



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS RIO VERDE**

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS HIPÓLITO DE OLIVEIRA MELO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE
FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS PARA SILOS GRANELEIROS EM
SOLO DA CIDADE DE RIO VERDE-GO**

**Rio Verde – GO
2025**

LUCAS HIPÓLITO DE OLIVEIRA MELO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE
FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS PARA SILOS GRANELEIROS EM
SOLO DA CIDADE DE RIO VERDE-GO**

Trabalho de curso apresentado ao Instituto Federal Goiano
– Campus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção
do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Heitor Cardoso Bernardes

Rio Verde – GO
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M528 HIPOLITO DE OLIVEIRA MELO, LUCAS
ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES
SOLUÇÕES DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS PARA
SILOS GRANELEIROS EM SOLO DA CIDADE DE RIO
VERDE-GO
/ LUCAS HIPOLITO DE OLIVEIRA MELO. Rio Verde 2025.
85f. il.
Orientador: Prof. Dr. Heitor Cardoso Bernardes.
Monografia (Bacharel) - Instituto Federal Goiano,
curso de
0220084 - Bacharelado em Engenharia Civil - Integral - Rio
Verde (Campus Rio Verde).
I. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: LUCAS HIPÓLITO DE OLIVEIRA MELO

Matrícula: 2018102200840211

Título do Trabalho: ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE FUNDAÇÕES ESTAKEADAS PARA SILOS GRANELEIROS EM SOLO DA CIDADE DE RIO VERDE-GO

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 29/08/2025

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde/GO
Local

29/08/2025.
Data

Ciente e de acordo:

 Documento assinado digitalmente
HEITOR CARDOSO BERNARDES
Data: 19/08/2025 11:45:37-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **28** dias do mês de **agosto** de **dois mil e vinte e cinco**, às 10:30 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. **Heitor Cardoso Bernardes** (orientador), Prof. **Philippe Barbosa Silva** e Prof. **Michell Macedo Alves**, para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado **ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SOLUÇÕES DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS PARA SILOS GRANELEIROS EM SOLO DA CIDADE DE RIO VERDE-GO**, de **LUCAS HIPÓLITO DE OLIVEIRA MELO**, estudante do curso de **Engenharia Civil** do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2018102200840211**. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, 28 de agosto de 2025.

Heitor Cardoso Bernardes

Orientador

Philippe Barbosa Silva

Membro da Banca Examinadora

Michell Macedo Alves

Membro da Banca Examinadora

Heitor Cardoso Bernardes

Mediador de TC

Documento assinado eletronicamente por:

- **Heitor Cardoso Bernardes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 28/08/2025 12:12:51.
- **Michell Macedo Alves**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 28/08/2025 12:18:03.
- **Philippe Barbosa Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 28/08/2025 13:00:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 737594

Código de Autenticação: hfIdRh40nf



RESUMO

MELO, L. H de O. **Análise comparativa de diferentes soluções de fundações estaqueadas para silos graneleiros em solo da cidade de Rio Verde – GO.** 2025. Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025. 86f.

Silos são estruturas metálicas cilíndricas utilizadas para o armazenamento de material a granel, geralmente apoiadas sobre fundações compostas por estacas conectadas a um bloco de coroamento. Apesar de sua robustez, essas estruturas estão sujeitas a problemas patológicos. Na região centro-oeste do Brasil, sendo a maioria deles relacionada ao comportamento das fundações frente às cargas excêntricas e recalques diferenciais, devido à presença de perfis geotécnicos complexos, como solos colapsáveis, e a presença de vários ciclos de carregamento e descarregamento, tais estruturas estão sujeitas a patologias, que podem comprometer a estabilidade e a operação do sistema como um todo. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, sob os aspectos técnico, a viabilidade de diferentes opções de fundação para estruturas de silos implantadas em solos da região de Rio Verde, estado de Goiás. A metodologia empregada baseou-se na aplicação de métodos empíricos de dimensionamento geotécnico, além do embasamento em normas técnicas aplicáveis. Foram comparadas duas soluções de fundação: inclusão rígida, radier estaqueado. Os resultados indicaram que a fundação com inclusões rígidas apresenta maior consumo de concreto, porém melhor desempenho quanto à limitação de recalques diferenciais. Por outro lado, o radier estaqueado, embora tenha menor consumo de material, está mais longe do critério de serviço de distorção angular limitado a $1/500$. Já o sistema em inclusões rígidas demonstrou um desempenho técnico satisfatório, com valores aceitáveis de recalque e distorção angular, conciliando segurança estrutural e viabilidade. Assim, conclui-se que a escolha adequada do tipo de fundação em Rio Verde com relação a aspectos técnicos e viabilidade é por inclusão rígida, onde tem-se menores recalques e um gasto de concreto que não tão maior que a fundação por radier estaqueado.

Palavras-chave: Capacidade de cargas; Fundações; Inclusões rígidas; Recalques; Silos.

ABSTRACT

MELO, L. H de O. **Comparative analysis of different piled foundation solutions for grain silos in the soil of the city of Rio Verde - GO**. 2025. Monograph (Bachelor's Degree in Civil Engineering). Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás – Rio Verde Campus, Rio Verde, GO, 2025. 86f.

Silos are cylindrical metallic structures used for bulk material storage, typically supported by foundations composed of piles connected to a pile cap. Despite their robustness, these structures are subject to pathological problems. In the central-west region of Brazil, most of these issues are related to the behavior of foundations under eccentric loads and differential settlements. Due to the presence of complex geotechnical profiles, such as collapsible soils, and multiple loading and unloading cycles, such structures are prone to pathologies. These pathologies can compromise the stability and operation of the entire system. In this context, the present study aimed to evaluate, from a technical perspective, the feasibility of different foundation options for silo structures built on soils in the region of Rio Verde, state of Goiás. The methodology employed was based on the application of empirical geotechnical design methods, as well as on applicable technical standards. Two foundation solutions were compared: rigid inclusions and piled raft. The results indicated that the foundation with rigid inclusions requires a higher consumption of concrete but offers better performance in limiting differential settlements. On the other hand, the piled raft, although consuming less material, is further from meeting the angular distortion service criterion limited to $1/500$. The rigid inclusion system, however, demonstrated satisfactory technical performance, with acceptable values of settlement and angular distortion, balancing structural safety and feasibility. Therefore, it is concluded that the most suitable foundation type for Rio Verde, considering technical aspects and feasibility, is rigid inclusion, as it results in smaller settlements and a concrete consumption not much higher than that of the piled raft foundation.

Keyword: Load capacity; Foundations; Rigid inclusions; Settlements; Silos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura típica dos silos metálicos atuais.	16
Figura 2- Principais tipos de sistemas de fundações: a) grupo de estacas, b) radier estaqueado, c) radier estaqueado combinado, d) radier isolado, e) estaca isolada.....	18
Figura 3- Inclusões pré-fabricadas. a) de madeira b) metálica c) de concreto.	23
Figura 4 - Hélice contínua.	25
Figura 5 - Características gerais da estrutura e a fundação.	26
Figura 6 - Distribuição em planta das estacas e das inclusões rígidas.	27
Figura 7 - Configuração das inclusões embaixo do tanque.	27
Figura 8 - Vista geral da construção das inclusões e da PTC.....	28
Figura 9 - Tabela de tabulação da sondagem.	31
Figura 10 - NSPT final.	32
Figura 11 - Curva média dos NSPT'S x Profundidade.	32
Figura 12 - Ábaco de Fadum.	37
Figura 13 - Gráfico de determinação do fator de influência inicial.....	39
Figura 14 - Gráfico fator de correção da profundidade.	40
Figura 15 - Gráfico fator de correção da compressibilidade.	40
Figura 16 - Gráfico de definição da correção do fator de proporção do coeficiente de Poisson.	40
Figura 17 - Gráfico de definição do fator interação entre as estacas.....	41
Figura 18 - Correção por interação horizontal N_h	42
Figura 19 - Correção por interação vertical N_v	42
Figura 20 - Gráfico de comportamento da relação entre a carga e recalque da fundação.....	45
Figura 21 - Representação das estacas na base do silo.....	52
Figura 22 - Valores tabelados de k' para cada camada.	52
Figura 23 - Definição da profundidade das estacas pelo método Decourt-Quaresma....	53
Figura 24 - Interface e parâmetros software GARP.	54
Figura 25 - Definição da malha lançamento (Desenho Autocad).	55
Figura 26 - Lançamento coordenadas malha GARP.	56
Figura 27 - Interface da carga distribuída GARP.	57
Figura 28 - Momento de inércia das diferentes seções do radier estaqueado.....	57
Figura 29 - Lançamento no GARP da espessura das camadas.....	58

Figura 30 - Lançamento no GARP da espessura das camadas.....	59
Figura 31 - Interpolação de S/D software DEFPIG.....	59
Figura 32 - Coeficiente de flexibilidade software DEFPIG.	60
Figura 33 - Parâmetros do radier software DEFPIG.	60
Figura 34 - Parâmetros das estacas software DEFPIG.....	61
Figura 35 - Análise de carga por estaca, Software GARP.....	62
Figura 36 - Representação da tensão de iteração, Software GARP.....	62
Figura 37 - Gráfico de representação faixa de tensões das estacas.	63
Figura 38 - Locação das estacas e cargas no radier.....	64
Figura 39 - Output do Software GARP com relação as cargas totais.....	
Figura 40 - Recalques no radier estaqueado, Software GARP.....	
Figura 41 - Dados para início dos cálculos	66
Figura 42 - Resultado do dimensionamento por inclusão rígida.	68
Figura 43 - Distribuição das estacas na base do silo	68
Figura 44 - Cálculo profundidade da estaca Decourt-Quaresma.....	69
Figura 45 - Estacas na malha quadriculada	70
Figura 46 - Tela do Software GARP após inserção dos dados iniciais.....	71
Figura 47 - Interpolação dos fatores de influência software DEFPIG.	71
Figura 48 - Coeficiente de flexibilidade software DEFPIG.	72
Figura 49 - Pile Data, Software GARP.....	72
Figura 50 - Influência das estacas no suporte do carregamento, Software GARP.....	73
Figura 51 - Gráfico das faixas de carga das estacas.	73
Figura 52 - Locação das estacas e cargas no radier.....	74
Figura 53 - Representação da tensão de iteração, Software GARP.....	74
Figura 54 - Recalques no radier estaqueado, Software GARP.....	75
Figura 55 - Plotagem do recalque total na fundação por radier estaqueado, Software GARP.	76
Figura 56 - Plotagem do recalque total na fundação por radier estaqueado, Software GARP.	76
Figura 57 - Cálculo de concreto.	77
Figura 58 - Comparação consumo de concreto.	78
Figura 59 - Interpolação dos fatores de influência (reanálise), software DEFPIG.....	79
Figura 60 - Coeficiente de flexibilidade reanálise.....	79
Figura 61 - Pile data (reanálise).....	80

Figura 62 - Representação da tensão de iteração (Reanálise), Software GARP.	80
Figura 63 - Tensão em cada uma das estacas.	81
Figura 64 - Zonas de recalque, software GARP.	81
Figura 65 - Comparação consumo de concreto entre radier estaqueado e reanálise inclusão rígida.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 Agronegócio e silos graneleiros.....	16
2.2 Sistema de fundações	17
2.3 Principais tipos de fundações.....	20
2.4 Fundação do tipo inclusão rígidas	22
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Caracterização do silo	29
3.2 Caracterização do solo do município de Rio Verde.....	30
3.2.1 Disposição de camadas.....	30
3.2.2 Coesão e ângulo de atrito.....	32
3.2.3 Módulo de Young.....	33
3.2.4 Nível de água	33
3.3 Dimensionamento teórico das fundações	33
3.3.1 Fundação em radier estaqueado.....	34
3.3.2 Fundação em radier sobre inclusão rígida	46
3.4 Análise comparativa	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Concepção do projeto inicial para os procedimentos de cálculo.	51
4.2 Dimensionamento por radier estaqueado.....	53
4.3 Dimensionamento por Inclusão Rígida.....	66
4.4 Análise comparativa	75
4.5 Otimização da fundação	78
5 CONCLUSÕES.....	83
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	88
ANEXO A - PLANTA MECANICA DO SILO ESTUDADO.....	88
ANEXO B - PLANTA MECANICA PLANO DE AERAÇÃO	89

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o agronegócio tem grande peso na economia sendo em 2023 cerca de 23% do PIB de acordo com o IBGE, somando toda a cadeia de serviços em volta da produção e cultivo de grãos. Em vista dessa situação, a produção necessita de instalações de armazenagem, tipicamente utilizando silos metálicos. No Brasil, esses silos são geralmente construídos como estruturas metálicas cilíndricas apoiadas em uma fundação composta por uma série de estacas ligadas a um bloco de coroamento (SOUZA FILHO, 2018).

Normalmente, os silos são projetados verticalmente e construídos com chapas de metal, apresentando componentes que auxiliam no armazenamento e transporte, além de fornecer estabilidade estrutural (SOUZA FILHO, 2018).

Estruturas de silos são frequentemente situadas em áreas remotas, longe de grandes centros urbanos, tornando-as desafiadoras para acesso de tecnologias de construção contemporâneas e equipamentos necessários para implementação de projetos. Como resultado, problemas dentro de instalações de armazenamento não são incomuns.

A maioria desses problemas decorre das fundações dos complexos de armazenamento. Problemas notáveis incluem o recalque de lajes de fundo, o afundamento de anéis, o surgimento de rachaduras nos anéis e túneis, infiltração de água em túneis e poços, deformações em linhas de transporte acima dos silos e deformações laterais causadas por forças do vento ou assentamentos diferenciais (CONCIANI, 2016).

Para gerenciamento desses recalques, existem duas soluções de fundações profundas utilizadas ao redor do mundo, o primeiro é a solução em radier estaqueado que é um tipo de fundação que consiste entre a união de estacas profundas com uma laje na superfície do solo que recebe o carregamento do silo.

A solução em inclusão rígida combina um aterro com geossintético e várias estacas distribuídas na extensão do silo. Diferentemente de fundações profundas tradicionais, as inclusões rígidas não visam suportar isoladamente toda a carga da estrutura, mas sim trabalhar em conjunto com o solo para melhorar a capacidade de suporte e limitar deformações.

1.1 Objetivo geral

Determinar a solução de fundação estaqueada mais viável do ponto de vista técnico para silos graneleiros no solo do município de Rio Verde – GO.

1.2 Objetivos específicos

- I. Definir um perfil geotécnico típico para Rio Verde – Goiás;
- II. Escolher um modelo de silo utilizado na cidade;
- III. Realizar o dimensionamento de uma fundação por radier estaqueado para o referido silo;
- IV. Dimensionar uma fundação em radier sobre solo reforçado com inclusões rígidas para o solo de Rio Verde;
- V. Comparar recalques absolutos, diferenciais e a distorção angular entre as soluções;
- VI. Comparar aspectos relacionados a volumes de concreto e de escavação em ambas as soluções.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agronegócio e silos graneleiros

Na agricultura, silos a granel são estruturas criadas especificamente para o armazenamento de grãos, incluindo soja, milho e arroz, entre outros. Os materiais usados para construir um silo variam com base em seu uso pretendido e podem incluir chapas de aço, concreto reforçado, madeira e muito mais (Figura 1). Os silos precisam ser projetados para regular efetivamente a temperatura e a umidade para preservar os produtos, garantindo que os grãos estejam protegidos das condições ambientais externas (FARIA; ROCHA, 2018).



