

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS BUCH NASCIMENTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE SOLUÇÕES DE RADIERS UTILIZADOS
EM SILOS METÁLICOS DE FUNDO PLANO**

GUARAPUAVA

2022

LUCAS BUCH NASCIMENTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE SOLUÇÕES DE RADIERS UTILIZADOS
EM SILOS METÁLICOS DE FUNDO PLANO**

**ANALYSIS OF THE TECHNICAL FEASIBILITY OF RAFT SOLUTIONS USED IN
FLAT BOTTOM METAL SILOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS BUCH NASCIMENTO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE SOLUÇÕES DE RADIERS UTILIZADOS
EM SILOS METÁLICOS DE FUNDO PLANO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva

Data de aprovação: 05 julho de 2022

Dyorgge Alves Silva
Mestre em Estruturas e Construção Civil
Universidade Tecnológica do Paraná Federal - UTFPR

Anderson Buch
Graduação em Engenharia Civil
AABB - Engenharia e Construções LTDA

Edison Roberto Villela de Biassio Jr.
Pós-graduado em Gestão Ambiental
Aresta arquitetura e Engenharia

GUARAPUAVA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus.

Ao Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva pela orientação e contribuição com seus conhecimentos e experiências na área de estruturas em concreto armado.

A minha família pelo apoio e incentivo em todos esses longos anos.

A minha noiva que esteve ao meu lado em todos os momentos, ajudando, apoiando, incentivando e sempre me inspirando.

Aos meus amigos e colegas que deixavam os dias melhores e divertidos.

“Teoria é teoria
prática é prática
há uma grande diferença quando se leva a
realidade; mas lembre-se sempre dessa
verdade:
Há quem é bom na teoria...
E há quem é bom na prática!”
(Marcos Vinicius Trindade)

RESUMO

Silos são estruturas de armazenagem de produtos sólidos, como por exemplo na agricultura, a soja, milho, feijão, entre tantos outros, com a finalidade de garantir a qualidade e durabilidade dos produtos armazenados por um grande período de tempo. Embora sejam estruturas importantes no escoamento da produção, no Brasil há um déficit, que aumenta a cada ano, pois a velocidade de crescimento da produção é maior que a velocidade de investimentos e pesquisa em unidades armazenadoras. As bases e fundações de silos sofrem uma variabilidade de cargas muito alta, uma vez que ocorre o carregamento e descarregamento dos grãos rapidamente, muitas vezes isto causa deformações que comprometem a segurança da estrutura. Como é sabido alguns sistemas de fundações são pouco utilizados apesar de seus benefícios, podemos observar isto em silos. O radier estaqueado é um sistema de fundações que é pouco utilizada por conta de sua maior dificuldade de cálculo, mas traz diversos benefícios para a execução de silos, visto que diminui os recalques esperados e reduz o custo das fundações, pois otimiza a quantidade de estacas necessárias para garantir a rigidez e estabilidade global do silo. Para melhorar ainda mais a eficiência, e ter parâmetros comparativos para novos empreendimentos, o presente trabalho vem estudar a interação entre solo-estrutura para silos metálicos de fundo plano, visando otimizar a utilização de radier estaqueado. A análise tem como base de comparação entre simulações computadorizadas, o dimensionamento estrutural já existente e um breve dimensionamento do número de estacas, utilizando-se de um laudo SPT real para a correta validação dos resultados. A comparação entre uma análise rápida da quantidade de estacas necessárias e o dimensionamento estrutural, mostra que o dimensionamento está dentro da realidade, considerando os parâmetros de projeto.

Palavras-chave: Silos, grãos armazenamento, fundações, recalque de estruturas, solos.

ABSTRACT

Silos are storage structures for solid products, such as in agriculture, soy, corn, beans, among many others, with the purpose of guaranteeing the quality and durability of the products stored for a long period of time. Although they are important structures in the flow of production, in Brazil there is a deficit, which increases every year, as the speed of production growth is greater than the speed of investments and research in storage units. The bases and foundations of silos suffer a very high load variability, since the loading and unloading of grains occurs quickly, this often causes deformations that compromise the safety of the structure. As it is known that some foundation systems are little used despite their benefits, we can observe this in silos. The piled radier is a system of foundations that is little used due to its greater difficulty in calculating, but it brings several benefits for the execution of silos, as it reduces the expected settlements and reduces the cost of foundations, as it optimizes the number of piles necessary to ensure the overall rigidity and stability of the silo. To further improve efficiency and have comparative parameters for new projects, the present work aims to study the interaction between soil-structure for flat-bottomed metallic silos, aiming to optimize the use of piled radiator. The analysis is based on the comparison between computer simulations, the existing structural design and a brief design of the number of piles, using a real SPT report for the correct validation of the results. The comparison between a quick analysis of the amount of piles needed and the structural design shows that the design is within reality, considering the design parameters.

Keywords: silos; grain-storage; foundations; settlement of structure; soils.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2 - Silo Madeira	18
Figura 3 - Silos Concreto	19
Figura 4 - Silos Metálicos	19
Figura 5 – Infraestrutura e Superestrutura – Silos	22
Figura 6 – Base Silo	22
Figura 7 – Fundação Silo	23
Figura 8 – Tipos de fundação superficial ou rasa	24
Figura 9 – Tipos de fundação profunda	25
Figura 10 – Sistemas de Análise Computacional	37
Figura 11 – Sistema de Análise – Estática Estrutural	38
Figura 12 – Modelagem: Radier Estaqueado	41
Figura 13 – Modelagem: Radier	41
Figura 14 – Modelagem: Radier Estaqueado Não Apoiado	42
Figura 15 – Modelagem: Solo Único	42
Figura 16 – Modelagem: Cargas atuantes na estrutura	44
Figura 17 – Deformação do Solo	47
Figura 18 – Deformação Estrutura	49
Figura 19 – Tensões no Solo	51
Figura 20 – Tensões na Estrutura	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso específico solos argilosos (γ)	38
Tabela 2 – Peso específico solos arenosos (γ)	38
Tabela 3 – Módulo de Elasticidade (ϵ)	39
Tabela 4 – Coeficiente de Poisson (ν)	39
Tabela 5 - Cálculo da capacidade de carga de fundações em estacas	45
Tabela 6 – Cargas.....	45

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Capacidade Carga da Estaca (Q_u) – Método Aoki-Veloso	33
Equação 2: Resistência da Ponta (Q_p) – Método Aoki-Veloso	33
Equação 3: Resistência Lateral (Q_a) – Método Aoki-Veloso	33
Equação 4: Capacidade Carga da Estaca (Q_u) – Método Décourt-Quaresma	34
Equação 5: Resistência da Ponta (q_p) – Método Décourt-Quaresma	34
Equação 3: Resistência Lateral (q_s) – Método Décourt-Quaresma	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cepea	Centro de Estudos Estatísticos Avançados em Economia Aplicada
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
M.E.C	Método dos elementos de contornos
M.E.F	Método dos elementos finitos
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto Interno Bruto
SPT	Ensaio de penetração padrão (Standard Penetration Test)

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_p = A_l = A_s$	Área ponta da estaca
Q_{total}	Carga de ruptura
Q/CS	Carga e ruptura considerando coeficiente de segurança
Q_u	Capacidade de carga das estacas
ν	Coefficiente de Poisson
α	Coefficiente em função do tipo de solo
β	Coefficiente em função do tipo de solo e da estaca
K	Coefficiente em função do tipo de solo
$F_1 = F_2$	Fator de correção em função do tipo de estaca
E	Módulo de Elasticidade
γ	Peso específico
$Q_a = q_s$	Resistência lateral
$Q_p = q_p$	Resistência da ponta
N_{spt}	Resistência à penetração do amostrador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo principal	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
3.1	Silos de Armazenagem	17
3.1.1	Silos Metálicos de Fundo Plano	21
3.2	Fundações	23
3.2.1	Tipos e Sistemas de Fundações	24
3.2.2	Radier Estaqueado	26
3.2.3	Fatores de Influência em Radier Estaqueado	27
3.2.3.1	Espaçamento entre as Estacas	27
3.2.3.2	Comprimento da Estaca	27
3.2.3.3	Diâmetro das estacas	28
3.2.3.4	Número de Estacas	28
3.2.3.5	Espessura do Radier	28
3.2.3.6	Comprimento do radier	29
3.2.3.7	Densidade do solo	29
3.2.4	Mecanismos de Interação dos Elementos do Radier Estaqueado	29
3.3	Método de Análise de Radier Estaqueado	30
3.3.1	Método Simplificado de Poulos, Davis e Randolph	30
3.3.2	Método dos Elementos de Contorno (M.E.C)	31
3.3.3	Método dos Elementos Finitos (M.E.F.)	31
3.3.4	Métodos Híbridos	32
3.4	Método de análise da capacidade de carga de estacas - Semiempíricos ..	32
3.4.1	Método Aoki-Velloso	33
3.4.2	Método Décourt-Quaresma	34
3.5	ANSYS	34
3.6	Validação do Programa	35
4	METODOLOGIA	36
4.1	Modelagem Computacional	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Análise do Dimensionamento das Fundações	45

5.2	Análise Numérica Computacional.....	46
6	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIA	57
	ANEXO A – SONDAGEM SPT	63

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na agricultura nas últimas décadas no Brasil trouxe um aumento significativo na produção de grãos, principalmente soja e milho, tornando o país um dos maiores produtores do mundo. Apesar do crescimento no volume da produção de grãos, a construção de armazéns não acompanhou esta escalada acarretando em um déficit na armazenagem de grãos. Devido a esse déficit os produtores buscaram outras maneiras para suprir temporariamente suas necessidades, sendo através da utilização de bags ou arcando com os prejuízos e depositando os grãos diretamente no solo, o que acaba afetando a qualidade dos grãos devido a falta de um sistema de controle de umidade e temperatura. (AGÊNCIA BRASIL, 2021; CONAB, 2021; LAVOURA 2019)

Sabe-se que o agronegócio é o principal setor produtivo do país e conforme estudos realizados pela Cepea em parceria com a CNA, no ano de 2020 esse setor correspondeu a 26,6% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) prevê um possível crescimento para esse setor, devido ao histórico de crescimento da safra a cada ano que passa. Segundo estimativas acredita-se em um crescimento de 14,2% no setor para o ano de 2021, considerando esse crescimento a produção de grãos pode bater a marca de 288,61 milhões de toneladas de grãos. (CLIMATE, 2021; CNA, 2021; CONAB, 2021)

Apesar do grande peso do agronegócio no PIB do país, as pesquisas para melhorias nos sistemas de escoamento e armazenagem de grãos não ocorrem na mesma velocidade com que ocorrem os avanços na agropecuária. Aumentando ainda mais a diferença entre a capacidade produtiva e a capacidade armazenadora, deixando os avanços tecnológicos e melhorias em unidades já existentes de lado. (LEITE, 2013)

Com isso, muitos saem prejudicados com a falta de incentivo à pesquisa e construção de novas unidades de armazenamento. Os produtores, por exemplo, sofrem com a falta de infraestrutura e espaço de armazenamento. A população com a alta variabilidade dos preços decorrentes da necessidade da venda imediata, ficando à mercê dos mercados internacionais. E os engenheiros sofrem com a falta de atualização dos métodos de dimensionamento e execução de silos. (LEITE, 2013)

A armazenagem nos armazéns garante a preservação da qualidade dos grãos, e permite manter a safra guardada por até 3 anos. (CLIMATE, 2020; ECONOMIA UOL, 2021) Porém, devido a essa defasagem na capacidade de armazenamento os produtores são forçados a negociarem suas safras imediatamente, não podendo esperar por um melhor momento ou por melhores oportunidades.

Embora o Brasil seja referência mundial na pesquisa e produção de grãos, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) juntamente com o IBGE, apresentam dados preocupantes sobre a capacidade de armazenamento de grãos no país. A capacidade estática de armazenagem é em torno de 176,3 milhões de toneladas, que quando comparada com as estatísticas da safra apresentadas pelo IBGE mostra uma defasagem de quase 112 milhões de toneladas de grãos. (AGÊNCIA BRASIL, 2021; CONAB, 2021)

Tais dados reforçam a necessidade da construção de armazéns graneleiros que atendam a esta demanda. Conforme a Climate (2020), o Brasil dispõe de diferentes modelos de armazéns graneleiros, como os silos de concreto, silos metálicos, silos bolsa e os silos móveis, sendo que destes, os metálicos têm se destacado pelo custo-benefício em relação ao custo da obra por tonelada armazenada e o tempo de execução, que é um fator determinante para o produtor. (CLIMATE,2020)

Os silos metálicos podem variar conforme o tipo: elevados, de fundo plano e melita, e conforme a altura e diâmetro, podendo chegar até 34,3m de altura e 36,4m de diâmetro, o que resultam em uma carga de 22.310 toneladas. (KEPLER WEBER)

Para a engenharia civil a construção de silos é um grande desafio, visto que é necessário suportar altas variações nas cargas suportadas e altas variabilidade de volume em pequena área, o que demanda fundações robustas. Essas variações ocorrem devido a que em certas épocas do ano os silos sofrem grande variação em sua utilização, podendo estar vazios em uma semana e na semana seguinte já com sua capacidade máxima, gerando altas cargas nas fundações e solo. (SCALABRIN, 2008)

Considerando o cenário apresentado, é relevante ainda acrescentar que é normal que o solo trabalhe de acordo com as pressões nele exercidas e suas características físicas e mecânicas, o que exige cálculos exatos que considerem todas estas variáveis a fim de evitar custos elevados, desperdícios e riscos de acidentes. Para tanto, o uso de programas de simulação mecânica estrutural, como o ANSYS, se apresenta como uma alternativa que contribui para a tomada de decisão dos

engenheiros no que se refere ao processo de escolha e dimensionamento das fundações e bases de silos graneleiros metálicos de fundo plano.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Mapear o comportamento do solo devido as pressões exercidas pela interação fundação-base e a carga dos grãos em silos graneleiros metálicos de fundo plano com um sistema de fundações em radier estaqueado.

2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar os tipos de fundações mais usuais na construção de silos de fundo plano;
- Estudar o comportamento dos silos para diferentes configurações de sistemas de fundações, de forma a considerar o Sistema atuando como um só;
- Observar qual a relação da interação fundação-base com as pressões causadas no solo;
- Definir a melhor solução técnica a ser utilizada para a execução de fundações para silos metálicos de fundo plano.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As fundações de silos de armazenagem são de fundamental importância, uma vez que são submetidas a cargas cíclicas durante sua utilização, isto leva a necessidade de uma atenção especial a estas estruturas. Devido a ciclicidade e das altas cargas de carregamento, com o passar do tempo estas cargas podem não se comportar de maneira prevista em projeto, provocando pontos de sobrecarga desfavoráveis, conseqüentemente podem ocorrer recalques e em casos extremos a ruptura, tanto da fundação, como do solo. (CALIL, 2007)

Nestes casos extremos, a alteração no terreno ou fundação, altera a forma e a capacidade de distribuição dos esforços, comprometendo o silo, sua integridade estrutural e o bom funcionamento dos sistemas de exaustão, troca de calor, carregamento e descarregamento. Essas alterações acarretam em sérias conseqüências para produtores devido a perdas financeiras, o que conseqüentemente causa problema aos engenheiros devido a problemas jurídicos. (PATURCA, 2014)

Durante a execução do projeto é importante avaliar a região de construção dos silos pois em muitos casos a área de construção é localizada em regiões com baixas condições de suporte do solo, não sendo possível ser adotado fundações rasas, nesses casos se faz necessário a utilização de fundações profundas ou mistas, dessa forma garantindo que a região do solo atingida é capaz de suportar bem as cargas do silo. (BIANCHIN, 2013)

Um bom exemplo de fundações mistas que é muito utilizada em silos é a fundação do tipo radier estacado, na qual são utilizadas três diferentes formas para distribuição das tensões no solo, sendo elas pela base do radier, pela ponta das estacas e ao longo do fuste das estacas. (BIANCHIN, 2013)

3.1 Silos de Armazenagem

Silos de armazenagem são construções com finalidade de armazenar produtos à granel de qualquer natureza, sólido, pulverulento ou granular. Os silos podem ser projetados e construídos de diversas formas e modelos, dependendo da finalidade de utilização, e os processos necessários para a armazenagem do produto. No agronegócio, são muito utilizados principalmente para o armazenamento de grãos, como soja, milho, feijão, aveia, cevada, entre outros. (ALVES, 2001)

Segundo Freitas (2001) os silos são estruturas capazes de armazenar produtos pulverulentos e granulares, equipados com equipamentos de carga e descarga, por gravidade ou por meio mecânico.

