SPT.

Estacas - Anel		Estacas - Túnel	
Rigidez (kN/m)	89114,7	Rigidez (kN/m)	101798,3
s/D	Fator α_{PR}	s/D	Fator α_{PR}
1,5	0,414	1,5	0,363
2	0,378	2	0,328
2,5	0,352	2,5	0,302
3	0,330	3	0,281

Estacas - Anel		Estacas - Túnel	
Rigidez (kN/m)	89114,7	Rigidez (kN/m)	101798,3
4	0,297	4	0,249
5	0,271	5	0,225
6	0,250	6	0,206
7	0,233	7	0,191
8	0,218	8	0,178
9	0,204	9	0,167
10	0,193	10	0,157
12	0,172	12	0,140
15	0,148	15	0,120

A rigidez média, calculada como descrito anteriormente, baseada nos recalques obtidos por meio do programa GARP, para as partes superior e inferior, determinada por meio dos parâmetros de deformabilidade estimados pelo ensaio SPT, são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Rigidez média das partes superior e inferior calculadas a partir dos recalques obtidos pelo programa GARP, por meio dos parâmetros obtidos via ensaio SPT.

Rigidez Média (mm/kPa) - GARP		
Elemento/Região	Inferior	Superior
Anel	1,04	0,86
Túnel	1,31	1,09

Os resultados referentes à rigidez média obtidos pela simulação da primeira safra por meio do programa GARP a partir dos parâmetros de deformabilidade estimados pelo ensaio SPT, demonstram também uma maior rigidez da camada superior. Entretanto os valores encontrados distanciam-se dos medidos em campo, provavelmente pelas simplificações inerentes à obtenção dos parâmetros a partir do ensaio e a não consideração de recarregamento do terreno na análise pelo *software*. A Tabela 4.7 a seguir ilustra resumidamente os valores medidos em campo, os simulados via GARP, para cada elemento de cada região, superior ou inferior.

Tabela 4.7. Comparação da Rigidez Média Aferida em Campo e Pela Análise no GARP.

Análise (SPT)	Anel - Inferior (mm/kPa)	Anel - Superior (mm/kPa)	Túnel - Inferior (mm/kPa)	Túnel - Superior (mm/kPa)
Campo	0,39	0,12	5,56	0,43
GARP	1,04	0,86	1,31	1,09

4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica, elaborada como proposta preventiva dado os eventos patológicos ocorridos no conjunto de silos, foi efetuada a partir dos parâmetros obtidos pela sondagem feita previamente ao carregamento. Assim sendo, as propriedades de deformabilidade do terreno foram semelhantes aquelas utilizadas para a simulação da primeira safra. A descrição do comportamento do conjunto, a partir da adição de estacas na laje de fundo, comportando-se como um radier estaqueado, é apresentada a seguir.

Todas as etapas nas análises aqui desenvolvidas consistirão na adição de estacas extras sob a laje de fundo, formando um total de sete configurações de estaqueamento, como ilustradas na Tabela 4.8 a seguir.

Tabela 4.8. Configurações de estaqueamento utilizadas.

Configuração	Fator Geométrico (A_g/A)/(s/d)	Número de Estacas sob a Laje
C1	0,00	0
C2	0,03	48
C3	0,05	76
C4	0,07	96
C5	0,09	116
C6	0,10	140
C7	0,13	172

O fator geométrico FG, utilizado como forma de adimensionalização dos resultados, foi definido por Sanctis e Mandolini (2006) e expresso na equação 4.1 a seguir.

$$FG = \left(\frac{A_g}{A} \right) / \left(\frac{s}{D} \right) \quad (4.1)$$

Onde,

A_g = área do radier que compreende a região das estacas;

A = área total do radier;

s/D = relação do espaçamento entre eixos de estaca e o diâmetros destas.

4.3.1 Recalques Totais

Como forma de avaliar a variação do recalque médio total nos elementos com a adição de estacas na laje de fundo, considerou-se estacas de diâmetro e comprimento iguais aos já existentes no anel e no túnel, apoiadas sob a laje de fundo, variando apenas a tipologia da estaca, de hélice-contínua para pré-moldada. Desta forma, todas as estacas adicionais são do tipo pré-moldada de concreto e apresentam comprimento de 20 m e diâmetro de 0,35 m, variando tais parâmetros a medida em que se procedeu as análises. A Figura 4.3 ilustra o comportamento do conjunto quanto aos recalques totais a partir do estaqueamento da laje, para cada elemento constituinte da base dos silos, quando se variou o número de estacas adicionadas. Adotando como valor limite de recalque $\delta_{m\acute{a}x} = 3$ cm, como já mencionado anteriormente.

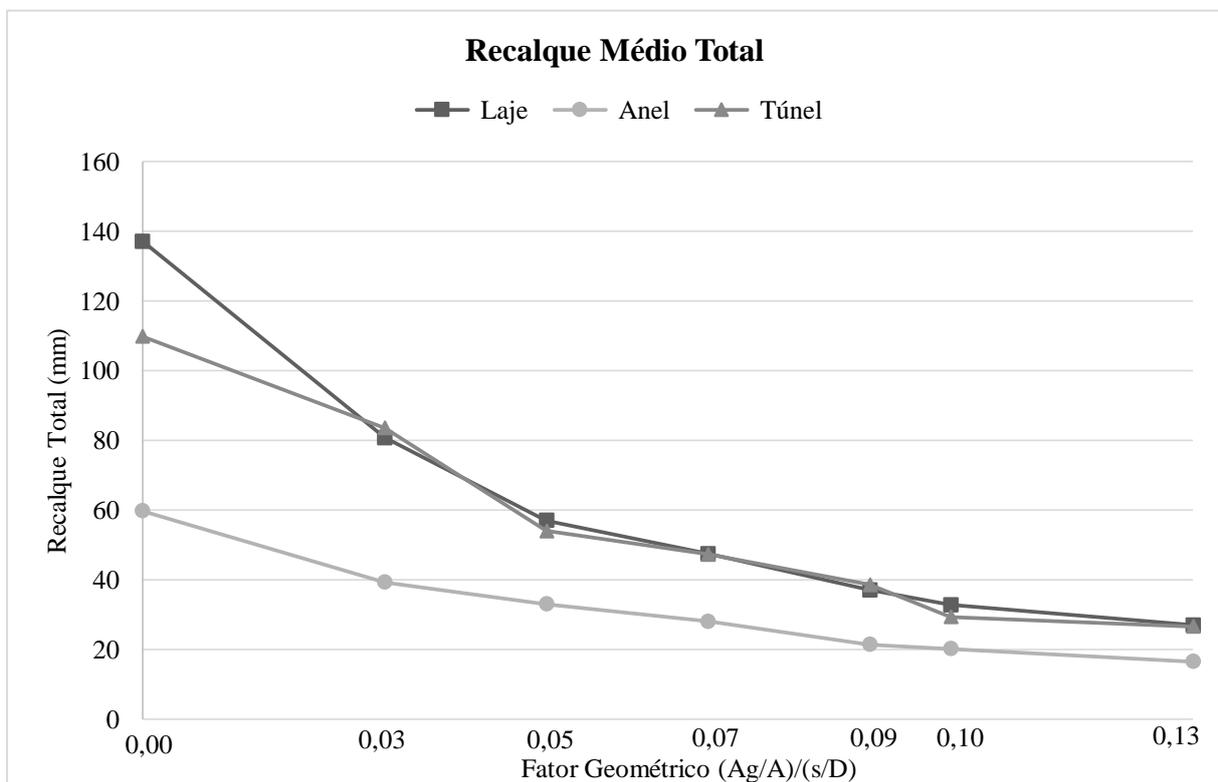


Figura 4.3. Variação do recalque médio total *versus* fator geométrico.

Para a configuração original de estaqueamento, com nenhuma estaca adicionada à laje de fundo o maior recalque médio ocorreu na laje, atingindo valores da ordem de 137 mm, seguido pelo túnel central, com valores em torno de 109 mm, e por fim os menores recalques, na faixa de 59 mm, ocorreram no anel externo.

De maneira geral, o cenário de recalques totais médios, apresentou-se próximo tanto para a laje quanto para o túnel, não apresentando variação significativa entre si. Porém, para o anel os valores, para todas as configurações de estaqueamento, apresentaram-se abaixo dos encontrados para os demais elementos.

Para a região da laje e do túnel, a adição de estacas configurou em uma redução de aproximadamente 80% e 75%, respectivamente, nos recalques médios totais, quando comparase a configuração 1, 0 estacas sob a laje, à configuração 7, 172 estacas sob a laje. Porém a partir da configuração com 116 estacas, a adição destas deixa de ser efetiva na redução dos recalques, pois a partir deste ponto, a inclinação nas curvas apresentadas para tais elementos demonstra menor acentuação e com isso uma menor variação nos recalques encontrados.

Para o anel externo a adição de estacas promoveu uma redução total de aproximadamente 70% nos recalques totais, e novamente, a partir da configuração com 116 estacas, houve uma perda na efetividade da adição destas na redução dos recalques médios totais. O cenário de recalques para esta região dos silos apresentou menores valores devido à adição de estacas ter sido efetuada em outra área do complexo, a laje de fundo.

Em uma nova etapa, procedeu-se a avaliação do recalque médio total nos elementos para cada configuração de estaqueamento, levando-se em conta a variação do diâmetro e comprimento das estacas, bem como da espessura do radier.

Para a variação do diâmetro, $D = 30$ cm (D30), 40 cm (D40) e 50 cm (D50), das estacas as Figuras 4.4 a 4.6 ilustram o comportamento do conjunto quanto à recalque médio total para cada configuração de estaqueamento, para o anel externo, túnel e laje de fundo, respectivamente, mantendo-se constante o comprimento da estaca em 20 m e a espessura do radier em 0,15 m.

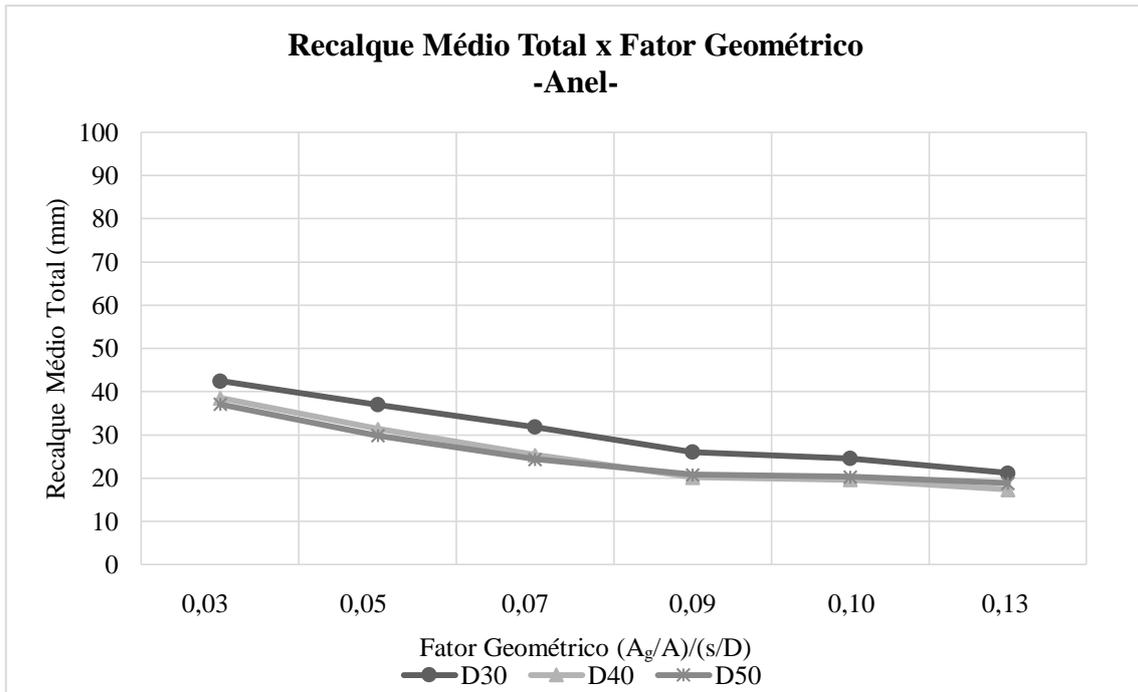


Figura 4.4. Variação do recalque total do anel externo *versus* fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.

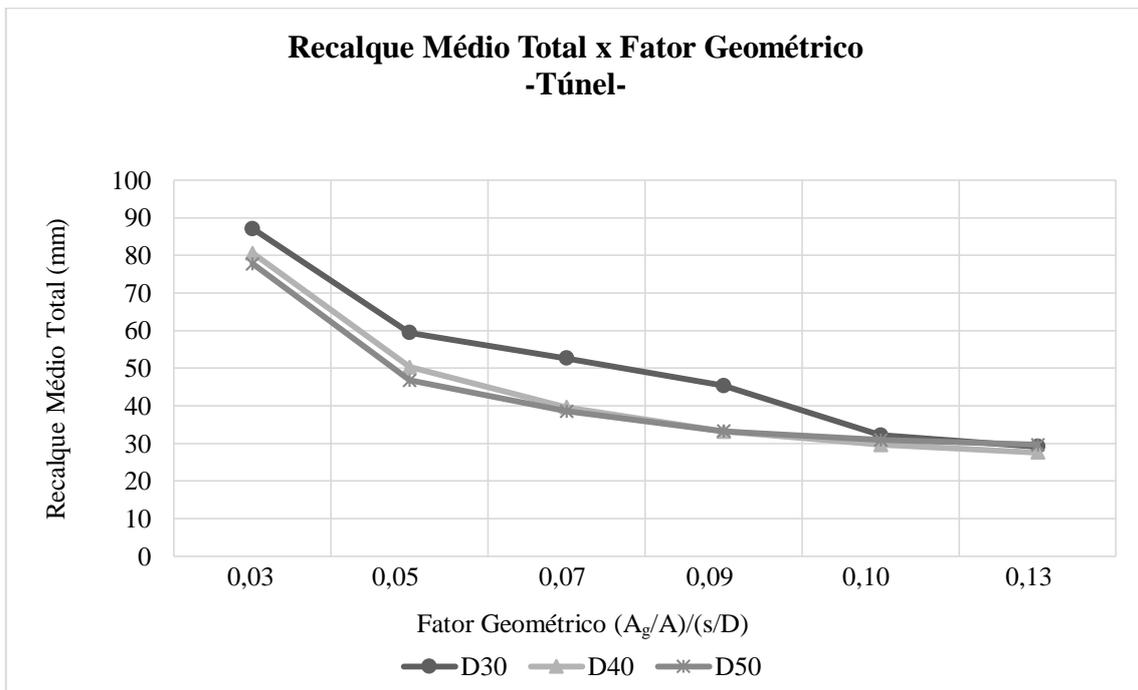


Figura 4.5. Variação do recalque total do túnel central *versus* fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.

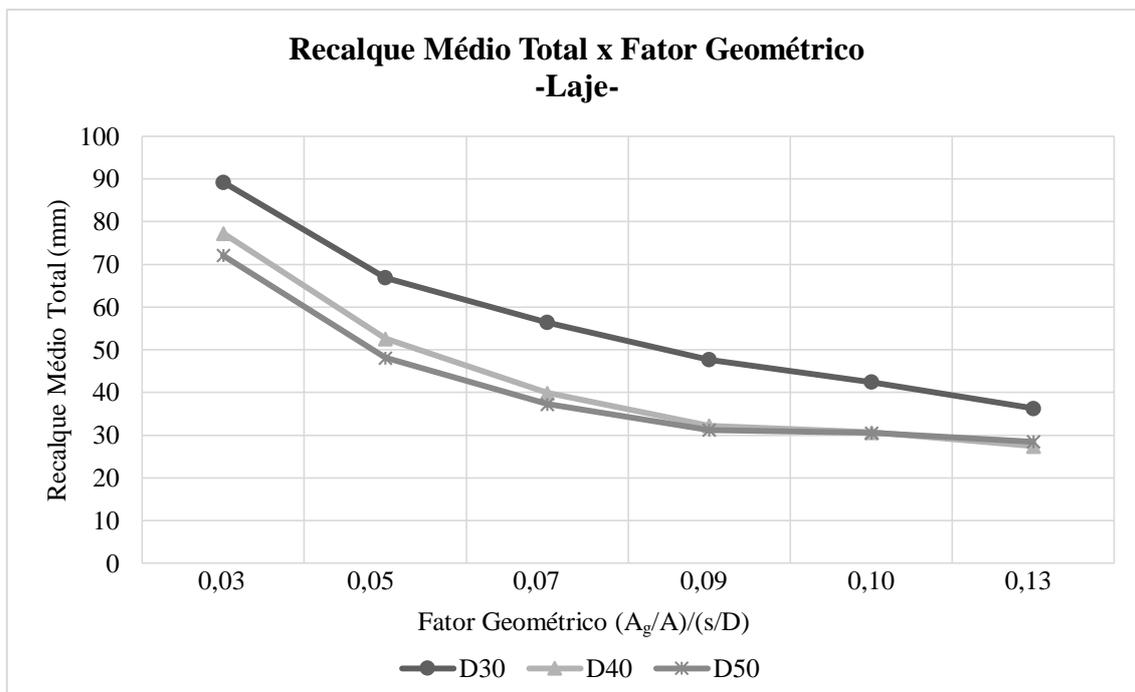


Figura 4.6. Variação do recalque total da laje de fundo *versus* fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.