Figura 1. Estrutura típica dos silos metálicos atuais.
Fonte: GSI, (2025).

O objetivo de armazenar produtos agrícolas é manter sua qualidade por longos períodos, preservando seus atributos biológicos, químicos e físicos logo após a colheita (SOUZA FILHO, 2018).

Segundo Silva Neto (2013), atingir o armazenamento prolongado de um produto depende da implementação de práticas adequadas de colheita, limpeza, secagem e controle de insetos, fungos e roedores, além de um processo de aeração eficaz. Consequentemente, as etapas de operação dentro dos silos devem minimizar a degradação para garantir um produto final de maior qualidade.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2019), os tipos de silos mais frequentemente utilizados incluem silos de superfície, silos de trincheira e silos cilíndricos, que podem ser projetados como meia-inclinação ou cisternas (poços). Cada tipo apresenta seu próprio conjunto de prós e contras, particularmente em termos de despesas

de construção, conveniência de carga e descarga e eficácia na preservação de silagem, pois certos projetos de silos apresentam maiores perdas de silagem do que outros.

2.2 Sistema de fundações

A carga da superestrutura é transmitida ao solo por elementos de fundação. Essa transmissão pode assumir várias formas, influenciadas pelas dimensões e geometria do elemento, juntamente com as propriedades geotécnicas do perfil do solo. Atualmente, os projetistas têm uma seleção de sistemas de fundação potenciais a serem considerados para cada cenário e devem se concentrar em selecionar a opção que oferece desempenho ideal ao custo mínimo (SOUZA FILHO, 2018).

Usualmente, a NBR 6122 (ABNT, 2019) que aborda o projeto e a execução de fundações, descreve os dois principais tipos de fundações utilizados em projetos de construção:

- De acordo com a NBR 6122:2019, as fundações rasas são aquelas em que as cargas da estrutura são transmitidas ao solo predominantemente pelas tensões distribuídas sob a base do elemento de fundação. A profundidade de assentamento desse tipo de fundação é pequena em relação à sua dimensão horizontal, geralmente limitada a até duas vezes a menor dimensão da base. As fundações rasas são executadas próximas à superfície do terreno e dependem da capacidade de suporte do solo superficial, exigindo uma investigação geotécnica criteriosa para garantir a segurança e o controle de recalques. Exemplos típicos de fundações rasas incluem sapatas isoladas, sapatas corridas, blocos, radier e sapatas associadas.
- Já as fundações profundas, conforme a NBR 6122:2019, são aquelas que transmitem as cargas da estrutura ao terreno por meio de resistência de ponta, resistência por atrito lateral ou por ambas, a profundidades superiores a duas vezes a menor dimensão da fundação. Esse tipo de fundação é utilizado quando as camadas superficiais do solo não possuem capacidade de carga suficiente ou quando é necessário minimizar recalques diferenciais. As fundações profundas são formadas por elementos esbeltos, como estacas ou tubulões, que podem ser pré-moldados, moldados in loco ou cravados, e possuem a função de transferir os esforços da estrutura para camadas mais resistentes localizadas em maiores profundidades.

Em seu trabalho de 2013, Castillo descreve e define os principais tipos de sistemas de fundações estacadas e radier em uso hoje, conforme a lista abaixo e ilustrado na Figura 2, levando em consideração cargas horizontais (H), verticais (P) e de momento (M).

- Estacas isoladas: elementos de fundação profunda que são cravados ou escavados na terra, transferindo as cargas da superestrutura para o solo por meio da resistência lateral fornecida pelo eixo e pela ponta;
- Radier isolado: são placas de concreto que suportam o peso de todas as colunas da estrutura e o transferem diretamente para a terra. Normalmente, são utilizadas quando o solo apresenta estabilidade geotécnica adequada;
- Grupo de estacas: este termo se refere à combinação de estacas conectadas por um bloco de concreto resistente, que auxilia na distribuição uniforme das cargas nas estacas, garantindo que a interação entre o bloco e o solo não seja considerada ao avaliar a distribuição de tensões no solo;
- Radier estaqueado: o elemento criado por meio da combinação de estacas e um radier ou placa é distinto dos grupos de estacas tradicionais. Essa diferença surge do projeto, que leva em conta a interação entre o bloco ou radier e o solo, permitindo que o elemento de superfície desempenhe um papel na absorção de carga da superestrutura.
- Radier estaqueado combinado: A definição fornecida anteriormente é relevante, mas neste caso, existe uma camada de solo reforçada de aterro compactado que atua como reforço de superfície quando o solo não possui propriedades geotécnicas adequadas. Esta adição melhora a rigidez geral e ajuda a absorver uma parte das forças exercidas no solo.

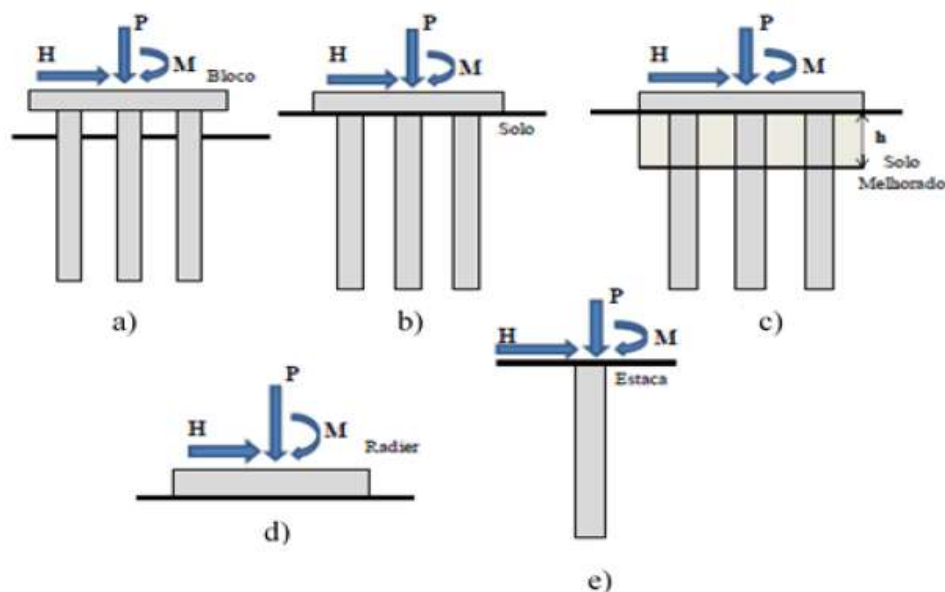


Figura 2. Principais tipos de sistemas de fundações: a) grupo de estacas, b) radier estaqueado, c) radier estaqueado combinado, d) radier isolado, e) estaca isolada.

Fonte: Castillo, (2013).

Conforme descrito na NBR 6122 (2019), a avaliação do desempenho das fundações deve incluir o monitoramento dos recalques registrados na estrutura, o que é necessário nas seguintes situações:

- a) Estruturas onde a carga variável é considerável em comparação à carga total, como silos e tanques de armazenamento de água;
- b) Estruturas que se elevem acima de 55,0 metros do nível do solo até a laje de cobertura do último andar habitável;
- c) Uma relação altura-largura (com base na menor dimensão) superior a quatro;
- d) Fundações ou estruturas não convencionais.

Além do monitoramento de recalques a NBR 6122 preconiza que os recalques diferenciais e totais devem atender ao ELU e ELS da edificação. Para a NBR 6122 Os Estados Limites são condições utilizadas no dimensionamento estrutural para garantir tanto a segurança quanto o desempenho da estrutura durante sua vida útil.

O Estado Limite Último (ELU) está relacionado ao colapso ou perda de estabilidade estrutural, ou seja, à capacidade máxima de resistência da estrutura frente às ações aplicadas, considerando combinações de cargas mais severas. Já o Estado Limite de Serviço (ELS) está associado às condições de utilização, sendo verificados aspectos como deformações excessivas, fissuração, vibrações e deslocamentos que possam comprometer a funcionalidade, o conforto dos usuários ou a durabilidade da estrutura, mesmo que não representem risco de colapso.

O estudo de Dogangun *et al.* (2009) apresenta uma análise detalhada das causas de danos e falhas em silos, estruturas cilíndricas de aço ou concreto armado amplamente utilizadas para armazenamento de materiais a granel, como grãos, cimento e carvão, o artigo destaca que silos são submetidos a condições de carregamento não convencionais, que resulta em modos de falha distintos, como explosões, colapso por cargas assimétricas durante enchimento ou descarga, pressões de solo não uniformes, corrosão, deterioração por ácidos de silagem, colapso estrutural interno, ciclagem térmica e danos sísmicos. Essas falhas frequentemente levam a colapsos catastróficos devido à baixa redundância estrutural e à ausência de caminhos alternativos para redistribuição de cargas.

Ademais, Dogangun *et al.* (2019) enfatiza a importância de considerar as propriedades dos materiais armazenados, como densidade e comportamento de fluxo, no projeto de silos, que segue normas específicas, como a ACI 313 nos Estados Unidos. Condições de solo inadequadas, como solos argilosos com baixa resistência ao cisalhamento, podem causar assentamentos diferenciais e inclinações, conforme ilustrado por casos de falhas em silos no Canadá e no Peru. Além disso, o estudo analisa eventos sísmicos, como os terremotos de

Kocaeli (1999) e Chi-Chi (1999), que resultaram em colapsos devido aos esforços laterais e falhas em colunas de suporte. A corrosão em silos metálicos e a deterioração de silos de concreto por ácidos de silagem também são identificadas como fatores críticos que exigem inspeções regulares.

2.3 Principais tipos de fundações

Conforme observado por Alonso (2020), o projeto de fundações para reservatórios, que são utilizados para armazenamento de líquidos, e silos a granel, destinados a vários tipos de grãos, normalmente adere às mesmas metodologias aplicadas a outras formas estruturais. É essencial ter em mente que as cargas primárias em reservatórios e silos surgem dos produtos que eles contêm. Consequentemente, prever e gerenciar com precisão os recalques de fundação se torna ainda mais crítico do que em edifícios comerciais ou residenciais, onde as ações variáveis, como carga de utilização, geralmente, são um pouco menores do que o peso da estrutura.

Zen (2014) recomenda que fundações rasas sejam normalmente utilizadas para armazenagem a granel, isso porque essas estruturas facilitam uma distribuição de cargas no solo que é eficaz, podendo ser empregadas inclusive em terrenos de baixa resistência. Como outras estruturas, as fundações para reservatórios e silos podem ser construídas como sistemas rasos, empregando sapatas ou anéis de concreto ao longo de suas periferias, que também podem repousar no solo ou ser suportadas por estacas. Além disso, as bases dessas estruturas podem ser suportadas diretamente por estacas, formando um radier estaqueado.

Conforme observado por Gomes e Calil Junior (2005), a estrutura mais eficaz no solo é o silo horizontal não elevado. O custo por tonelada de material armazenado diminui à medida que o tamanho do silo aumenta. Mesmo quando se trata de solos de baixa resistência, é viável criá-los com fundações diretas, levando a recalques que apresentam variações aproximadamente lineares. É aconselhável segmentar as estruturas em seções, utilizando juntas de dilatação para separação. Quando os recalques são mínimos, as juntas podem ser colocadas mais afastadas; no entanto, se os recalques forem significativos, as juntas devem ser posicionadas mais próximas umas das outras. A galeria subterrânea é projetada estaticamente para suportar as cargas da coluna de cereal, seu próprio peso e pressões do solo, enquanto em certas circunstâncias, sua fundação é construída usando estacas.

Em vários cenários envolvendo projeto de silo, as condições do terreno frequentemente se mostram inadequadas para fundações rasas devido a fatores como a baixa capacidade de

suporte ou características únicas como colapsibilidade ou expansividade. Consequentemente, torna-se essencial considerar fundações profundas e mistas e/ou empregar métodos tradicionais para melhoria do solo, como utilizar aterro compactado abaixo da laje inferior do silo (SOUZA FILHO, 2018).

Saeedi; Azizkandi e Taherkhani (2020), em estudo publicado, investigaram experimentalmente o comportamento de fundações *piled raft* conectadas e não conectadas, submetidas a carregamentos excêntricos em solos arenosos, por meio de testes em escala reduzida (1g). A pesquisa analisou o desempenho de radiers quadrados, circulares e em faixa, considerando variáveis como o comprimento das estacas ($L/D = 8$ e 16), em que L é o comprimento e D o diâmetro da estaca; o espaçamento entre estacas ($S/D = 3$ e 6), em que S é a distância entre os eixos; a excentricidade ($e/B = 0,05$ e $0,1$), em que e é a distância entre a linha de ação da carga e o centro geométrico da base, e B é a menor dimensão da fundação; além da presença de uma camada de brita como almofada nos sistemas não conectados. Os resultados indicaram que fundações não conectadas, com estacas mais próximas ($S/D = 3$), apresentaram maior capacidade de carga (por exemplo, $19,8 \text{ kg/cm}^2$ para radier quadrado) e menores assentamentos em comparação às conectadas (18 kg/cm^2), devido à melhoria do solo proporcionada pela almofada de brita. Por outro lado, fundações conectadas mostraram melhor desempenho com estacas mais espaçadas ($S/D = 6$) e maiores comprimentos ($L/D = 16$), com aumentos de até 165% na capacidade de carga.

O estudo destaca que a forma geométrica do radier influencia a capacidade de carga, com fundações quadradas superando as circulares, sugerindo a necessidade de fatores de forma específicos para cálculos de capacidade em sistemas não conectados. Além disso, a análise das superfícies de ruptura revelou que sistemas conectados geram cunhas de falha maiores, enquanto a almofada de brita em sistemas não conectados reduz a formação dessas cunhas, aumentando a capacidade de carga.

Em um estudo de caso no Centro-Oeste brasileiro, Bernardes *et al.* (2021) investigaram radiers estaqueados em silos graneleiros de aço em solos colapsáveis de São Félix do Araguaia, Mato Grosso, utilizando a ferramenta híbrida GARP. A análise paramétrica revelou que um arranjo com fator geométrico de 0,09, composto por estacas de 24 m no radier central e 20 m no anel externo, reduziu recalques totais para cerca de 30 mm e distorções angulares para 1/500, atendendo aos limites operacionais. O aumento do número de estacas além desse fator não trouxe reduções significativas, sendo antieconômico, enquanto a espessura do radier (0,15 m) e a rigidez da camada compactada (1,5 m) tiveram impacto negligível.