Existem diferentes finalidades para os silos, como por exemplo armazenamento, secagem, troca de transporte, etc. Devido a gama de finalidades para utilização dos silos, também existem diferentes tipos de construção, sendo elas de acordo com as suas finalidades, dessa forma podem ser construídos em aço, madeira, concreto, e combinações entre materiais. (CALIL, 2007)

A Figura 1 representa um silo construído em madeira utilizado para armazenagem de grãos. Esse tipo de silo tem um baixo custo para sua construção, porém apresentam uma durabilidade inferior aos demais e alta influência de intempéries causadas por efeitos naturais. (CARNEIRO, 2013)

Figura 1 - Silo Madeira



Fonte: Silomax (2021)

A Figura 2 representam silos construídos em concreto utilizado para armazenagem de grãos. Esse tipo de silo normalmente é utilizado para o armazenamento de grandes quantidades e são formados por duas partes, a torre e o conjunto de células. Diferentemente do silo de madeira, esse tipo de silo tem altos custos de construção e de manutenção, entretanto, possuem uma menor influência de intempéries devido as suas paredes espessas e permitem um maior tempo de armazenamento e conservação dos grãos. (PATURCA, 2014)

Figura 2 - Silos Concreto

Fonte: Equipe ESSS (2018)

A Figura 3 representa silos metálico, os quais são construídos por chapas lisas ou corrugadas de ferro ou alumínio. Quando comparado com o silo de concreto sua capacidade armazenamento é inferior aos silos de concreto, entretanto seus custos de construção e manutenção são inferiores. (PATURCA, 2014)

Figura 3 - Silos Metálicos

Fonte: ARMCO STACO (2021)

Baseado no estudo de Calil, Nascimento e Araújo (1997) no Brasil os silos são predominantemente construídos de chapas metálicas galvanizadas para construção da superestrutura.

Para facilitar os aspectos logísticos de transporte e acesso aos grãos, normalmente são construídos muito próximos uns aos outros. (LEITE, 2013)

Esses silos ter capacidade de manter uma qualidade satisfatória para conservar os grãos, com um sistema independente que possibilite o controle da temperatura e umidade interna, de acordo a necessidade do produto ali armazenado. Dessa forma, garantindo a qualidade do grão e sua conservação por maior tempo. (MACHADO, 2018)

Devido a sua alta capacidade de armazenamento por metro quadrado, garantia de conservação da alta qualidade dos produtos por um período maior de tempo e redução da mão de obra, os silos são considerados uma solução de alta viabilidade econômica. (PALMA, 2005)

O armazenamento de grãos do cultivo agrícola tem como objetivo manter a integridade, qualidade biológica e física dos grãos por longos períodos de tempo. O armazenamento pode ser realizado por anos, desde que as práticas adotadas sejam corretas, desde a colheita, secagem, limpeza, combate a insetos, roedores e fungos, com um processo de aeração adequado, garantindo assim a menor deterioração possível. (SILVA,2013)

Os silos podem ser classificados de diferentes tipos, essa classificação leva está geralmente relacionada com a sua construção em relação com o solo, formato geométrico e tipo do fundo. (CALIL, 2007)

Com base na sua construção e relação com o solo, pode ser dividida em 3 categorias, silos elevados ou silos aéreos, silos subterrâneos e silos semi-subterrâneos. (CALIL, 2007)

Os silos elevados são construídos acima do nível do solo, em contrapartida os silos subterrâneos se localizam abaixo do nível do solo. Já os silos semi-subterrâneos têm construções intermediárias aos tipos anteriores. Embora o processo de construção de silos subterrâneos seja mais simples, normalmente eles apresentam diversos problemas com infiltração e descarregamento dos produtos. (CALIL,2007)

Baseado na sua geometria, sua classificação pode ser realizada em 2 categorias, silos esbeltos e silos baixos. Os silos esbeltos apresentam uma relação da altura com o diâmetro do silo é maior ou igual a 1,5, enquanto que, os silos baixos apresentam uma relação inferior a 1,5. (PALMA, 2005)

Por fim, os silos ainda podem ser classificados pelo tipo de seu fundo, sendo eles em formato de cone, tronco de cone ou fundo plano (BIANCHIN, 2013).

No Brasil, a maior parte dos silos são metálicos construídos com chapas metálicas corrugadas com geometria cilíndrica de fundo plano. Esses silos são montados sobre uma base de concreto armado (BIANCHIN, 2013).

3.1.1 Silos Metálicos de Fundo Plano

Os silos metálicos de fundo plano são considerados uma maneira atrativa para redução do déficit de armazenagem no Brasil, visto que é possível a sua implementação em fazendas e cooperativas agroindustriais. (LACOVIC, 2014).

Esse tipo de silo tem se destacado por serem muito eficazes, com custo relativamente baixo quando comparado aos silos e armazéns inteiramente construídos de concreto e possuem uma montagem facilitada, devido ao peso aliviado das chapas de aço corrugadas e cobertura cônica. (ANDRADE, 2007)

As chapas de aço corrugadas trazem uma rigidez ao silo, evitando deformações durante as etapas de montagem, utilização e na manutenção. Esses projetos permitem a utilização de chapas mais finas para a concepção. (ROCHA, 2018)

Segundo Sérvulo (2012), esses silos que são a melhor opção de custo-benefício para armazenagens de longos períodos, devido ao baixo custo por tonelada armazenada. Além disso, quando necessário e dimensionados para este fim, esses silos permitem ampliações, através da adição de mais anéis na estrutura vertical, conseqüentemente, aumentando a capacidade.

Uma das principais características desses projetos é a leveza da estrutura metálica, permitindo um melhor aproveitamento para o armazenamento. Entretanto, essa leveza torna a estrutura, quando vazia, suscetível a problemas de estabilidade. Para evitar estes problemas de estabilidade, a construção do corpo do silo se dá com a fixação por montantes, na qual as chapas de aço são presas a eles por meio de parafusos, e este é preso a fundação. (BIANCHIN, 2013)

Fortes (1985) afirmou que os silos são uma estrutura não corriqueira, em que grande parte da carga é aplicada após a conclusão da obra, em um curto período de tempo, podendo acarretar na ruptura do solo. Fortes (1985) ainda divide os projetos de silos em dois grupos, a superestrutura e a infraestrutura. A superestrutura trata-se das partes metálica, paredes, telhado, equipamentos de transporte, secagem, ou seja, toda a estrutura superior do silo. Enquanto que a infraestrutura é dividida em base e fundação. A figura 4 ilustra os 2 grupos citados por Fortes (1985).

Figura 4 – Infraestrutura e Superestrutura – Silos



Fonte: MASTER EM SILOS – HOTMART (2020)

A base é a área que serve de apoio para a superestrutura e para os produtos armazenados, ela é composta pelo anel de coroamento e pela laje, esses dois elementos são responsáveis por suportar as pressões do armazenamento. A Figura 5 mostra exemplos da base de construção de um silo. (FORTES, 1985)

Figura 5 – Base Silo



Fonte: Autoria própria (2017)

A fundação garante a rigidez de todo o conjunto, geralmente composta por estacas. A etapa de construção da fundação é de fundamental importância para o bom andamento da construção do silo, pois ela é responsável por evitar a ocorrência de recalques e deformações. A Figura 6 mostra exemplos da fundação de um projeto de construção de um silo. (FORTES, 1985)

Figura 6 – Fundação Silo



Fonte: Autoria própria (2017)

3.2 Fundações

A fundação é a base de todas as estruturas da engenharia civil, inclusive dos silos de armazenagem, sendo considerada um item necessário para a segurança das estruturas. As técnicas empregadas nas fundações evoluem constantemente, sempre buscando aprimoramento para atender melhor as novas necessidades, buscando minimizar as estruturas com pouco recalque e sob controle, mesmo em solos com baixa capacidade de suporte. (BIANCHIN, 2013)

Segundo Caputo (1977), a fundação é a parte da estrutura que transmite as cargas da superestrutura para o solo. O estudo da fundação se dá em duas etapas, o cálculo das cargas na fundação e o cálculo da fundação no solo, que é o estudo do terreno, da capacidade suporte.

Para o bom dimensionamento deve-se sempre transmitir as cargas da estrutura as camadas de terreno que tem capacidade suporte suficiente para que o terreno resista as cargas sem que ocorra a sua ruptura. Quando os recalques forem esperados deve-se leva em consideração que ocorra em toda a estrutura de forma igual, de modo que não cause excentricidades na estrutura, não permitindo a ocorrência de danos as estruturas vizinhas e respeitando o aspecto econômico. (CAPUTO, 1977)

Durante a etapa de cálculo das fundações é necessário analisar diversas combinações de cargas, uma vez que, é comum os silos estarem carregados em diferentes níveis, de acordo com a época do ano e sua necessidade. Pelo fato dos silos normalmente serem construídos próximos um aos outros, é possível o aparecimento de recalques devido aos sucessivos carregamentos e

descarregamentos, os quais podem provocar o acúmulo de deformações e alterar as tensões aplicadas no solo. (FORTES, 1985)

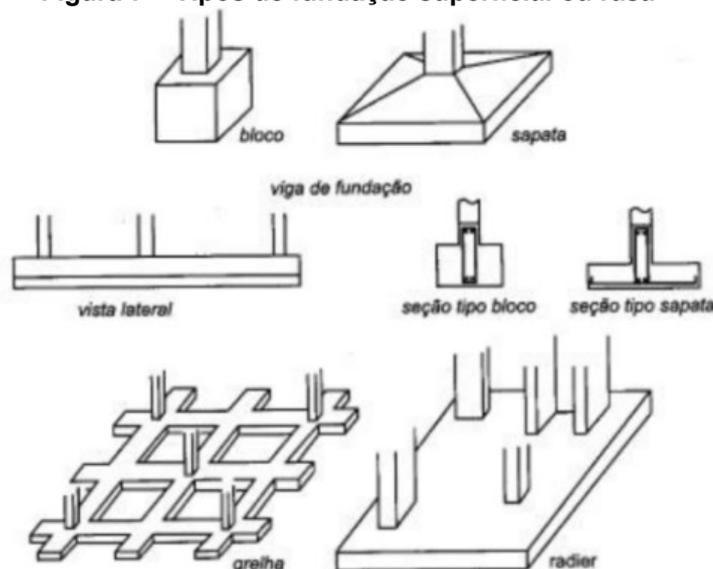
As patologias apresentadas em silos são em sua maioria apresentadas pelo mal dimensionamento das fundações, sendo as mais comuns os recalques na laje, recalques no anel de coroamento, trincas nos anéis e lajes, infiltrações. Todos esses exemplos de patologias citados são situações graves que podem interromper a utilização dos silos e até mesmo levar a sua ruptura. (CONCIANI, 2016).

3.2.1 Tipos e Sistemas de Fundações

Para a construção de silos é de fundamental importância a escolha do tipo correto de fundação. Para a elaboração de projetos e execuções das fundações é fundamentada pela norma NBR 6122 (ABNT, 2010), a qual classifica as fundações em dois tipos:

- Fundação superficial ou rasa: quando a carga é transmitida ao terreno diretamente sob a base da fundação. Nessa classificação a relação entre a profundidade e a dimensão da fundação deve ser respeitada, sendo que nesse caso a profundidade deve ser inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. A Figura 7 ilustra alguns exemplos de fundações superficiais. (ABNT, 2010)

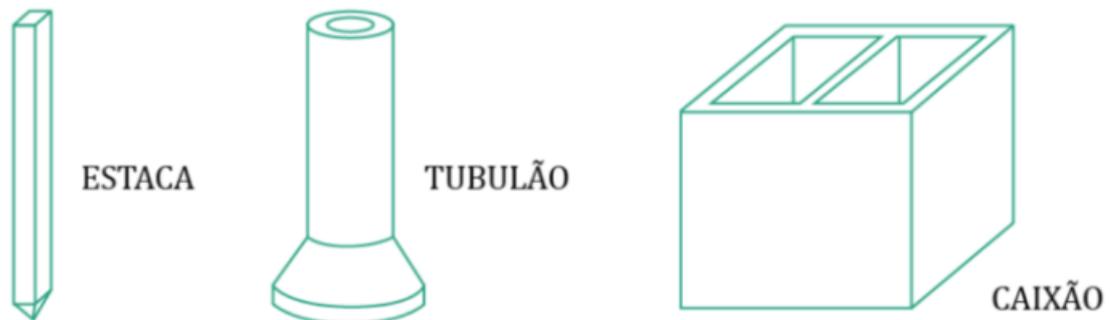
Figura 7 – Tipos de fundação superficial ou rasa



Fonte: OBRA EXPERTISE (2019)

- Fundação profunda: quando a carga é transmitida ao terreno pela resistência de ponta ou por meio da resistência lateral ou ainda por uma combinação das duas. Nessa classificação a profundidade deve ser de no mínimo 3 metros. A Figura 8 ilustra alguns exemplos de fundações profundas. (ABNT, 2010)

Figura 8 – Tipos de fundação profunda



Fonte: OBRA EXPERTISE (2019)

Além dos tipos de fundação em silos a escolha do sistema de fundação mais adequado é de fundamental importância, essa escolha deve ser realizada pelo projetista, e deve levar em consideração a segurança de sua estrutura. Normalmente o sistema de fundação mais utilizado é composto por estacas, as quais possuem atuam dando capacidade suporte ao anel de coroamento, e pela laje de suporte. (CASTILHO, 2013)

Para Castilho (2013), são cinco os principais sistemas de fundações utilizados atualmente, sendo eles:

- Estacas isoladas: são elementos cravados ou concretados no solo, os quais transmitindo os esforços para o solo por resistência lateral e de ponta. (CASTILHO, 2013)
- Radier isolado: são placas de concreto que transmitem os esforços de forma direta para o solo. Esse tipo de sistema é empregado quando há alta capacidade de suporte do solo. (CASTILHO, 2013)
- Grupo de estacas: são conjuntos de estacas unidas por um bloco de coroamento, tem como função principal ajudar na divisão das tensões igualmente entre as estacas. (CASTILHO, 2013)

- Radier estaqueado: é a associação das estacas com o radier. Em um projeto realiza a distribuição das cargas de 3 modos, sendo pela resistência de ponta, resistência lateral da estaca e pela resistência da base do radier. (CASTILHO, 2013)
- Radier estaqueado melhorado: da mesma maneira que o radier estaqueado, é a associação das estacas com radier, entretanto há a presença de uma camada de solo melhorado, funcionando como reforço de solo logo abaixo do radier. (CASTILHO, 2013)

3.2.2 Radier Estaqueado

É um sistema misto de fundações, composto por elementos de fundações profundas, as estacas, associadas por um elemento de fundações superficiais, o radier. Assim apresenta comportamento diferente do característico de radier e estacas isoladas, visto que ocorre a interação entre seus elementos, apresentando um desempenho diferente do conhecido. (PUC-RIO)

O radier estaqueado pode ser definido como um sistema de fundação onde estacas e radier interagem com o solo e entre si para suportar as cargas da superestrutura. (JANDA *et al.*, 2009)

Para Soares (2011) o radier estaqueado obtêm vantagem da possibilidade de no dimensionamento, pois o radier pode ser considerado para aumentar o suporte da fundação ou então reduzir a quantidade de estacas.

A inclusão das estacas sobre o radier aumenta a estabilidade e rigidez global, e reduz o recalque diferencial do conjunto, isso acontece devido ao fato da capacidade de distribuição das tensões ser aumentada. (MANDOLINI, 2017)

Cada vez mais utilização vem ganhando espaço nas construções, pois a adição das estacas no radier promove o aumento significativo da capacidade de carga das fundações e dá a possibilidade de controle dos recalques. (CORDEIRO, 2017).