Em todos os elementos, o aumento do diâmetro proporcionou um conseqüente aumento na redução dos recalques totais, de forma que tal diferença apresentou-se de forma mais notória nos elementos da laje e do túnel quando comparados aos elementos do anel, e sem grandes variações entre as estacas com 40 cm e 50 cm de diâmetro.

Tomando como base a configuração um fator geométrico $FG = 0,07$, configuração C4, a qual apresentou maior redução dos recalques com a variação dos diâmetros das estacas em todos os elementos, e comparando os valores obtidos com os diâmetros de 30 cm com aqueles com os diâmetros de 50 cm, para a região do anel, a redução foi em torno de 23%, para a região do túnel, a redução apresentou valores de aproximadamente 27%, e para a região da laje, a redução dos recalques foi em torno de 34%.

Para a variação do comprimento, $L = 16$ m (L16), 20 m (L20) e 24 m (L24), das estacas as Figuras 4.7 a 4.9 ilustram o comportamento do conjunto quanto à recalque médio total para cada configuração de estaqueamento, para o anel externo, túnel e laje de fundo, respectivamente, mantendo-se constante o diâmetro da estaca em 0,35 m e a espessura do radier em 0,15 m.

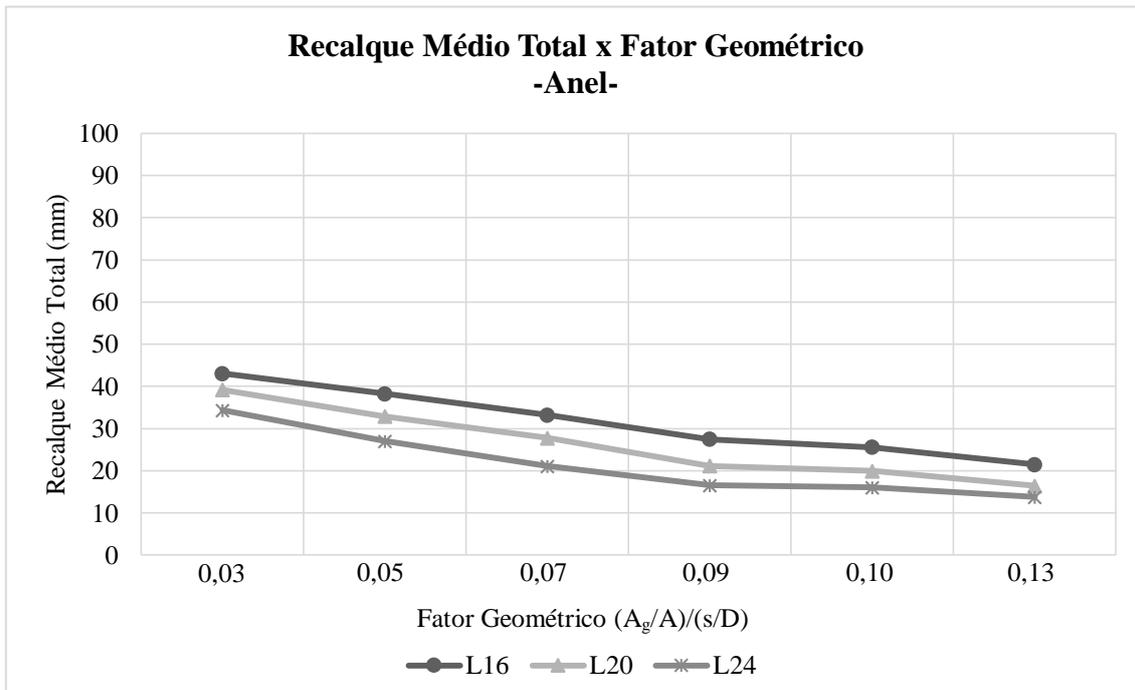


Figura 4.7. Variação do recalque total do anel externo *versus* fator geométrico, para cada comprimento de estaca.

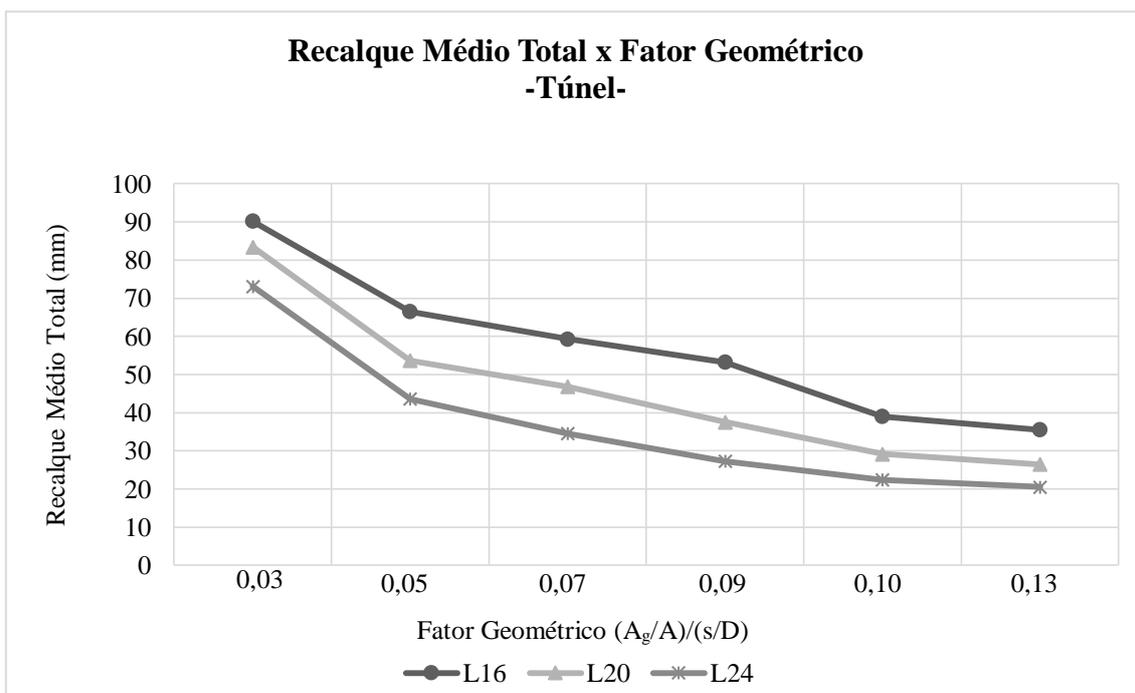


Figura 4.8. Variação do recalque total do túnel central *versus* fator geométrico, para cada comprimento de estaca.

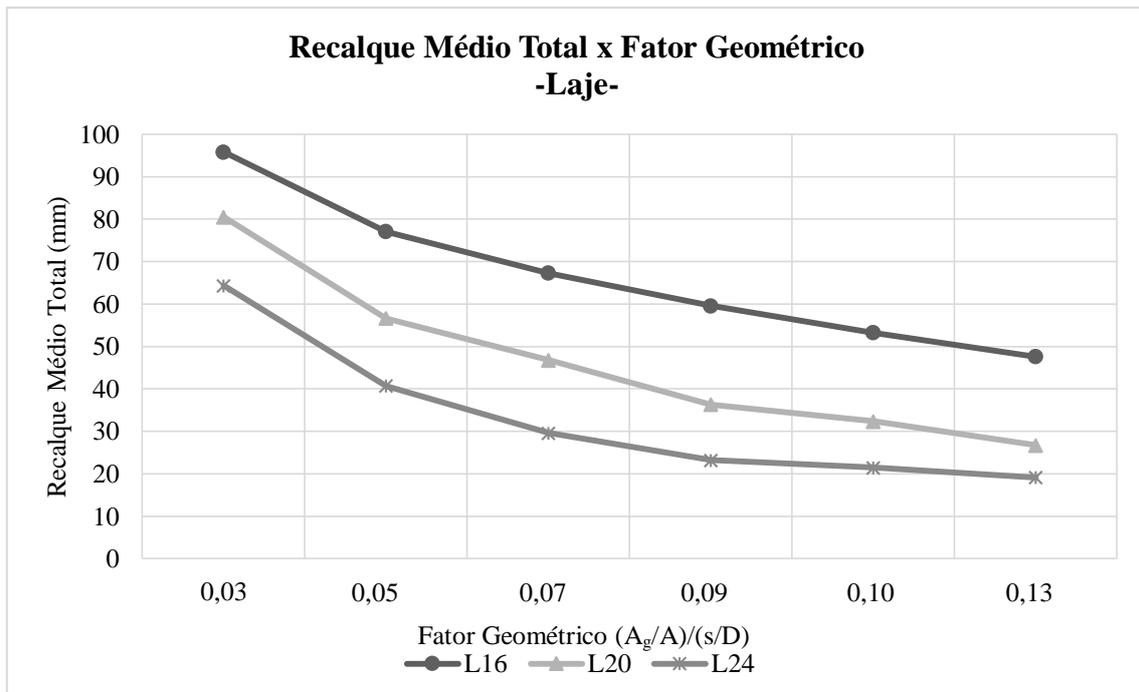


Figura 4.9. Variação do recalque total da laje de fundo *versus* fator geométrico, para cada comprimento de estaca.

Para todas as partes constituintes do silo, o aumento do comprimento das estacas proporcionou um incremento na redução dos recalques totais, onde novamente tal diferença apresentou-se mais abundante nos elementos da laje e do túnel quando comparados aos elementos do anel, porém com maiores variações entre estacas com comprimentos diferentes, principalmente quando se compara a curva L16 com as curvas L20 e L24.

Tomando mais uma vez como referência a configuração C4, e comparando os valores obtidos com os comprimentos de 16 m com aqueles com os comprimentos de 24 m, para a região do anel, a redução dos recalques totais foi em torno de 32%, para a região do túnel, a redução apresentou valores de aproximadamente 42%, e para a região da laje, a redução foi em torno de 57%.

Enfim, para a variação da espessura do radier, $e = 10$ cm (E10), 20 cm (E20) e 30 cm (E30), as Figuras 4.10 a 4.12 ilustram o comportamento do conjunto quanto à recalque médio total para cada configuração de estaqueamento, para o anel externo, túnel e laje de fundo, respectivamente, mantendo-se constante o comprimento da estaca em 20 m e seu diâmetro em 0,35.

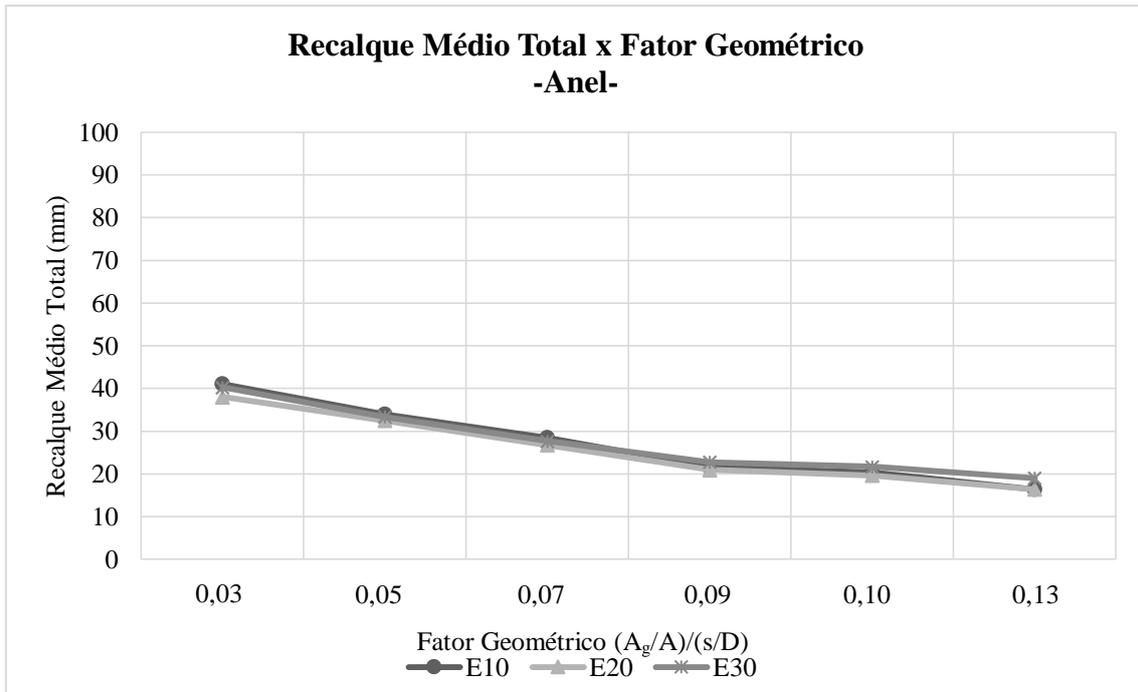


Figura 4.10. Variação do recalque total do anel externo *versus* fator geométrico, para cada espessura do radier.

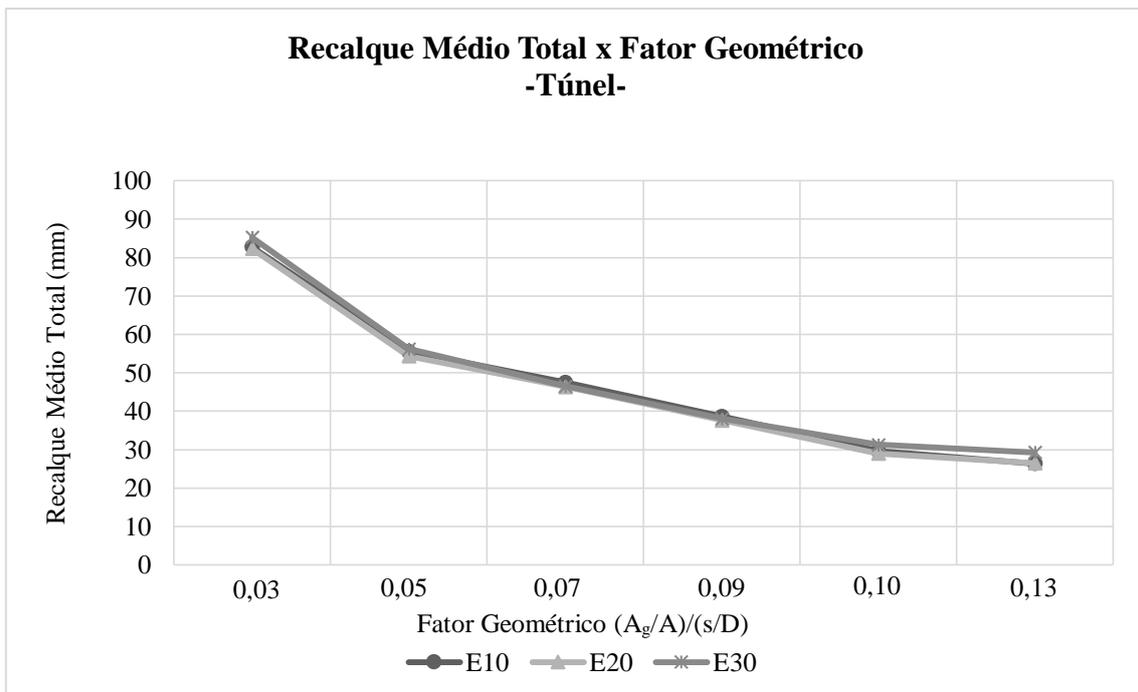


Figura 4.11. Variação do recalque total do túnel central *versus* fator geométrico, para cada espessura do radier.

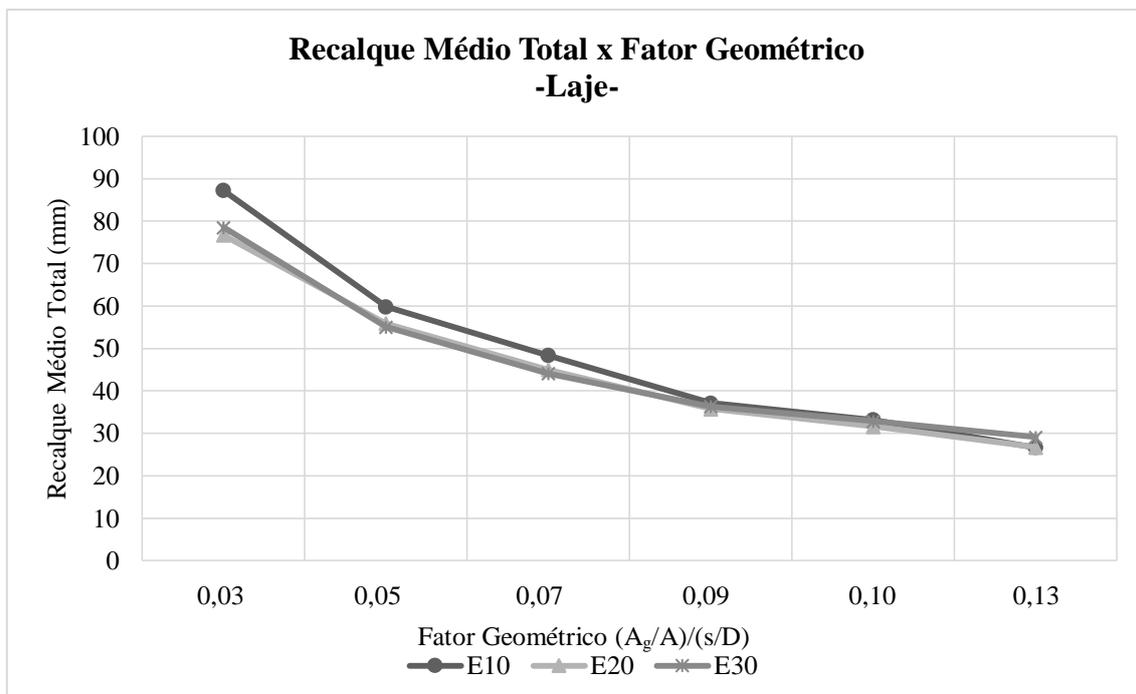


Figura 4.12. Variação do recalque total da laje de fundo *versus* fator geométrico, para cada espessura do radier.