2.4 Fundação do tipo inclusão rígidas

Inclusões referem-se a estruturas cilíndricas ou prismáticas que não tocam diretamente a fundação (radier ou sapata) e podem ser instaladas no solo por meio de vários métodos, incluindo estacas escavadas, estacas revestidas, estacas cravadas de concreto pré-moldado, estacas cravadas de aço, micro estacas, estacas helicoidais contínuas, injeção de baixa pressão, injeção de jato e colunas de cascalho. Essencialmente, essas são qualquer forma de fundação profunda que oferece rigidez significativamente maior em comparação ao solo de fundação reforçado (REBOLLEDO *et al.*, 2019).

As inclusões rígidas, segundo Santiago (2021), são elementos de fundação que transferem cargas a camadas mais profundas do solo, sem conexão direta com a estrutura superior, sendo amplamente utilizadas em solos de baixa capacidade de suporte, como os solos tropicais do Centro-Oeste brasileiro. Essas inclusões, geralmente de concreto, são instaladas sob uma plataforma de transferência de carga (PTC), composta por material granular, que distribui as cargas do radier para as inclusões, reduzindo recalques totais e diferenciais (LÓDÓR *et al.*, 2016).

Inclusões rígidas, frequentemente chamadas de soluções de estacas estaqueadas desconectadas ou não conectadas, podem ser facilmente confundidas com uma solução de estacas devido à similaridade nas propriedades do material, conforme observado por Hor *et al.* (2017). No entanto, a introdução de uma plataforma de transferência de carga (PTC), normalmente construída a partir de material granular, situada entre a estaca e o solo, resulta em um comportamento que difere dos métodos tradicionais de estacas. A PTC é crucial para facilitar a transferência de carga nas cabeças das inclusões rígidas e promover recalques uniformes. As interações que ocorrem dentro desse tipo de fundação envolvem fenômenos complexos, abrangendo tanto a transferência de carga na PTC quanto ao longo da estaca.

Inclusões rígidas são elementos feitos de argamassa ou agregado de cimento que servem para fortalecer solos moles, aumentando a capacidade de carga e minimizando recalques. Elas transportam cargas de camadas de solo mais fracas para camadas mais fortes situadas abaixo, permitindo que a carga seja parcialmente suportada pelo solo subjacente sem nenhuma conexão estrutural, reduzindo assim os custos (BLACKBURN; FRANZ, 2016).

O método de inclusão rígida para fundações é predominante em muitos países da Europa e América do Norte, mas continua relativamente desconhecido e subutilizado no Brasil. Isso é evidente, pois a Norma Regulamentadora Brasileira nº 6122 de 2019 (Projeto e Execução de Fundações) não detalha diretrizes de projeto para esse tipo de fundação em suas diretrizes. No

entanto, vários estudos foram conduzidos para promover a adoção da técnica de inclusão rígida, particularmente para grandes estruturas que necessitam de recalques mínimos.

Conforme observado por Malcolm (2013), há duas categorias de inclusões rígidas: aquelas que são pré-fabricadas e aquelas que são moldadas *in loco*. Inclusões pré-fabricadas podem ser vistas na Figura 3:

- Madeira: Entre as técnicas mais antigas para melhorar a qualidade do solo, esse método continua em uso em vários países. No entanto, sua principal desvantagem está em sua vulnerabilidade a ameaças biológicas de fungos e insetos, particularmente em regiões com flutuações no lençol freático ao longo das estações.
- Materiais metálicos: normalmente compreendem tubos cilíndricos ou perfis laminados, com sua escolha influenciada pelas condições corrosivas do local. Eles exibem resistência significativa e geralmente sofrem deslocamento lateral mínimo do piso durante o processo de instalação.
- Concreto: Essencialmente, são estacas de concreto pré-moldado, diferindo principalmente porque permanecem desconectadas da estrutura após a instalação. Podem ou não incluir aço de reforço. Embora exibam alta resistência, sua capacidade de funcionar em ambientes corrosivos é uma vantagem notável. Normalmente, são quadrados ou retangulares na seção transversal, pois o formato circular complica o processo de fabricação desses elementos.



Figura 3. Inclusões pré-fabricadas. a) de madeira b) metálica c) de concreto.
Fonte: Malcom, (2013).

Estudos recentes, como o de Rebolledo *et al.* (2022), avaliaram o desempenho de inclusões rígidas em silos graneleiros no Centro-Oeste do Brasil, em solos porosos argilosos similares aos de Rio Verde – GO. Utilizando modelagem numérica 3D (*Plaxis 3D*), os autores

demonstraram que inclusões rígidas de 15 m de comprimento reduziram recalques totais em 78% (de 34 cm para 10 cm) e distorções angulares em até 97% (de 1/34 para 1/510) em comparação com um radier isolado, atendendo aos limites de utilização (150 mm para recalque total e 1/400 para distorção angular).

Além disso, a solução diminuiu a abertura da junta estrutural radier-anel em 85%, minimizando riscos de fissuras e contaminação de grãos. A presença de inclusões também reduziu em 30% a carga nas estacas do túnel, sugerindo potencial otimização de custos ao substituir parte das estacas convencionais (REBOLLEDO *et al.*, 2022).

Para os dois tipos de fundações estudados, as estacas foram realizadas pelo sistema em hélice contínua.

Uma Hélice Contínua (*Continuous Flight Auger*), se refere a uma estaca de concreto que é moldada in loco por meio do processo de inserção de uma broca helicoidal de rotação contínua no solo. À medida que a broca é extraída, o concreto é simultaneamente injetado por meio de seu eixo central tubular vazado. A colocação de reforço, ocorre somente após o concreto ter sido despejado na estaca (SANTIAGO, 2021).

As principais características deste método incluem: a eliminação de vibrações; altos níveis de produtividade; monitoramento em tempo real da profundidade, inclinação da broca, velocidade de avanço, elevação e rotação da broca durante a perfuração e a colocação do concreto; a capacidade de penetrar em camadas mais resilientes; e a capacidade de criar estacas com diâmetros de até 150 cm e comprimentos que chegam a 38,5 m (SANTIAGO, 2021).

A Figura 4 ilustra as etapas fundamentais envolvidas na execução de uma estaca hélice contínua.

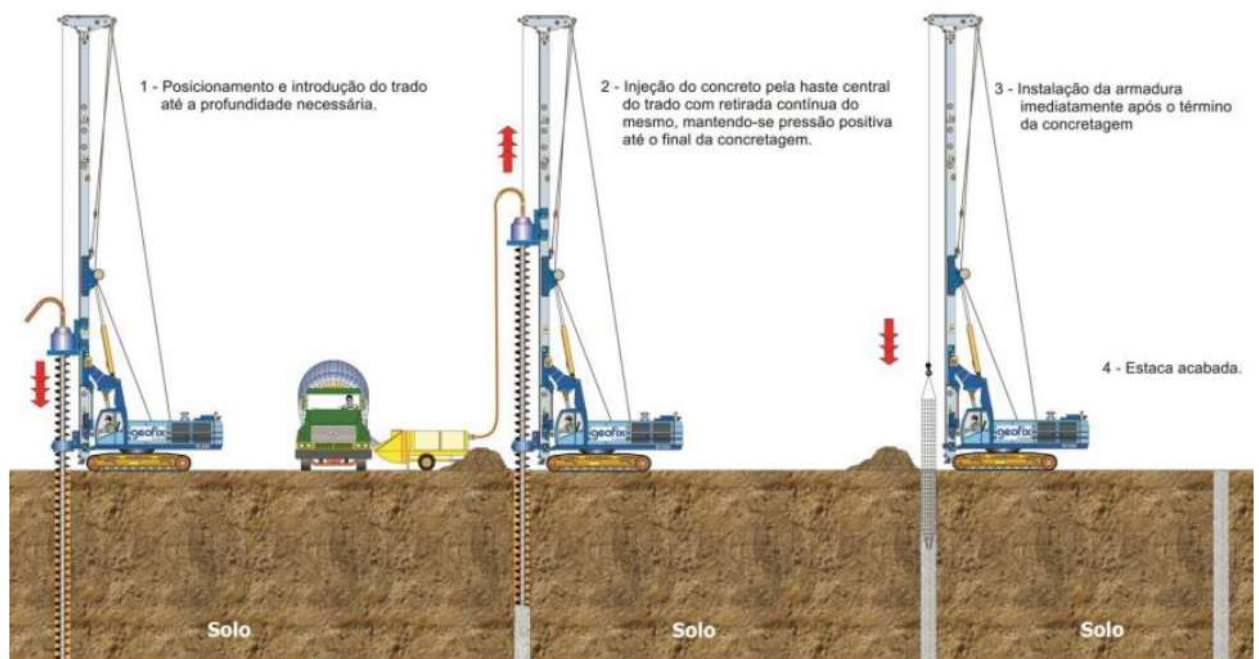


Figura 4 Hélice contínua.

Fonte: Geofix, (2015).

Conforme afirmado por Briançon *et al.* (2015), o uso de inclusões rígidas serve como um método para mitigar problemas de recalque superficial; esta técnica não só é rápida de aplicar, mas também elimina a necessidade de substituição do solo.

Embora a literatura contenha relatos de inclusões rígidas sendo utilizadas em vários projetos de construção, como pontes, rodovias e tanques, sua aplicação em silos de grãos é considerada uma abordagem nova. Isso se deve às referências limitadas na literatura técnica e científica sobre estudos ou implementações desse tipo de fundação para mitigar recalques nas lajes de base de silos e tanques de grãos (SANTIAGO, 2021).

Um estudo de caso ilustrativo sobre inclusões em silos pode ser referenciado no trabalho de Lódör *et al.* (2016) e Móczár *et al.* (2016) na Hungria. Um silo de armazenamento de açúcar foi construído com um diâmetro de 60 m e uma altura de 40 m, ostentando uma capacidade de 60.000 t, conforme mostrado na Figura 5.

Abaixo das vigas de borda e do túnel central, estacas “convencionais” foram empregadas, enquanto inclusões rígidas foram implementadas na seção intermediária da estrutura abaixo de um radier para regular os recalques, ilustrada na Figura 6. O radier era composto de concreto armado com uma espessura de 25 cm, apoiada em um PTC de 2 m de espessura feito de material granular e reforçado com geogrelha. Abaixo do PTC, aproximadamente 280 inclusões de concreto, cada uma com 15 m de comprimento e variando em diâmetro de 1 a 1,2 m, foram instaladas sem reforço estrutural. Além disso, 90 estacas de

concreto armado, medindo entre 12,5 e 14,7 m de comprimento e também de 1 a 1,2 m de diâmetro, foram utilizadas para a viga de borda e o túnel.

Garcia (2021) em inclusões rígidas os resultados mostraram que a carga transmitida às estacas aumenta com o aumento da altura da camada de transferência de carga até uma certa altura onde o efeito de arco não aumenta mais, no caso com geossintético a transferência de carga às estacas aumenta pelo efeito de membrana, o efeito membrana é maior quanto mais rígido seja o geossintético e quanto mais próximo esteja da cabeça das estacas, uma segunda camada de geossintético pode ser útil se existe risco de punção, mas não diminui os recalques do aterro, foi realizada comparação com modelagem numérica.

O uso de geossintéticos na camada de transferência de carga desempenha um papel fundamental no reforço e na melhoria da eficiência do sistema de inclusões rígidas. Quando incorporado, o geossintético atua como uma membrana de tração, mobilizando o chamado efeito membrana, que contribui para redirecionar parte significativa das cargas do aterro para as cabeças das estacas. Esse efeito é mais pronunciado quanto maior for a rigidez do geossintético e quanto mais próximo ele estiver da superfície das inclusões. Além disso, o geossintético ajuda a controlar deformações localizadas, como o risco de punção, promovendo uma melhor distribuição dos esforços e aumentando a estabilidade do aterro sobre o solo reforçado.

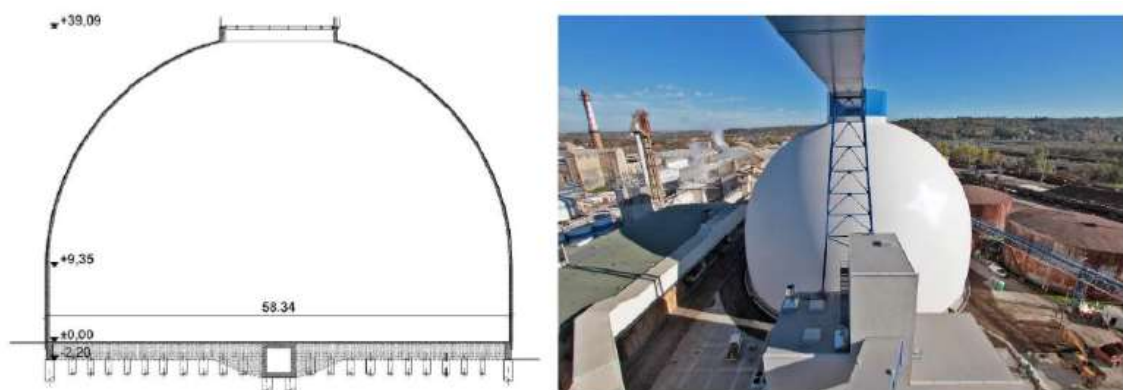


Figura 5. Caraterísticas gerais da estrutura e a fundação.
Fonte: LÓDÖR *et al.*,(2016).

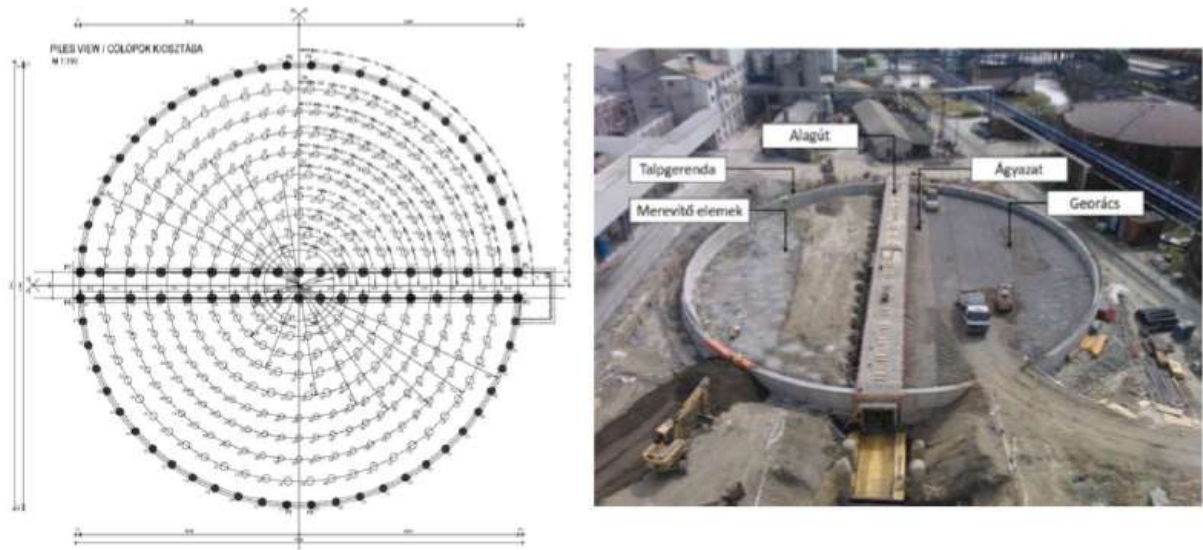


Figura 6. Distribuição em planta das estacas e das inclusões rígidas.