Para compreender o potencial de uso do radier estaqueado é necessário determinar a distribuição das cargas entre estacas e o radier. O método de instalação das estacas afeta muito o comportamento do sistema de fundação, visto que as interações entre os elementos são diferentes para cada combinação. (MACHADO, 2018)

3.2.3 Fatores de Influência em Radier Estaqueado

O comportamento das fundações em radier estaqueado são influenciados por diversos fatores, onde cada um deles tem um efeito no comportamento. Podendo alterar a capacidade de carga, distribuição de carga, tanto entre estacas e o radier, quanto da fundação para o solo, e na rigidez da fundação. (Balakumar, 2008)

3.2.3.1 Espaçamento entre as Estacas

Conforme a distância entre as estacas aumenta, a influência das estacas diminui e a do radier aumenta na capacidade resistente da fundação e na transferência dos esforços. Limitando-se a espaçamentos de 6 vezes o diâmetro da estaca, a partir deste ponto a influência do radier começa a ficar constante. (Balakumar, 2008)

3.2.3.2 Comprimento da Estaca

Observa-se um aumento da capacidade resistente das estacas conforme se aumenta o comprimento das mesmas, e também uma redução linear nos recalques da fundação. Quanto maior o comprimento das estacas menor o recebimento de cargas no radier e a sua influência na dissipação das cargas. (Balakumar e Ilamparuthi, 2008)

Embora o aumento do comprimento resulte em reduções nos recalques e na transferência de cargas para o radier, há um limite para este comportamento, comprimentos além do limite mostram reduções insignificantes na diminuição dos recalques e transferência de esforços. (Wulandari e Tjandra, 2015)

Conforme Balakumar e Ilamparuthi (2008) as estacas tem uma maior ação, no suporte dos carregamentos, em pequenos recalques e conforme estes aumentam, a capacidade do radier aumenta e das estacas diminui. Quanto maior o comprimento das estacas, maior deverá ser a carga aplicada ao radier para que este tenha participação relevante no recebimento e dissipação dos esforços aplicados a fundação.

3.2.3.3 Diâmetro das estacas

O aumento do diâmetro das estacas tem uma influência proporcional na capacidade de carga da fundação, quanto maior o diâmetro, maior a capacidade. Mas, para estacas de pequeno diâmetro, a fundação se comporta de maneira similar a um radier. (Balakumar, 2008)

3.2.3.4 Número de Estacas

Quanto maior o número de estacas do sistema, maior a capacidade de carga e há uma redução dos recalques. Embora exista um limite no incremento do número de estacas que resulte em uma diminuição significativa dos recalques, onde a partir deste ponto começa a ser um desperdício de material e mão de obra. Este aumento no número de estacas tem maior influência quando as estacas são mais profundas. (Bourgeois, 2013)

O aumento do número de estacas do sistema reduz os esforços aplicados ao radier, uma vez que as estacas estarão recebendo a maior parcela dos esforços aplicados ao sistema. Entretanto, isto gera uma descaracterização do radier estaqueado, uma vez que a interação entre o radier e o solo fica menor. (Bourgeois, 2013)

3.2.3.5 Espessura do Radier

A espessura do radier tem pouca influência no comportamento do sistema, contudo são necessários mais estudos que verifiquem o comportamento do radier estaqueado devido a influência da espessura. (Balakumar, 2008)

Radiers rígidos deformam menos que radiers flexíveis, a maior deformação de leva conseqüentemente a um aumento na transmissão dos esforços para o radier, levando a um aumento da interação entre solo-radier, aumentando também a influência no recebimento e dissipação de esforços aplicados ao sistema de fundação. (Alnuiam, 2013)

A espessura do radier tem uma maior influência na rigidez da estrutura, melhorando o desempenho geral do sistema. (Sinha e Hanna, 2017)

3.2.3.6 Comprimento do radier

Conforme se aumenta o comprimento ou área do radier, há um aumento na carga transferida pelo radier e uma diminuição na carga transferida pelas estacas. (Alnuiam, 2013)

3.2.3.7 Densidade do solo

O aumento da densidade ou nível de compactação do solo, melhoram a capacidade de carga e aumenta a transferência de cargas pelo radier, aumentando a interação entre solo-radier. (Alshenawy, 2016)

3.2.4 Mecanismos de Interação dos Elementos do Radier Estaqueado

A análise do sistema de fundações em radier estaqueado não é simples e direto, visto se tratar de um problema tridimensional, com uma natureza complexa devido a combinação de vários elementos. É necessário leva em consideração a transferência de cargas, as reações do solo, as interações entre os elementos, solo, estacas e radier, o que dificultam ainda mais a análise, uma vez todas exercem influências diretas entre si. (SALES, 2000)

Segundo Perez (2017) as principais interações que podem ocorrer em um radier estaqueado são as interação estaca-estaca, interação estaca-radier, interação radier-estaca e interação radier-radier.

O fator de interação é estimado supondo o efeito do carregamento de um elemento sobre outro não carregado, e é dado pela relação dos recalques causados em um elemento não carregado com os recalques no elemento carregado. Todos os quatro fatores de interação são obtidos desta forma. (PEREZ, 2017)

É possível destacar as principais variáveis que podem influenciar os fatores de interação, como por exemplo, resistência de ponta e atrito lateral das estacas, homogeneidade do solo, rigidez estaca-solo. (CORDEIRO, 2017)

O projeto de um radier estaqueado segue as mesmas orientações que qualquer projeto de fundações. Alguns pontos que devem ser levados em consideração foram elencados por Poulos (1980). Como capacidade de carga,

recalques máximos, momentos e cortantes aplicados aos elementos da fundação, no caso estacas e radier.

Poulos (2001) ainda sugere um processo de três estágios para o projeto de radier estaqueado, iniciando por um estágio preliminar que avalia a possibilidade da utilização do radier estaqueado e faz uma estimativa da quantidade de estacas necessárias ao projeto. Um estágio intermediário que avalia as características e exigências gerais das estacas, assim como sua localização. E por fim, o estágio final detalhado, com o número ótimo de estacas, localização precisa, configuração, assim como o cálculo da distribuição de recalques, momentos, cortantes no radier e nas estacas.

Para o estágio final é necessário o uso de um programa de computador que leve em consideração a interação entre solo-radier-estaca, e o efeito da superestrutura e variabilidade das cargas. Os métodos numéricos utilizados são métodos dos elementos de contorno (M.E.C.), método dos elementos finitos (M.E.F.) e métodos híbridos. (POULOS, 2001)

3.3 Método de Análise de Radier Estaqueado

Como o radier estaqueado vem se destacando por ser uma alternativa viável e bastante econômica em relação aos outros sistemas de fundações, diversos métodos foram propostos para a análise do sistema, apresentados a seguir. (FREITAS,2018)

3.3.1 Método Simplificado de Poulos, Davis e Randolph

Inicialmente considerava-se para o cálculo da resistência de carga de um radier estaqueado, apenas a soma das resistências, do radier e das estacas, separadamente, sem considerar as interações entre estes elementos, método proposto por Poulos e Davis (1980).

Randolph (1994) propôs considerar esta interação entre radier-estaca, utilizando um coeficiente “ K_{pr} ”, a partir disto podemos considerar o radier estaqueado como um sistema único. O método considera que primeiramente as estacas são carregadas ao seu máximo, após este ponto de carga máxima das estacas que o radier entra em ação para ajudar na capacidade de carga da fundação.

3.3.2 Método dos Elementos de Contorno (M.E.C)

Na análise de sistemas de fundações em estacas, a grande maioria das soluções é com a utilização deste método, que admite a isotropia e homogeneidade do solo, representando-o como um meio linearmente elástico. (BANERJEE E BURRERFIELD, 1977)

Foram realizados alguns estudos em radier estaqueado rígido utilizando o método, que mostrou um aumento na rigidez na ordem de até 15% do sistema. (BANERJEE E BURRERFIELD, 1977)

A análise de radier estaqueado na qual todas as interações entre radier e as estacas foi apresentada por Mendonça e de Paiva. Nessa análise o radier é considerado uma placa descrita por integrais e o solo é considerado isotrópico com comportamento elástico linear. O sistema é modelado dividindo as faces entre elementos da fundação e solo em elementos triangulares, com três pontos nodais de força, de modo que é possível obter um sistema de equações lineares envolvendo as forças e deslocamentos em todos os pontos da interface solo-fundação. Com a resolução deste sistema é possível obter os recalques e a rigidez global da fundação. (PUC-RIO)

3.3.3 Método dos Elementos Finitos (M.E.F.)

Método amplamente utilizado no cálculo e análise de sistemas de fundações com radier estaqueado. São utilizados elementos tridimensionais na modelagem para determinação do recalque em função da rigidez das estacas. O comportamento nas interfaces entre diferentes materiais da fundação, solo, radier, estaca, são simulados através de elementos de junta, que leva em conta a ocorrência de movimentos relativos associados aos modos de deformação. (PUC-RIO)

Segundo Santos (1987), para o modelo semi espaço o solo deve ser considerado um meio contínuo, no qual a deformação do terreno ocorre em mais regiões, não se concentrando apenas na região carregada. Nessa condição considera-se a teoria da elasticidade, a qual permite que seja solucionados situações mais complexas por meio de formulações matemáticas. (PUC-RIO)

Smith e Wang (1998) utilizaram o proposto método, com uma modelagem tridimensional, para resolver com eficiência o sistema de equações resultantes, com mais de um milhão de graus de liberdade. (PUC-RIO)

Com os estudos mais recentes é possível identificar a tendência de otimizar a quantidade de estacas presentes no radier, a redução dos recalques, consequentemente melhorando a eficiência do sistema. (PUC-RIO)

Hoje existem alguns programas voltados para a modelagem e resolução de problemas utilizando MEF, por exemplo, o software utilizado neste presente trabalho, o ANSYS.

3.3.4 Métodos Híbridos

Como algumas dificuldades são encontradas ao considerar apenas a utilização de um método, alguns autores propuseram modelos híbridos de análise, combinando a boa utilização de MEF para a análise de radier e a boa análise de MEC para análise do conjunto estaca-solo. (PUC-RIO)

O método apresentado por Russo e Viggiani (1998) consiste em transformar o radier em um sistema de elementos de placas finitos, e as estacas e solo são representadas por meio de molas, podendo ser lineares e não lineares. Os deslocamentos das estacas e do radier são analisados através das superposições dos fatores de interação em um espaço homogêneo calculado pela solução de Boussineq, enquanto que os perfis de solo estratificado são resolvidos pela aproximação de Steinbrenner.

Os autores observam que a combinação dos métodos é satisfatória, podendo ser utilizadas desde que se conheçam a espessura relativa e a rigidez das camadas de solo, pois as distribuições de cargas são afetadas principalmente por estas características. (RUSSO E VIGGIANI, 1998)

3.4 Método de análise da capacidade de carga de estacas - Semiempíricos

A capacidade de carga das estacas é dividida em duas partes. Através do atrito entre o fuste da estaca e o solo a sua volta, conhecido como atrito lateral, e pela resistência de ponta da estaca em contato com o solo a baixo dela. Variações da capacidade de carga entre resistência de ponta e resistência lateral depende do tipo

de solo que se está trabalhando. Para de solos arenosos o atrito lateral pode chegar a zero, enquanto que para solos argilosos quase a totalidade da sua capacidade é dada pelo atrito lateral. (CINTRA, 2010)

Os métodos semiempíricos mais aceitos e utilizados, tanto no Brasil e até fora do país, são os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, onde existem correlações experimentais a partir de resultados reais de provas de carga em solos e estacas. (CINTRA, 2010)

3.4.1 Método Aoki-Velloso

Como é sabido a capacidade de carga de estacas (Q_u) é dividida entre resistência de ponta (Q_p) e resistência lateral (Q_a). A capacidade de carga total da estaca é dada pela Equação 1: (CINTRA, 2010)

$$Q_u = Q_p + Q_a$$

Para cálculo da resistência da ponta (Q_p), é necessário o cálculo da relação entre o coeficiente em função do tipo de solo (K), valores resultantes do ensaio SPT (N), área da ponta da estaca (A_p) e fator de correção em função do tipo da estaca (F_1). Essa relação está descrita na Equação 2: (CINTRA, 2010)

$$Q_p = \frac{K \cdot N}{F_1} \cdot A_p$$

Para obtenção do valor da resistência lateral (Q_a), é necessária a realização do cálculo da relação ao somatório do coeficiente em relação ao tipo de solo (α), o coeficiente em função do tipo de solo (K), valores resultantes do ensaio SPT (N), área da ponta da estaca (A_l) e fator de correção em função do tipo da estaca (F_2). Essa relação está descrita na Equação 3. (CINTRA, 2010)

$$Q_a = \sum \alpha \cdot \frac{K \cdot N}{F_2} \cdot A_l$$

Os valores de N , são os valores obtidos no ensaio SPT, e estão relacionados ao número de golpes nos últimos 30cm para cada metro, e leva em consideração o Q_a como o valor médio das camadas de solo e Q_p como o valor da camada de apoio

das estacas. Os elementos K , F_1 , F_2 e α tratam-se de elementos com valores tabelados. (CINTRA, 2010)

3.4.2 Método Décourt-Quaresma

Para este método se mantém as características do método Aoki-Velloso, sendo que a capacidade de carga das estacas (Q_u) é dada pela soma da resistência de ponta e resistência lateral, conforme Equação 4. (CINTRA, 2010)

$$Q_u = \alpha \cdot q_p \cdot A_p + \beta \cdot q_s \cdot A_s$$

Para cálculo da resistência da ponta (q_p), é necessário o cálculo da relação entre o coeficiente em função do tipo de solo (K), valores resultantes do ensaio SPT (N). Essa relação está descrita na Equação 5. (CINTRA, 2010)

$$q_p = K \cdot N$$

Para cálculo da resistência lateral (q_s), é necessário o cálculo de multiplicação e divisão relacionado aos valores resultantes do ensaio SPT (N). Essa relação está descrita na Equação 6: (CINTRA, 2010)

$$q_s = 10 \cdot \left(\frac{N}{3} + 1 \right)$$

De modo similar ao método de Aoki-Velloso, os valores de N , são os valores obtidos no ensaio SPT, e estão relacionados ao número de golpes nos últimos 30cm para cada metro, e leva em consideração o q_s como o valor médio das camadas de solo e q_p como o valor da camada de apoio das estacas. Os elementos K , α e β tratam-se de elementos com valores tabelados. (CINTRA, 2010)

3.5 ANSYS

É um software de simulação, que dá a capacidade de analisar e verificar como os produtos ou ideias irão se comportar na realidade, qual será seu comportamento e se atende aos requisitos necessários para produção. É capaz de acelerar processos, diminuir custos, melhorar a qualidade e reduzir riscos. (ANSYS, 2022)

“É como se fosse possível prever o futuro, possibilitando aos engenheiros inovar como nunca” (ANSYS inc., site, tradução nossa) (ANSYS, 2022)

Consegue entregar soluções para a realização de análises estruturais, facilitando a resolução de problemas complexos da engenharia, trazendo rapidez e eficiência ao trabalho. Todo o conjunto de ferramentas do programa permite a análise de elementos finitos, customizar e automatizar soluções para desafios de mecânica estrutural, incorporando simulações de queda, vibração, impacto, esmagamento, carregamento simples e cíclico, entre outras funcionalidades. Além de ser possível analisar diversas modelagens diferentes, para otimizar o produto. (ANSYS, 2022)

Muito utilizado também para simular estruturas, eletrônicos ou peças mecânicas, analisando a resistência, elasticidade, distribuição de temperatura, efeitos de eletromagnetismo e fluxo de fluídos. Permitindo analisar o produto com diferentes especificações, sem a necessidade de modelos de teste físicos. Como exemplo é possível simular como a fundação de um edifício se comportará com o passar dos anos e com as variações de cargas na estrutura. (ANSYS, 2010)

3.6 Validação do Programa

Para garantir a veracidade das informações geradas pelo software ANSYS, foi realizada uma verificação comparativa com os cálculos teóricos, que já são muito conhecidos e utilizados, além de ter sua eficácia comprovada por estudos experimentais.