Como ilustrado nas Figuras anteriores, em todos os elementos que compunham os silos, a variação da espessura do radier ou da laje de fundo foi pouco influente na configuração de recalques totais, atingindo uma variação máxima de 10% para um fator geométrico $FG = 0,03$, configuração C2, na laje.

4.3.2 Distorção Angular

Os valores de distorção angular, medidos a partir do recalque diferencial entre o túnel e o anel externo, nas duas direções principais do eixo dos silos, X-X e Y-Y, são apresentados a seguir. Adotou-se como valor admissível a distorção angular de 1:500, recomendado por Bjerrum (1963) *apud* Castillo (2013) como limite de segurança para estruturas em que não se admite fissuras. Na Figura 4.13 ilustra-se a variação do número de estacas ao longo da laje com a correspondente distorção angular.

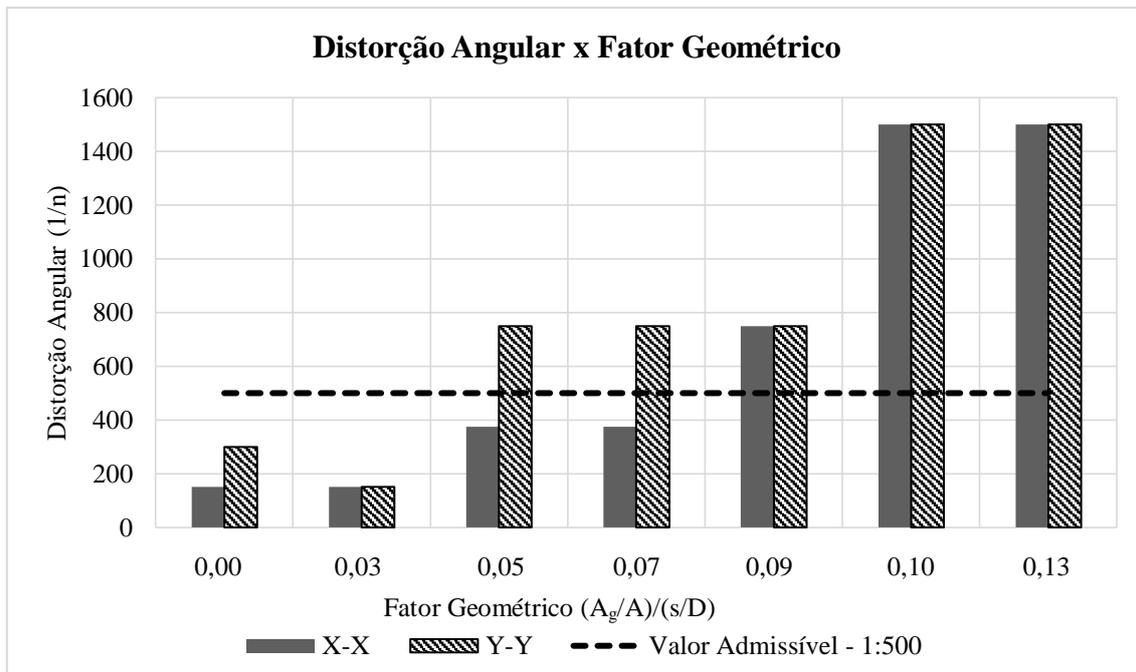


Figura 4.13. Distorção angular nas direções principais dos silos *versus* fator geométrico.

Como ilustrado no gráfico anterior, para fatores geométricos $FG = 0$ e $0,03$, as configurações apresentaram valores abaixo do admissível para as direções X-X e Y-Y, onde a configuração C1 atingiu valores para a distorção angular de 1:150 e 1:300 nas direções X-X e Y-Y, respectivamente. Para a configuração C2, a distorção angular foi de 1:150 em ambas direções.

O cenário de distorção angular apresentou melhoria para $FG = 0,05$ e $0,07$ de maneira similar, onde no eixo X-X os valores chegaram a 1:375, ainda abaixo do adotado como admissível. Para o eixo Y-Y os valores atingiram uma distorção de 1:750, sendo considerados como aceitáveis nesta direção.

A partir de fatores geométricos superiores a $0,09$, todos os valores encontrados para a distorção angular superaram o admissível, com um considerável aumento para as duas últimas configurações, C6 e C7, atingindo para estas, uma distorção de 1:1500. Assim sendo, o arranjo de estaqueamento da configuração C5, $FG = 0,09$, composta por 116 estacas, já seria suficiente para o controle de distorção angular adotado como admissível.

Procedeu-se também uma análise da distorção angular em cada eixo principal do silo, para cada configuração de estaqueamento, variando-se o diâmetro (D30, D40 e D50) e comprimento da estaca (L16, L20, L24), bem como a espessura do radier (E10, E20, E30). Os resultados de tal análise considerando um fator geométrico $FG = 0,03$, são ilustrados nas Figuras 4.14 e 4.15.

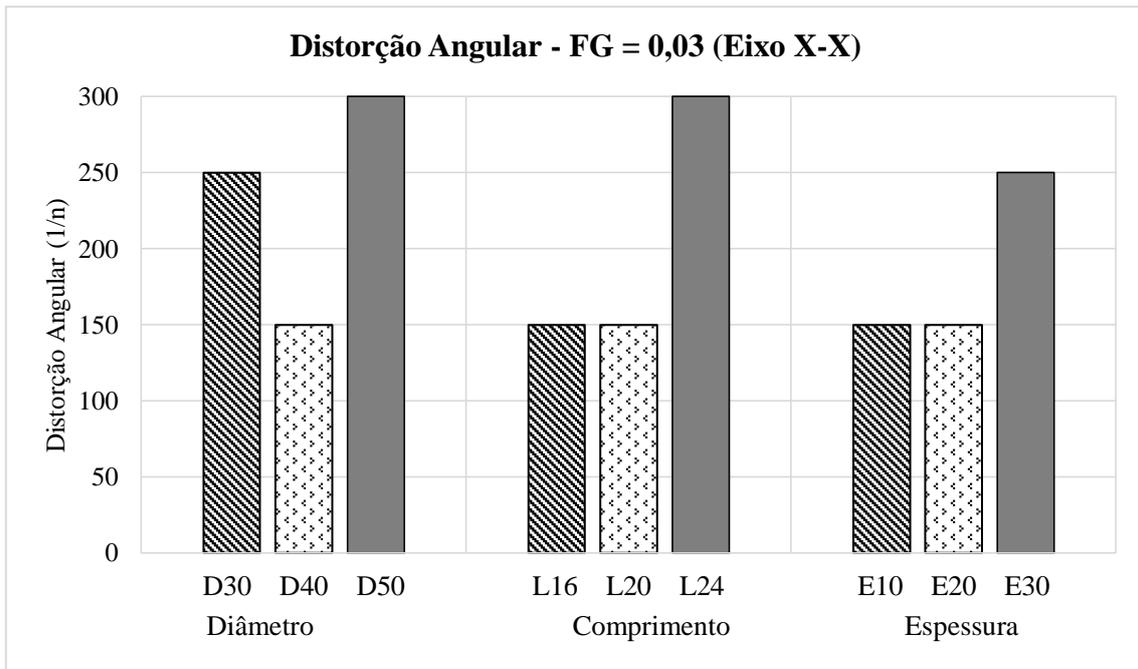


Figura 4.14. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C2.

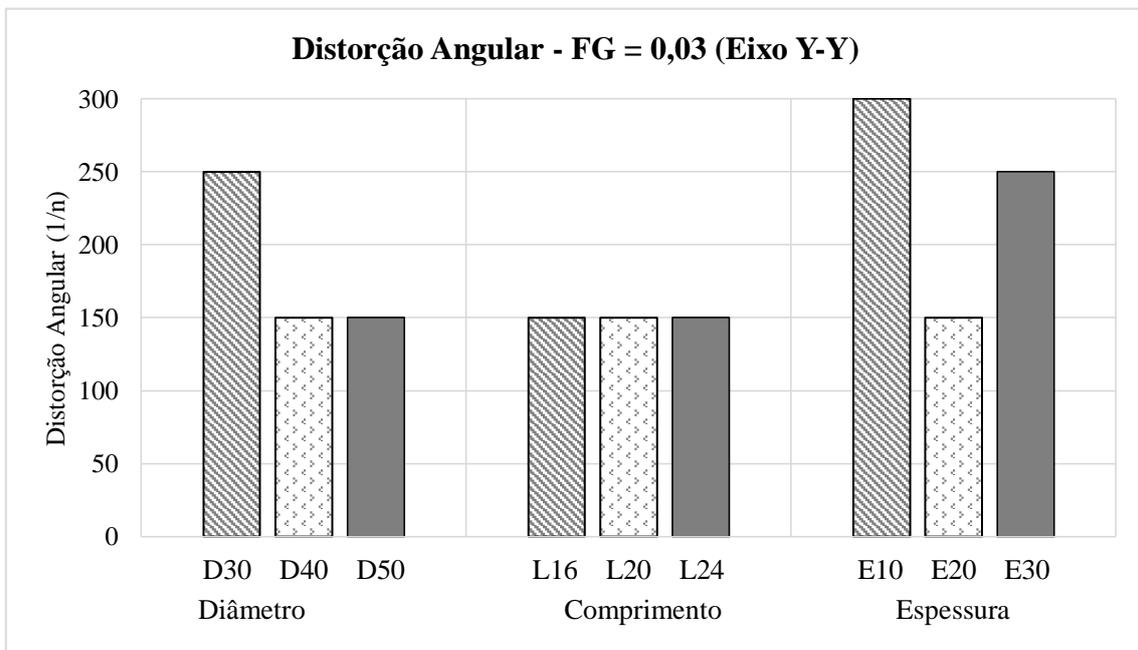


Figura 4.15. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C2.

Considerando a variação dos parâmetros do diâmetro das estacas para um fator geométrico $FG = 0,3$, o comportamento do sistema quanto à distorção angular não apresentou a correspondente melhoria esperada. No eixo X-X, o aumento do diâmetro não implicou em uma progressiva melhoria dos valores encontrados para a distorção, onde para o diâmetro da estaca igual a 30 cm a distorção encontrada apresentou cenário menos crítico do que o diâmetro de 40 cm, e somente com o diâmetro de 50 cm a distorção atingiu um valor igual a 1:300, mas ainda abaixo do aceitável. Para o eixo Y-Y, o diâmetro de estaca igual a 30 cm apresentou valor mais favorável, 1:250, quando comparado aos diâmetros maiores, e novamente sem atingir o valor considerado como admissível.

Em relação à variação do comprimento das estacas, no eixo X-X, não houve melhora no cenário da distorção angular encontrada entre os comprimentos de 16 m e 20 m, onde para tais comprimentos a distorção foi de 1:150, e somente com o comprimento de 24 m a distorção angular atingiu o valor de 1:300, mas ainda abaixo do admissível. Para o eixo Y-Y a variação do comprimento não alterou a configuração de distorção do sistema, onde para todos os comprimentos neste eixo, a distorção encontrada foi de 1:150.

Quanto à variação da espessura do radier, no eixo X-X a distorção angular não foi afetada para os valores iniciais de 10 cm e 20 cm de espessura, de modo que o sistema só apresentou significativa mudança para a espessura de 30 cm, atingindo um valor de distorção igual a 1:250. Analisando a influência da variação do mesmo parâmetro no eixo Y-Y, observa-se que não há correspondente melhoria no cenário de distorção angular com o respectivo aumento da espessura do radier, de forma que a espessura de 10 cm demonstrou um cenário mais favorável com valor de distorção igual a 1:300, mas ainda abaixo do aceitável, e as espessuras de 20 cm e 30 cm apresentaram uma distorção de 1:150 e 1:250, respectivamente.

A distorção angular nos eixos principais dos silos para $FG = 0,05$ é apresentada nas Figuras 4.16 e 4.17.

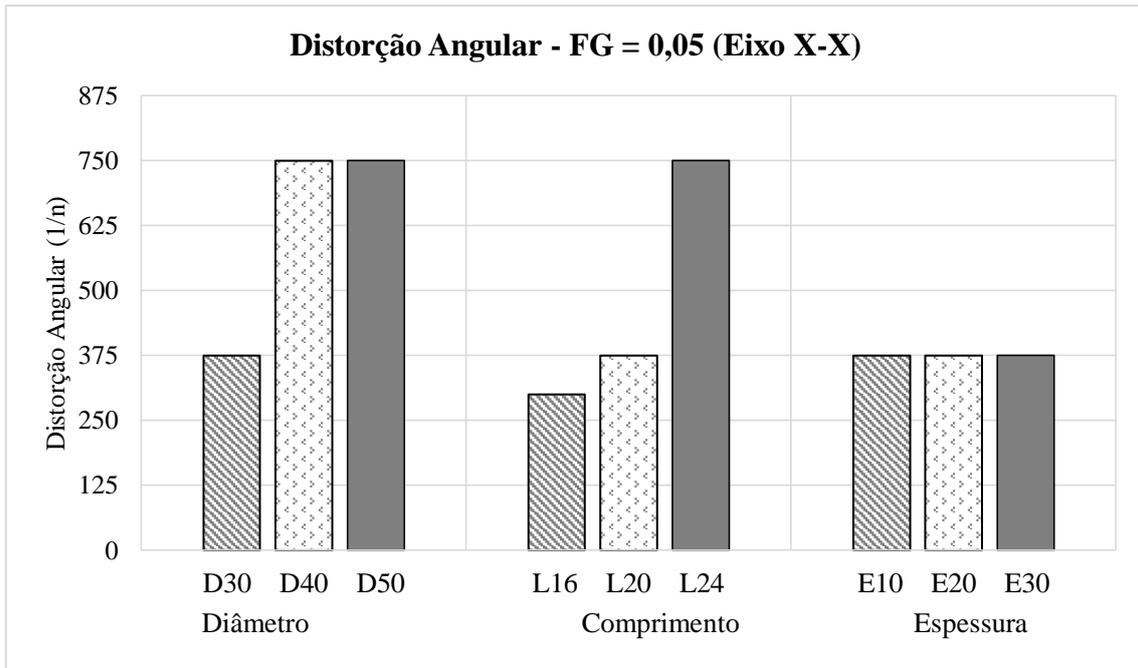


Figura 4.16. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C3.

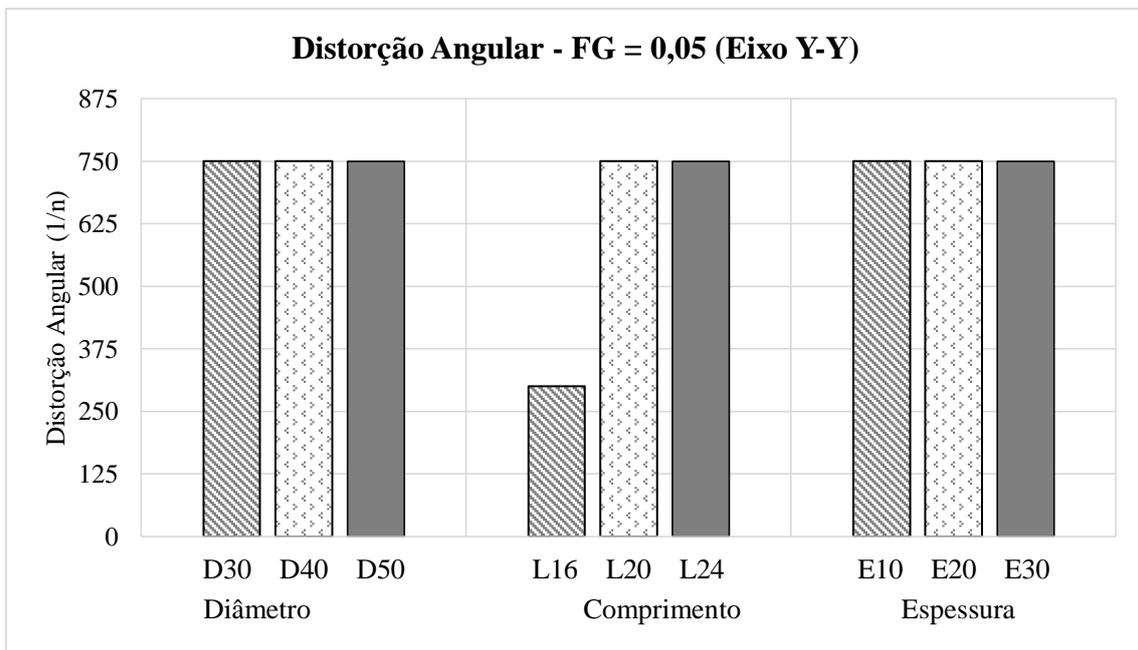


Figura 4.17. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C3.

Os valores de distorção angular encontrados para $FG = 0,05$, configuração de estaqueamento C3 indicam um comportamento distinto em relação à configuração anterior. Para o eixo X-X, o aumento do diâmetro das estacas promoveu uma melhora nos valores encontrados, sendo que

para o diâmetro de 30 cm a distorção foi de 1:375, mantendo-se estável na faixa de 1:750 para os diâmetros relativos a 40 cm e 50 cm. No eixo Y-Y, a variação do diâmetro não alterou o cenário de distorção angular, de forma que esta manteve-se constante em 1:750, em todos os diâmetros analisados, nível acima do considerado como admissível.