Fonte: LÓDÖR *et al.*, (2016).

Bernuy *et al.* (2018) demonstra outra aplicação de inclusões que se alinha com seu uso em silos a granel, particularmente quando o objetivo principal é minimizar os recalques na laje inferior. Esta pesquisa se concentrou nas fundações de oito tanques de armazenamento de gás liquefeito de petróleo no Kuwait, cada um medindo 96 m de diâmetro e 45 m de altura, e produziu resultados positivos na redução de recalques. Para cada tanque, um total de 1128 inclusões foram instaladas, cada uma com um diâmetro de 0,8 m e um comprimento de 22 m, conforme ilustrado na Figura 7 e Figura 8.

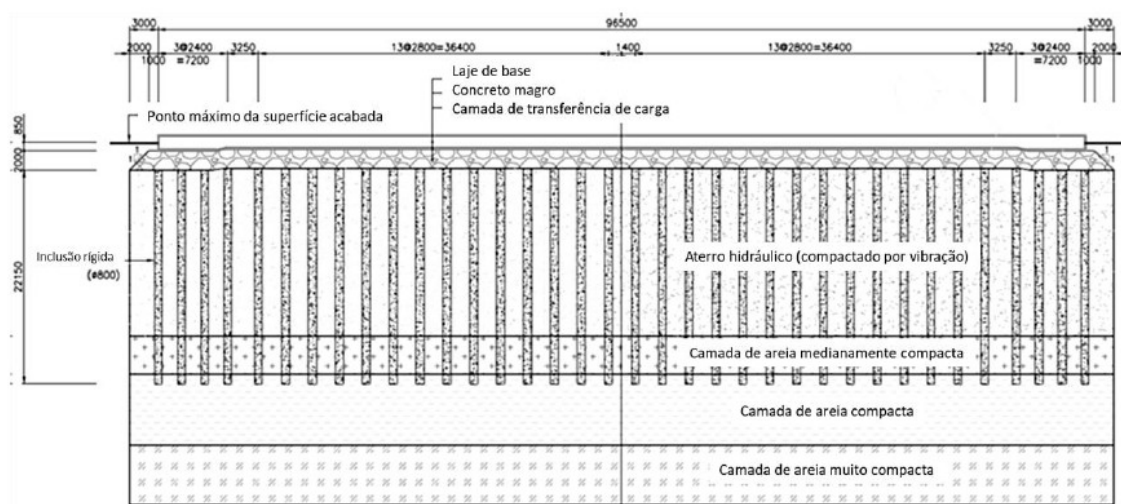


Figura 7. Configuração das inclusões embaixo do tanque.

Fonte: BERNUY *et al.*, (2018).



Figura 8. Vista geral da construção das inclusões e da PTC.
Fonte: BERNUY *et al.*, (2018).

O Projeto Nacional Asiri (2005-2011), conduzido na França com um orçamento de €2,7 milhões e apoio de 39 parceiros, resultou na publicação das "*Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements*" (ASIRI, 2011).

Este trabalho consolidou avanços na técnica de melhoria de solos por meio de inclusões rígidas verticais, uma solução amplamente aplicada em fundações de obras civis e de construção, como lajes, reservatórios e aterros. A pesquisa, coordenada pelo IREX, envolveu experimentos físicos, modelagens numéricas e nove teses de doutorado, gerando uma base de dados robusta para compreender os mecanismos de interação entre solo, inclusões e plataformas de transferência de carga.

As recomendações do projeto abordam desde o projeto, com base no Eurocode 7, até a execução e controle de qualidade, propondo diretrizes práticas para a concepção, construção e monitoramento dessas estruturas. Destacam-se os testes de carregamento estático em inclusões isoladas ou em grupo, controles de integridade estrutural e a instrumentação para monitoramento de deformações e transferência de cargas. A ênfase no uso de geossintéticos e na verificação da espessura e compactação da plataforma de transferência reforça a importância de controles rigorosos para garantir a eficiência do sistema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, levantaram-se os dados referentes ao silo a dimensionar. Trata-se de uma unidade graneleira, modelo 60'18, da marca GSI, projetada para atender a uma capacidade de armazenamento de 74.084 sacas de soja, o que corresponde a aproximadamente 4,44 mil toneladas de produto a serem suportadas pela estrutura (ver Anexo A – Projeto de Capacidade da Unidade).

Em seguida, definiu-se que o estudo seria desenvolvido com base nas condições do município de Rio Verde – GO, em razão da expressiva atividade agrícola da região. A escolha justifica-se pela relevância prática do estudo comparativo proposto, uma vez que a determinação do método de fundação mais adequado pode influenciar diretamente futuros empreendimentos similares. Assim, os resultados obtidos poderão servir como referência técnica, fornecendo subsídios relevantes para decisões relacionadas à segurança estrutural e ao custo-benefício em projetos de unidades graneleiras na região.

3.1 Caracterização do silo

Os silos metálicos modelo 60'18 da GSI são utilizados no armazenamento de grãos devido à sua robustez. Com diâmetro de 18,3 metros e altura média de 25 metros, esses 25 metros são divididos entre altura do corpo de 20,1 metros, altura do teto de 4,7 metros e base de 80 centímetros que pode ser modificada pela necessidade específica do local de construção. Esses silos possuem volume interno bruto de aproximadamente 4.500 a 5.000 m³, sendo capazes de armazenar de 4.000 a 5.500 toneladas de grãos, dependendo da densidade do material, como soja ou milho. A estrutura é projetada por chapas de aço galvanizado de diferentes espessuras e também por colunas metálicas “Stiffeners”. O telhado possui inclinação de 30°, facilitando o escoamento da água, enquanto a base em concreto armado garante a estabilidade necessária a estrutura.

Esses silos são equipados com sistemas que auxiliam na conservação dos grãos armazenados. O sistema de aeração, composto por ventiladores e dutos distribuídos no piso, mantém os grãos em condições ideais de temperatura e umidade, reduzindo o risco de deterioração. O sistema de descarga pode ser feito por fundo cônico ou plano, utilizando transportadores helicoidais ou correias, garantindo eficiência no esvaziamento. Além disso, portas de inspeção laterais e na base facilitam a manutenção e o monitoramento dos grãos,

enquanto sensores integrados permitem o acompanhamento em tempo real de temperatura e umidade.

O silo a ser dimensionado possui características quanto as cargas especificadas pelo fabricante (Anexo A), essas características são usadas no dimensionamento de sua estrutura de base,

- Pressão no fundo = 118 kn/m^2 ;
- Carga total no anel = 430 kn/Montante .

3.2 Caracterização do solo do município de Rio Verde

A região onde foi realizada essa comparação entre os tipos de fundação é o município de Rio Verde, localizado no sudoeste goiano, conforme observado em informações do município (Prefeitura Municipal de Rio Verde), de maneira geral, seu solo é predominantemente composto por latossolos vermelho distrófico e estrófico de textura argilosa a argilo-arenosa com um relevo plano, levemente ondulado, com 5% de declividade, para fins de dimensionar as fundações propostas, e importante salientar algumas de suas características tais como as disposições de camadas, coesão, ângulo de atrito, modulo de *Young* e nível de água.

3.2.1 Disposição de camadas

Conforme o trabalho desenvolvido por Mendes (2024) intitulado “Análise Geológico-Geotécnica da Cidade de Rio Verde - GO e Desenvolvimento de Cartas de Aptidão para Fundações com Base em Sondagens SPT Utilizando QGIS” que apresenta uma caracterização detalhada do solo de rio verde através de laudos de sondagem SPT (*standard penetration test*) e interpolações realizadas em software, o solo do município apresenta diferentes características conforme a profundidade do solo aumenta.

- Até 6 metros: Nesta profundidade, encontra-se principalmente solo argiloso, com valores de NSPT geralmente baixos (normalmente abaixo de 15), o que indica uma menor resistência à penetração. Essa camada superficial é composta por solos mais moles, especialmente na parte norte do município.
- De 7 a 9 metros: Aqui, ocorre uma transição para um solo siltoso, onde os valores de NSPT começam a aumentar gradativamente, indicando uma maior compactação ou mudança na textura do solo.

- De 9 a 14 metros: Predomina o solo arenoso, com valores de NSPT mais altos (entre 20 e 45), o que sugere uma maior resistência mecânica.
- A partir de 14 metros: Encontra-se uma camada que é impenetrável à percussão (NSPT superior a 50), que pode ser interpretada como rocha ou solo muito consolidado, tornando-se predominante em profundidades maiores.

Em síntese o solo de Rio Verde é caracterizado por uma transição de camadas argilosas moles na superfície para solos siltosos, arenosos e, finalmente, uma camada impenetrável em profundidades maiores.

Para a caracterização do NSPT a ser usado para o dimensionamento da fundação, esse processo foi feito pela tabulação mostrada na Figura 9 que consiste na análise e junção das médias dos NSPTs em diferentes localidades no entorno do município de Rio Verde.

TABULAÇÃO SONDAGEM								
Perfil Geológico	Profundidade (m)	MÉDIA NSPT A	MÉDIA NSPT B	MÉDIA NSPT C	MÉDIA N SPT	Composição da Camada SPT A	Composição da Camada SPT B	Composição da Camada SPT C
0	0,45	3,67	4,00	-	3,83			Silte Argiloso
1	1,45	3,33	4,00	11,00	6,11	Argila silto arenosa	Argila Pouco Siltosa	Silte Argiloso
2	2,45	4,00	7,00	6,50	5,83	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Silte Argiloso
3	3,45	6,33	8,00	9,50	7,94	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Argila
4	4,45	4,67	13,00	7,50	8,39	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Argila
5	5,45	5,67	7,00	3,50	5,39	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Argila
6	6,45	10,00	7,00	6,00	7,67	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Silte Argiloso
7	7,45	14,67	7,00	8,00	9,89	Argila siltosa	Argila Pouco Siltosa	Silte Argiloso
8	8,45	19,33	11,50	4,50	11,78	Argila siltosa	Argila Siltosa	Silte Argiloso
9	9,45	37,33	15,00	4,50	18,94	Argila siltosa	Argila Siltosa	Silte Argiloso
10	10,45	54,67	24,50	7,00	28,72	Argila siltosa	Argila Siltosa	Silte Argiloso
11	11,45	32,00	15,50	7,50	18,33	Argila siltosa	Silte Argiloso	Silte Argiloso
12	12,45	33,00	20,00	9,50	20,83	Argila siltosa	Silte Argiloso	Silte Argiloso
13	13,45	35,00	20,50	8,00	21,17	Argila siltosa	Silte Argiloso	Silte Argiloso
14	14,45		22,50	16,50	19,50		Argila Siltosa	Silte Argiloso
15	15,45		22,50	35,50	29,00		Argila Siltosa	Silte Argiloso
16	16,45		37,00	15,00	26,00		Silte Argiloso	Silte Argiloso
17	17,45		44,50	12,50	28,50		Silte Argiloso	Areia Fina
18	18,45		53,50	11,00	32,25		Silte Argiloso	Areia Fina
19	19,45		55,00	13,00	34,00		Silte Argiloso	Areia Fina
20	20,45			10,50	10,50		Silte Argiloso	Areia Fina
21	21,45			11,50	11,50			Areia Fina
22	22,45			15,50	15,50			Areia Fina
23	23,45			16,50	16,50			Areia
24	24,45			33,50	33,50			Silte Arenoso
25	25,45			30,00	30,00			Silte Arenoso

Figura 9. Tabela de tabulação da sondagem.

Fonte: Próprio autor (2025).

Foram fornecidas pela empresa Alvo Agrícola várias sondagens, as quais foram divididas em três grupos (A, B e C), conforme apresentado na Figura 9. As médias desses grupos foram utilizadas para determinar o NSPT final, que representa o comportamento médio do solo na região. Após a tabulação, os dados foram organizados, sendo extraído o NSPT médio final, que foi utilizado para o cálculo da fundação neste trabalho (Figura 10).

SPT			
Perfil Geológico	Profundidade (m)	N SPT	Composição da Camada
0	0,45	4	Silte Argiloso
1	1,45	6	Argila Siltosa
2	2,45	6	Argila Siltosa
3	3,45	8	Argila Siltosa
4	4,45	8	Argila Siltosa
5	5,45	5	Argila Siltosa
6	6,45	8	Argila Siltosa
7	7,45	10	Argila Siltosa
8	8,45	12	Argila Siltosa
9	9,45	19	Silte Argiloso
10	10,45	29	Silte Argiloso
11	11,45	18	Silte Argiloso
12	12,45	21	Silte Argiloso
13	13,45	21	Silte Argiloso
14	14,45	20	Silte Argiloso
15	15,45	29	Silte Argiloso
16	16,45	26	Silte Argiloso
17	17,45	29	Silte Argiloso
18	18,45	32	Silte Argiloso
19	19,45	34	Silte Argiloso
20	20,45	11	Areia Fina
21	21,45	12	Areia Fina
22	22,45	16	Areia Fina
23	23,45	17	Areia Fina
24	24,45	34	Silte Arenoso
25	25,45	30	Silte Arenoso

Figura 10. NSPT final.
Fonte: Próprio autor (2025).

Com isso é possível obter a curva do NSPT médio com relação a profundidade, sendo comparado graficamente pela Figura 11.

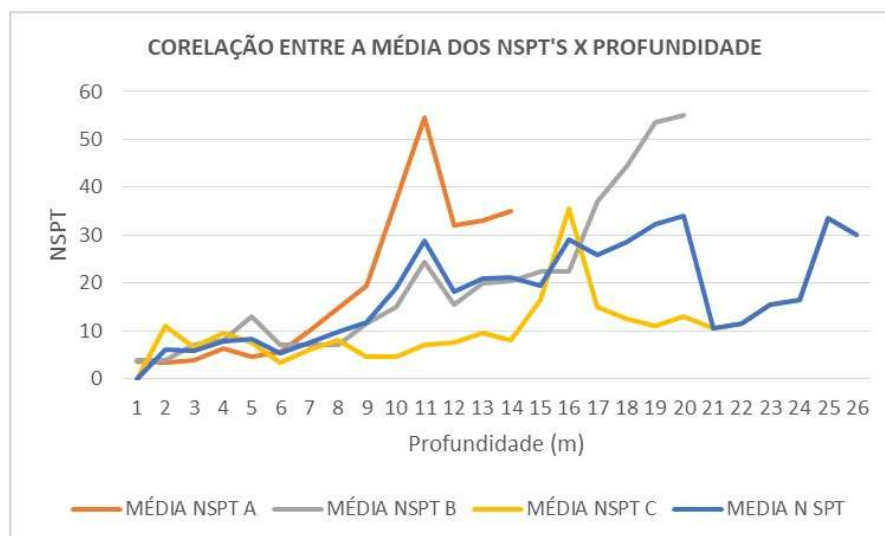


Figura 11. Curva média dos NSPT'S x Profundidade.
Fonte: Próprio autor (2025).