4 METODOLOGIA

Para a análise das interações entre solo-estrutura no presente projeto será utilizado laudo de sondagem SPT (Anexo A). Para a realização dos cálculos de recalques e deformações será utilizado o software ANSYS, o qual utiliza do método de elementos finitos para realizar os cálculos.

Será feito também uma verificação das capacidades de carga das estacas, utilizando os parâmetros do laudo de sondagem SPT, e os métodos semiempíricos de aoki-veloso.

Um estudo da capacidade de carga da base do silo, funcionando como um radier estaqueado será feito utilizando o método de Terzaghi (1942) com as alterações propostas por Couto (2001).

Com os valores teóricos da capacidade de carga das estacas e do radier, será realizado a análise sobre a capacidade de carga total do radier estaqueado, funcionando como um só.

Na análise de radier estaqueado não será considerada a interação entre os elementos da fundação, sendo estimada a capacidade de carga pela soma das estacas e do radier isoladamente.

Para a análise dos recalques, será feita uma modelagem numérica no software para computador ANSYS, onde serão inseridos os parâmetros de propriedades mecânicas do concreto, do solo, a partir do laudo SPT, as cargas atuantes e as dimensões das fundações e estruturas.

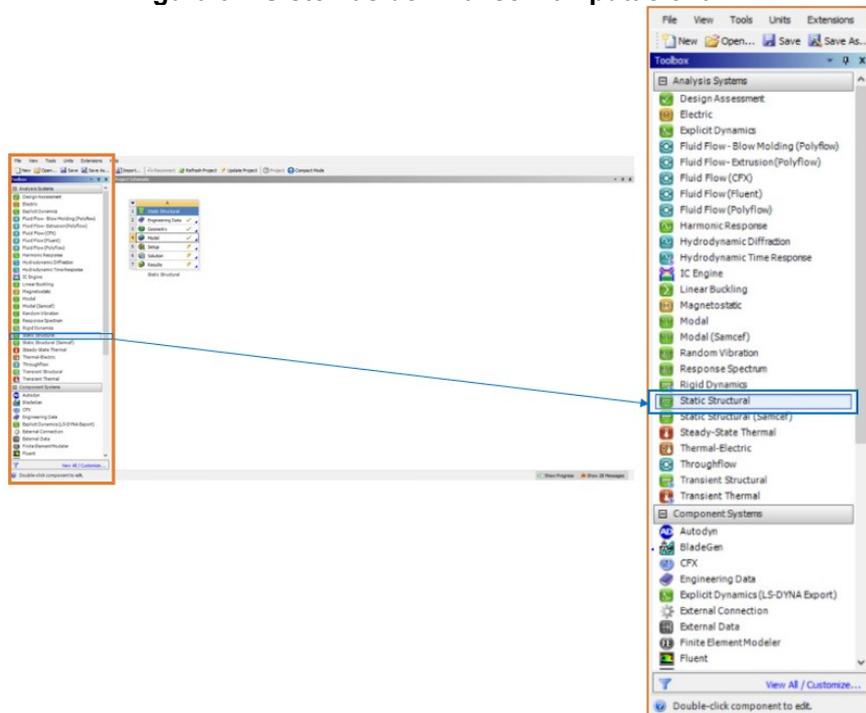
Serão elaboradas algumas propostas de modelos de raders estaqueado circular, onde serão analisadas as diferenças dos recalques e tensões geradas no sistema de fundação, com a finalidade de entender qual o comportamento e a parcela correspondente a capacidade de carga de cada elemento.

Com a análise final sendo a verificação se a disposição das estacas é ótima e melhor para a economia e segurança.

4.1 Modelagem Computacional

Para obtenção das deformações do solo e da estrutura do silo, foi utilizado o software de análise numérica por meio do método dos elementos finitos, ANSYS. A modelagem do silo, seguindo o projeto estrutural existente (anexo B), foi realizada dentro do “workbanch” do programa, onde há várias opções para análise (Figura 9), para o caso estudado utilizamos a opção estática estrutural (“static estrutural”), onde é feita a análise de estruturas estáticas, como é o caso das estruturas de concreto armado.

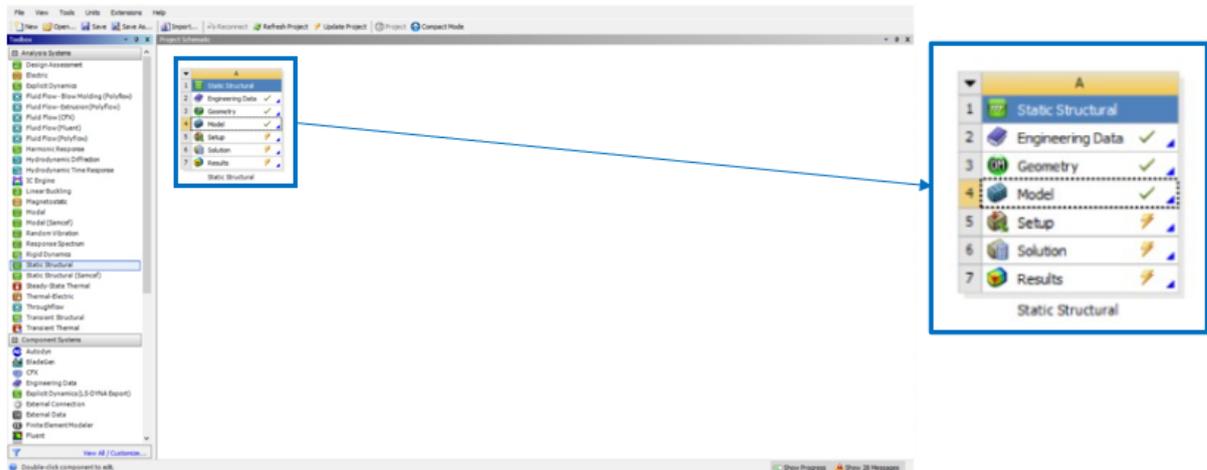
Figura 9 – Sistemas de Análise Computacional



Fonte: Autoria Própria (2021)

Após aberto temos três diferentes etapas (Figura 10) para a modelagem da estrutura.

Figura 10 – Sistema de Análise – Estática Estrutural



Fonte: Autoria Própria (2021)

Primeiramente foram inseridos os dados dos materiais, no balão “engineering data”, que são empregados na estrutura e por consequência na modelagem, que são: concreto armado e o solo (argila). Estes materiais foram encontrados a partir da sondagem SPT (anexo A), considerando o N_{spt} médio, igual a 12, para o solo como apenas um maciço. As propriedades do solo sendo elas seu peso específico para solos argilosos (γ), pesos específicos para solos arenosos (γ), módulo de elasticidade (ϵ) e coeficiente de Poisson (ν) foram retiradas da Tabelas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. (CINTRA, 2010; SOUSA, 2019)

Tabela 1 – Peso específico solos argilosos (γ)

Peso específico de solos argilosos		
N_{SPT}	Consistência	γ (kN/m ³)
≤ 2	Muito Mole	13
3 – 5	Mole	15
6 – 10	Média	17
11 – 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Adaptado de Cintra (2010)

Tabela 2 – Peso específico solos arenosos (γ)

Peso específico de solos arenosos				
N_{SPT}	Compacidade	γ (kN/m ³)		
		Areia seca	Areia úmida	Areia saturada
< 5	Fofa			
5 – 8	Pouco compacta	16	18	19
9 – 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 – 40	Compacta	18	20	21
≥ 40	Muito compacta			

Fonte: Adaptado de Cintra (2010)

Tabela 3 – Módulo de Elasticidade (ϵ)

Tipo de solo	Valores típicos (kgf/cm ²)
Areia normalmente adensada	$E = 5 \cdot (\text{NSPT} + 5)$
Areia sobreadensada	$E = 180 + (7,50 \cdot \text{NSPT})$
Argila muito mole ($\text{NSPT} \leq 2$)	10
Argila mole ($3 \leq \text{NSPT} \leq 5$)	20
Argila média ($6 \leq \text{NSPT} \leq 10$)	50
Argila rija ($11 \leq \text{NSPT} \leq 19$)	80
Argila dura ($\text{NSPT} > 19$)	150
Areia fofa ($\text{NSPT} \leq 4$)	50
Areia pouco compacta ($5 \leq \text{NSPT} \leq 8$)	200
Areia medianamente compacta ($9 \leq \text{NSPT} \leq 18$)	500
Areia compacta ($19 \leq \text{NSPT} \leq 40$)	700
Areia muito compacta ($\text{NSPT} > 40$)	900

Fonte: Sousa (2019)

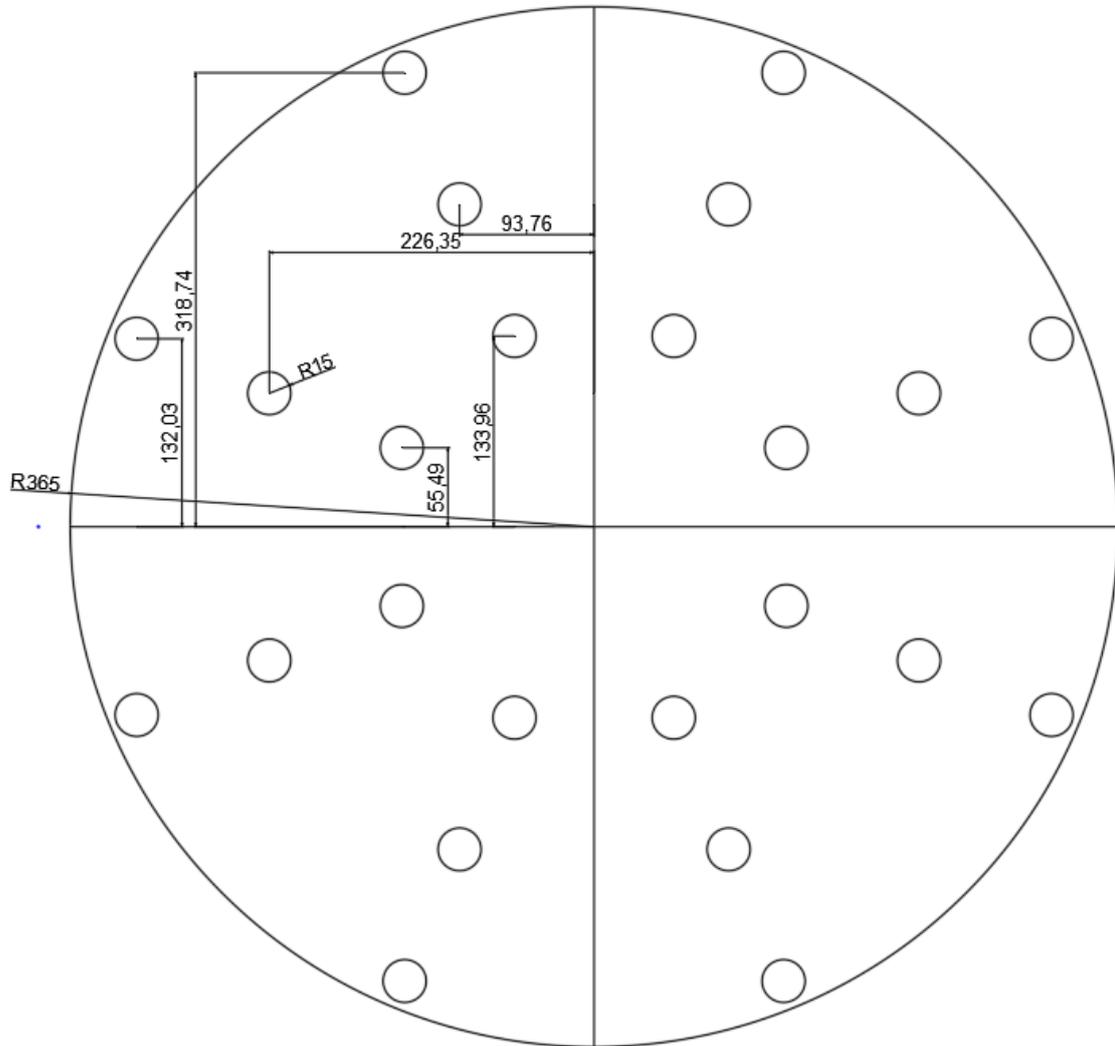
Tabela 4 – Coeficiente de Poisson (ν)

Tipo de solo	Poisson
Areia fofa ($\text{NSPT} \leq 4$)	0,30
Areia pouco compacta ($5 \leq \text{NSPT} \leq 8$)	0,29
Areia medianamente compacta ($9 \leq \text{NSPT} \leq 18$)	0,28
Areia compacta ($19 \leq \text{NSPT} \leq 40$)	0,27
Areia muito compacta ($\text{NSPT} > 40$)	0,26
Argila muito mole ($\text{NSPT} \leq 2$)	0,24
Argila mole ($3 \leq \text{NSPT} \leq 5$)	0,23
Argila média ($6 \leq \text{NSPT} \leq 10$)	0,22
Argila rija ($11 \leq \text{NSPT} \leq 19$)	0,21
Argila dura ($\text{NSPT} > 19$)	0,21

Fonte: Sousa (2019)

O peso específico aparente (γ) do concreto armado utilizado foi de 25 kN/m³, conforme informações da norma NBR 6120:2019.

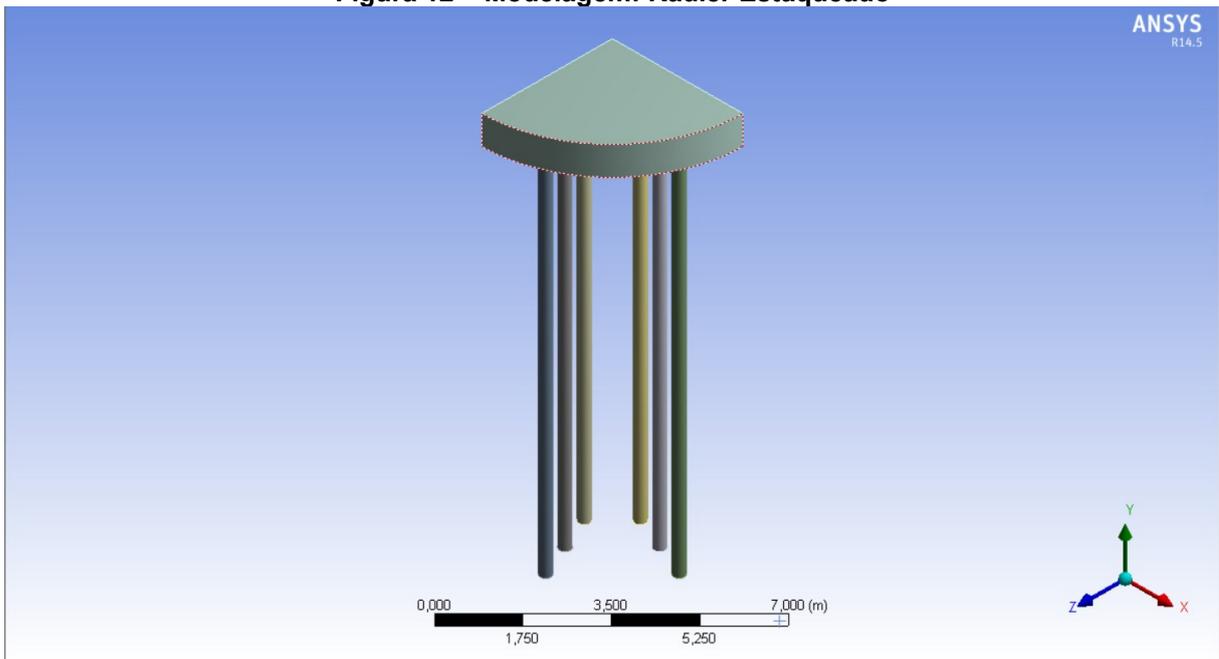
Na sequência realizou-se a modelagem propriamente dita, onde foram inseridas as geometrias das estruturas, com as medidas conforme Figura 11, adotada uma espessura de radier de 83cm, alinhada com as espessuras encontradas em projetos. Para o comprimento das estacas foi adotado uma profundidade de 10m. Durante a modelagem dos modelos, foi utilizada a ferramenta “symmetry” assim o modelo estrutural fica com apenas 1 quarto do tamanho original, permitindo o aumento da precisão dos cálculos, uma vez que o ANSYS versão para estudante tem uma limitação no número de elementos para cálculo, com o máximo em 128 mil elementos.