Quanto à variação do comprimento das estacas, para o eixo X-X, o aumento do diâmetro implicou em uma melhor performance do sistema quanto à distorção encontrada, variando de 1:300, para o comprimento de 16 m, até 1:750, para o comprimento de 24 m. Em relação ao eixo Y-Y de análise, a distorção encontrada para o comprimento de 16 m foi novamente de 1:300, mantendo-se estável para as estacas com comprimento superiores em 1:750, atendendo ao critério adotado como aceitável.

Por fim, em relação à variação da espessura do radier, para ambos os eixos de análise, não houve nenhuma mudança no desempenho do sistema quanto à distorção angular, de forma que para todas as espessuras analisadas a distorção encontrada foi de 1:375 e 1:750, para os eixos X-X e Y-Y, respectivamente.

A distorção angular nos eixos principais dos silos considerando $FG = 0,07$ é apresentada nas Figuras 4.18 e 4.19.

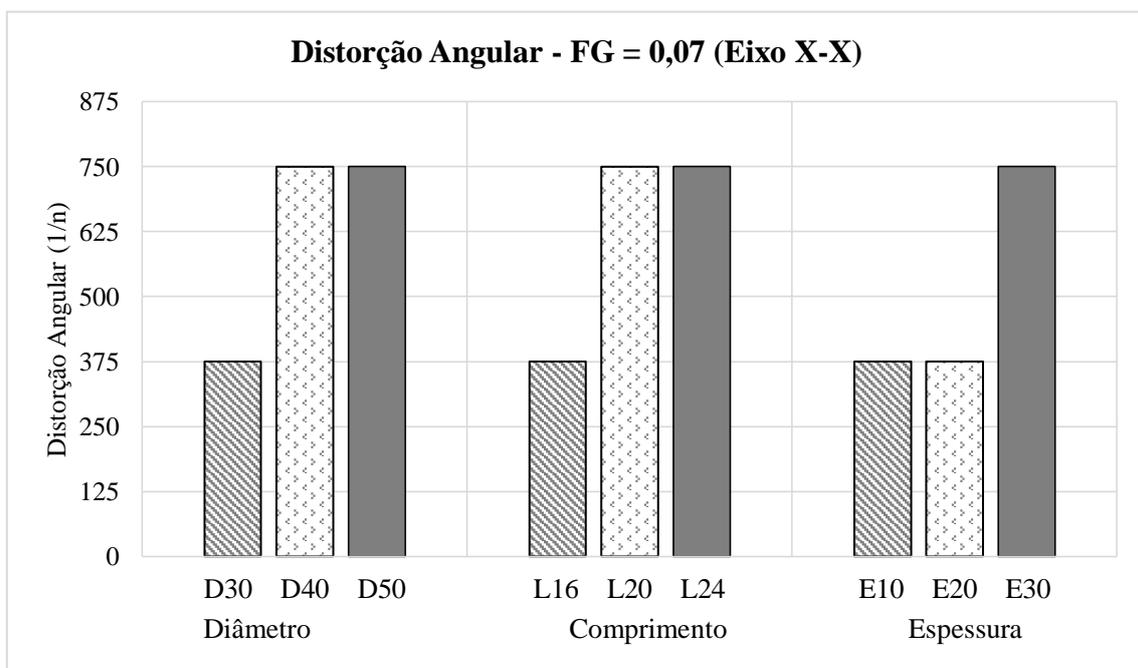


Figura 4.18. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C4.

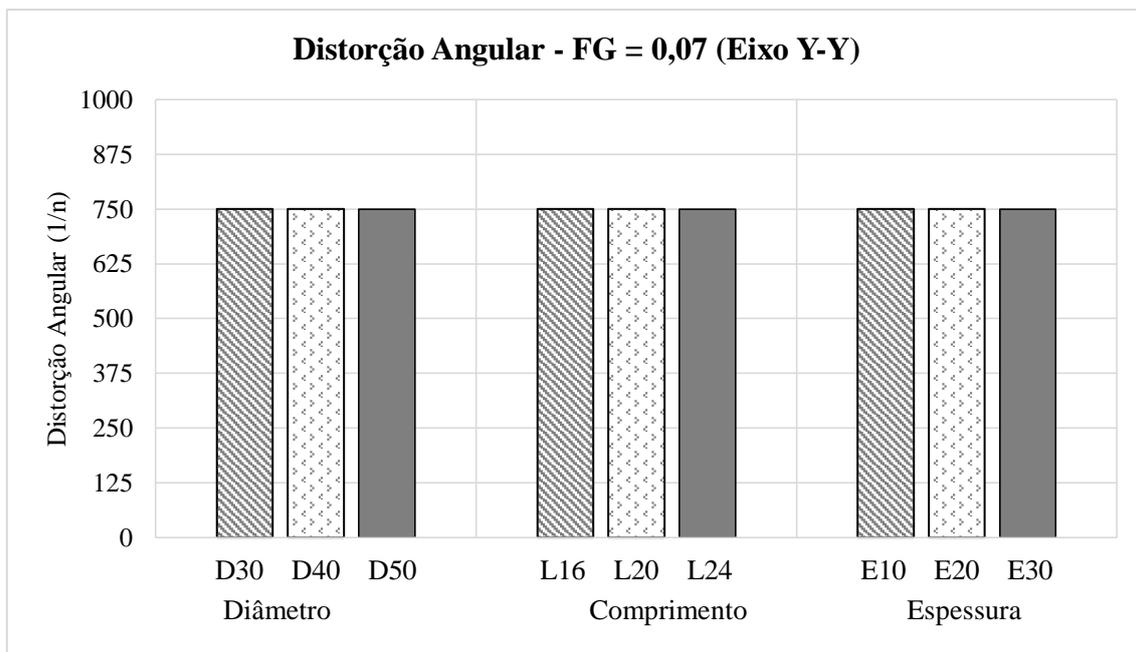


Figura 4.19. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C4.

Como observado nos gráficos anteriores, considerando $FG = 0,07$, configuração C4, especificamente no eixo X-X, o aumento do diâmetro das estacas provocou um cenário mais favorável quanto à distorção angular encontrada, de forma que para o diâmetro de 30 cm a correspondente distorção foi de 1:375 e manteve-se constante em 1:750 para os diâmetros de 40 cm e 50 cm. Ao analisar-se a distorção do sistema no eixo Y-Y, observa-se que a variação do diâmetro não alterou a configuração de distorções angulares, onde os valores encontrados mantiveram-se constantes, acima do limite aceitável, em 1:750.

Na análise da variação do comprimento das estacas, observou-se comportamento semelhante aquele encontrado para a variação do diâmetro, onde no eixo X-X o aumento do comprimento proporcionou um cenário mais favorável quanto à distorção angular, e para o eixo Y-Y, o mesmo aumento não alterou o desempenho do sistema, de forma que neste eixo, todos os valores encontrados também se mantiveram dentro do limite aceitável.

Avaliando a influência da espessura do radier no comportamento do sistema em relação à respectiva distorção encontrada, observou-se que para o eixo X-X o aumento de tal espessura, de 10 cm para 20 cm, não provocou alteração no cenário, e somente com a espessura de 30 cm, a distorção atingiu o valor de 1:750, acima do admissível. Para o eixo Y-Y, em todas as espessuras analisadas, a distorção angular apresentou o valor correspondente a 1:750.

A distorção angular nos eixos principais dos silos considerando $FG = 0,09$ é apresentada nas Figuras 4.20 e 4.21.

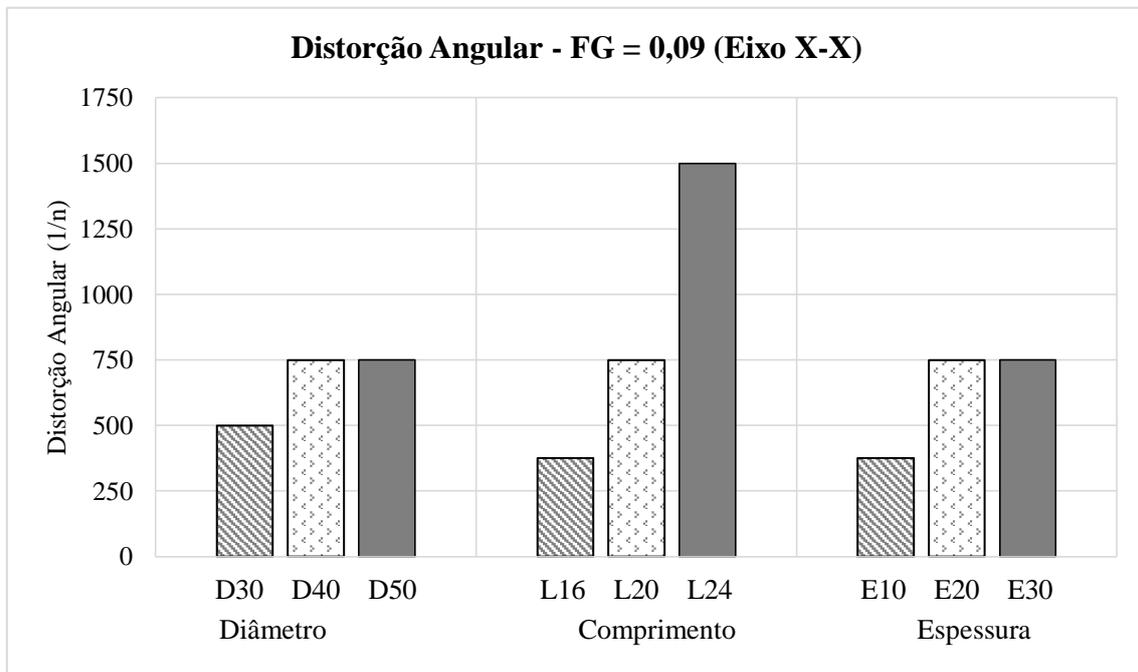


Figura 4.20. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C5.

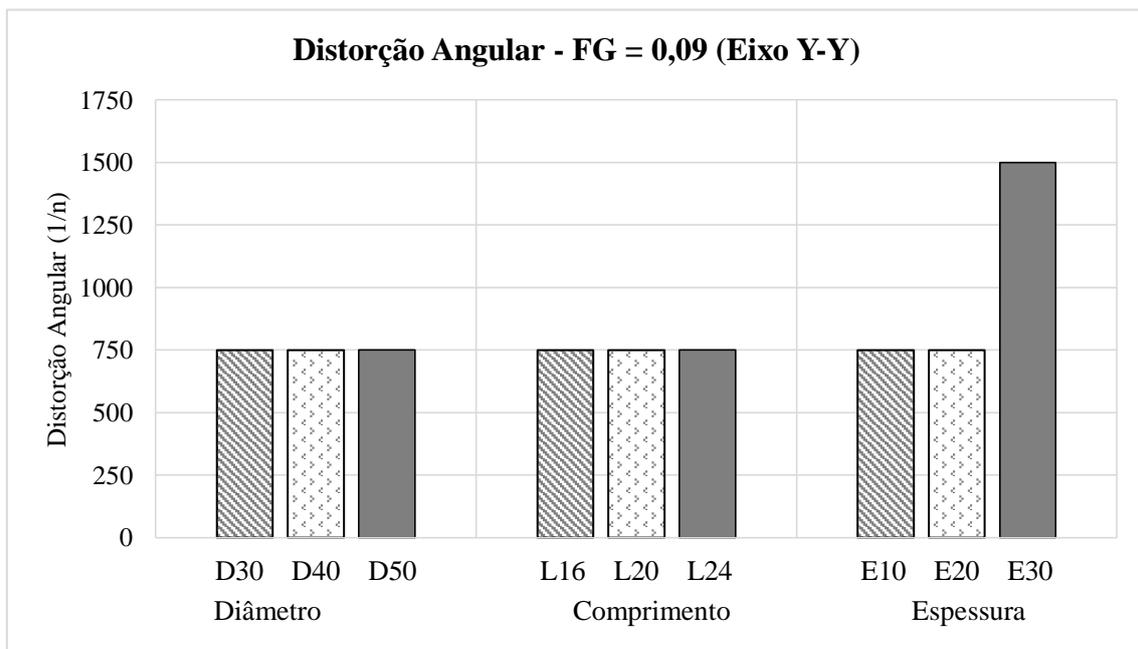


Figura 4.21. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C5.

Para $FG = 0,09$, configuração C5, a análise de distorção angular no eixo X-X permitiu constatar que o aumento do diâmetro das estacas implicou em uma melhoria no desempenho do sistema, de forma que a distorção se manteve constante para os diâmetros de 40 cm e 50 cm, e em todos os diâmetros analisados, a distorção angular manteve-se dentro do limite admissível. Em relação ao eixo Y-Y, a variação do diâmetro não influenciou no desempenho, porém para todas as análises, o cenário encontrado esteve dentro do limite aceitável, apresentando valores de distorção iguais a 1:750.

A respeito da análise da variação do comprimento das estacas, no eixo X-X, o aumento do comprimento proporcionou uma redução na distorção angular, atingindo o valor mais favorável de 1:1500 para o comprimento de 24 m. Quando se analisa a variação do mesmo parâmetro, porém em relação ao eixo Y-Y, o comportamento do sistema manteve-se constante, para todos os comprimentos, apresentando distorção angular de 1:750.

Por fim, ao avaliar a variação da espessura do radier, o sistema apresentou uma melhoria em seu desempenho para os dois eixos de análise, de forma que no eixo Y-Y, a configuração de distorção angular encontrada foi mais favorável quando comparada ao outro eixo, pois todos os valores obtidos encontraram-se dentro do limite aceitável, chegando a atingir uma distorção de 1:1500 neste eixo, para a espessura de radier igual a 30 cm.

A distorção angular nos eixos principais dos silos para $FG = 0,10$ é apresentada nas Figuras 4.22 e 4.23.

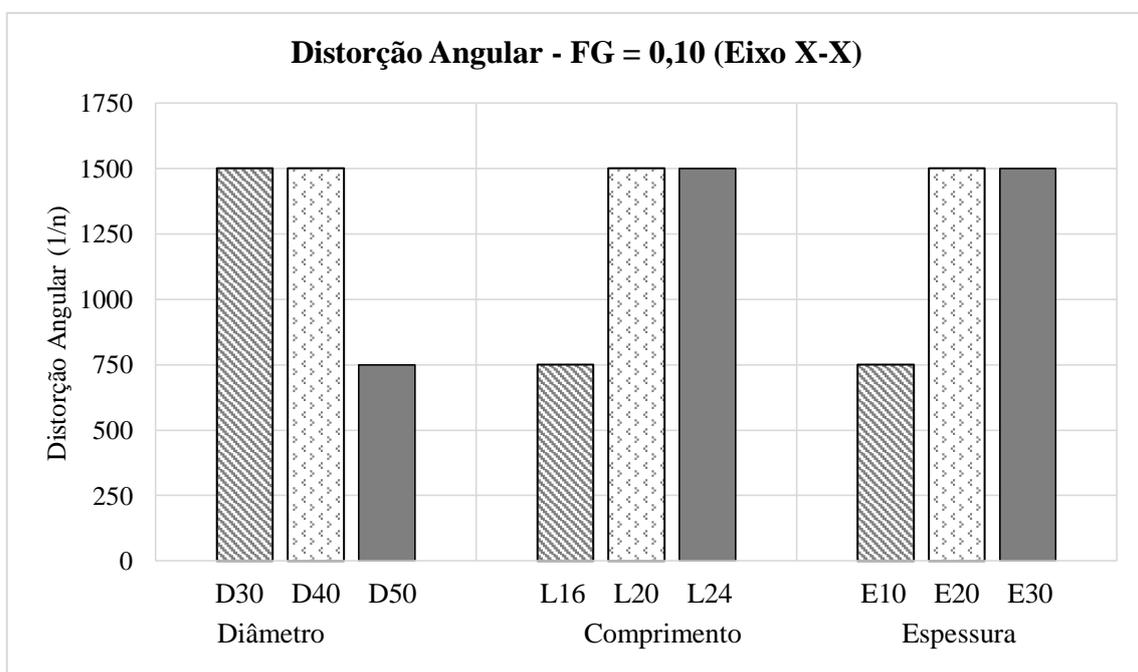


Figura 4.22. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C6.