3.2.2 Coesão e ângulo de atrito

Considerando a ausência de dados diretos sobre coesão e ângulo de atrito, os parâmetros foram estimados com base em correlações geotécnicas típicas para solos tropicais do cerrado, classificando-se o solo do município como um latossolo vermelho, com texturas argilosa e areno-argilosa (GEOTECHDATA, 2012)

Sendo a coesão a capacidade do solo de resistir ao cisalhamento, independentemente da tensão normal aplicada, diretamente associada a presença de argila. A estimativa para um latossolo argilo-arenoso varia entre 20 e 40MPa, portando um valor considerável para fins de simplificações seria de 30MPa.

Quanto ao ângulo de atrito ($\tan \phi$) que deriva do ângulo de atrito interno (ϕ), medindo a resistência friccional, influenciada pela fração arenosa. O ângulo de atrito interno para latossolos argilo-arenosos varia de 23° a 28°, com um valor médio de 25°, resultando em um ângulo de atrito de aproximadamente 0,47, obtido pela tangente de 25°.

3.2.3 Modulo de Young

O módulo de Young, indicador da rigidez do solo, foi estimado em 25 MPa. Esse valor situa-se dentro da faixa de 10 a 50 MPa, usual para solos argilosos, conforme apresentado na tabela de referência do módulo de Young para solos. A estimativa considerou a textura do latossolo e sua capacidade de deformação elástica, influenciada pela densidade e pelo teor de umidade do solo. Em solos tropicais, como os latossolos, o módulo pode variar em função do grau de compactação e do uso agrícola.

3.2.4 Nível de água

Para o presente trabalho, foi calculada a média entre o nível de água dos três modelos de NSPT, resultando na profundidade de 11,45 m.

3.3 Dimensionamento teórico das fundações

O dimensionamento foi realizado de acordo com métodos semiempíricos e normas básicas aplicáveis aos casos de fundação em radier estaqueado (NBR 6122) e fundação em radier sobre

inclusão rígida, conforme a norma britânica BS 8006. Esses dimensionamentos tiveram como foco a segurança e o custo-benefício, sendo determinada toda a estrutura de fundação em conformidade com as orientações dessas normas.

3.3.1 Fundação em radier estaqueado

A fundação do tipo radier estaqueado (ou sapata estaqueada) é um sistema híbrido que combina as capacidades de carga de estacas e de um radier (ou sapata). Esse tipo de fundação permite a otimização do projeto, especialmente em situações em que nem um radier isolado nem um grupo de estacas isolado seria suficiente ou econômico. Em um radier estaqueado, a carga total da estrutura é compartilhada entre as estacas e o radier. A proporção de carga suportada por cada componente depende de diversos fatores, como o número e o arranjo das estacas, as propriedades do solo e a rigidez do radier. Ao projetar cuidadosamente o radier estaqueado, os engenheiros podem controlar os recalques e melhorar o desempenho geral da fundação, aproveitando a interação entre os elementos.

Sales (2000) afirma que uma abordagem comum no projeto de radier estaqueado é definir uma proporção-alvo de compartilhamento de carga entre as estacas e o radier. Nesse contexto, a abordagem "*creep piling*", na qual as estacas são projetadas para trabalhar com cargas 60% e 80% da carga de ruptura e, conseqüentemente, um baixo fator de segurança. Enquanto o radier suporta os 40% a 20% restantes. Essa estratégia busca equilibrar a distribuição de carga para minimizar os recalques de longo prazo, especialmente aqueles relacionados à fluência (ou *creep*) do solo, que é a deformação lenta e contínua do solo sob carga constante.

A NBR 6122 (2022) estabelece parâmetros mínimos quanto ao dimensionamento de fundações e também baliza fatores como cargas e métodos executivos.

Decourt-Quaresma em 1996 definiram equações empíricas para cálculos importantes no dimensionamento de estacas por hélice contínua, a definição de métodos para cálculo da parcela de carga resistida pela lateral da estaca e também a parcela de resistência da ponta da estaca. Na Equação 1 e 2 propicia uma análise mais detalhada quanto a possibilidade de qual profundidade mínima se usar para o conjunto de estacas, levando em consideração sempre a segurança do sistema estrutural.

$$P_L = P_{er} * \Delta l * \left(\frac{N'}{3} + 1 \right) \text{ e } P_p = A_p * k' * N' \text{ (Eq. 1 e Eq. 2)}$$

Onde:

P_L = Carga parcela lateral (Tf/m²);

Per = Perímetro da estaca (m);

Δl = altura da área lateral (m);

N' = Média do NSP entre a anterior, a camada em estudo e a posterior;

P_p = Carga parcela de ponta (Tf/m²);

k' = Fator de correção do NSPT para o tipo de solo na camada.

Analise do Radier

O dimensionamento começa com a determinação da tensão admissível que tira-se a definição de tensão para solos argilosos de W. L. COSTA que determina através do dimensionamento geotécnico pelo método semiempírico dado pela Equação 3:

$$\sigma_{adm} = \frac{NSPT}{5} * 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

A área efetiva do radier é obtido pela Equação 4, considerando a iteração entre a estrutura e o terreno de acordo com o método desenvolvido por R. W. Cooke (1986).

$$A_{ef} = A_r - \left(\frac{n * \pi * \emptyset}{4} * K_p \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

A_r = Área do radier (m²);

n = N° de estacas;

$\emptyset$ = Diâmetro das estacas;

K_p = Razão entre o diâmetro da área circular não efetiva ao redor da estaca e o diâmetro da estaca.

Para cálculo da carga última no radier segue como especificado na Equação 5:

$$P_r = \sigma_{ult} * A_{ef} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

P_r = carga admissível do radier (kN);

A_{ef} = Área efetiva do radier (m²).

Agora determina-se as zonas de influência de tensões, as equações do método foram definidas por Newmark-Fadum visando descrever os parâmetros do espalhamento da tensão de acordo com as camadas de solo.

Determinados as camadas do solo a ser estudado define-se uma coluna de uma tabela com as alturas da camada (Δz) em outra preencheu-se com o ponto médio da camada de solo acumulada (Z_i).

Em outras duas colunas coloca-se as razões geométricas necessárias para determinação do fator de influência no ábaco de Fadum (Figura 12).

$$m = \frac{L}{Z_i} \quad e \quad n = \frac{B}{Z_i} \quad (Eq. 6 \text{ e } Eq. 7)$$

Onde:

m = Fator geométrico da largura da base do radier;

L = Largura da face do radier;

Z_i = Profundidade do ponto médio da camada;

n = Fator geométrico do comprimento da base do radier;

B = Comprimento da base do radier.

Feito isso, encontra-se o fator de influência k (Iz no ábaco da Figura 12) para cada camada até atingir a rocha, ou camada com fator de influência do carregamento insignificante.

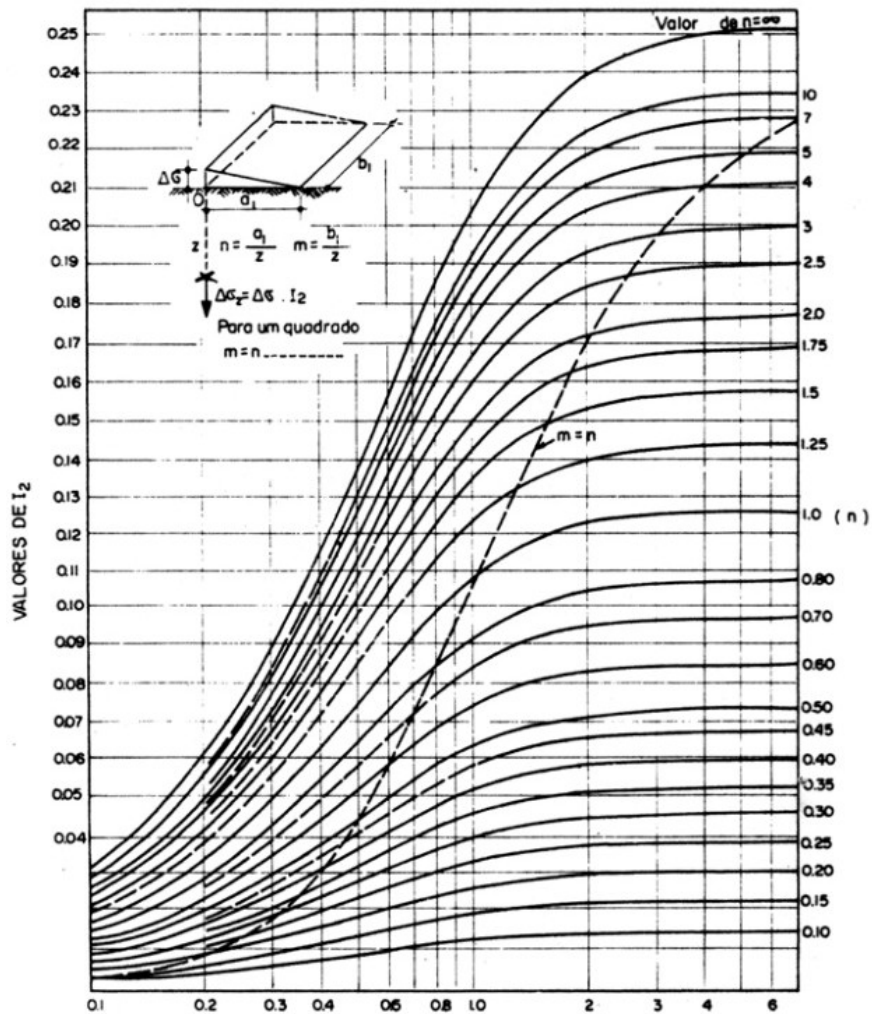


Figura 12. Ábaco de Fadum.
Fonte: Neto (2012).

Com os valores de k encontrados para cada camada determina-se a variação da deformação dada pela Equação 8.

$$\Delta_{\sigma} = 4 * k * q_0 \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

Δ_{σ} = variação de tensão na camada;

q_0 = carga inicial (tensão admissível).

Determinado a variação de tensão calcula-se a variação de deformação (recalque na camada de solo) pela Equação 9.

$$\Delta_{\rho} = \frac{\Delta_{\sigma} * \Delta z}{E} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

Δ_{ρ} = variação da deformação na camada;

E = Módulo de elasticidade do solo.

Para determinação do recalque total ($\sum \Delta \rho$) é necessário fazer a somatória da coluna onde calcula-se o recalque de todas as camadas.

O método de Newark-Fadum considera a somatória dos recalques para determinar o deslocamento máximo no centro de uma área uniformemente carregada. Para calcular a rigidez da placa, assume-se que o recalque médio corresponde a 80% do recalque total no centro. Com base nessa premissa, a rigidez da placa, uma simplificação empírica consiste em assumir que o recalque médio correspondente pode ser calculado com a Equação 10.

$$K_r = \frac{P}{\sum \Delta \rho * 0,8} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

K_r = Rigidez da placa;

P = Carga da placa;

$\sum \Delta \rho$ = Somatória do recalque nas camadas.

Análise das Estacas

Tendo em vista a obtenção da rigidez das estacas primeiramente deve-se determinar o recalque unitário sofrido por cada uma das estacas, que pode ser calculado com a Equação 11.

$$\rho_e = \frac{I_v}{E_s * D} \quad (\text{Eq 11})$$

Onde:

I_v = Fator de influência vertical;

E_s = Modulo de elasticidade médio do solo;

D = Diâmetro da estaca;

ρ_e = Recalque unitário da estaca.

O fator de influência vertical considerando o método de Poulos é calculado com a Equação 12.

$$I_v = I_0 * R_k * R_n * R_v \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

I_0 = Fator de influência da base;

R_k = Fator de correção para rigidez do solo;

R_n = Fator de correção para profundidade da camada compressível;

R_v = Fator de correção para a variação da rigidez do solo com a profundidade.

Os fatores de correção da formula para a influência vertical são calculados de acordo com gráficos propostos por Poulos e Davis (1998) que após vários testes chegaram a curvas que determinam o comportamento entre as tensões entre o solo e a estaca as curvas da Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 foram usadas para definição dos fatores no presente trabalho.

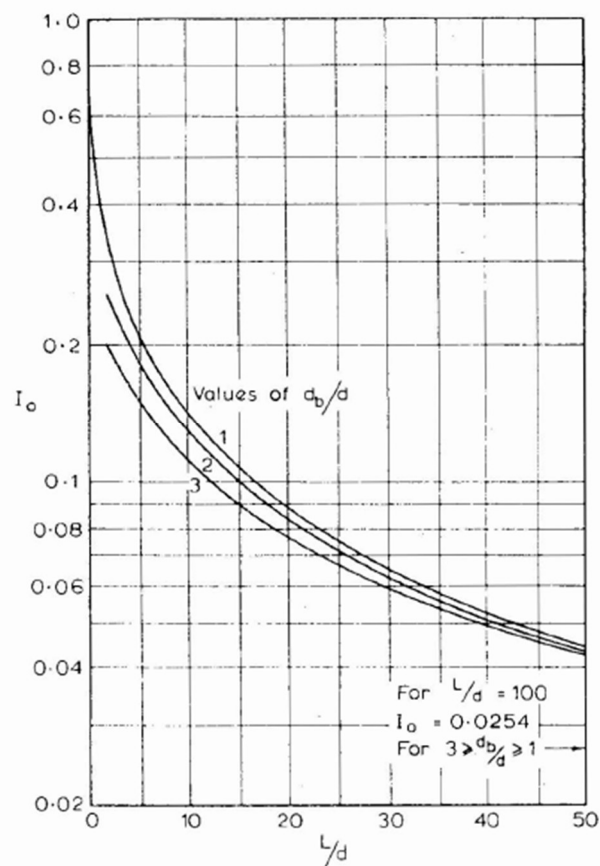


Figura 13. Gráfico de determinação do fator de influência inicial.
Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 101.

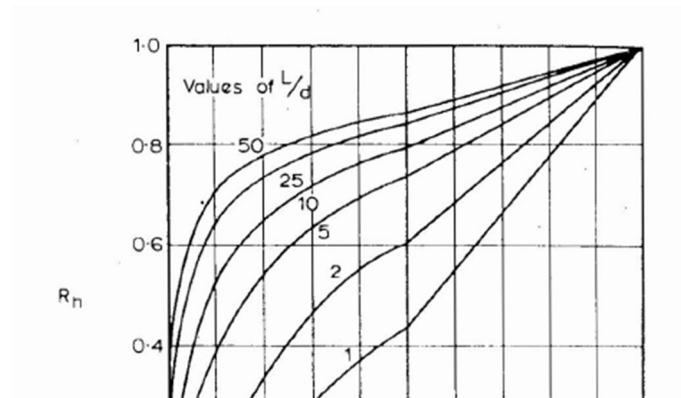


Figura 14 Gráfico fator de correção da profundidade.
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 101.