Figura 11 - Dimensões do Radier e Estacas para os Modelos a Serem Analisados

Fonte: Autoria Própria (2022)

Primeiramente foi modelado o radier estaqueado modelo 01, como pode ser observado na Figura 12, onde temos o radier estaqueado apoiado no solo.

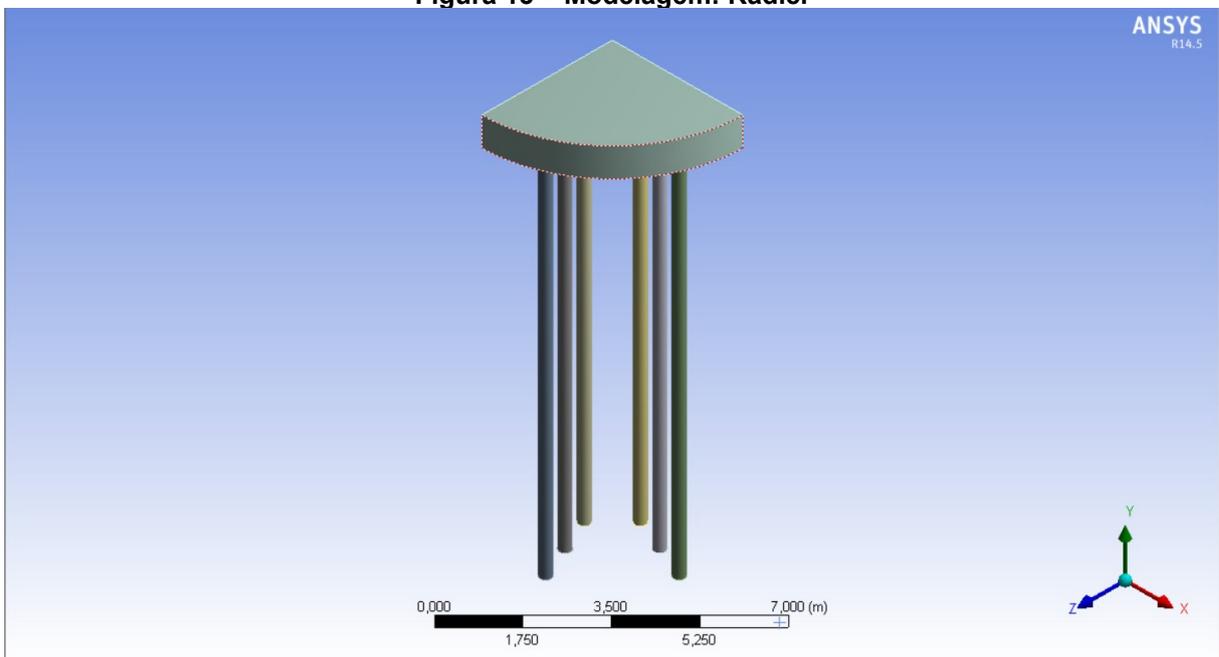
Figura 12 – Modelagem: Radier Estaqueado



Fonte: Autoria Própria (2022)

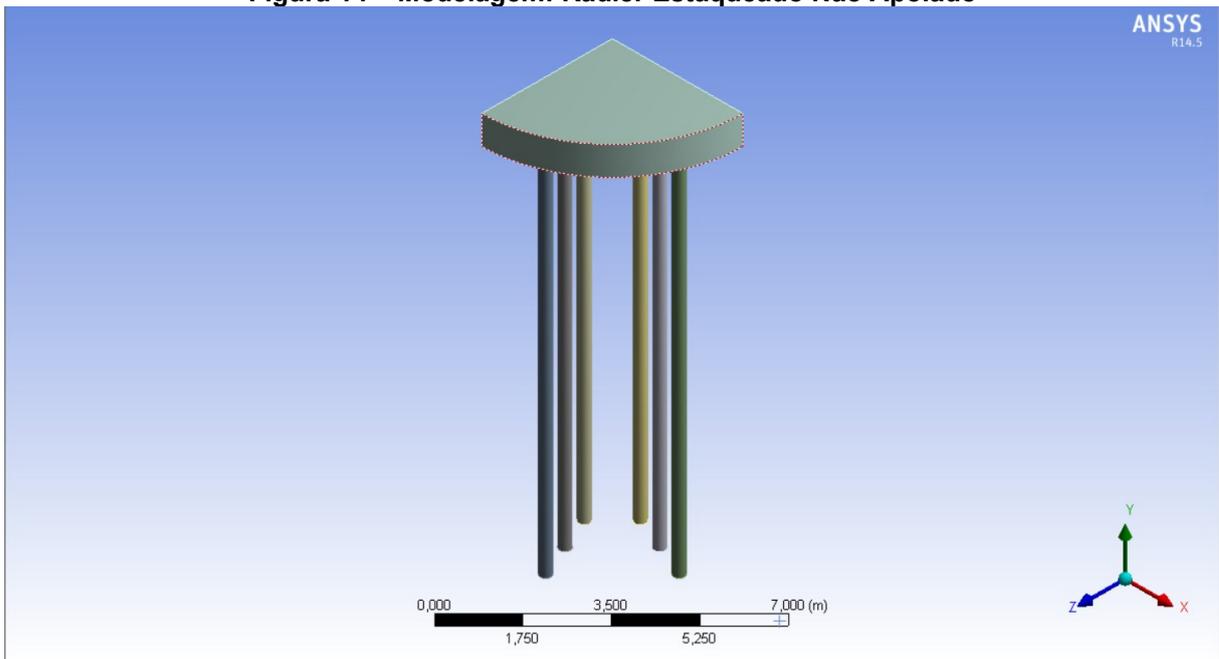
Na sequência foi modelado o radier modelo 02, como pode ser observado na Figura 13, onde temos apenas o radier apoiado no solo.

Figura 13 – Modelagem: Radier



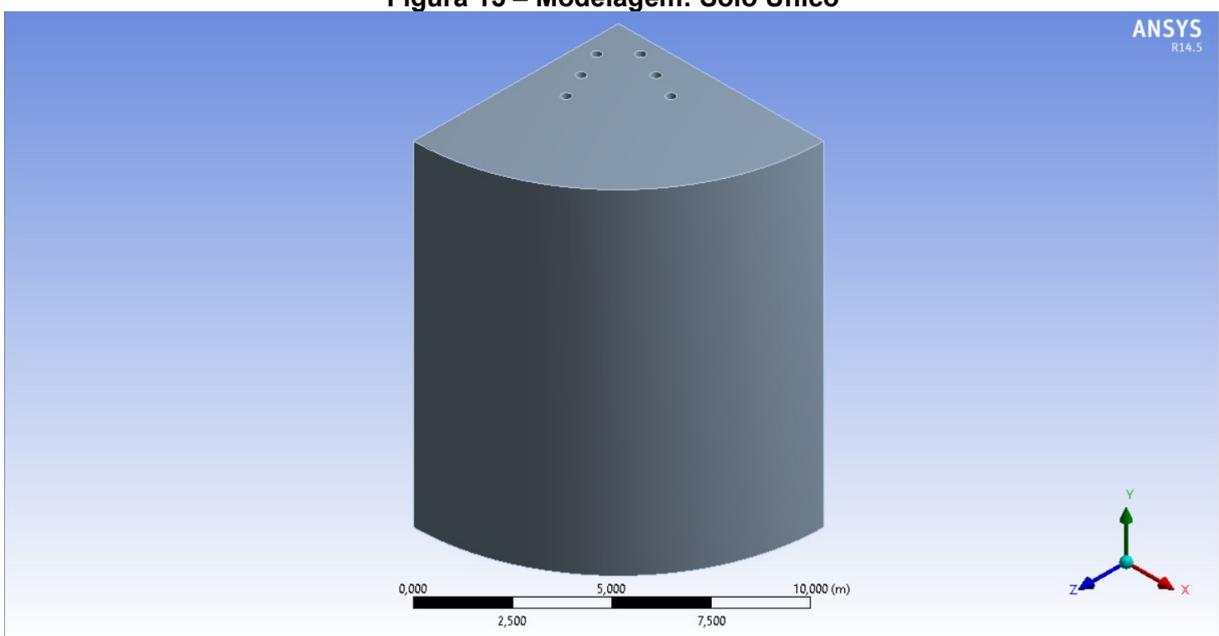
Fonte: Autoria Própria (2022)

Por último foi modelado o radier estaqueado modelo 03, como pode ser observado na Figura 14, onde temos o radier estaqueado, sem apoio no solo, para observarmos apenas a atuação das estacas na capacidade de carga da fundação.

Figura 14 – Modelagem: Radier Estaqueado Não Apoiado

Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a modelagem da base e fundações do silo, realizou-se a modelagem do solo abaixo e ao redor do silo, levando em consideração o solo como um maciço com suas propriedades definidas. Com o auxílio do ensaio SPT criamos uma camada única para representar o solo, como pode ser observado na Figura 13.

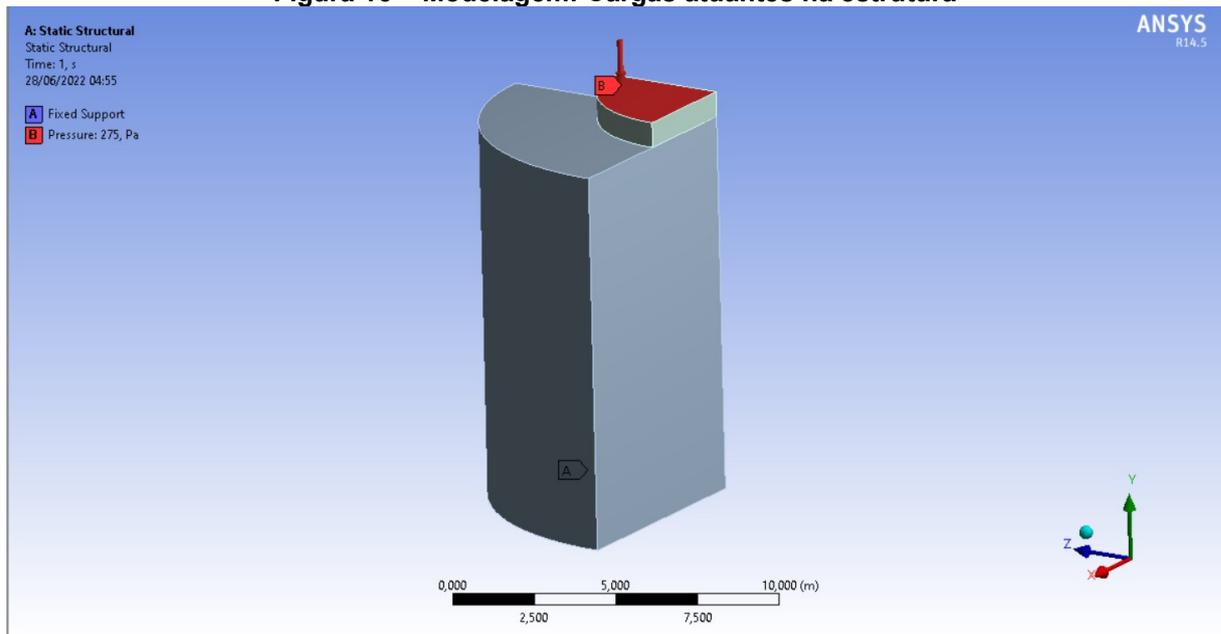
Figura 15 – Modelagem: Solo Único

Fonte: Autoria Própria (2022)

Apesar de graficamente parecer pronto, o programa modela o solo como inteiro, não realizando a diferenciação entre solo e estrutura, para realização dessa diferenciação utilizou-se a função “boolean”, a qual permite retirar o solo de onde deve ser estrutura no formato exato da geometria da estrutura do silo.

Com a modelagem da fundação, base e solo prontas pode-se seguir para o próximo passo, no qual criou-se uma malha para a realização dos cálculos. Trata-se de uma etapa crucial para a obtenção dos resultados, uma vez que, define a proximidade com condição da realidade. Para otimização da malha e garantia de bons resultados, foram aplicadas algumas regras para a geração das malhas nos modelos analisados, para o radier foram modelados com elementos de no máximo 0,25m. Para as estacas foi utilizado o método “Sweep” com 40 subdivisões, com malha triangular. Para otimizar o contato entre solo-estaca foi utilizado o método de “contact size” com elementos de 0,25m. Para a ponta da estaca e a base do solo em contato com a mesma, adicionou-se um controle de superfície, com elementos de 0,15m. Foram utilizados também os métodos “multizone” e “inflation” para o solo, onde foi possível suavizar a passagem entre o solo e as áreas escavadas das estacas.

Em sequência atribui-se os materiais aos sólidos criados na modelagem, dessa forma, o solo e a estrutura terão suas características mecânicas simuladas com condições próximas a realidade. Deve-se definir o método de ligação entre os sólidos do modelo, que no caso dos elementos de concreto estão colados, para trabalharem como um corpo só. Entre elementos de concreto e solo temos a ligação por atrito, onde foi considerado um coeficiente de 0,2 por recomendação do próprio programa, uma vez que para valores maiores que este podem gerar problemas de convergência na resolução do modelo. Também se adicionou as cargas e suportes para a estrutura e solo, conforme figura 16.

Figura 16 – Modelagem: Cargas atuantes na estrutura

Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a atribuição das características mecânicas e das cargas, pode-se iniciar a solução do modelo para obtenção dos resultados. Deve-se definir quais resultados devem ser gerados e dar continuidade a solução. Por tratar-se de um modelo complexo, demanda muita capacidade computacional, devido as várias ligações existentes entre solo e estrutura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise do Dimensionamento das Fundações

Considerando a fundação da estrutura como apenas estacas, pode-se realizar um breve dimensionamento da quantidade de estacas necessárias para suportar as cargas da estrutura, para efeito comparativo com os dados obtidos pela análise computacional e o dimensionamento estrutural.

Utilizou-se métodos empíricos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma lançados em uma planilha do software Microsoft Excel (Tabela 5) para facilitar e agilizar a obtenção dos resultados de capacidade de carga de cada estaca no solo em questão, obtido a partir do ensaio de sondagem SPT.