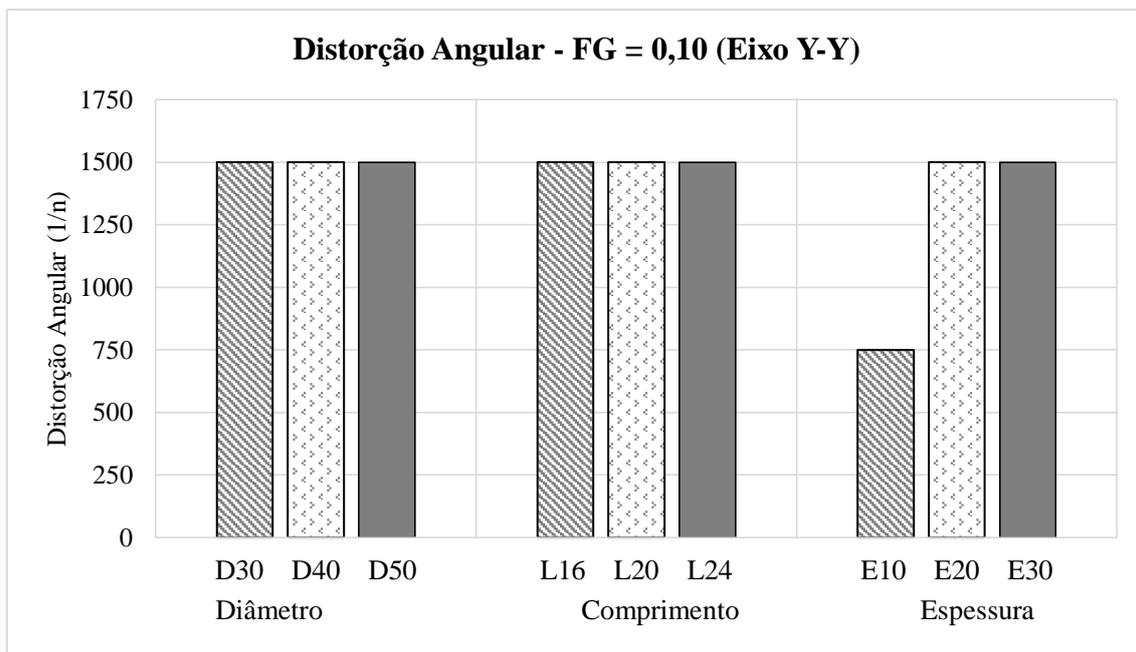


Figura 4.23. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C6.

O comportamento do sistema considerando $FG = 0,10$, configuração C6, apresentou-se de forma que, a variação do diâmetro das estacas não implicou em uma melhoria no desempenho quanto à distorção angular. No eixo X-X de análise, todos os valores encontrados estavam dentro do limite aceitável, porém houve uma piora no comportamento para o maior diâmetro de 50 cm. Em relação ao eixo Y-Y, todos os valores mantiveram-se constante em 1:1500, de forma que a variação do diâmetro deixou de fazer influência no desempenho para esta configuração.

Sobre a variação do comprimento das estacas para a configuração C6, a influência deste também não se apresentou de forma significativa no desempenho do sistema. Para o eixo X-X, houve uma melhoria em relação ao comprimento de 30 cm e 40 cm, contudo, a partir deste segundo diâmetro, a distorção se manteve constante em 1:1500. No eixo de análise Y-Y, para todos os comprimentos analisados, o comportamento foi semelhante, onde a distorção angular encontrada foi de 1:1500.

Sobre a variação da espessura do radier, para o eixo X-X, o comportamento do sistema foi o mesmo encontrado para a variação do comprimento das estacas, e para o eixo Y-Y obteve-se uma melhora no desempenho apenas entre as espessuras de 10 cm e 20 cm, de forma que, a distorção se manteve estável em 1:1500 com o aumento da espessura para 30 cm.

A distorção angular nos eixos principais dos silos para $FG = 0,13$, configuração C7 é apresentada nas Figuras 4.24 e 4.25.

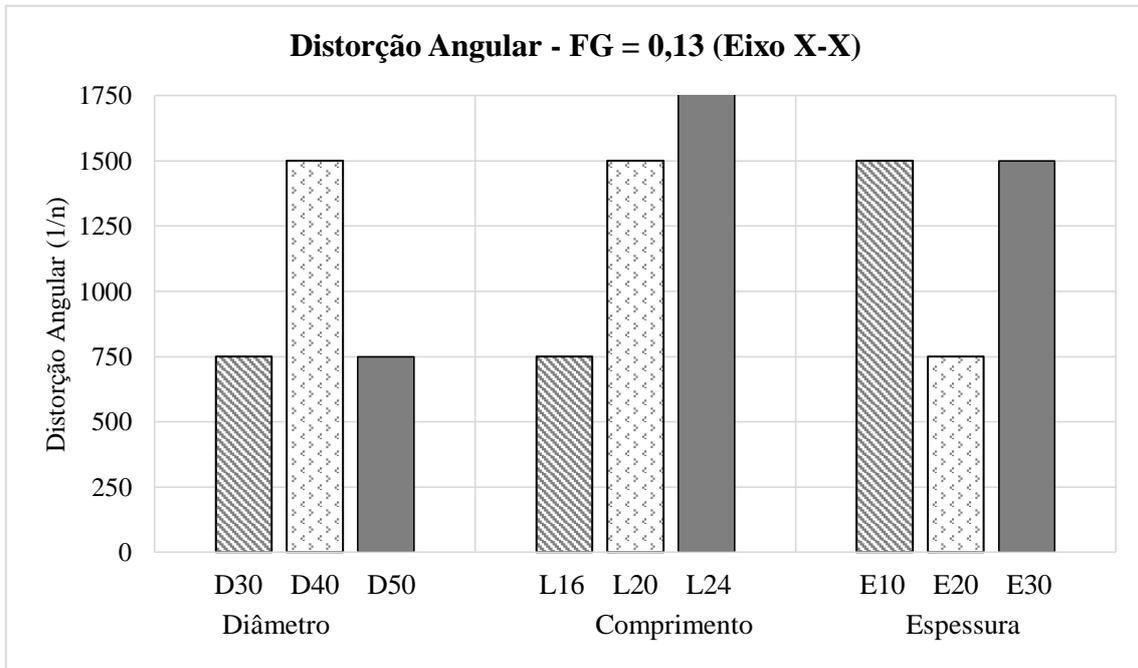


Figura 4.24. Distorção angular no eixo X-X para a configuração C7.

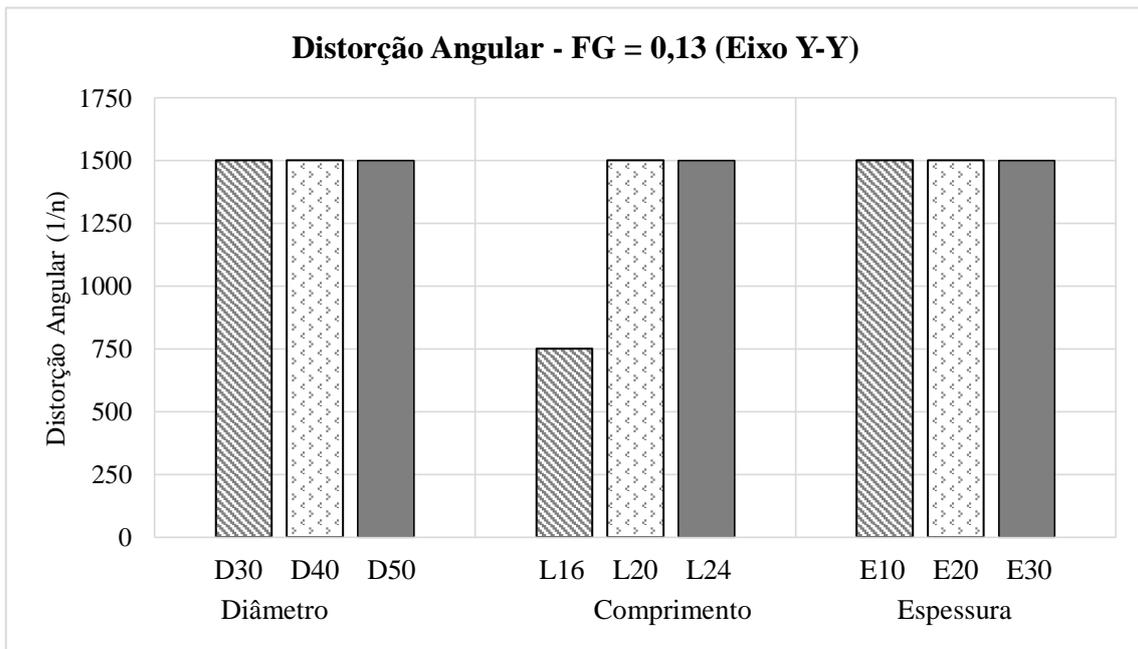


Figura 4.25. Distorção angular no eixo Y-Y para a configuração C7.

Para $FG = 0,13$, configuração C7, o comportamento do sistema quanto ao cenário de distorção angular não apresentou uma padronização regular com a variação dos parâmetros para o eixo de análise X-X, onde apenas para a variação do comprimento das estacas, o sistema demonstrou uma melhora saindo de uma distorção de 1:750, para o comprimento de 16 m, atingindo o valor de 1:1750, para o comprimento de 24 m.

Ainda considerando $FG = 0,13$, porém em relação ao eixo Y-Y, a variação do diâmetro das estacas e espessura do radier não provocou influência nos valores de distorção encontrados, de forma que se mantiveram constantes em 1:1500. Contudo, para a variação do comprimento das estacas, o sistema apresentou redução na distorção angular entre os comprimentos iguais a 16 m e 20 m, mantendo-se estável em 1:1500 para o comprimento final de 24 m.

4.3.3 Momentos Fletores na Laje

Os momentos fletores foram avaliados ao longo da laje de fundo, para cada direção principal do eixo dos silos, e para tanto, considerou-se os valores máximos em módulo encontrados nos elementos. A variação do momento fletor para cada fator geométrico FG, correspondente a cada configuração de estaqueamento, é ilustrada na Figura 4.26.

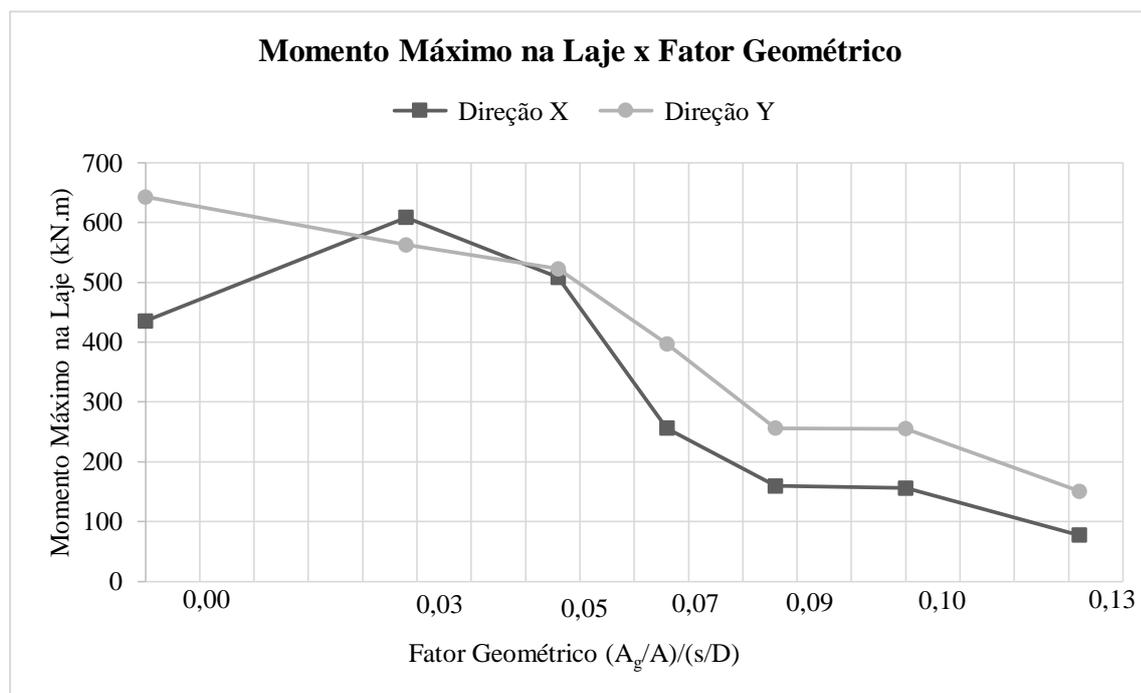


Figura 4.26. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico.

De maneira geral, a adição de estacas sob a laje de fundo dos silos promoveu de forma satisfatória a redução do momento fletor atuante neste elemento, onde quando analisado o momento máximo na direção Y do eixo dos silos, observou-se uma redução de aproximadamente 77% de tal esforço, de forma que para a configuração sem estacas adicionais, $FG = 0,00$, o momento fletor ao longo da laje atingiu um valor limite de 642,7 kN.m, e para $FG = 0,13$, última configuração, com 172 estacas extras, o valor máximo foi de aproximadamente 150,7 kN.m.

Ao se analisar a mesma influência do número de estacas com o momento fletor atuante na laje para a direção X do eixo dos silos, a redução alcançada foi de aproximadamente 82%, onde para $FG = 0,00$ o momento fletor máximo obtido foi de 435,3 kN.m, alterando-se para o valor limite de 77,1 kN.m para $FG = 0,13$.

Vale ressaltar ainda que a posição em que se adicionou as estacas extras sob a laje de fundo proporcionou uma influência no cenário de momentos fletores máximos atuantes neste elemento. Para a configuração C2, na qual ocorreu o primeiro estaqueamento, a quantidade de estacas adicionadas ao longo do eixo X foi maior quando comparada a quantidade adicionada ao longo do eixo Y, o que resultou em um aumento do momento fletor máximo ao longo daquela direção, como pode ser visto pelos valores encontrados entre a configuração C1 e C2, e resultou também em valores de momento maiores para a direção X, quando comparados à outra direção, de forma que o momento observado na direção X foi de 608,1 kN.m e na direção Y atingiu aproximadamente 562,4 kN.m.

Entretanto, a medida em que se aumentou o número de estacas adicionadas ao longo do eixo Y dos silos, para as demais configurações, houve uma inversão no comportamento da absorção destes esforços, de forma que os momentos fletores ao longo do eixo Y tornaram-se maiores em relação aqueles atuantes na outra direção, fato este observado de maneira mais acentuada a partir da configuração C4, em que o momento fletor máximo na direção Y foi de 397,2 kN.m e na direção X atingiu o valor aproximado de 256,1 kN.m.

Procedeu-se também uma avaliação da influência dos parâmetros geométricos dos elementos sobre o momento fletor máximo atuante, e seus resultados para cada direção principal dos silos são apresentados a seguir. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam a variação do momento fletor com o fator geométrico, para cada diâmetro de estaca.

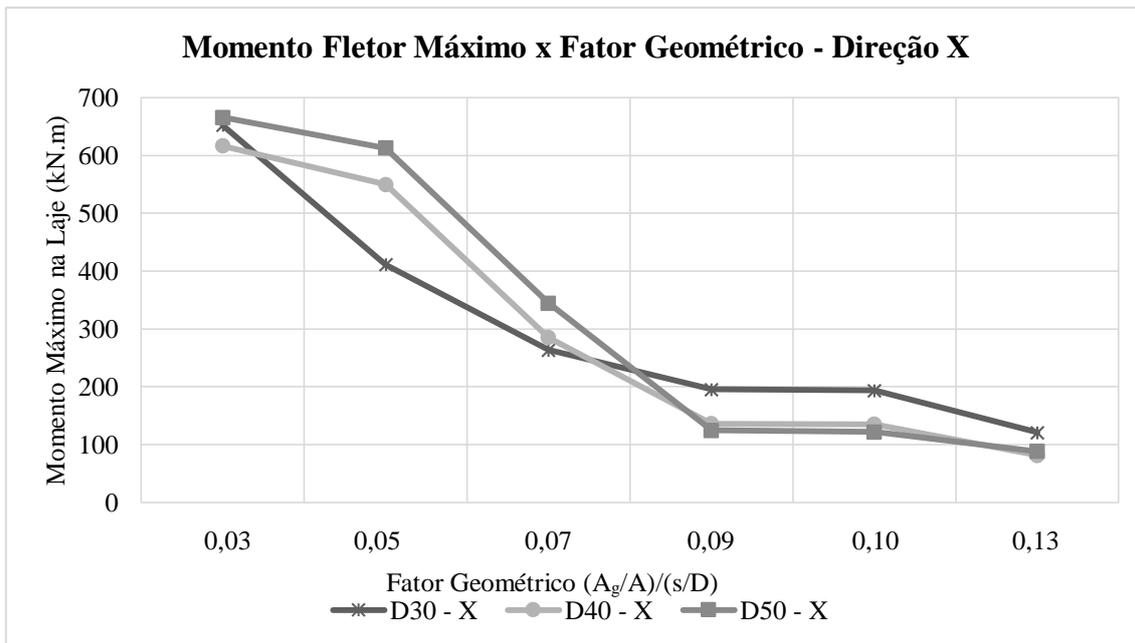


Figura 4.27. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção X, para diferentes diâmetros de estaca.