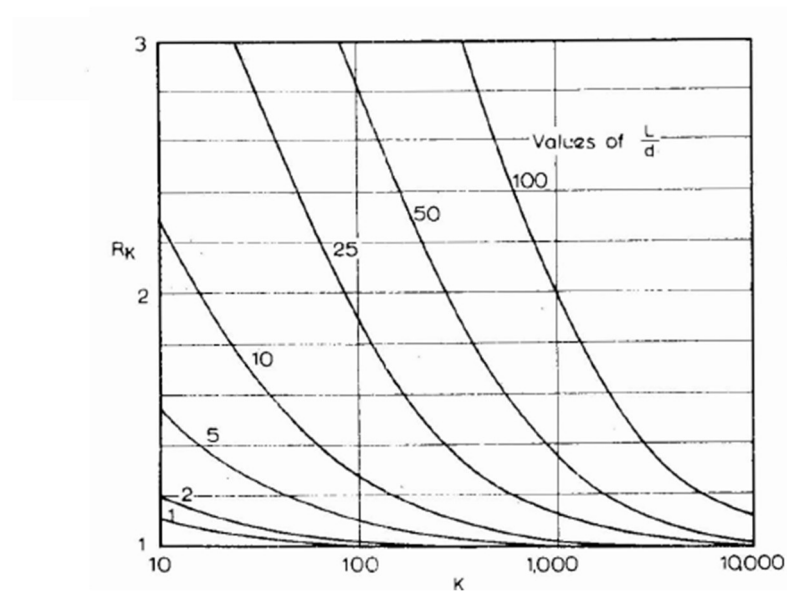


Figura 15. Gráfico fator de correção da compressibilidade.
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 101.

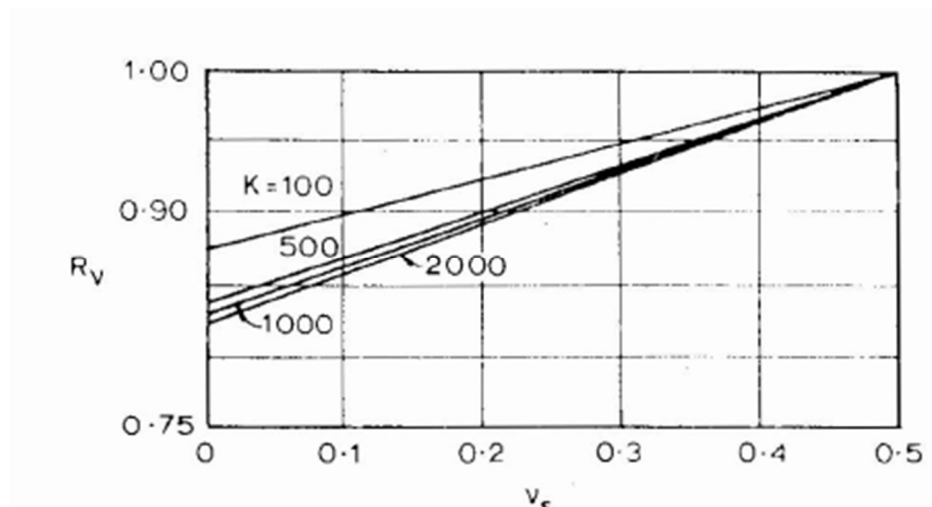


Figura 16. Gráfico de definição da correção do fator de proporção do coeficiente de Poisson.
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 101.

A análise das interações entre as estacas começa pela determinação das distâncias entre cada uma delas, determinadas as distâncias, assim, calcula-se os parâmetros para determinação do deslocamento por influência entre elas, o primeiro parâmetro é calcular como a carga de uma estaca afeta o assentamento da outra, isso pode ser obtido com a Figura 17 com a relação entre o diâmetro da estaca e a distância entre elas.

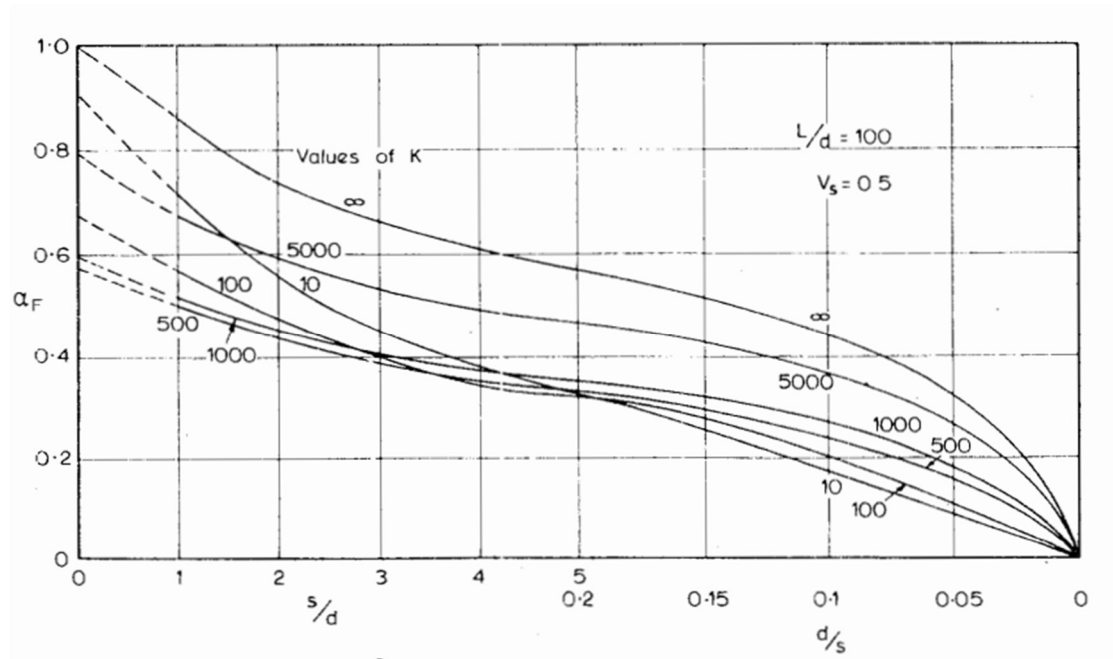


Figura 17. Gráfico de definição do fator interação entre as estacas.
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 112.

Esse gráfico da figura anterior é usado para uma relação onde $L/d = 100$ para valores diferentes é necessário fazer uma interpolação entre esse gráfico e onde $L/d = 25$, como essa interpolação deve ser feita para cada iteração, utilizou-se o software DEFPIG desenvolvido por Poulos (1980), que automatiza esse cálculo com o lançamento de dados pré-determinados pela sequência do trabalho, as Figuras 18 e 19 mostram gráficos onde define-se os fatores de interação vertical e horizontal.

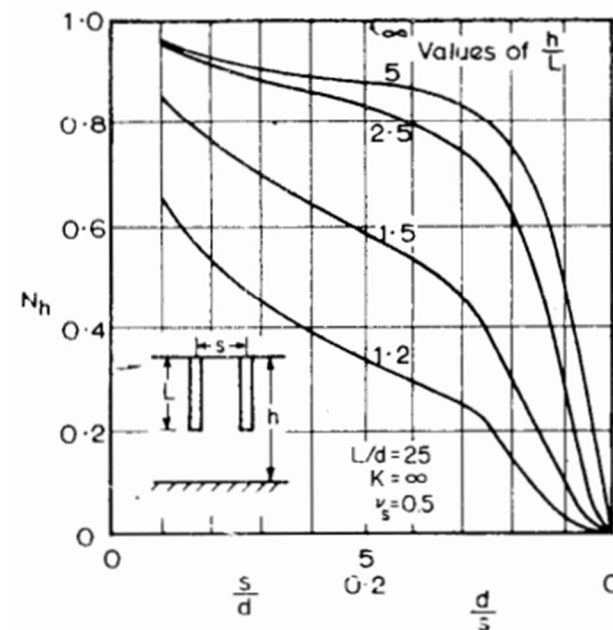


Figura 18. Correção por iteração horizontal N_h .
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 113.

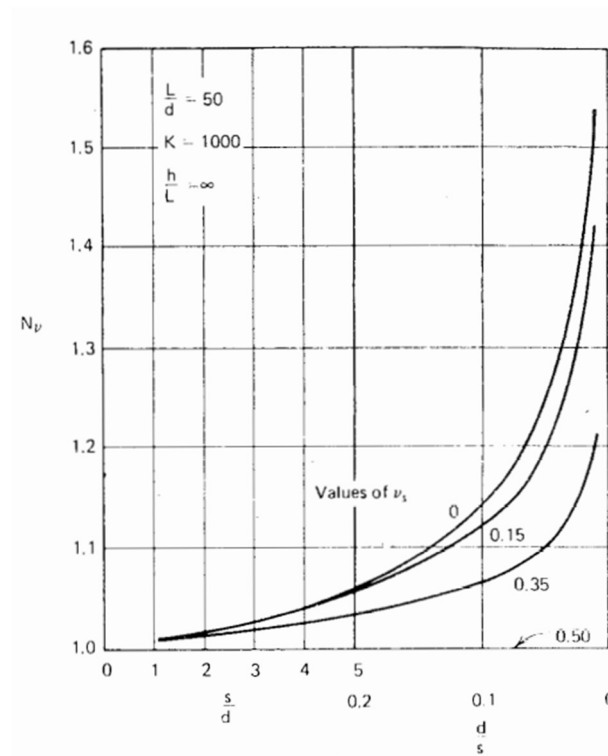


Figura 19. Correção por iteração vertical N_v .
 Fonte: Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, p. 113.

Com os dados organizados como uma tabela em linhas e colunas calcula-se os deslocamentos unitários para cada iteração dados pela Equação 13.

$$\rho_{\text{unit}} = \alpha_i * N_h * N_v \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

N_h = Correção por iteração horizontal;

N_v = Correção por iteração vertical;

ρ_{unit} = Deslocamento unitário.

Feita a coluna com os deslocamentos unitários, a seguinte equação para a determinação do deslocamento total nas estacas que pode ser determinado pela Equação 14.

$$\rho_i = \sum_{j=1}^i \alpha_{ij} * P_j * \rho_{\text{unit}} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

ρ_i = Somatório dos deslocamentos unitários;

P_j = Carga em cada estaca.

A equação 12 fornece a primeira parte de um sistema para o cálculo dos parâmetros totais de interação, nos quais são identificados a carga e o deslocamento das estacas analisadas. A capacidade de carga última do conjunto de estacas pode ser determinada pela Equação 15, em que os coeficientes de correção para a ponta e para a lateral das estacas foram definidos segundo o método semiempírico proposto por Decourt-Quaresma (1996).

$$P_{\text{ult}} = n[(\alpha * r_p * A_p) + (\beta * r_l * A_l)] \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

P_{ult} = Carga última das estacas;

n = N° de estacas;

r_p = Resistência de ponta da estaca;

A_p = Área da ponta da estaca;

α = Coeficiente de ajuste da ponta da estaca;

β = Coeficiente de ajuste da lateral da estaca;

r_l = Resistência lateral da estaca;

A_l = Área lateral da estaca.

Logo a rigidez do grupo de estacas pode ser determinada pela Equação 16.

$$K_{pg} = \frac{P_{ge}}{\rho_e} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

K_{pg} = Rigidez do grupo de estacas;

P_{ge} = Carga aplicada ao grupo de estacas;

ρ_e = Deslocamento correspondente.

Análise Radier Estaqueado

Considerando o estaqueamento, a carga última do radier foi dada pela dada pela Equação 17.

$$P_r = \sigma_{ult} * A_{ef} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

P_r = Carga do radier (kN);

σ_{ult} = Tensão última do radier (kPa);

A_{ef} = Área efetiva do radier.

Logo a carga última do conjunto (P_{pr}) entre as estacas e o radier é dado pela Equação 18.

$$P_{pr} = P_r + P_{ge} \quad (\text{Eq. 18})$$

Para o cálculo do radier estaqueado, a rigidez do conjunto (K_{pr}) é determinada pela Equação 19.

$$K_{pr} = \left[\frac{1 - 0,6 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)}{1 - 0,64 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)} \right] * K_{pg} \quad (\text{Eq. 19})$$

A partir dessa rigidez, determinam-se as parcelas de carga suportadas por cada elemento do conjunto radier-estacas, sendo esperado que a contribuição das estacas seja significativamente maior do que a do radier.

Para a execução da curva que correlaciona carga e recalque da fundação, o primeiro trecho é determinado considerando a imobilização das estacas até a carga máxima, sendo o excesso de carga suportado pelo radier, conforme as Equações 20 e 21.

$$P_A = \frac{P_{ge}}{(\% \text{ de contribuição do grupo de estacas})} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$\rho_A = \frac{P_A}{K_{pr}} \quad (\text{Eq. 21})$$

O segundo trecho da curva apenas o radier continua oferecendo a capacidade de carga e conseqüentemente a rigidez do conjunto, a determinação do trecho onde (P_B = Carga última do radier) o deslocamento pode ser calculado de acordo com a Equação 22.

$$\rho_B = \frac{P_{pr} - P_A}{K_r} + \rho_A \quad (\text{Eq. 22})$$

O resultado esperado é uma curva conforme o padrão da Figura 20, na qual constarão todos os dados necessários para a análise de carga e recalque da fundação, devendo ser considerados os fatores de segurança.

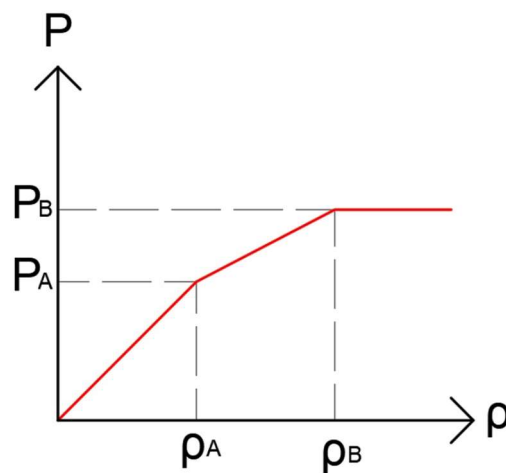


Figura 20. Gráfico de comportamento da relação entre a carga e recalque da fundação.
Fonte: Próprio autor (2025).

Utilização do software GARP

Na análise do comportamento e dimensionamento de estacas, foi empregado o software GARP (*Geotechnical Analysis of Rigid Piles*), Poulos (1994), uma ferramenta computacional especializada em simular a interação solo-estrutura sob diversas condições geotécnicas e de carregamento. O GARP permite modelar estacas considerando a complexidade do solo ao seu redor, levando em conta diferentes perfis estratigráficos e variações nas propriedades do solo. Essa capacidade é crucial para uma avaliação precisa do desempenho da fundação, especialmente em projetos que exigem uma compreensão detalhada da resposta estrutural e do solo sob carregamentos verticais e laterais.