Tabela 5 - Cálculo da capacidade de carga de fundações em estacas

Obra: TCC 2
Local: Guarapuava - PR

Diâmetro: 28 cm
fck do concreto da estaca: 25 MPa
Resistência da estaca: 1100 kN
Coef. Segurança: 2.0

Tipo de estaca: Pré-moldada cravada
F1 = 2,5
F2 = 3,5

Cota (m)	Prof. (m)	SPT	Solo	Décourt-Quaresma						Aoki-Velloso					Q calc. (kN)			
				K (kN/m ²)	qp (kN/m ²)	Qp (kN)	qs (kN/m ²)	Qs (kN)	Qtot (kN)	Q/CS (kN)	K (kN/m ²)	α (%)	Qp (kN)	Qa (kN)		Qtot (kN)	Q/CS (kN)	
0	0	-	Argila siltosa	120	0	0	10	0	0	0	0	220	4,0%	0	0	0	0	0
-1	1	-	Argila siltosa	120	0	0	10	9	9	4	220	4,0%	0	0	0	0	0	0
-2	2	-	Argila siltosa	120	0	0	10	18	18	9	220	4,0%	0	0	0	0	0	0
-3	3	-	Argila siltosa	120	0	0	10	26	26	13	220	4,0%	0	0	0	0	0	0
-4	4	-	Argila siltosa	120	0	0	10	35	35	18	220	4,0%	0	0	0	0	0	0
-5	5	5	Argila siltosa	120	600	37	27	59	96	48	220	4,0%	27	11	38	19	19	19
-6	6	6	Argila silto-arenosa	120	720	44	30	85	129	65	330	3,0%	49	26	75	37	37	37
-7	7	7	Argila silto-arenosa	120	840	52	33	114	166	83	330	3,0%	57	43	100	50	50	50
-8	8	8	Argila silto-arenosa	120	960	59	37	147	206	103	330	3,0%	65	63	128	64	64	64
-9	9	10	Argila silto-arenosa	120	1200	74	43	185	259	129	330	3,0%	81	88	169	85	85	85
-10	10	14	Silte argilo-arenoso	200	2800	172	57	235	407	203	250	3,0%	86	115	201	100	100	100
-11	11	8	Silte argilo-arenoso	200	1600	99	37	267	365	183	250	3,0%	49	130	179	89	89	89
-12	12	18	Silte argilo-arenoso	200	3600	222	70	328	550	275	250	3,0%	111	164	274	137	137	137
-13	13	30	Silte areno-argiloso	250	7500	462	110	425	887	443	450	2,8%	333	259	591	296	296	296
-14	14	30	Silte areno-argiloso	250	7500	462	110	522	984	492	450	2,8%	333	354	686	343	343	343
-15	15	30	Silte arenoso	250	7500	462	110	619	1080	540	550	2,2%	406	445	851	426	426	426

Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se que o resultado de capacidade suporte do solo atingiu a resistência de 100 kN por estaca a profundidade de 10 metros. Há dois casos onde deve-se observar se o número de estacas foi adequado, na viga-anel e na base dos grãos.

As cargas provenientes do peso da superestrutura metálica e dos grãos, são passadas pela empresa responsável pela fabricação e montagem dos silos, os quais são dados abaixo para o silo modelo 12808 (Tabela 6)

Tabela 6 – Cargas

SILO	12805	12808	12810	12813	12815	12818	12820
CARGA FUNDO (TON/M²)	4,2	5,5	6,4	7,8	8,4	9,4	10,1
CARGA ANEL	155,4	304,1	424,2	630,0	781,5	1026,2	1143,2

(TON)							
CARGA MONTANTE (TON)	5,55	10,86	15,15	22,50	27,91	36,65	42,83

Fonte: Adaptado Projeto De Silos (2017)

Na base dos grãos, a carga de projeto é de 55kN/m^2 (Tabela 6), a área de atuação da carga é de aproximadamente $41,85\text{ m}^2$, uma vez que, o raio da base é de $3,65\text{m}$. A carga atuante total no radier é de $2301,75\text{ kN}$, considerando a profundidade para as estacas, de 10m o número de estacas necessárias para suportar o peso da estrutura é de 23 estacas.

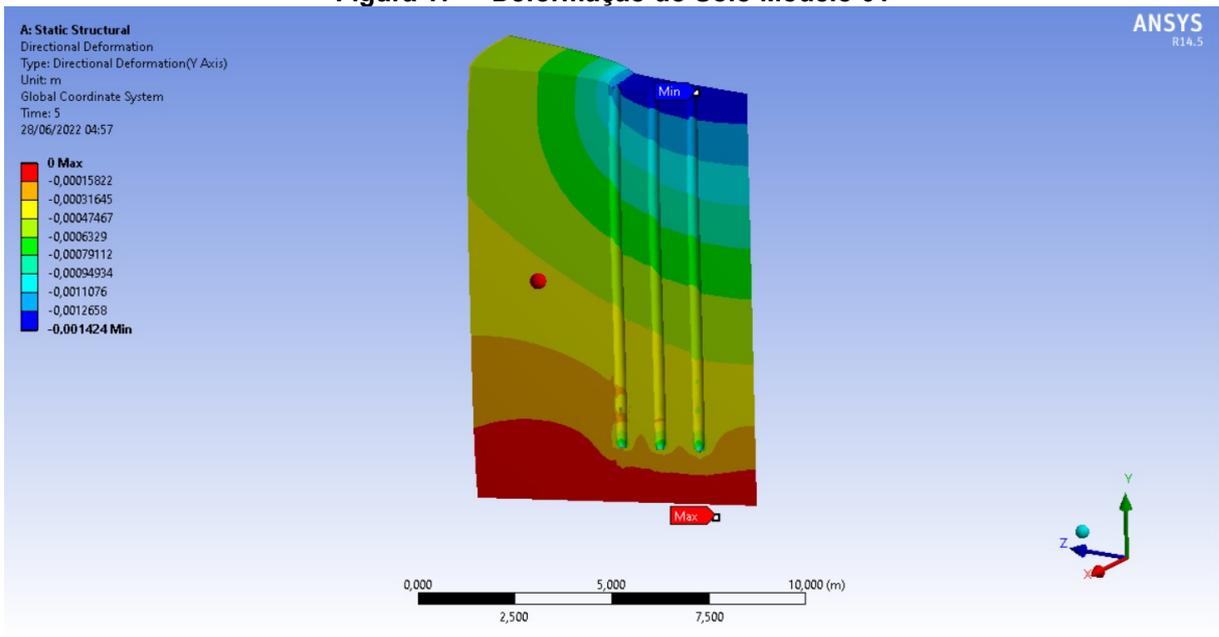
Levando em consideração que a estimativa de estacas calculadas de forma direta, isto é, a carga da estrutura dividido pela capacidade de carga do solo em cada estaca, não leva em consideração as tensões na estrutura, a quantidade de estacas está bem dimensionada.

A análise numérica computacional mostrou as novas tensões atuantes na estrutura e no solo e como elas se comportam. Isto é importante para observar onde ocorre o acúmulo de tensões para que haja o devido cuidado com a utilização da estrutura e possíveis correções para readequação das tensões, tanto na estrutura como no solo.

5.2 Análise Numérica Computacional

Após a conclusão dos cálculos pelo software ANSYS, pode-se realizar a avaliação do comportamento da fundação do silo, podendo realizar a avaliação de quatro variáveis, sendo elas as deformações do solo, deformações da estrutura, tensões no solo e tensões na estrutura. A análise foi iniciada a partir do resultado apresentado para as deformações direcionais no solo, a fim de encontrar o recalque ocorrido, para os 3 modelos analisados, conforme Figuras 17, 18 e 19.

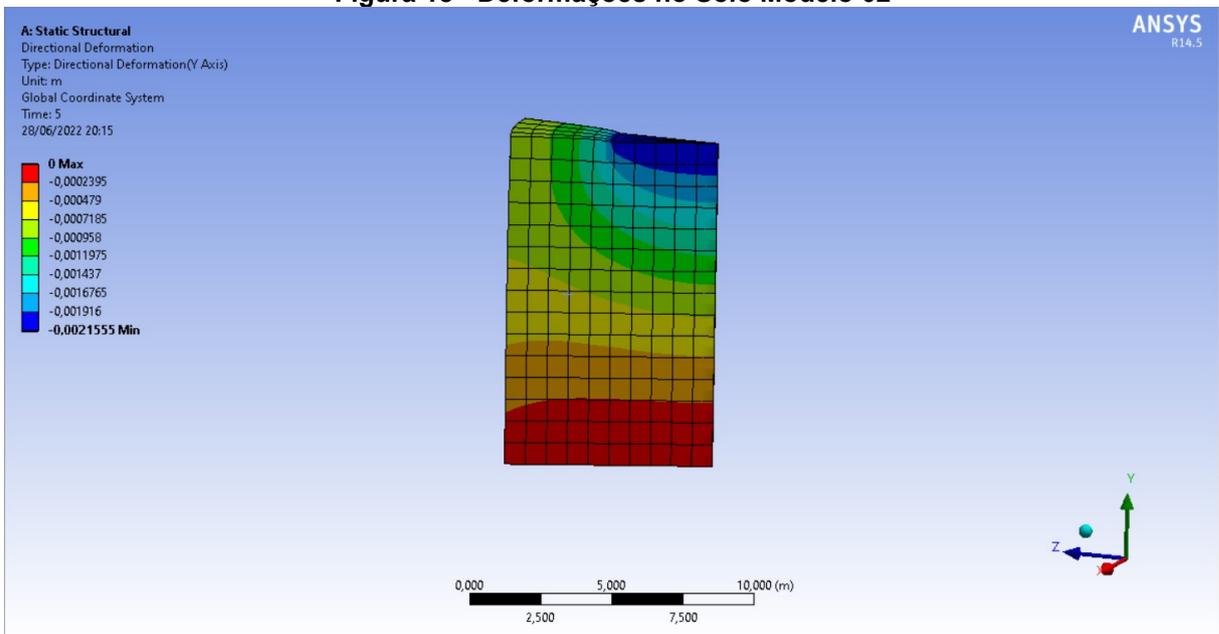
Figura 17 – Deformação do Solo Modelo 01



Fonte: Autoria Própria (2021)

Percebe-se que nesta configuração de fundações, modelo 01 (Figura 17), considerando o radier estaqueado temo deformações em dois principais pontos, logo abaixo do radier e na ponta das estacas.

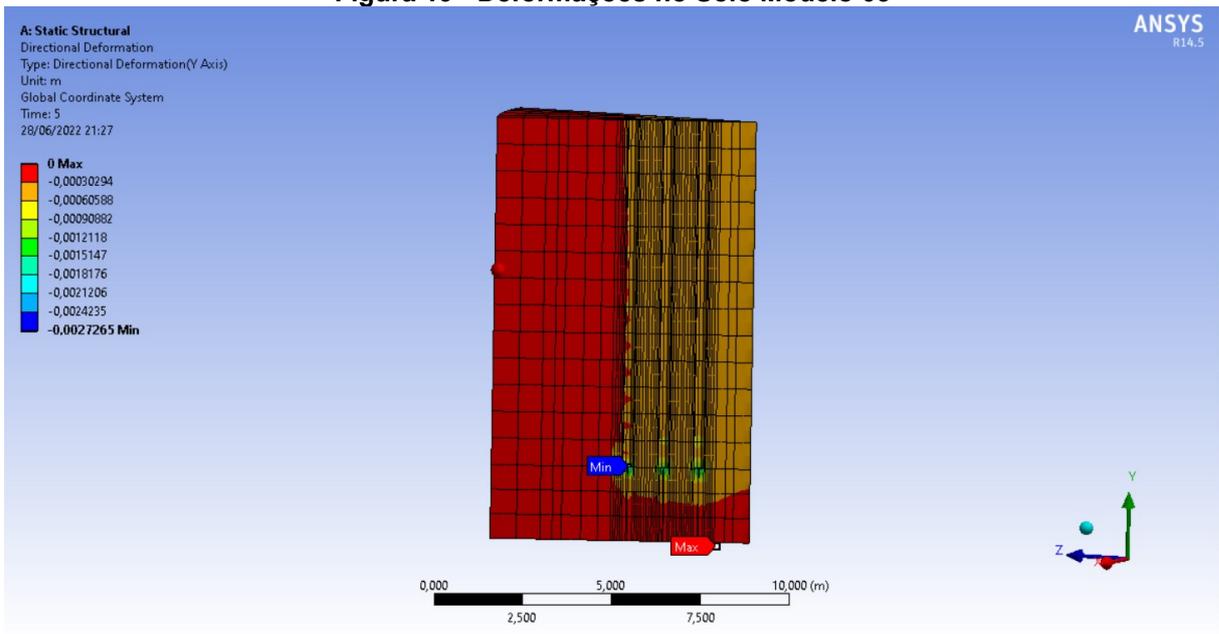
Figura 18 - Deformações no Solo Modelo 02



Fonte: Autoria Própria (2021)

Já no modelo 02 (Figura 18), onde temos apenas o radier, observa-se a distribuição gradual da deformação pelo solo dissipando-se conforme está mais afastado da fundação, com a máxima concentrada logo a baixo do radier.

Figura 19 - Deformações no Solo Modelo 03



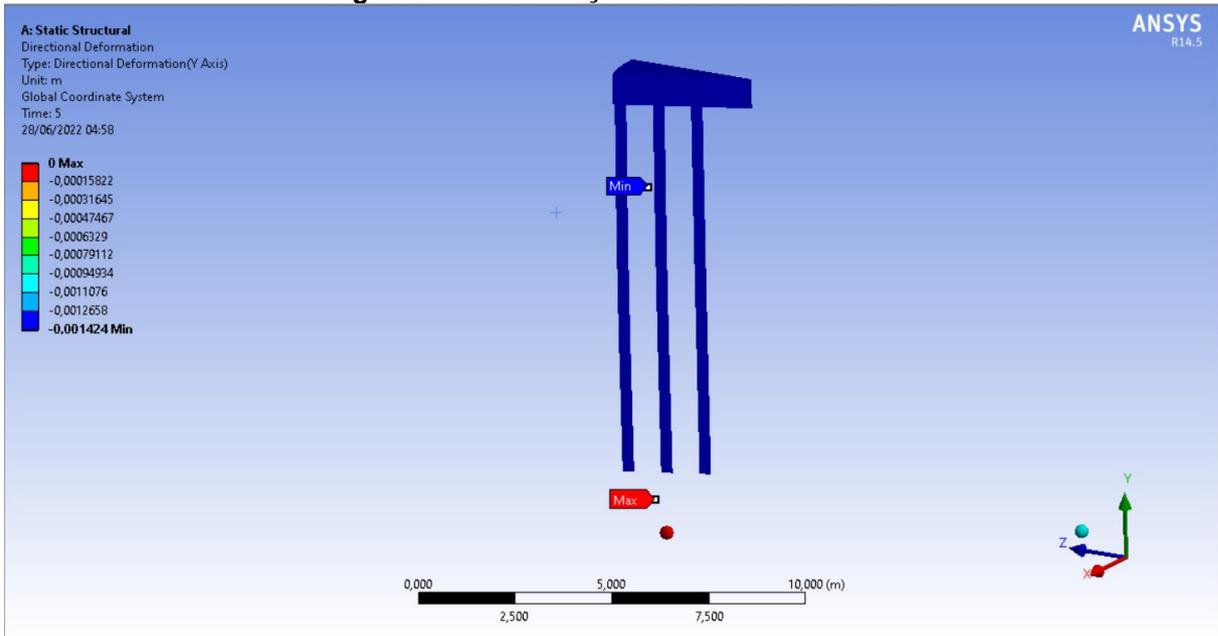
Fonte: Autoria Própria (2021)

Para o caso onde temos apenas as estacas para resistir as cargas (Figura 19), podemos observar um pouco da dissipação das cargas através do fuste das estacas e principalmente a dissipação pela ponta das estacas, onde foram geradas as maiores deformações.

Analisando os resultados apresentados após o modelamento verificou-se que o solo apresentou deformações, entretanto os valores apresentados foram baixos. (ABNT NBR 6122: 2010). Também conseguimos fazer uma análise comparativa entre os modelos de fundações, é possível observar que o radier estaqueado foi capaz de resistir mais aos recalques, obtendo os menores valores. Já o radier isolado e estacas isoladas tiveram os recalques bem superiores, mostrando a melhoria que o sistema de fundações, em radier estaqueado, gera neste modelo de base e fundação para silos. Uma vez que conseguimos considerar todas as parcelas de capacidade resistente da interação solo-estrutura.