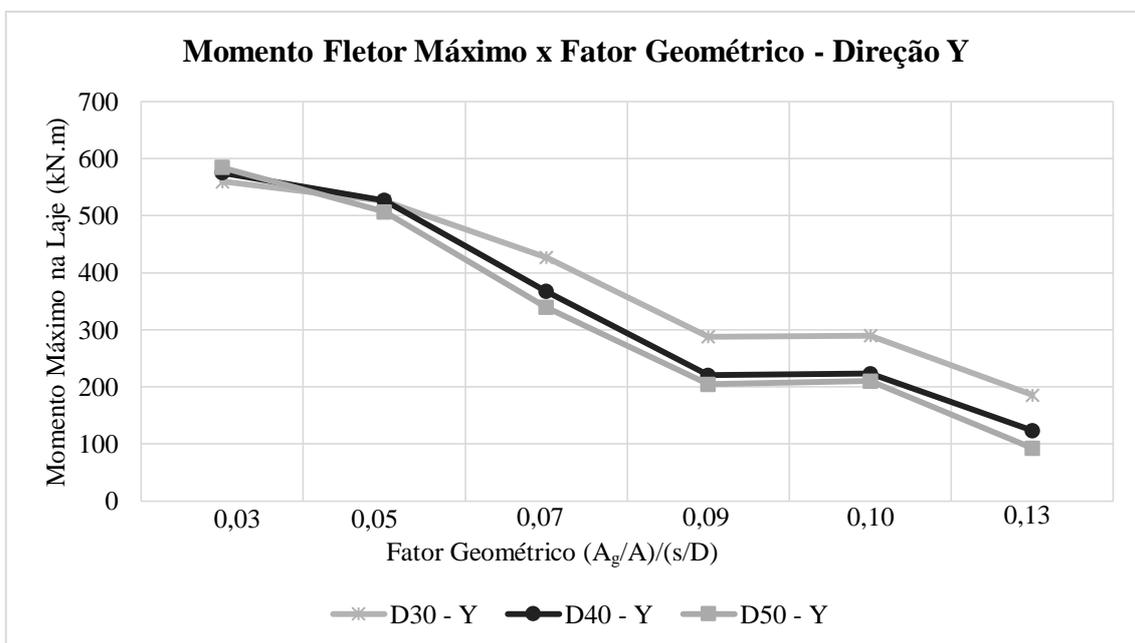


Figura 4.28. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção Y, para diferentes diâmetros de estaca.

Como observado na Figura 4.27, o aumento do diâmetro das estacas não resultou em uma consequente queda nos valores obtidos para os momentos fletores atuantes ao longo da direção X para os fatores $FG = 0,03, 0,05$ e $0,07$, de forma que para $FG = 0,05$, houve maior discrepância entre os dados encontrados, atingindo para o diâmetro de 30 cm um correspondente momento

fletor igual a 411,1 kN.m, para o diâmetro de 40 cm um momento igual a 550 kN.m e por fim, para o diâmetro de 50 cm um momento atuante de 612,7 kN.m.

Somente a partir do fator $FG = 0,09$, que contava com uma distribuição mais uniforme das estacas ao longo das duas direções da laje, valores maiores de diâmetro passaram a proporcionar menores momentos atuantes para o sistema, mesmo que para os diâmetros de 40 cm e 50 cm, esta diferença tenha sido observada em menor grau. Como apresentado no gráfico, para $FG = 0,09$, um aumento no diâmetro da estaca de 30 cm para 40 cm, proporcionou uma redução de 36% no valor de momento atuante.

Ao se analisar a influência dos diâmetros das estacas nos momentos fletores atuantes na direção Y, Figura 4.28, observa-se que para os fatores geométricos $FG = 0,03$ e $0,05$, o diâmetro pouco interferiu nos valores obtidos para os esforços analisados. Somente a partir de valores de $FG = 0,07$, observou-se uma redução nos momentos com o respectivo aumento do diâmetro das estacas, onde novamente, esta influência apresentou-se de maneira mais significativa entre os diâmetros D30 e D40, e menos significativa entre os diâmetros D40 e D50. De maneira geral, para valores de FG compreendidos entre $0,09$ e $0,13$, a alteração do diâmetro das estacas de 30 cm para 40 cm, acarretou em uma redução de aproximadamente 23% nos momentos fletores atuantes.

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam a variação do momento fletor com o número de estacas para diferentes comprimentos.

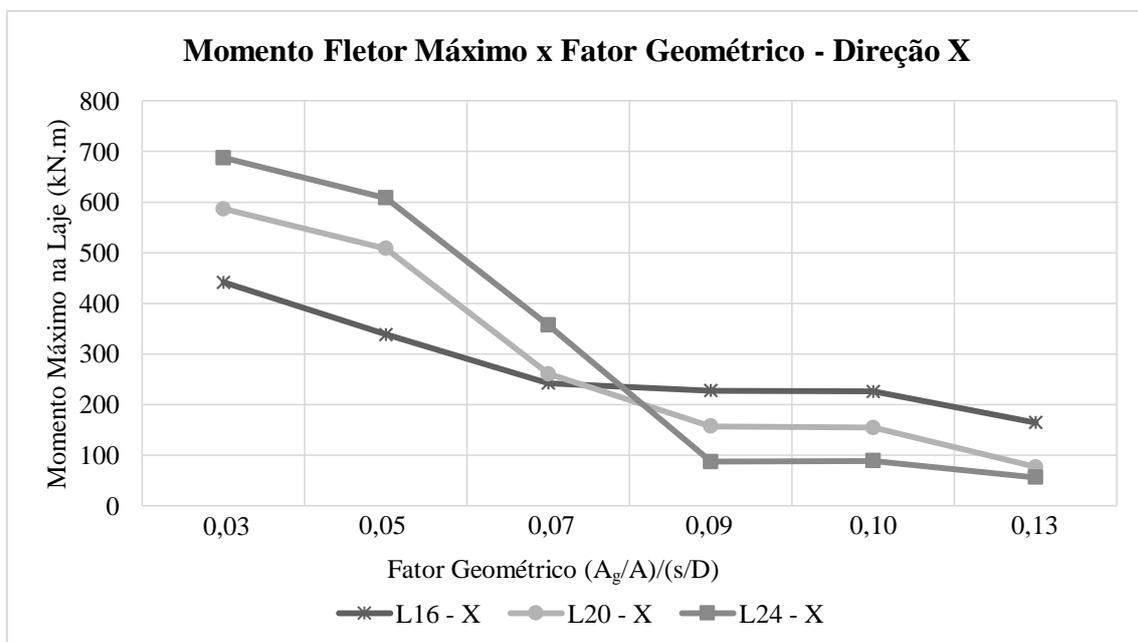


Figura 4.29. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção X, para diferentes comprimentos de estaca.

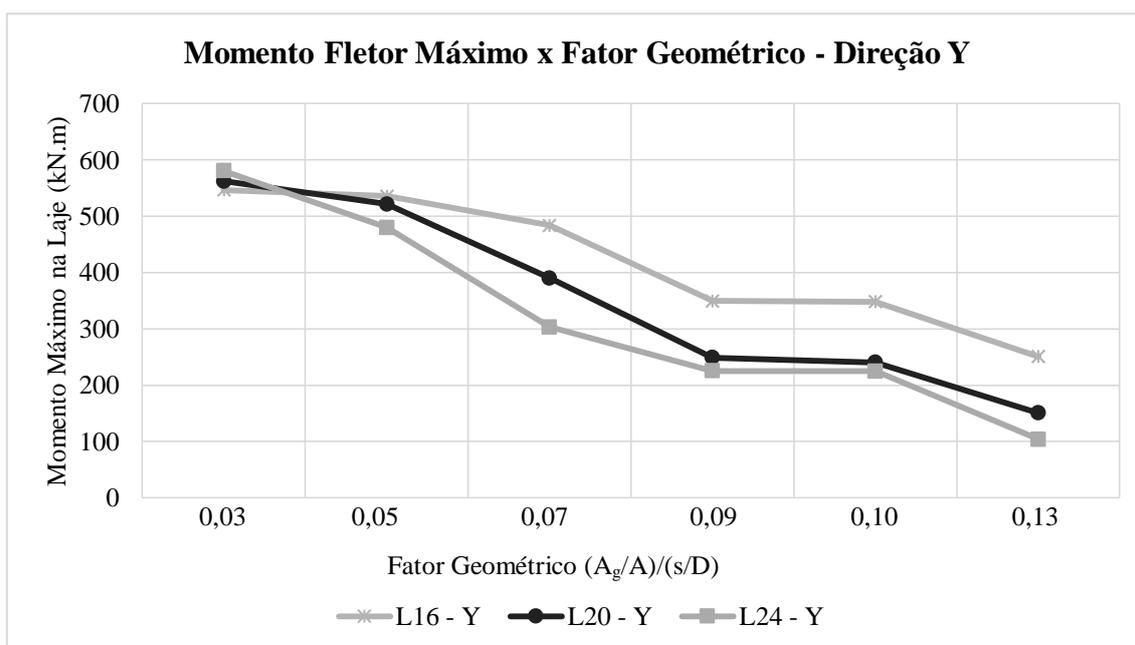


Figura 4.30. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção Y, para diferentes comprimentos de estaca.

A partir da análise procedida para a direção X, apresentada na Figura 4.29, observou-se comportamento próximo aquele encontrado para a variação do diâmetro das estacas, onde para valores de FG iguais a 0,03, 0,05 e 0,07, o aumento no comprimento das estacas não foi efetivo em diminuir o correspondente momento fletor atuante, haja vista a disposição das estacas ao longo da laje para cada configuração correspondente. E mais uma vez, somente a partir de valores de FG iguais a 0,09, a variação do comprimento foi inversamente proporcional ao momento fletor atuante ao longo da laje, com redução máxima, atribuída a $FG = 0,13$, de 66% nos momentos atuantes quando se alterou o comprimento da estaca de 16 m para 24 m.

Ao realizar a mesma análise anterior para os momentos na direção Y, observou-se que o aumento no comprimento das estacas reduziu o momento fletor atuante ao longo da laje, com valores máximos em torno de 59% para $FG = 0,13$. Para valores de FG a partir de 0,09, o desempenho do sistema com a variação do comprimento das estacas permaneceu inversamente proporcional, porém com influências menos significativas entre os comprimentos referentes a 20 m e 24 m, quando comparadas aquelas entre os comprimentos de 16 m e 20 m.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam a variação do momento fletor com o número de estacas para diferentes espessuras de radier

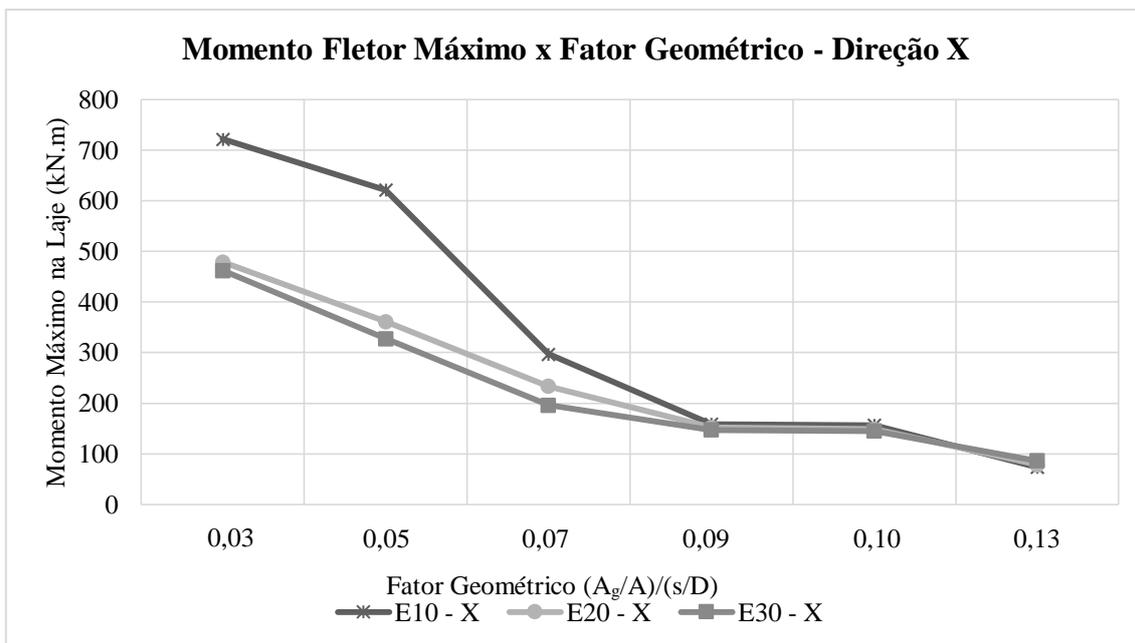


Figura 4.31. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção X, para diferentes espessuras de radier.

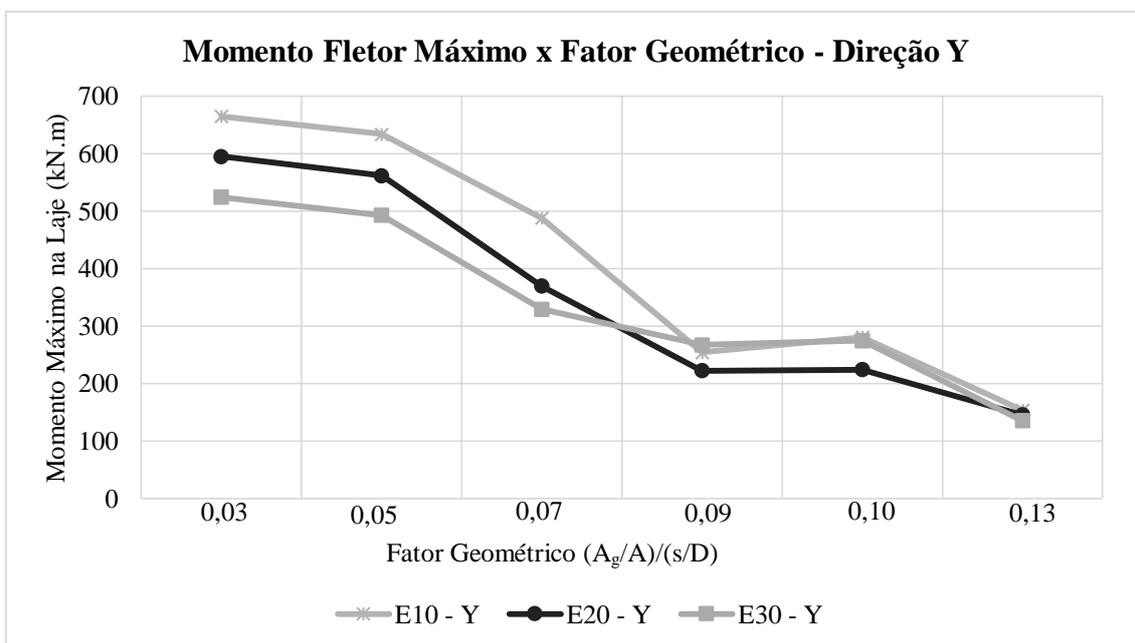


Figura 4.32. Variação do momento fletor máximo *versus* fator geométrico na direção Y, para diferentes espessuras de radier.

Como observado na Figura 4.32 o aumento na espessura do radier acarretou em uma redução nos momentos fletores atuantes neste para a direção X, atingindo um valor máximo de 47% para $FG = 0,05$, de forma que o ganho gerado apresentou menor notoriedade com o aumento do número de estacas, tornando-se praticamente constante para valores de FG a partir de 0,09.

Ao se analisar também a redução dos momentos fletores obtidas para valores iniciais de FG, observou-se que o aumento da espessura do radier foi mais efetivo para a variação entre 10 cm e 20 cm, tornando-se menos significativa para a variação entre 20 cm e 30 cm de espessura.

Para a análise dos momentos atuantes na direção Y, observou-se novamente uma redução dos esforços com o aumento da espessura do radier, de maneira distinta para cada espessura do radier, de modo a alcançar um valor limite de 32% para $FG = 0,07$. Valores de FG a partir de 0,09, não apresentaram redução tão significativa nos momentos atuantes quando comparadas aquelas iniciais, assim sendo, o aumento da espessura do radier demonstrou-se efetivo até $FG = 0,07$.

4.3.4 Carga nas Estacas

Analisou-se a variação da porcentagem que as estacas constituintes do sistema estariam absorvendo do carregamento total, com a variação do número destas sob a laje de fundo. Para tal análise adotou-se a configuração inicial imposta com estacas de comprimento igual a 20 metros e diâmetro de 0,35 m. Posteriormente, avaliou-se para cada configuração a influência da geometria dos elementos das estacas e radier, na absorção de cargas das estacas. A Figura 4.33 ilustra a variação da quantidade de estacas na absorção de carga para as estacas e o radier. A Tabela 4.9 resume a porcentagem de carga em relação ao carregamento total absorvida pelas estacas para cada fator geométrico.

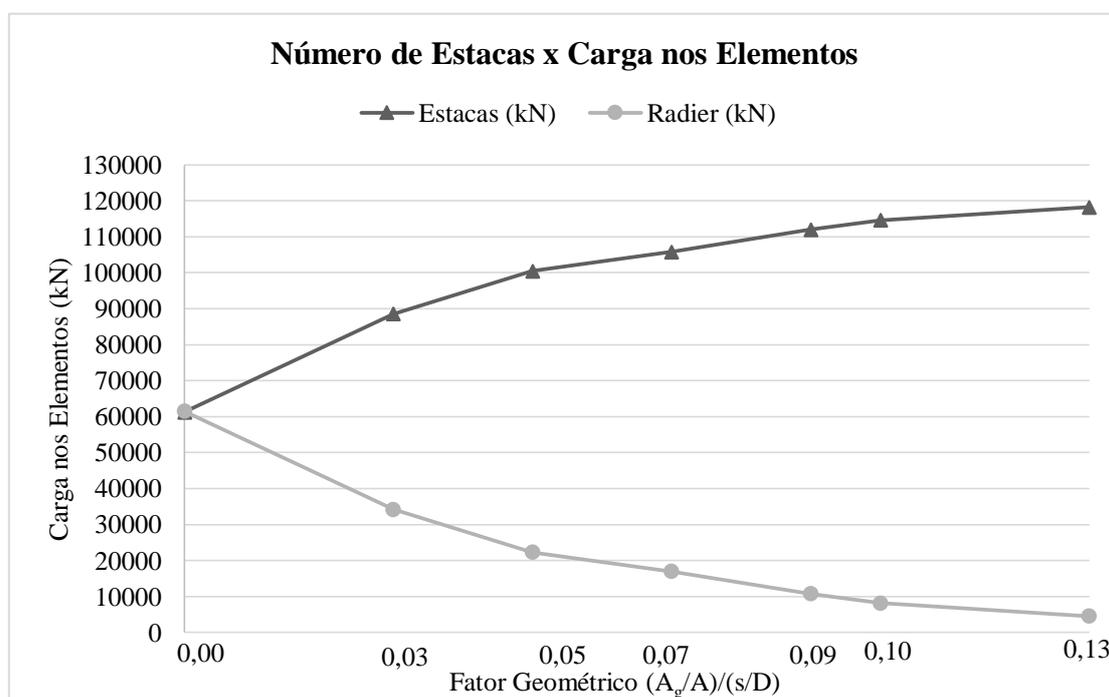


Figura 4.33. Variação da carga nos elementos *versus* fator geométrico.