O software GARP adota modelos semiempíricos fundamentados em dados de ensaios de campo e nas propriedades geotécnicas do solo, esses modelos combinam princípios teóricos com observações experimentais, permitindo uma abordagem mais realista da interação entre a estaca e o solo. Dessa forma, o GARP possibilita a análise de parâmetros geotécnicos essenciais, como a capacidade de carga da estaca, a distribuição de tensões ao longo do fuste e na base, além dos recalques esperados sob diferentes cenários de carregamento. A utilização desses modelos semiempíricos contribui para que as análises reflitam adequadamente as condições *in situ*.

3.3.2 Fundação em radier sobre inclusão rígida

A norma BS 8006 (2010) fornece recomendações e diretrizes para técnicas de reforço em solos, sendo amplamente aplicada em projetos de geotecnia que envolvem o uso de geossintéticos. Essa norma foi utilizada como referência para o dimensionamento do radier estaqueado por inclusão rígida.

A norma prevê diversas verificações; entretanto, para o presente trabalho, considerando a fundação predeterminada como um radier estaqueado, são necessárias apenas as verificações relativas ao reforço e ao estaqueamento.

O espaçamento máximo entre as estacas considerando uma malha quadriculada pode ser calculado com a Equação 23.

$$s = \sqrt{\frac{Q_p}{(\gamma * H + ws)}} \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde:

s = Espaçamento máximo entre as estacas;

γ = Peso unitário do aterro;

H = Altura do aterro;

ws = Sobrecarga do aterro.

Para evitar deformações diferenciais na superfície do aterro, deve-se seguir a relação apresentada na Equação 24, relativa à altura do aterro e ao espaçamento entre os blocos.

$$H \geq 0,7 * (s - a) \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde:

a = Largura do bloco.

Logo prossegue-se para o dimensionamento da carga no reforço que foi determinado pelo método de Marston's como citado pela BS 8006-1 (2010) e descrito pela Equação 25.

$$\frac{p'c}{\sigma'v} = \left(\frac{C_c * a}{H} \right)^2 \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde:

p'c = Tensão vertical nos blocos;

$\sigma'v$ = Tensão vertical média fatorada na base do aterro;

C_c = Coeficiente de arqueamento.

Sendo a tensão vertical fatorada na base do aterro determinada pela equação 26:

$$\sigma'v = ffs * \gamma * H + fq * ws \quad (\text{Eq. 26})$$

Onde:

ffs = fator parcial para o peso unitário do solo;

fq = fator de carga parcial para cargas aplicadas externamente.

Os fatores de carga são determinados pela BS 8006-1, conforme o estado limite último e estado limite de serviço para os casos da carga de aterro, carga externa e cargas de tráfego.

ffs para carga de aterro E.L.U = 1,3 / E.L.S = 1,0

ffs para cargas externas estática, E.L.U = 1,2 / E.L.S = 1,0

ffs para cargas externas dinâmicas, E.L.U = 1,3 / E.L.S = 1,0

O coeficiente de arqueamento pode ser determinado pela equação 26 para estacas de ponta e pela Equação 27 para estacas flutuantes.

$$ffs = 1,95 * \frac{H}{a} - 0,18 \quad (\text{Eq. 26}) \quad ffs = 1,95 * \frac{H}{a} - 0,07 \quad (\text{Eq. 27})$$

Posteriormente determina-se carga distribuída (WT) suportada pela armadura entre as fundações de estacas adjacentes, pelas equações 28 e 29, conforme a altura do aterro (H).

Para o caso de $H > 1,4 * (s - a)$

$$\mathbf{WT} = \frac{1,4 * s * ffs * \gamma * (s - a)}{s^2 - a^2} * \left((s^2 - a^2) * \left(\frac{p'c}{\sigma'v} \right) \right) \quad (\text{Eq. 28})$$

Para o caso de $0,7 * (s - a) \leq H \leq 1,5 * (s - a)$

$$\mathbf{WT} = \frac{s * (ffs * \gamma * H + fq * ws)}{s^2 - a^2} * \left((s^2 - a^2) * \left(\frac{p'c}{\sigma'v} \right) \right) \quad (\text{Eq. 29})$$

Para o dimensionamento do reforço, utilizou-se o método de Hewlett e Randolph, que se baseia na interação entre o solo e o reforço, empregando o conceito de arcos de solo. Esse conceito refere-se à redistribuição das cargas do aterro para as estacas, decorrente da diferença de rigidez entre o solo mole e as estacas, minimizando a carga transmitida diretamente ao solo e otimizando a transferência de esforços no sistema de fundação.

A proporção do peso do aterro suportado diretamente pelas estacas pode ser calculada a partir da equação 30.

$$E_{crown} = 1 - \left(1 - \left(\frac{a}{s} \right)^2 \right) * (A - A * B + C) \quad (\text{Eq. 30})$$

Sendo A, B, C coeficientes de cálculos, dado pelas equações 31, 32, 33.

$$A = \left(1 - \left(\frac{a}{s} \right) \right)^{2 * (K_p - 1)} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$B = \frac{S}{\sqrt{2} * H} * \frac{2 * K_p - 2}{3 * K_p - 2} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$C = \frac{s - a}{\sqrt{2} * H} * \frac{2 * K_p - 2}{3 * K_p - 2} \quad (\text{Eq. 33})$$

Onde o coeficiente de empuxo passivo do solo (K_p), pode ser obtido através da equação 34.

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \quad (\text{Eq. 34})$$

Sendo:

ϕ = ângulo de atrito interno do solo

Posteriormente pode-se determinar a eficiência de arqueamento (E_{cap}) na laje de fundação, dado pela equação 35.

$$E_{cap} = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (\text{Eq. 35})$$

Sendo β um coeficiente, obtido pela equação 36

$$\beta = \frac{2 * K_p}{(K_p + 1) * \left(1 + \frac{a}{s}\right)} * \left(1 - \frac{a}{s}\right)^{-K_p} - \left(1 + K_p * \frac{a}{s}\right) \quad (\text{Eq. 36})$$

Desta forma podem-se determinar a carga distribuída máxima (W_T) e mínima ($W_{T\min}$) pelas equações 37 e 38.

$$W_T = \frac{s * (ffs * \gamma * H + fq * ws)}{(s^2 - a^2)} * (1 - E_{\min}) * s^2 \quad (\text{Eq. 37})$$

Sendo $E_{\min}$ o menor valor entre E_{crown} e E_{cap} .

$$W_{T\min} = s * 0,15 * (ffs * \gamma * H + fq * ws) \quad (\text{Eq. 37})$$

Por fim, com a determinação da carga distribuída agindo sobre a armadura, pode-se obter a carga de tração (T_{rp}) na armadura pela equação 38.

$$T_{rp} = \frac{W_T * (s - a)}{2 * a} * \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Onde:

ε = Tensão na armadura.

3.4 Análise comparativa

A verificação da segurança da fundação é comumente realizada por meio da avaliação da distorção angular, sendo o limite de 1/500 amplamente adotado como referência. Esse valor, recomendado pelo trabalho clássico de Bjerrum (1963) *Allowable Settlement of Structures*, busca garantir um equilíbrio entre a segurança estrutural e a continuidade operacional dos silos, evitando recalques diferenciais excessivos sem exigir fundações demasiadamente rígidas que possam encarecer o projeto de forma desnecessária. Para comparação foi analisado o volume em m³ de concreto para cada solução.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Concepção do projeto inicial para os procedimentos de cálculo.

Para execução dos procedimentos de cálculo foi determinado a quantidade de estacas na base do silo dada na figura 21.

Pressão na laje de fundo kN/m²	Área da base do silo (m²) Ø18,3	Carga total (kN)	60% Carga (kN)	Carga unitária da estaca (kN)	Quantidade de estacas
118	262,89	31020,86	18612,5	750	24,82

Tabela 1 - Cálculos iniciais do projeto de fundações.
Fonte: Próprio autor (2025).

A pressão no fundo da laje é de 118 kN/m², para área de 262,89m². Considerando uma abordagem “*creep-pilling*”, 60% das cargas devem ser aguentadas pelas estacas. Segundo a NBR 6122, a carga unitária de uma estaca com diâmetro de 0,4 m deve ser de 75 Tf em condições normais de execução. Com base nisso, ao dividir a parcela das estacas pela carga unitária determinada pela norma, obtém-se uma quantidade mínima de 25 estacas para o dimensionamento dessa fundação. A Figura 22 apresenta a disposição das estacas na base do silo.

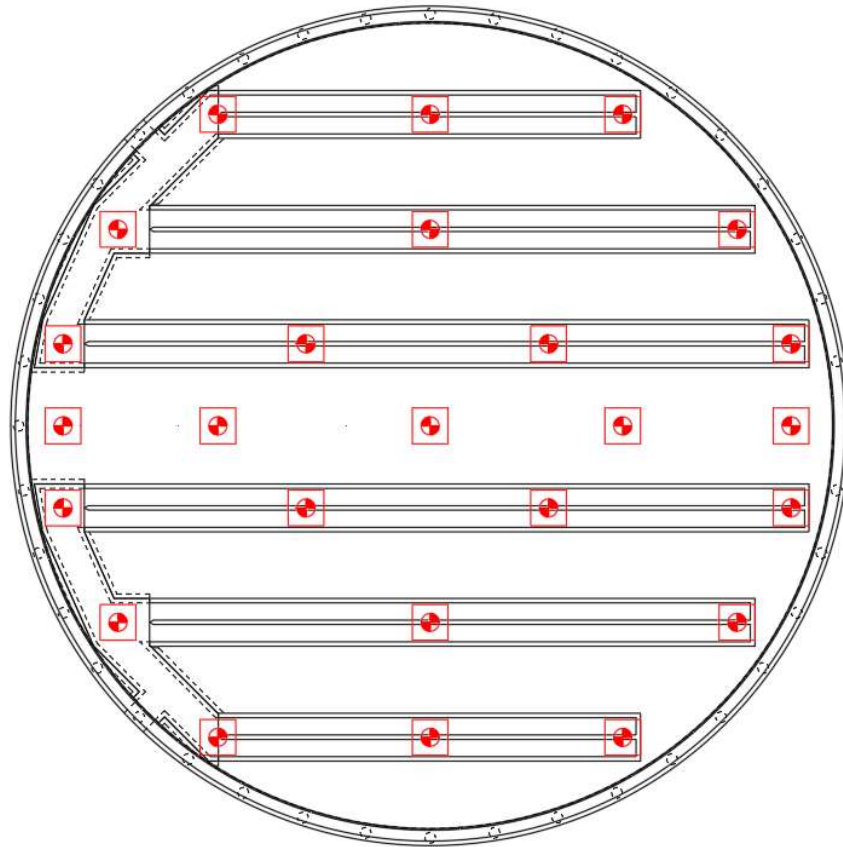


Figura 21 Representação das estacas na base do silo.
Fonte: Próprio autor (2025).

Para o dimensionamento da profundidade das estacas, utilizou-se o método de Decourt-Quaresma. Para realizar essa análise, primeiramente define-se, para cada camada, o valor do coeficiente k' , determinado para cada amostra de NSPT conforme a Figura 23.

VALORES DE K'	
Tipo de solo	K' (kN/m ²)
Argila	120
Silte argiloso	200
Silte arenoso	250
Areia	400

Figura 22 - Valores tabelados de k' para cada camada.
Fonte: Próprio autor (2025).

A profundidade das estacas é definida a partir do ponto em que a resistência total do trecho supera o valor estabelecido como carga unitária de cada estaca. Conforme indicado na

figura 21, esse valor corresponde a 75kN. Assim, os cálculos são realizados até que se obtenha a resistência combinada entre as parcelas de ponta e lateral das estacas compatível com o valor definido pelo método de Decourt-Quaresma. A Figura 24 demonstra que, para a profundidade de 14,45 metros, obtém-se 785,9 kN, valor que atende à carga unitária mínima para cada estaca.

amostra	tipo de solo	prof	N	N'	k'	qs	ø	qp	PL	PP	Qu	QAdmin
	relatório spt	m	n° nspt no relatorio	media 3 camadas	tab. 3 (tf/m²)	kN	m	kN	kN	kN	kN	kN
0	Silte Argiloso	0,45	3,83	4,97	200,00							
1	Argila Siltosa	1,45	6,11	5,26	120,00	22,8		994,4	28,6	125,0	66,1	33,1
2	Argila Siltosa	2,45	5,83	6,63	120,00	30,4	0,4	631,1	76,3	79,3	100,1	50,1
3	Argila Siltosa	3,45	7,94	7,39	120,00	29,4	0,4	795,6	111,0	100,0	141,0	70,5
4	Argila Siltosa	4,45	8,39	7,24	120,00	36,5	0,4	886,7	183,4	111,4	216,8	108,4
5	Argila Siltosa	5,45	5,39	7,15	120,00	38,0	0,4	868,9	238,5	109,2	271,3	135,6
6	Argila Siltosa	6,45	7,67	7,65	120,00	28,0	0,4	857,8	210,8	107,8	243,2	121,6
7	Argila Siltosa	7,45	9,89	9,78	120,00	35,6	0,4	917,8	312,8	115,3	347,4	173,7
8	Argila Siltosa	8,45	11,78	13,54	120,00	43,0	0,4	1173,3	431,9	147,4	476,1	238,1
9	Silte Argiloso	9,45	18,94	19,81	200,00	49,3	0,4	1624,4	557,1	204,1	618,3	309,2
10	Silte Argiloso	10,45	28,72	22,00	200,00	73,1	0,4	3963,0	919,2	498,0	1068,6	534,3
11	Silte Argiloso	11,45	18,33	22,63	200,00	105,7	0,4	4400,0	1461,7	552,9	1627,5	813,8
12	Silte Argiloso	12,45	20,83	20,11	200,00	71,1	0,4	4525,9	1072,3	568,7	1243,0	621,5
13	Silte Argiloso	13,45	21,17	20,50	200,00	79,4	0,4	4022,2	1297,8	505,4	1449,5	724,7
14	Silte Argiloso	14,45	19,50	23,22	200,00	80,6	0,4	4100,0	1417,2	515,2	1571,8	785,9
15	Silte Argiloso	15,45	29,00	24,83	200,00	75,0	0,4	4644,4	1413,7	583,6	1588,8	794,4
16	Silte Argiloso	16,45	26,00	27,83	200,00	106,7	0,4	4966,7	2144,7	624,1	2331,9	1165,9
17	Silte Argiloso	17,45	28,50	28,92	200,00	96,7	0,4	5566,7	2065,1	699,5	2274,9	1137,5
18	Silte Argiloso	18,45	32,25	31,58	200,00	105,0	0,4	5783,3	2375,0	726,8	2593,1	1296,5
19	Silte Argiloso	19,45	34,00	25,58	200,00	117,5	0,4	6316,7	2805,4	793,8	3043,6	1521,8
20	Areia Fina	20,45	10,50	18,67	400,00	123,3	0,4	5116,7	3099,7	643,0	3292,6	1646,3
21	Areia Fina	21,45	11,50	12,50	400,00	45,0	0,4	7466,7	1187,5	938,3	1469,0	734,5
22	Areia Fina	22,45	15,50	14,50	400,00	48,3	0,4	5000,0	1336,2	628,3	1524,7	762,4
23	Areia Fina	23,45	16,50	21,83	400,00	61,7	0,4	5800,0	1782,3	728,8	2001,0	1000,5
24	Silte Arenoso	24,45	33,50	26,67	250,00	65,0	0,4	8733,3	1960,4	1097,5	2289,6	1144,8
25	Silte Arenoso	25,45	30,00	31,75	250,00	121,7	0,4	6666,7	3822,3	837,8	4073,6	2036,8

Figura 23 - Definição da profundidade das estacas pelo método Decourt-Quaresma

Fonte: Próprio autor (2025).