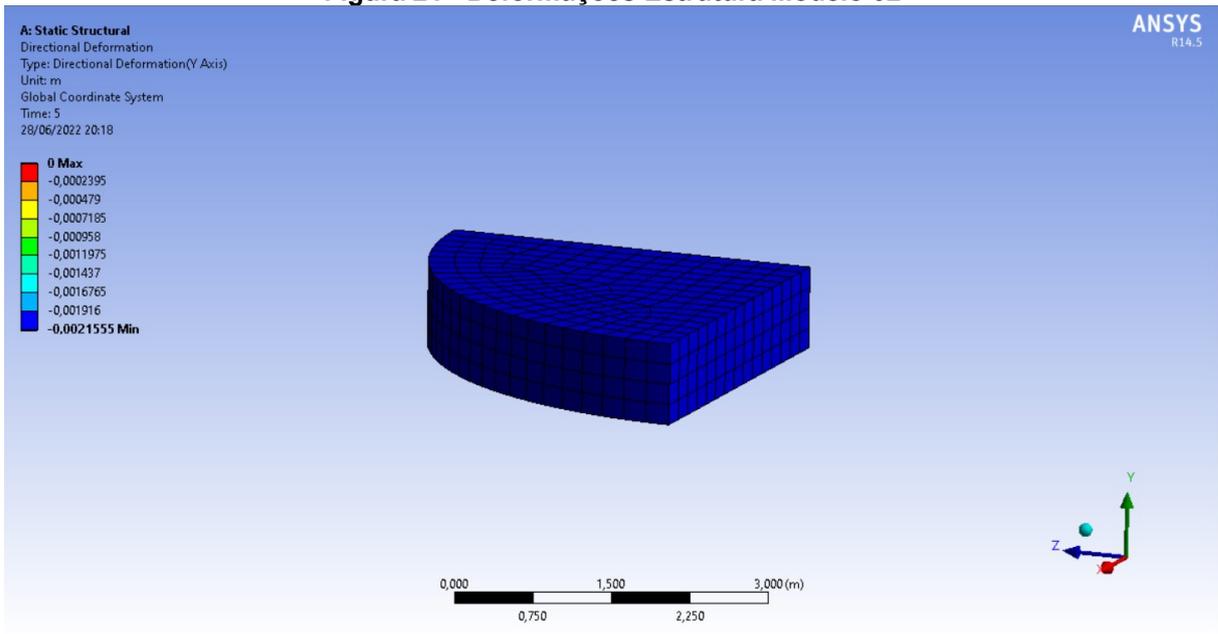
Na sequência realizou-se a análise do resultado apresentado pelas deformações nas estruturas conforme Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Deformação Estrutura Modelo 01



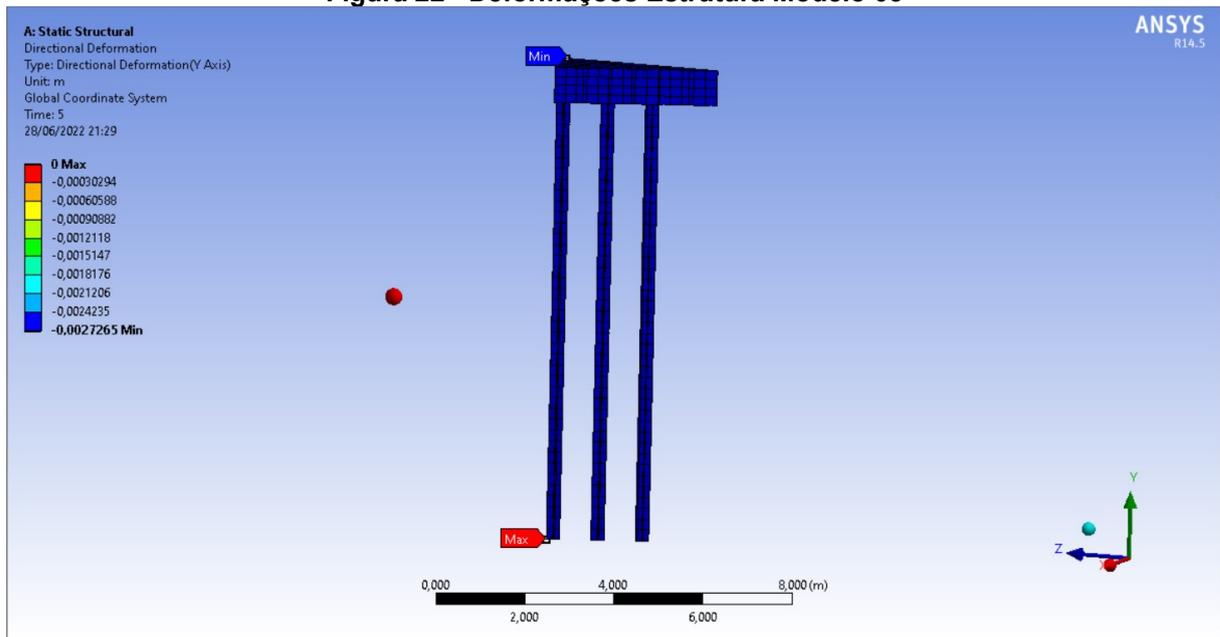
Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 21 - Deformações Estrutura Modelo 02



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 22 - Deformações Estrutura Modelo 03

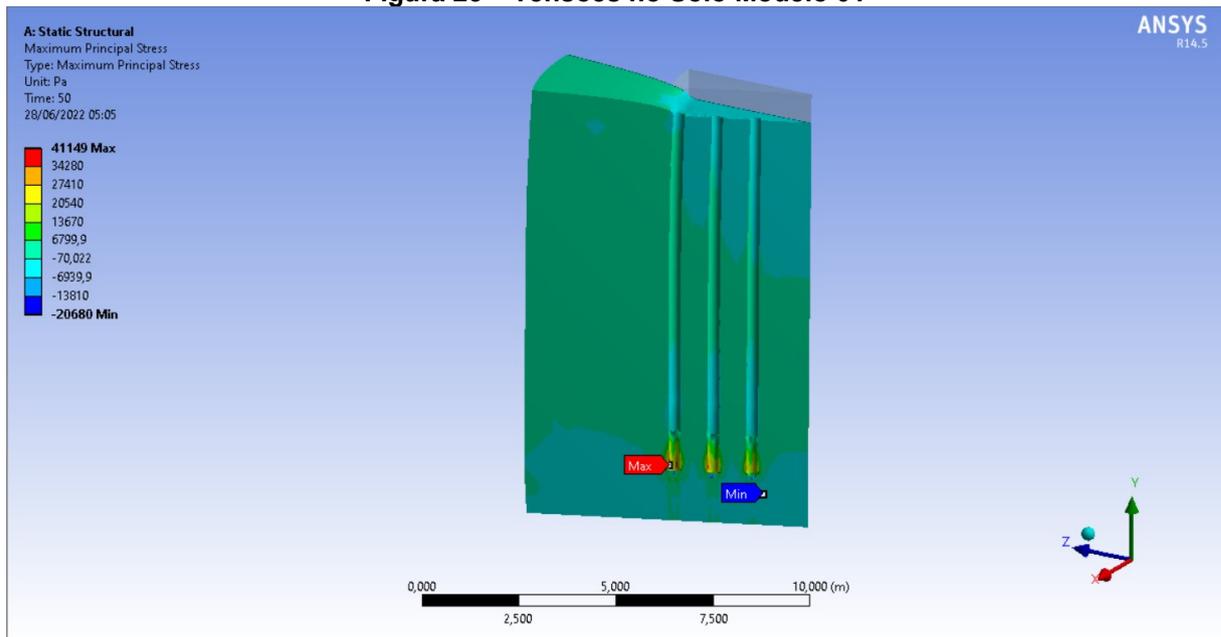


Fonte: Autoria Própria (2021)

As deformações na estrutura são pontos de extrema preocupação, pois são a principal causa de acidentes com rompimento de silos, assim podemos sobrecarregar uma região que não estava dimensionada para receber tal carga. Nos modelos apresentados, verificou-se que houveram poucas deformações na estrutura, sendo essas dentro do esperado, as quais não comprometem a estrutura. Foi possível observar apenas recalques da estrutura e não sua deformação.

Após a análise das deformações na estrutura, realizou-se a análise dos resultados obtidos referente as tensões do solo, conforme Figura 23.

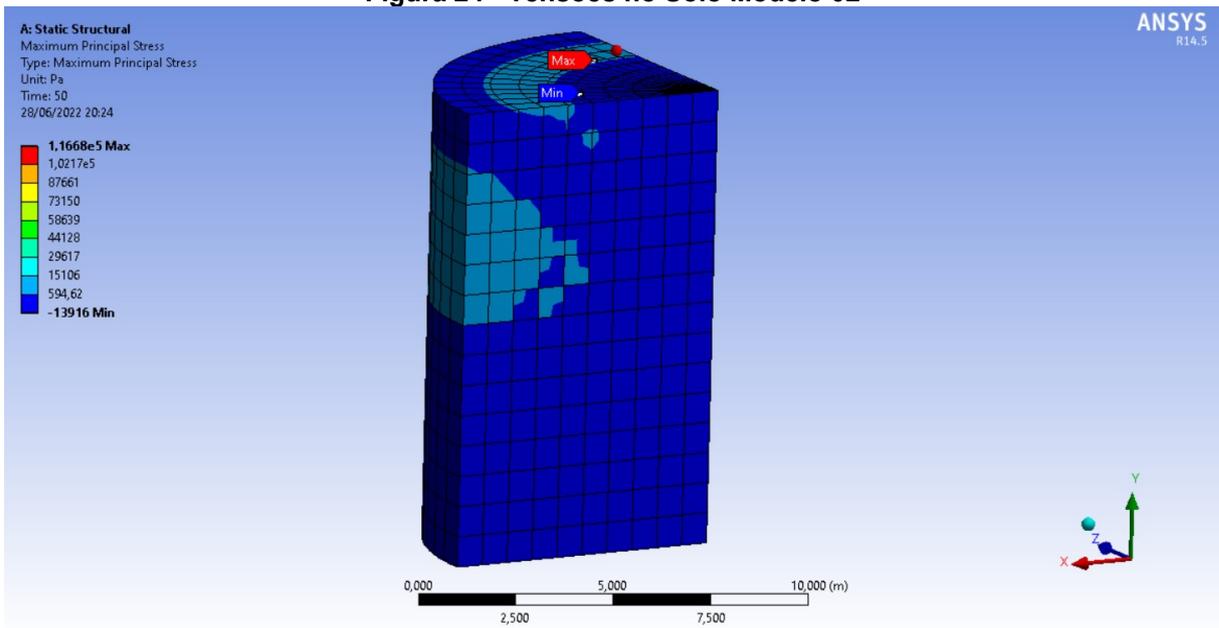
Figura 23 – Tensões no Solo Modelo 01



Fonte: Autoria Própria (2021)

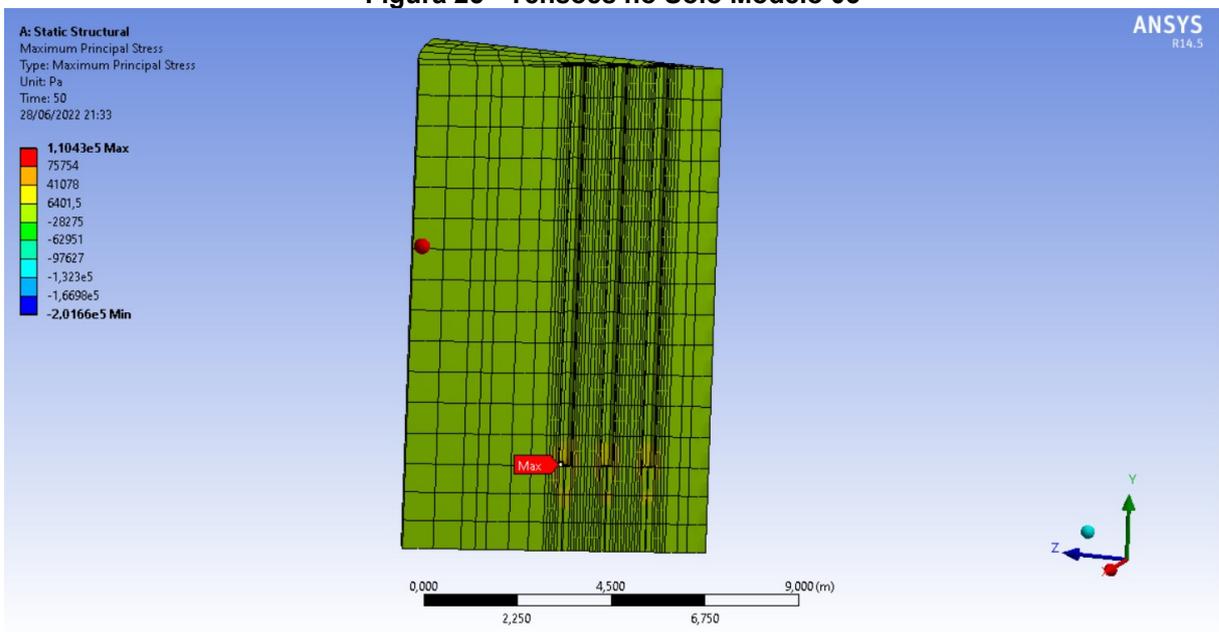
Percebe-se que as maiores tensões estão na ponta das estacas, demonstrando que neste modelo, as estacas foram os principais elementos na dissipação das cargas da estrutura e mostra que a resistência de ponta é bem superior a resistência no fuste da estaca. Podemos observar também que o radier teve pouca contribuição para a dissipação das tensões no solo, entretanto isto já era esperado, pois o radier é normalmente solicitado após as estacas atingirem seu limite de capacidade de carga.

Figura 24 - Tensões no Solo Modelo 02



Fonte: Autoria Própria (2021)

Figura 25 - Tensões no Solo Modelo 03

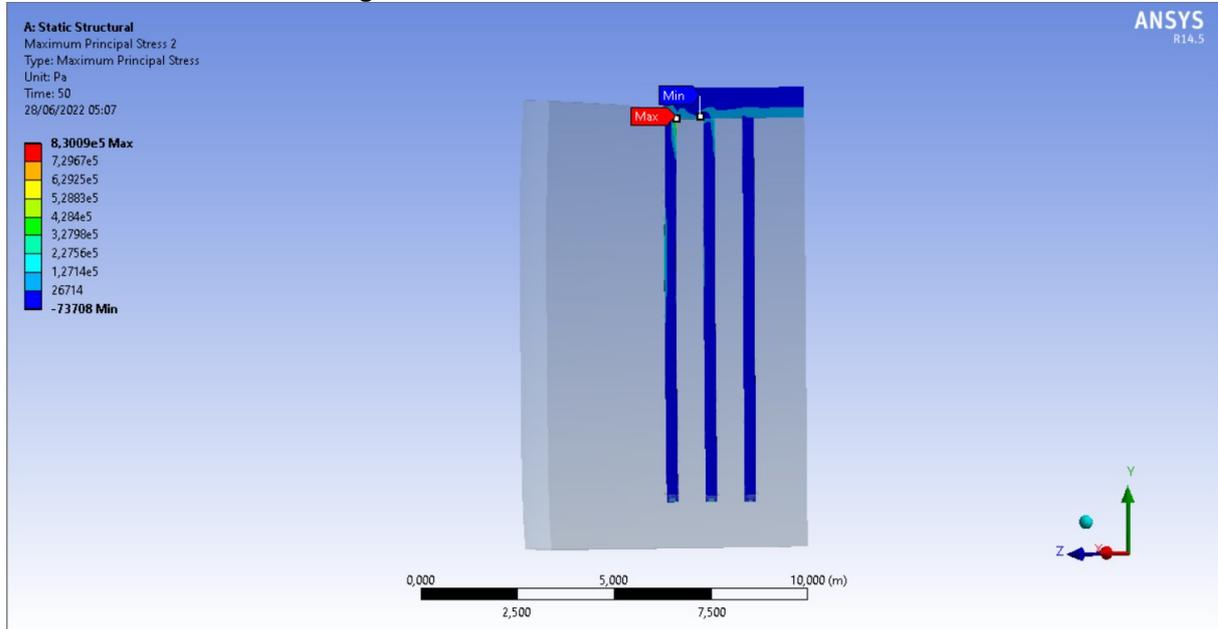


Fonte: Autoria Própria (2021)

A partir dessa análise, pode-se observar qual o comportamento do solo, a maneira que ocorreu a distribuição de tensões no solo, a área de atuação do bulbo de tensões e a profundidade. Para o modelo 03 (Figura 25), é possível perceber que as tensões ficaram concentradas nas pontas das estacas, corroborando com a realidade para solos argilosos, onde a resistência de ponta é superior a resistência do fuste.

Por fim, realizou-se a análise dos resultados obtidos para as tensões na estrutura, conforme Figura 26, 27 e 28.