Tabela 4.9. Porcentagem de carga nas estacas para cada fator geométrico.

Configuração	Fator Geométrico (A_g/A)/(s/D)	% de Carga nas Estacas
C1	0,00	49,9%
C2	0,03	72,1%
C3	0,05	81,8
C4	0,07	86,2%
C5	0,09	91,2%
C6	0,10	93,4%
C7	0,13	96,3%

Como esperado, houve um aumento de porcentagem de carga atuante nas estacas com a adição destas sob a laje de fundo. Para a configuração original, sem estacas extras, os elementos que compunham o sistema estrutural, estacas e radier, compartilhavam o carregamento a níveis quase semelhantes, contudo, já para a primeira configuração de estaqueamento adicional, aproximadamente 72% da carga total aplicada foi transmitida as estacas, chegando a 96% do total para a última configuração, composta por 172 estacas extras.

A porcentagem de carga absorvida pelas estacas para cada configuração de estaqueamento é apresentada para cada diâmetro de estaca ($D30 = 30$ cm, $D40 = 40$ cm e $D50 = 50$ cm) na Figura 4.34 e Tabela 4.10, mantendo-se o seu comprimento constante em 20 metros e espessura do radier em 0,15 m.

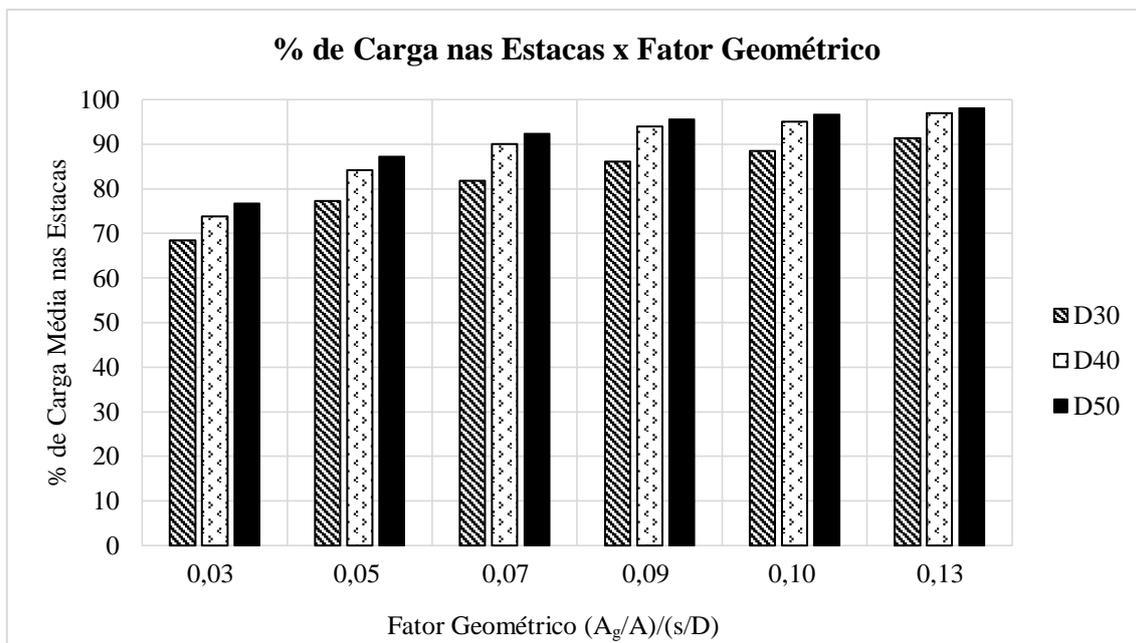


Figura 4.34. Variação da carga nas estacas *versus* fator geométrico, por diâmetro de estaca.

Tabela 4.10. Porcentagem de carga nas estacas para cada diâmetro de estaca analisado.

Diâmetro	Porcentagem de Carga nas Estacas (%)					
	C2	C3	C4	C5	C6	C7
D30	68,4	77,2	81,8	86	88,5	91,3
D40	73,8	84,2	90	93,9	95	97
D50	76,7	87,2	92,4	95,6	96,6	98

A porcentagem de carga absorvida pelas estacas para cada fator geométrico é apresentada para cada comprimento de estaca ($L16 = 16$ m, $L20 = 20$ m e $L24 = 24$ m) na Figura 4.35 e Tabela 4.11, mantendo-se seu diâmetro constante em 0,35 m e espessura do radier igual a 0,15 m.

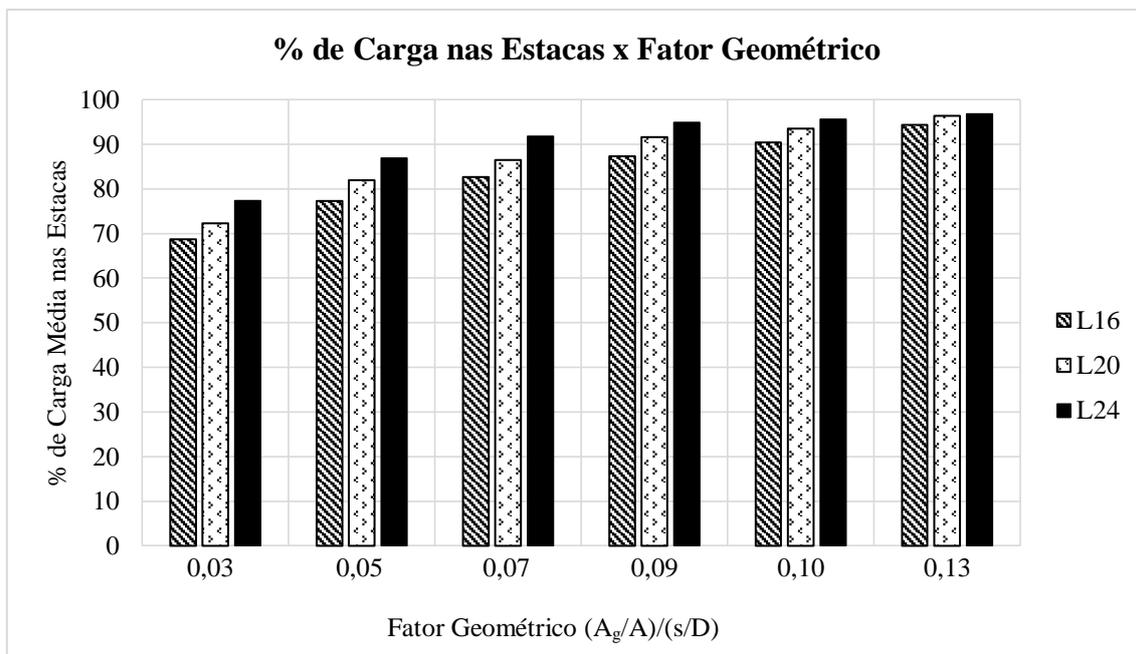


Figura 4.35. Variação da carga nas estacas *versus* fator geométrico, por comprimento de estaca.

Tabela 4.11. Porcentagem de carga nas estacas para cada comprimento de estaca analisado.

Comprimento	Porcentagem de Carga nas Estacas (%)					
	C2	C3	C4	C5	C6	C7
L16	68,7	77,3	82,6	87,3	90,4	94,3
L20	72,7	82	86,5	91,5	93,5	96,4
L24	77,3	86,9	91,7	94,8	95,6	96,8

A porcentagem de carga absorvida pelas estacas para cada fator geométrico é apresentada para cada espessura de radier (E10 = 10 cm, E20 = 20 cm e E30 = 30 cm) na Figura 4.36 e Tabela 4.12, mantendo-se o comprimento e diâmetro das estacas constantes em 20 m e 0,35 m, respectivamente.

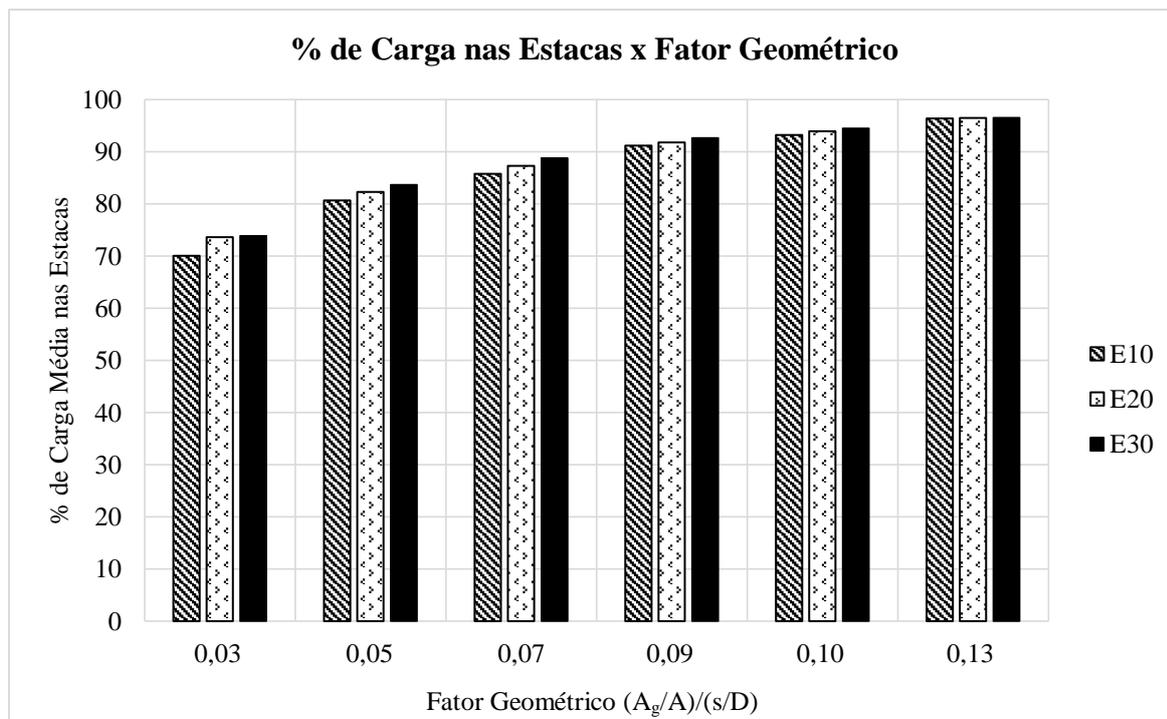


Figura 4.36. Variação da carga nas estacas *versus* fator geométrico, por espessura de radier.

Tabela 4.12. Porcentagem de carga nas estacas para cada espessura de radier analisada.

Espessura	Porcentagem de Carga nas Estacas (%)					
	C2	C3	C4	C5	C6	C7
E10	70	80,6	85,8	91,1	93,1	96,4
E20	73,6	82,3	87,3	91,8	93,9	96,4
E30	73,8	83,7	88,7	92,7	94,4	96,5

Como observado, com o aumento do número de estacas, a variação de todos os parâmetros analisados influenciou em menor nível na porcentagem de carga absorvida por elas, como pode ser observado principalmente nos dados referentes a configuração C7, e especificamente a variação do diâmetro proporcionou uma maior transferência de carga para as estacas a medida em que se adicionou novos elementos sob a laje de fundo.

4.3.5 Pressão de Contato do Solo-Radier

A avaliação do comportamento da pressão de contato entre o radier e o solo abaixo deste foi efetivada por meio da variação do número de estacas inseridas sob a laje de fundo. Conforme o relatório técnico elaborado pela empresa contratada para executar o serviço dos silos, a pressão máxima que a laje de um silo como o do estudo de caso, completamente cheio, é submetida gira em torno de 145,8 kPa, quando carregado com soja. Deste modo, tal valor será adotado como limite para a pressão de contato que atua no contato entre o solo e a laje. Os resultados da análise são apresentados na Figura 4.37, e foram calculados considerando a máxima pressão de contato desenvolvida nos elementos da laje ou radier.

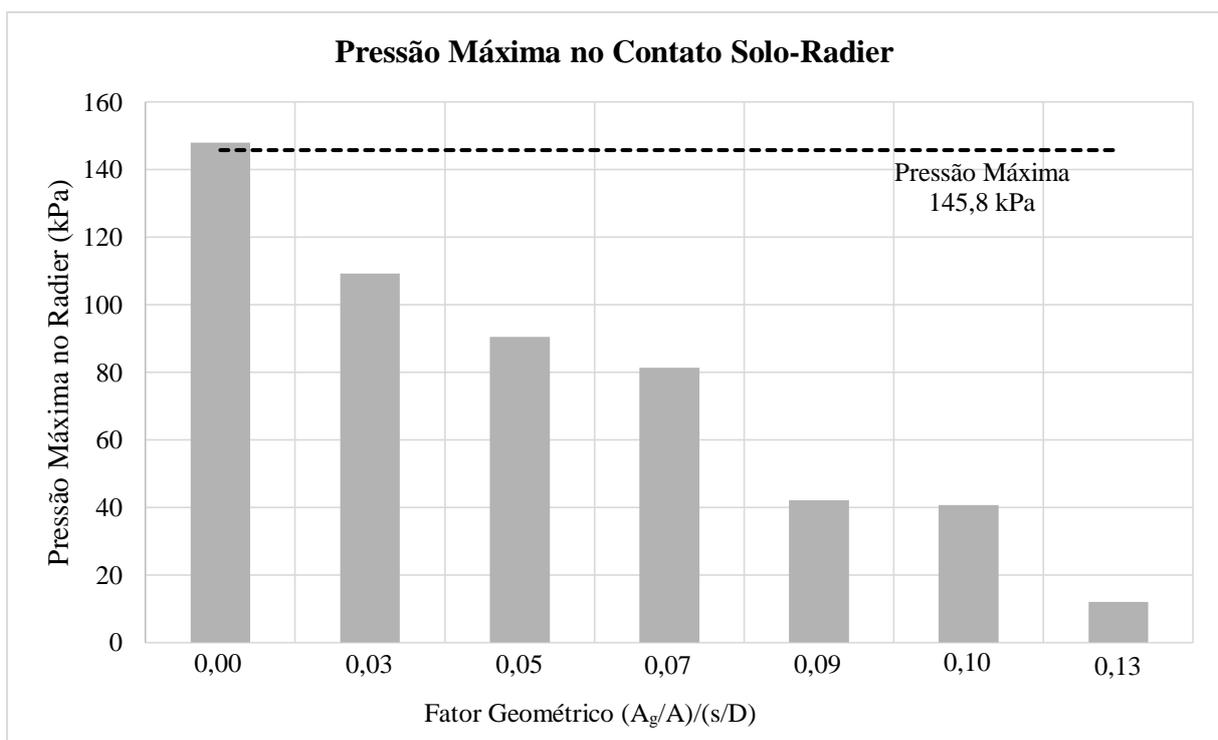


Figura 4.37. Variação da pressão de contato solo-radier, com o número de estacas sob a laje de fundo.

Para um fator geométrico $FG = 0,00$, com estacas apenas no túnel e anel externo, sem estacas adicionadas sob a laje, a pressão de contato no radier encontrada foi de 148 kPa, ultrapassando o valor limite máximo da pressão produzida no silo quando submetido a carregamento máximo. Contudo a pressão de contato reduz significativamente sua magnitude a medida em que se adicionou mais estacas ao sistema. Para valores de FG iguais a 0,09 e 0,10, não houve diferenças notórias na redução da pressão de contato, de modo que esta atingiu seu valor mínimo de 12

kPa para $FG = 0,13$. De maneira geral, a adição de estacas proporcionou uma redução em torno de 92% da pressão de contato entre o solo e o radier.