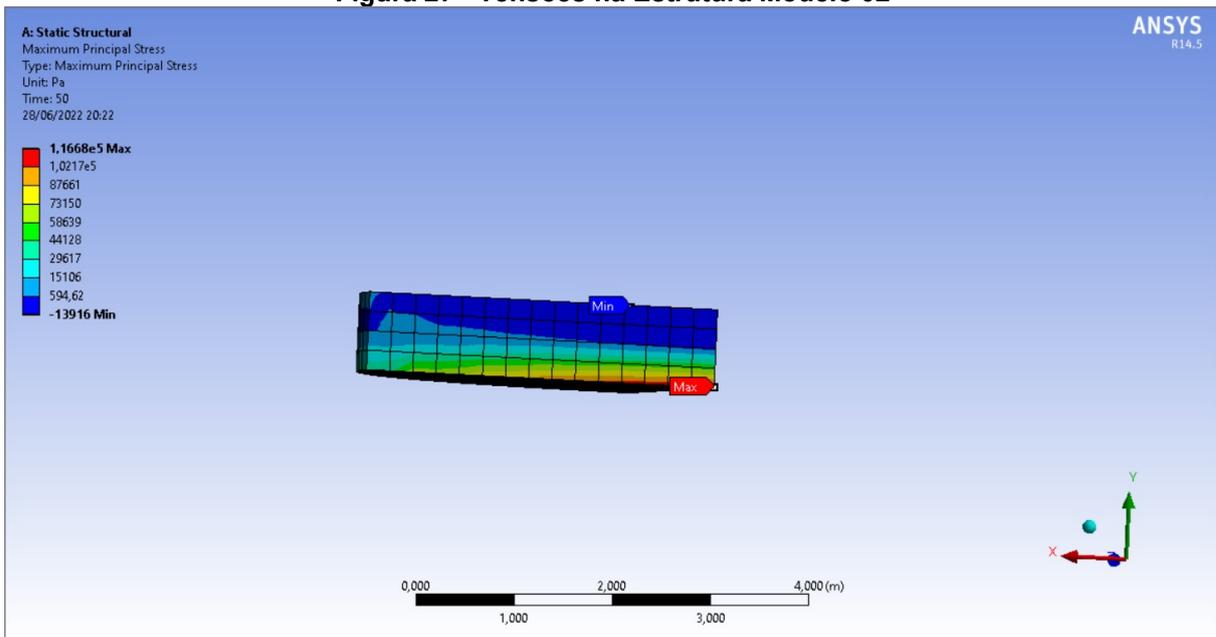
Figura 26 – Tensões na Estrutura Modelo 01



Fonte: Autoria Própria (2021)

É possível observar as tensões atuantes na estrutura de concreto armado do radier estaqueado (Figura 26), principalmente o acúmulo na parte inferior do radier. É possível observar como as interações entre os elementos do sistema de fundações ocorrem, uma vez que as tensões na estrutura do radier são dissipadas em conjunto com as estacas, deixando mais uniforme a distribuição das tensões no radier e ajudando a minimizar estas tensões.

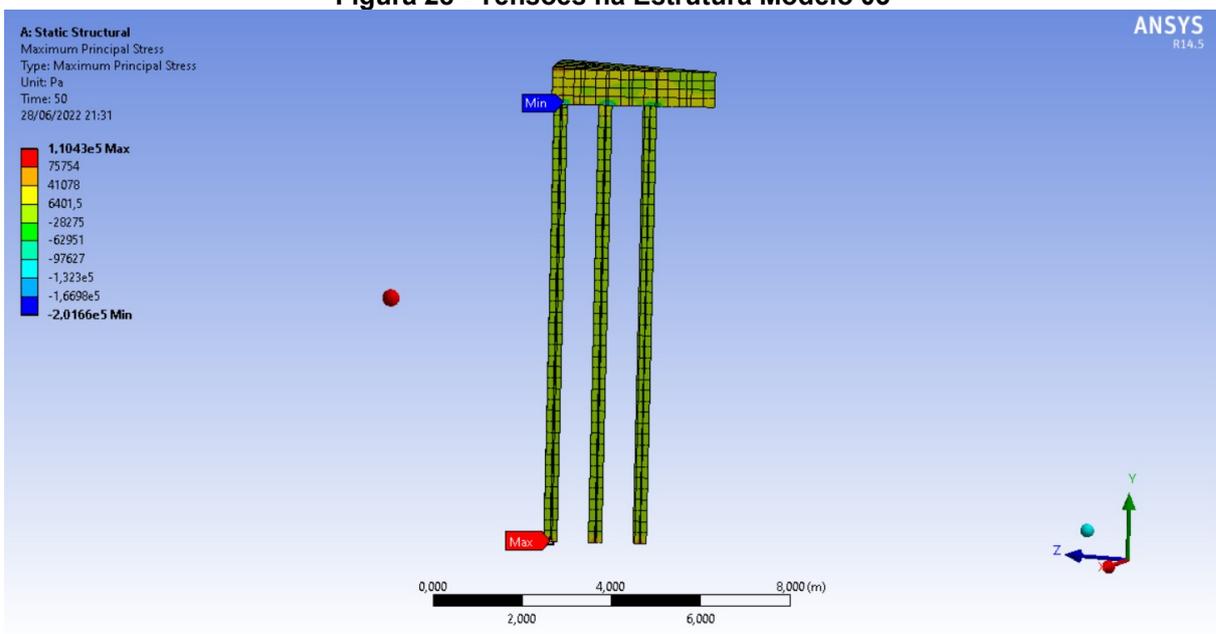
Figura 27 - Tensões na Estrutura Modelo 02



Fonte: Autoria Própria (2021)

Para o modelo 02 (Figura 27), podemos observar o comportamento de um radier isolado, com as tensões concentrando-se na região inferior central do elemento. Necessitando um aumento da taxa de aço na região, para suportar estas tensões.

Figura 28 - Tensões na Estrutura Modelo 03



Fonte: Autoria Própria (2021)

O modelo onde temos apenas as estacas desempenhando a função de dissipadoras das cargas (Figura 28), podemos observar o acúmulo de tensões na ponta das estacas, e uma tensão aproximadamente constante para o restante da estrutura.

A partir dessa simulação e análise, pode-se identificar os locais onde deve-se ter uma maior atenção e observar o comportamento in loco da estrutura, uma vez que, pequenas deformações na estrutura podem ser causadoras de grandes danos, físicos e financeiros.

6 CONCLUSÃO

Baseado na análise numérica, nos resultados gerados, na análise empírica, a escolha para a base e fundação dos silos metálicos de fundo plano, tem uma boa margem para otimização destas estruturas, visto que a consideração do radier estaqueado traz uma boa redução nos recalques e uma uniformidade na dissipação das tensões na estrutura.

Levando em consideração as tensões obtidas pela análise computacional vemos alguns pontos onde houve um acúmulo de tensões, embora sejam baixas e não preocupantes, deve-se realizar o acompanhamento in loco para verificação de possíveis alterações, como maiores recalques e trincas na estrutura.

Após a obtenção de todos os resultados observamos que o dimensionamento estrutural empírico, considerando apenas as estacas para a capacidade resistente da estrutura do silo, se comportou de maneira linear, com baixas deformações e poucas variações de tensões. Isto compactua com o que pode-se observar na realidade, uma vez que os dimensionamento de estaca utilizam a metodologia a muito tempo, se mostrando bem confiáveis. Embora não seja a melhor otimização para a base e fundação para silos.

A análise computacional mostrou que o dimensionamento da base e fundações do silo como um radier estaqueado, no solo em questão, seria de grande viabilidade, pois observa-se que as deformações no radier estaqueado interno foram menores que as deformações nos sistemas isolados de fundação, radier e estacas, com um nível de recalque com reduções de 48% comparado as estacas, se na concepção estrutural do dimensionamento da base e fundações, for considerada como radier estaqueado, será possível reduzir a quantidade de estacas no sistema, barateando a estrutura e agilizando a execução. .

Deixo para futuros trabalhos, a realização do redimensionamento da base e fundações de silos considerando a infraestrutura como radier estaqueado, para garantir a real otimização, alterando número de estacas e espessura do radier, ou ainda considerar a influência da movimentação das cargas no carregamento e descarregamento na fundação.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA BRASIL. IBGE: capacidade de armazenagem agrícola tem leve retração. 10 jun. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-06/ibge-capacidade-de-armazenagem-agricola-tem-leve-retracao>. Acesso em: 03 nov. 2021.

ALNUIAM, A. C. H. EL NAGGAR, M.H. **Performance of Piled-Raft System under Axial Load**. In: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.

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

ANDRADE, L. J. J.; CALIL, C. J. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.9, 2007.

ANSYS. The Ansys Story. Disponível em: <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>. Acesso em: 19 de mar. 2022.

ANSYS. **The International Directory of Company Histories**. Vol. 115. St. James Press, V.115, pp. 23–25, 2010.

ARMCO STACO. Sistemas para armazenagem de grãos. Disponível em: https://www.armcostaco.com.br/pt/produto/sistema_armazenagem_graos.html. Acesso em: 03 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

BALAKUMAR, V. **Experimental Studies of Model Piled Rafts on Sand and Field Study of Prototype Behaviour**. 2008. Ph.D. Thesis. Anna University. 304p.

BALAKUMAR, V. ILAMPARUTHI, K. **Behavior of Rectangular Piled Raft and Numerical Validation**. In: Proc. Indian Geotechnical Conference 2008, Bangalori, India, p. 141-144.

BANERJEE, P. K; BUTTERFIELD, R. **Boundary elements method in geomechanics**. In: GUDEHUS G. (editor). Finite elements in geomechanics. New York: Wiley; 1977.

BIANCHIN, D. **Fundações para bases de silos metálicos de fundo plano**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

BOURGEIOS, E. HASSEN, G. BHUHAN, P. **Finite element simulations of the behavior of piled-raft foundations using a multiphase model**. In: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2013. Vol.37(9), pp.1122-1139.

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

CALIL, C. J.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC, 2007.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: INL, 1977. 4v.

CARNEIRO, O. Silos e sua construção. **Anais de E. S. A. “Luiz de Queiroz”**. São Paulo: Universidade São Paulo, Escola Superior de Agricultura, 2013. P.4-33.

CASTILLO, D. J. A. **Uso da técnica de radier estaqueado para pequenos edifícios assentes sobre solo colapsível**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CLIMATE FIELVIEW. Armazenagem de grãos: quais os cuidados na operacionalização da colheita?. 06 jul. 2020. Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/armazenamento-dos-graos-quais-cuidados-sao-importantes-para-manter-o-resultado-da-safra>. Acesso em 03 nov. 2021.

CLIMATE FIELVIEW. Qual é a participação do agronegócio no PIB e nas exportações brasileiras ?. 06 abr. 2021. Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/qual-e-a-participacao-do-agronegocio-no-pib-e-nas-exportacoes-brasileiras>. Acesso em 03 nov. 2021.

CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil). PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020. 10 mar. 2021. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020>. Acesso em 03 nov. 2021.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Estimativa indica aumento na produção de grãos 2021/22, com previsão de 288,61 milhões de toneladas. 07 out. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4316-estimativa-indica-aumento-na-producao-de-graos-na-safra-2021-22-com-previsao-em-288-61-milhoes-de-toneladas#:~:text=e%20Promo%C3%A7%C3%A3o%20Institucional-,Estimativa%20indica%20aumento%20na%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20gr%C3%A3os%20na%20safra%202021,288%2C61%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas>. Acesso em 03 nov. 2021.

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

CORDEIRO, A. F. B. **Modelagem Física de Radiers Estaqueados Com e Sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia**. 2017. Tese (Doutorado; Publicação G.TD-136/17) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ECONOMIA UOL. Falta de armazém para o agro. 27 jul. 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/reportagens-especiais/agronegocio-logistica-armazenamento-de-soja-nas-fazendas/#end-card>. Acesso em: 03 nov. 2021.

EQUIPE ESSS. A Modelagem de Silos para o Armazenamento. 31 ago. 2018. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/a-modelagem-de-silos-para-o-armazenamento-de-soja/>. Acesso em: 03 nov. 2021.

FORTES, J. F. **Uma Introdução ao Estudo dos Silos**. 1985. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – EESC/USP, São Carlos, 2001.

FREITAS, A. P. S. **Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica**. 2018. Dissertação (Pós Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

HOTMART. **Master em Silos**. Disponível em: <https://www.hotmart.com/product/master-em-silos/Q42084144L>. Acesso em: 03 nov. 2021.

JANDA, T. *et al.* **Three Dimensional Finite Element Analysis and Back- Analysis of CDA Standard Pile Groups and Piled Rafts Founded on Tropical Soil**. 2009. Soil and Rocks, 32 (1): 3-18.

KEPLER WEBER. Projetos Agrícolas. **Silos**. Disponível em: <https://www.kepler.com.br/home>. Acesso em: 03 nov. 2021.

LACOVIC, A. C. **Estudo do processo de montagem de um silo metálico de fundo plano**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

LAVOURA – O BLOG DA AGRO. Armazenagem de grãos: o que você precisa saber sobre os silos. 18 jan. 2019. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/armazenagem-de-graos/>. Acesso em: 03 nov. 2021.

LEITE, G.L.D. **Capacidade de armazenamento e escoamento de grãos do estado do Mato Grosso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MACHADO, P. A. N. **Projeto de Fundação de Silo de Armazenagem de Grãos – Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS/MG), Varginha, 2018.

MANDOLINI, A., DI LAORA, R., IODICE, C. **Simple Approach to Static and Seismic Design of Piled Rafts**. 2017. 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, pp. 107-124.

OBRA EXPERTISE. Tipos de Fundações. 24 jun. 2019. Disponível em: <https://obraexpertise.com.br/tipos-de-fundacoes/>. Acesso em: 03 nov. 2021.

PALMA, G. **Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PATURCA, E. Y. **Caracterização das estruturas de armazenagem de grãos: um estudo de caso no Mato Grosso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Economia, Administração e Sociologia, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

PEREZ, C. C. **Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

POULOS, H.G., AND DAVIS, E.H. **Pile Foundationd Analysis and Design**. 1980. Wiley, New York.

POULOS, H.G. **Piled Raft Foundations: Design and Applications**. 2001. Géotechnique, 51(2), 95-113.

PUC-RIO. Radiers estaqueados. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3957/3957_3.PDF. Acesso em: 03 nov. 2021 (Certificação Digital nº 9916418/CA)

RANDOLPH, M. F. **Design Methods For Pile Groups and Piled Rafts**. 1994. In: Proceedings of the 13th ICSMFE. New Delhi, 1: 61-82.

ROCHA, M. T.; FARIA, G. A. I. **Modelagem analítica e numérica de fundações para silos graneleiros**. 2018. 65f. Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

RUSSO, G., VIGGIANI, C. Factors controlling soil-structure interaction for pile drafts. Proc. Int. Conf. On Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering, Darmstadt, pp. 297-322, 1998.

SALES, M. M. **Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas**. 2000. Tese (Doutorado; Publicação G.TD/002A) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenamento de grãos**. Dissertação (Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SÉRVULO, A. C. O. **Dimensionamento da Fundação de um silo vertical metálico de fundo plano para armazenagem de milho a granel**. 2012. Dissertação (Bacharel em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Goiás, Anápolis, 2012.

SINHA, A. HANNA, A.M. **3D Numerical Model for Piled Raft Foundation**. 2017. In: International Journal of Geomechanics, Vol.17(2).

SOUSA, G. F. **Análise numérica de blocos sobre duas estacas considerando o atrito lateral entre as estacas e o solo**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ILVA, I. T. N. **Estado da Arte de Silos Verticais de Madeira**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Engenharia, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

SILOMAX. **Armazenagem em Silos Ventiláveis**. Disponível em: <https://www.silomax.com.br/produtos/silos/armazenagem-em-silos-ventilaveis>. Acesso em: 03 nov. 2021.

SOARES, W. C. **Radier Estaqueado Com Estacas Hollow Auger Em Solo Arenoso**. 2011. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

TERZAGHI, K. Discuss on pile formula. ASCE, 68(2). p. 311-323. 1942.

WULANDARI, P. S. TIANDRA, D. **Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D**. 2015. In: The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5).

ANEXO A – SONDAGEM SPT