4.4 RESUMO DAS ANÁLISES

Por fim, os resultados das análises paramétricas aqui efetuadas no programa GARP, em termos de valores máximos absolutos encontrados, são agrupados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Resultado da análise paramétrica efetuada

Configuração	Parâmetro	Recalque Médio (cm)	Momento Fletor Máximo (kN.m)	Distorção Angular Máxima (1/n)	Carga Máxima nas Estacas (kN)	Pressão de Contato Máxima (kPa)
C1 (0 estacas)	-	13,7	642,7	150	61242,4	148
C2 (48 estacas)	L16	9,6	546,5	150	84315,1	
	L20	8,3	586,4	150	88674,1	
	L24	7,3	687,8	150	94942,3	
	D30	8,9	652,5	250	83952,4	
	D40	8,1	616,4	150	90600,4	109,2
	D50	7,7	665,6	150	94138,3	
	E10	8,7	721,7	150	85965,4	
	E20	8,2	594,8	150	90423,1	
	E30	8,5	524,1	250	90669,7	

Configuração	Parâmetro	Recalque Médio (cm)	Momento Fletor Máximo (kN.m)	Distorção Angular Máxima (1/n)	Carga Máxima nas Estacas (kN)	Pressão de Contato Máxima (kPa)
C3 (76 estacas)	L16	7,7	535,8	300	94897,1	90,5
	L20	5,6	521,7	375	100639,4	
	L24	4,35	607,9	750	106669,6	
	D30	6,7	525,6	375	94807,9	
	D40	5,2	550	750	103321,2	
	D50	4,8	612,7	750	107044,6	
	E10	5,9	634,1	375	99016,2	
	E20	5,6	561,7	375	101015,9	
E30	5,6	492,8	375	102744,1		
C4 (96 estacas)	L16	6,7	483,6	375	101391,1	81,4
	L20	4,6	390,1	750	106122,4	
	L24	3,4	356,8	750	112594	
	D30	5,6	426,9	375	100396,4	
	D40	3,9	367,4	750	110448,5	
	D50	3,8	344,6	750	113391,5	
	E10	4,8	487,8	375	105298,9	
E20	4,6	369,5	375	107168,7		
E30	4,6	329,4	750	108935,2		

Configuração	Parâmetro	Recalque Médio (cm)	Momento Fletor Máximo (kN.m)	Distorção Angular Máxima (1/n)	Carga Máxima nas Estacas (kN)	Pressão de Contato Máxima (kPa)
C5 (116 estacas)	L16	5,9	349,7	375	107210,5	
	L20	3,7	249,1	750	112409,1	
	L24	2,7	225,5	750	116425,7	
	D30	4,7	288,2	500	105611,8	
	D40	3,3	220,6	750	115332,5	42,1
	D50	3,3	204,5	750	117353,4	
	E10	3,8	254,1	375	111897,8	
	E20	3,7	222,3	750	112720,6	
	E30	3,8	267	750	113783,8	
C6 (140 estacas)	L16	5,3	348,1	750	110961,7	
	L20	3,2	240,3	1500	114822,7	
	L24	2,2	224,9	1500	117387,2	
	D30	4,2	289,7	1500	108605,3	
	D40	3,1	223,1	1500	116631,4	40,7
	D50	3,1	210,2	750	118631	
	E10	3,3	280,8	750	114360,2	
	E20	3,1	223,9	1500	115293	
E30	3,2	274,7	1500	115940,9		

Configuração	Parâmetro	Recalque Médio (cm)	Momento Fletor Máximo (kN.m)	Distorção Angular Máxima (1/n)	Carga Máxima nas Estacas (kN)	Pressão de Contato Máxima (kPa)
C7 (172 estacas)	L16	4,7	251,1	750	115793,9	
	L20	2,6	150,4	1500	118353,8	
	L24	2,1	103,9	1500	118840,4	
	D30	3,6	185,8	750	112118,4	
	D40	2,7	123,5	1500	118953,1	12,0
	D50	2,9	92,5	750	120408,7	
	E10	2,6	153,6	1500	118341,4	
	E20	2,6	145,2	750	118391,1	
	E30	2,9	134,9	1500	118462,9	

Como observado, para as diferentes configurações de estaqueamento, a adição de estacas extras sob a laje de fundo proporcionou redução significativa nos recalques médios totais, do cenário de distorção angular, bem como do momento fletor máximo atuante sob a laje de fundo e da pressão de contato solo-radier. Desta forma, espera-se um melhor desempenho operacional dos silos quanto a seu sistema de fundação.

Contudo, a adição de tais estacas aumenta-se o fato geométrico e, contudo, reduz seu efeito benéfico para o sistema em um certo limite, no qual a partir de valores de FG iguais a 0,9, correspondente a configuração C5, a melhoria acrescentada no desempenho da fundação dos silos deixa de apresentar incrementos significativos, como pode ser observado principalmente nos valores de recalques totais e momentos fletores atuantes. Assim sendo, a configuração C5 caracterizaria um perfil de estaqueamento mais ideal para a solução do problema em questão,

ao apresentar desempenho técnico satisfatório e com um menor uso de estacas quando comparada com as configurações com número de estacas superior.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho procurou simular duas safras de carregamento de um conjunto de silos de armazenamento de grãos por meio do programa GARP, a partir dos projetos e ensaios de campo e laboratório realizados por uma empresa privada. A partir da análise das duas safras armazenadas, as seguintes conclusões podem ser extraídas deste trabalho:

- Para a análise da primeira safra, o programa GARP foi capaz de simular com boa proximidade o cenário de recalques médio medidos em campo, apesar das simplificações inerentes à execução do ensaio e a estimativa dos parâmetros;
- Para a análise da segunda safra, realizada a partir dos parâmetros obtidos pelo ensaio SPT, o programa não foi eficaz em representar os recalques medidos em campo, apesar de indicar uma rigidez maior para a região superior dos silos, como demonstrado em campo;
- Os deslocamentos ocorridos no terreno mesmo com a execução de um aterro compactado sob a laje de fundo, mostraram que tal solução não foi suficiente para impedir as deformações que levaram à instabilidade do solo e consequentemente da estrutura dos silos;
- A redução dos deslocamentos em campo, quando se compara a segunda época de armazenamento com a primeira, pode ser bem representada pelos resultados dos ensaios oedométricos cíclicos, onde a partir de fases de carregamento e recarregamento do terreno, a deformação do solo diminui de forma notória, onde para novas fases de carregamento, o efeito do possível colapso ocorrido deixa de fazer maiores efeitos;
- O programa GARP apresentou boa representatividade para primeiros carregamentos no terreno, porém, a partir de um recarregamento do solo, como no caso da segunda safra, o *software* não simulou com precisão o cenário de recalques para aquela safra, o que se deve provavelmente ao fato de que o programa não é capaz de simular um possível fenômeno de colapso que ocorra no terreno.

Para a segunda etapa do trabalho, que consistiu de análise paramétrica, adotando-se os parâmetros de deformabilidade da primeira safra como proposta de solução preventiva ao

problema ocorrido em campo, propôs-se a utilização do sistema em radier estaqueado como solução a fim de se encontrar um número ótimo de estacas necessárias ao problema, e variou-se a quantidade de estacas inseridas sob a laje de fundo, o diâmetro e comprimento de tais estacas, bem como a espessura da laje ou radier. Para esta etapa, as principais conclusões são apontadas a seguir:

- Quanto maior o número de estacas inseridas sob a laje, menor foi o recalque médio total do sistema, de forma que a partir do fator geométrico igual a 0,09, observou-se que a adição de estacas deixou de fazer maior influência sobre o recalque dos silos;
- A adição de estacas proporcionou redução do recalque médio de maneira satisfatória, em torno de 70% a 80% do valor inicial encontrado, para todos os elementos dos silos, porém o estaqueamento da laje reduziu em menor escala os recalques do anel externo, quando comparados aos recalques do túnel e laje central, mostrando que a posição em que se adiciona estacas ao sistema mantém influência em seu desempenho quanto a recalques totais;
- Observou-se uma tendência à aproximação dos valores encontrados para recalques totais, a medida em que se aumentava o número de estacas sob a laje, para os três elementos dos silos, em cada região (superior e inferior), de forma que se pode concluir que a rigidez dos elementos, deixa de fazer maior influência nos recalques totais para um número maior de estacas inseridas, principalmente quando compara-se a laje de fundo e o túnel central;
- O aumento do diâmetro das estacas foi efetivo em reduzir os recalques médios totais quando se alterava-se do diâmetro D30 para D40, para todos os elementos dos silos, porém não se observou a mesma efetividade quando se aumentava o diâmetro de D40 para D50;
- O aumento do comprimento das estacas demonstrou-se efetivo na redução dos recalques totais, para todos os elementos dos silos e para toda a faixa de variação dos comprimentos, L16 à L24;
- De maneira geral, o aumento dos parâmetros das estacas, diâmetro e comprimento, proporcionou maior influência no recalque total da laje de fundo e túnel, quando comparada ao recalque do anel externo;
- A variação da espessura do radier não demonstrou influência notória na redução dos recalques totais, para todos os elementos do conjunto dos silos, com uma pequena

redução observada para o recalque da laje de fundo nas Configurações iniciais de estaqueamento;

- De maneira geral, a solução em radier estaqueado provou-se eficaz em reduzir os recalques totais para os valores limites adotados;
- Quanto à distorção angular observada, o aumento no número de estacas proporcionou uma melhoria no cenário do sistema, no qual somente a partir de $FG = 0,9$, todas as direções principais dos silos apresentaram valores maiores do que o admissível;
- Para valores iniciais de FG , a variação dos parâmetros analisados não representou em influência direta na melhoria do comportamento do sistema quanto à distorção angular, onde somente a partir de $FG = 0,07$, observou-se uma relação mais direta da variação dos parâmetros com a melhoria da distorção angular apresentada nos silos, principalmente ao variar o comprimento das estacas e a espessura do radier ou laje;
- Quanto à análise do momento fletor atuante na laje de fundo, observou-se que o aumento do número de estacas diminuiu de forma satisfatória o esforço atuante e que a posição a qual se realiza o estaqueamento adicional apresenta influência direta nos valores de momentos fletores atuantes em ambas direções de análise;
- A posição em que se procedeu o estaqueamento provocou maiores variações nos valores de momentos fletores atuantes na direção x , em relação à variação do diâmetro das estacas, de forma que para a configuração C5, não houve mudança significativa nos momentos atuantes entre os diâmetros D40 e D50;
- Para a direção y , quanto maior o diâmetro das estacas inseridas, menor o momento fletor atuante ao longo da laje, de forma a não haver mudanças significativas nos esforços entre os diâmetros D40 e D50;
- As mesmas conclusões referentes à variação do diâmetro das estacas, aplica-se à variação de seu comprimento, entretanto a influência exercida sobre os momentos atuantes se deu de maneira mais notória;
- O aumento da espessura do radier ou da laje de fundo proporcionou uma redução dos momentos fletores atuantes naquele elemento, mesmo que em menor grau para a variação das espessuras de 20 cm e 30 cm. Contudo, a partir da configuração C5, não houve redução em maior grau para os momentos fletores atuantes;
- De maneira geral, a variação dos parâmetros referentes as estacas influenciaram de maneira mais notória na porcentagem de carga absorvida por estas, quando comparada a variação da espessura do radier;

- O aumento do número de estacas proporcionou uma redução significativa na pressão exercida no contato solo-radier, de forma a reduzir em torno de 71% incrementando-se FG até valores iguais a 0,09, a partir da qual a influência deixa de ser tão representativa;

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas posteriores na área, recomenda-se após a elaboração deste trabalho:

- Efetuar uma modelagem numérica 3D em um programa que melhor simule a realidade do carregamento cíclico e rápido dos silos, avaliando as tensões residuais advindas deste, bem como um estudo do efeito do possível colapso do terreno nos deslocamentos medidos, e neste sentido complementar a análise em estudo;
- Realização de ensaios oedométricos e triaxiais em distintas profundidades ao longo do terreno que representem melhor a situação de carregamento de silos, para que assim se possa prever de maneira mais realista o comportamento dos silos quando submetidos a cargas usuais;
- Proceder o estudo e modelagem de distintas técnicas de melhoria do terreno, que não só a do sistema em radier estaqueado, como forma a garantir o desempenho técnico, mantendo-se o viés econômico, para obras de silos graneleiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. (2001). Análise e Dimensionamento de Silos de Concreto Armado: Desenvolvimento de um Programa Computacional. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 98 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6122/2010: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, RJ, 91 p.

BAHIA, G. A. D. (2015). Avaliação do Desempenho de Fundações em Edificações no DF Com a Utilização de Técnicas de Interação Solo-Estrutura. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-259/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 245 p.

BERNARDES, H. C. (2017). Ferramenta Numérica Híbrida Para Análise Não Linear de Radier Estaqueados. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 65 p.

BJERRUM, L. (1963). Allowable Settlement of Structures, Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, Vol III, pp 135–137.

CALIL JUNIOR, C. (1978). Silos de Madeira. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 127 p.

CALIL JUNIOR, C., NASCIMENTO, J. W. B., ARAÚJO, E. C. (1997). Silos Metálicos Multicelulares. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 178 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, GITIRANA JR. G. F. N, J. VILAR, O. M. & FERREIRA S. R. M. (2015). Solos Não-Saturados no Contexto Geotécnico. ABMS, São Paulo, SP, 763 p.

CASTILLO, D. J. A. (2013). Uso da Técnica de Radier Estaqueado Para Pequenos Edifícios Assentes Sobre Solo Mole Colapsível. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-223/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.

COLLANTES, C. A. P. (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.

CONAB. (2018). Indicadores da Agropecuária, 27 (5). Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, DF, 116 p. Disponível em: www.conab.gov.br.

CONCIANI, W. (2016). Possíveis Melhoramentos no Projeto e Construção de Silos. Tese de Candidatura à Classe de Professor Titular, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

- CORDEIRO, A. F. B. (2017). Modelagem Física de Radiers Estaqueados Com e Sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-136/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188 p.
- CURADO, T. S. (2015). Comparação de Teorias de Interação Entre Estacas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 151 p.
- DOGANGUN, A., KARACA, Z., DURMUS A. (2009). Cause of Damage and Failures in Silo Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(2). P. 61-71.
- EPF GEOTECNIA. (2017). Análise da Fundação dos Silos e Túneis da Unidade de Armazenamento em São Félix do Araguaia - MT. Informe Técnico, Brasília, DF, 11 p.
- FORTES FILHO, J. (1985). Uma Introdução ao Estudo dos Silos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 427 p.
- HAIN, S.J., LEE, I.K. (1978). The analysis of flexible raft-pile systems. *Geotechnique*, 28(1). p. 65-83.
- 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*, 32 (1): 3-18.
- KATZENBACH, R., ARSLAN, U., MOORMAN, C., Reul, O. (1998). Piled Raft Foundations: Interaction Between Piles and Raft. *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt University of Technology, 4: pp 279-296.
- KEPLER WEBER. (2017). Catálogo Geral de Produtos - Armazenagem de Grãos, 84 p. Disponível em: www.kepler.com.br.
- LEITE, L. M. O. (2008). Silos Metálicos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, PT, 194 p.
- 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.
- MADRONA, F. S. (2008). Pressões em Silos Esbeltos Com Descarga Excêntrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 177 p.
- MANDOLINI, A. (2003). Design of Pile Raft Foundations: Practice and Development. In: *Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, BAP IV. Bélgica, p.59-80.
- MANDOLINI, A., LAORA, R., MASCARUCCI, Y. (2013). Rational Design of Piled Raft. *Procedia Engineering*, 57: 45-52.

- MANDOLINI, A., DI LAORA, R., IODICE, C. (2017). Simple Approach to Static and Seismic Design of Piled Rafts. 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, pp. 107-124.
- NASCIMENTO, J. W. B. (1996). Estudo de Silos Metálicos Prismáticos Para Fábricas de Ração. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 152 p.
- PALMA, G. (2005). Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($h/d \geq 1,5$). Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 109 p.
- PALMEIRA, E. M. (2016). Resistência ao Cisalhamento dos Solos: Notas de Aula. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62 p.
- POULOS, H.G. (1991). Foundation Economy via Piled Raft Systems. Keynote Paper of Pile talk International' 91. Kuala Lumpur. p. 97-106.
- POULOS, H. G. (2000). Practical Design Procedures for Piled Raft Foundations. In: Design Applications of Raft Foundations, Hemsley, J. A. Ed. Thomas Telford. 2000, p. 425-467.
- POULOS, H.G. (2001). Piled Raft Foundations: Design and Applications. *Géotechnique*, 51(2), 95-113.
- POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. (1974). Elastic Solutions For Soil and Rock Mechanics. John Wiley & Sons Inc., Sydney, Austrália, 424 p.
- POULOS, H. G., SMALL, J. C., & CHOW, H. (2011). Piled Raft Foundations for Tall Buildings. *Geotechnical Engineering*, 42(2), 78–84.
- RANDOLPH, M. F. (1994). Design Methods For Pile Groups and Piled Rafts. In: Proceedings of the 13th ICSMFE. New Delhi, 1: 61-82.
- RINCON, E. R. (2016). Análise Experimental do Comportamento de Sistemas Radier Estaqueado em Solos Moles em Processos de Adensamento. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-119/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 237 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, 229 p.
- SALES, M. M., SMALL, J. C. & POULOS H. G. (2010). Compensated Piled Rafts in Clayey Soils: Behaviour, Measurements, and Predictions. *Can. Geotech. J.* 47: 327-345.
- SOARES, W. C. (2011). Radier Estaqueado Com Estacas Hollow Auger Em Solo Arenoso. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 302 p.

SANCTIS, L. & MANDOLINI, A. (2006). Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 132 (12).

SCALABRIN, L. A. (2008). Dimensionamento de Silos Metálicos Para Armazenamento de Grãos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 158 p.

SILVA NETO, I. T. (2013). Estado da Arte de Silos Verticais de Madeira. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Engenharia, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 154 p.

SOUSA, M. A. P. (2014). Análise do Efeito do Comportamento Não Linear dos Solos em Radier Estaqueado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 160 p.

SOUSA, L. C. M. & CUNHA, R. P. (2005). Estudo Experimental de Comportamento de Sapatas Estaqueadas Assentes em Solo Poroso colapsível. *Soils and Rocks*, 28, (2), p. 229- 240.

VARGAS, M. (1978). Introdução à Mecânica dos Solos. Makron Books do Brasil Editora Ltda, São Paulo, 509 p.