4.2 Dimensionamento por radier estaqueado

No software GARP, é necessário realizar o lançamento completo de todas as etapas, numeradas de 1 a 14, conforme demonstrado na Figura 25. Essas etapas compreendem desde a definição das propriedades do solo e das estacas até a geometria do radier, além das cargas atuantes na estrutura. Com todos os dados inseridos, o programa executa a interação entre as estacas e o radier, processo essencial para sistemas de fundação do tipo radier estaqueado, devido à complexa interação solo-estaca-radier. Essa análise interativa permite considerar

efeitos de grupo, redistribuição de esforços e rigidez relativa entre os elementos, proporcionando um dimensionamento mais preciso e seguro do conjunto fundacional.

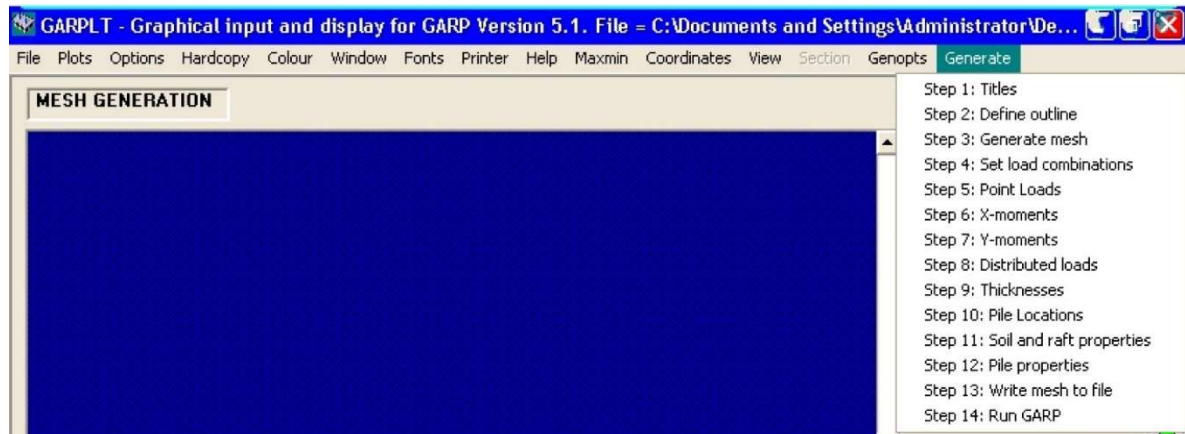


Figura 24 Interface e parâmetros software GARP.

Fonte: Próprio autor (2025).

No caso de um silo de planta circular, torna-se necessário converter todas as coordenadas em um sistema cartesiano compatível com o GARP. Para isso, utilizou-se o AutoCAD para gerar uma malha quadriculada sobre o perímetro do silo, conforme ilustrado na Figura 26, onde cada interseção representa um ponto de coleta de dados.

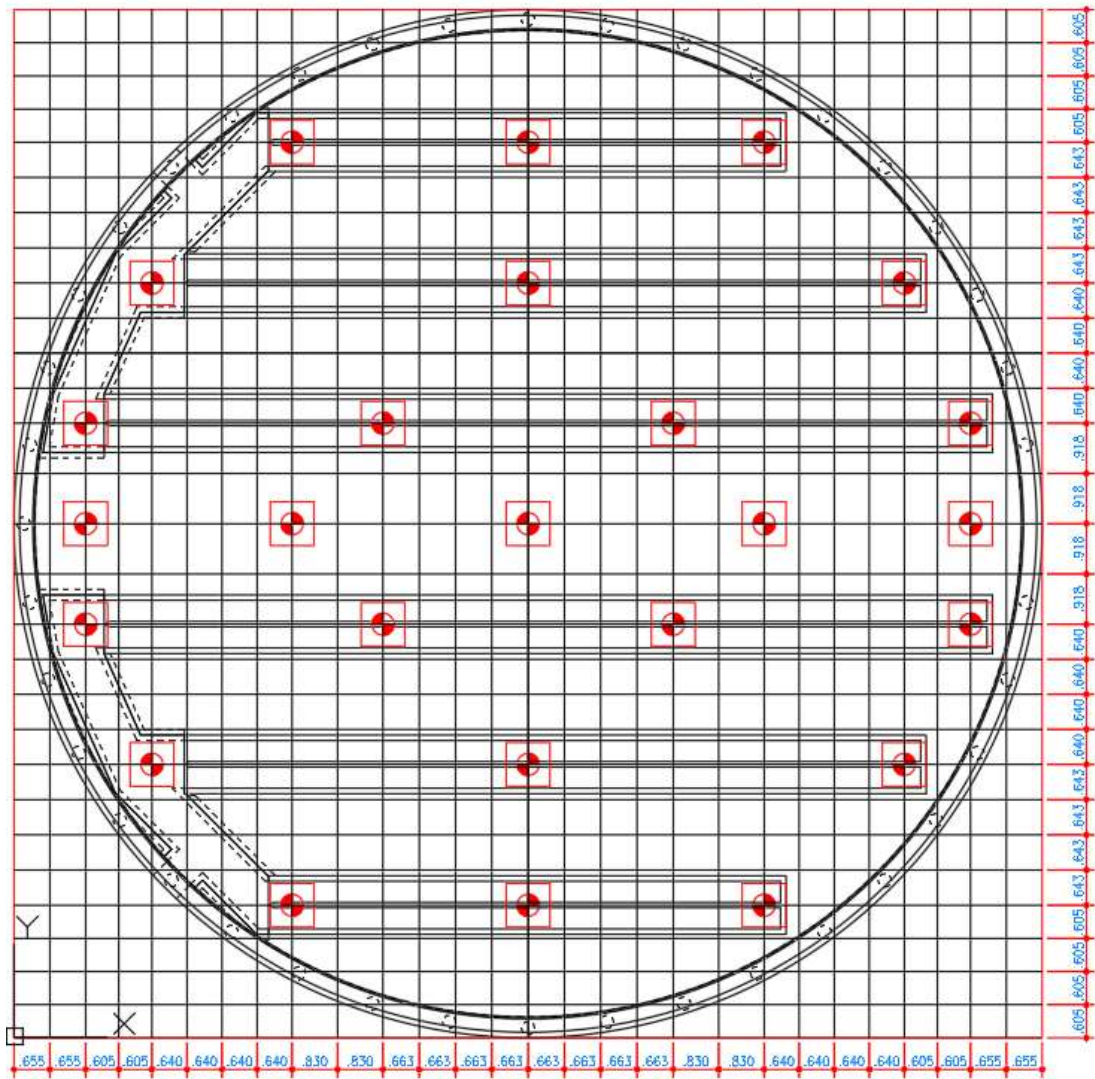


Figura 25 Definição da malha lançamento (Desenho Autocad).
Fonte: Próprio autor (2025).

As distâncias foram então extraídas e lançadas uma a uma no GARP, recriando no software a malha quadrada original em termos de coordenadas compreendidas pelo programa. Esse procedimento assegura que a geometria circular do silo seja representada no modelo de análise, permitindo que o GARP interprete corretamente as posições relativas dos pontos de inserção de carga e realize a interpolação dos parâmetros geotécnicos. A Figura 27 ilustra o processo de lançamento no Software.

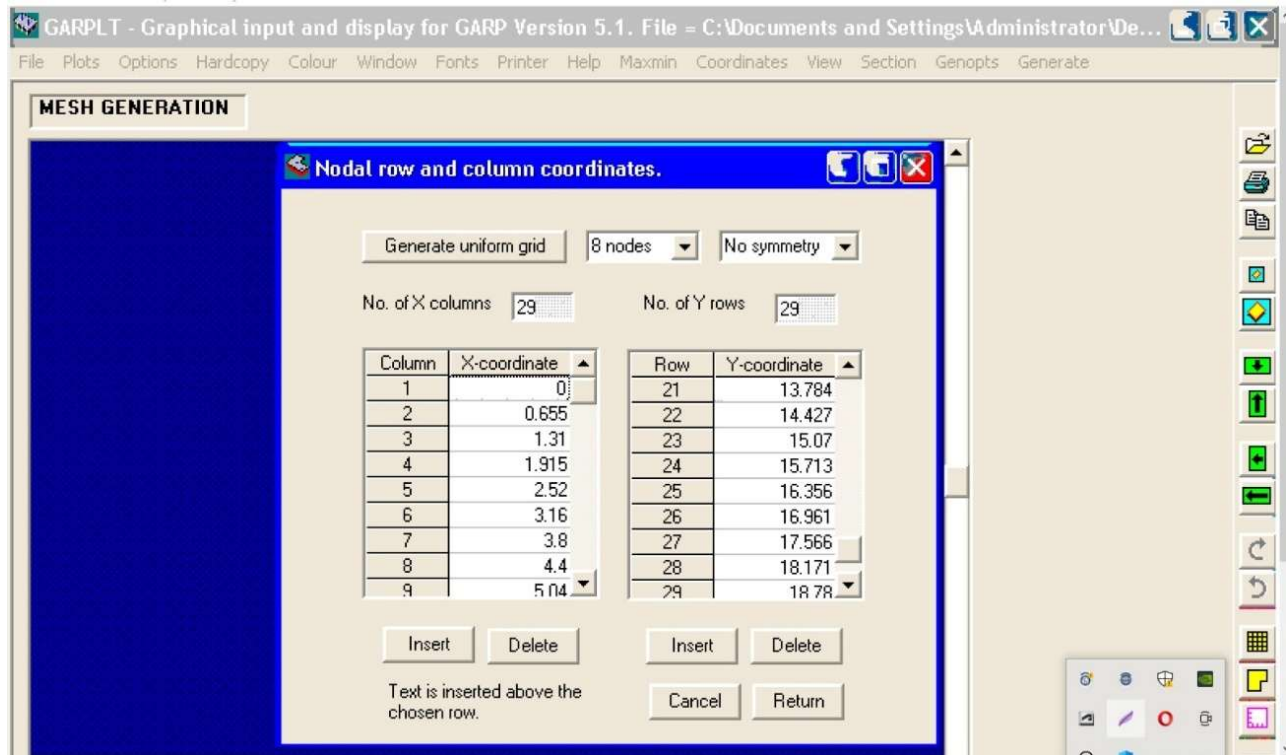


Figura 26 Lançamento coordenadas malha GARP.
Fonte: Próprio autor (2025).

Com a malha devidamente lançada, procede-se à delimitação da área de influência onde atua a carga distribuída proveniente do peso da estrutura. Essa região, destacada em verde na Figura 28, corresponde à área efetiva do radier onde se concentra o carregamento principal, adotado como 118 tf/m^2 , considerando-se a abordagem de 60% do método *Creep Pile*.

Essa carga representa o esforço real transmitido ao solo pelas estacas dentro da zona carregada. Já nas regiões periféricas da malha, ilustradas em azul, foi aplicada uma carga artificialmente desprezível, de 2 tf/m^2 , com a finalidade apenas de permitir ao GARP identificar toda a malha como área de atuação, sem interferir significativamente nos resultados.

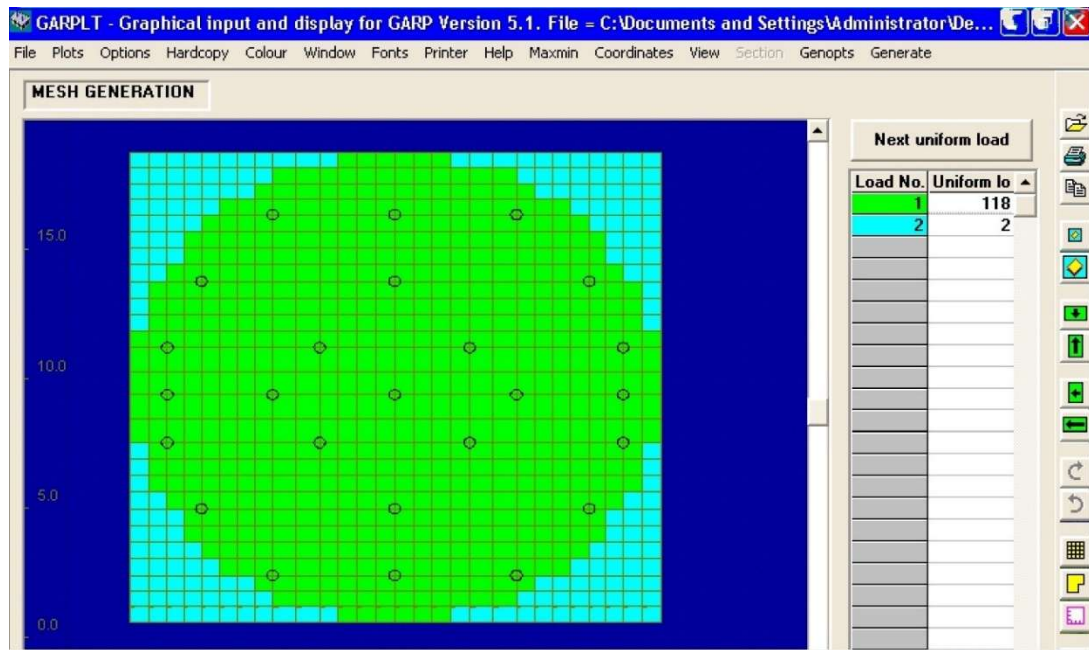


Figura 27. Interface da carga distribuída GARP.
Fonte: Próprio autor (2025).

A Figura 29 apresenta os valores de altura equivalente dos diferentes trechos do radier, determinados com base nos momentos de inércia das seções transversais das canaletas estruturais utilizadas. Para cada elemento, foi calculado o momento de inércia da seção em relação ao eixo horizontal e a base da seção transversal. Essa altura equivalente é utilizada para simplificar a modelagem da rigidez à flexão do radier, considerando a geometria real das peças estruturais.

ALTURA EQUIVALENTE DAS CANALETAS				
ELEMENTO	MOMENTO (cm ⁴)	BASE (cm)	ALTURA ($H=12 \cdot I_y/B^3$) cm	REPRESENTAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL
1	4.188.121	107	41,03	
2	98.240.000	200	147,36	
3	2.237.563	85	43,72	

Figura 28. Momento de inércia das diferentes seções do radier estaqueado.
Fonte: Próprio autor (2025).

Como pode ser observado na Figura 30, os valores de altura variam conforme as dimensões e propriedades geométricas de cada perfil. Essas diferenças são fundamentais para a correta representação do comportamento estrutural da fundação no software GARP.

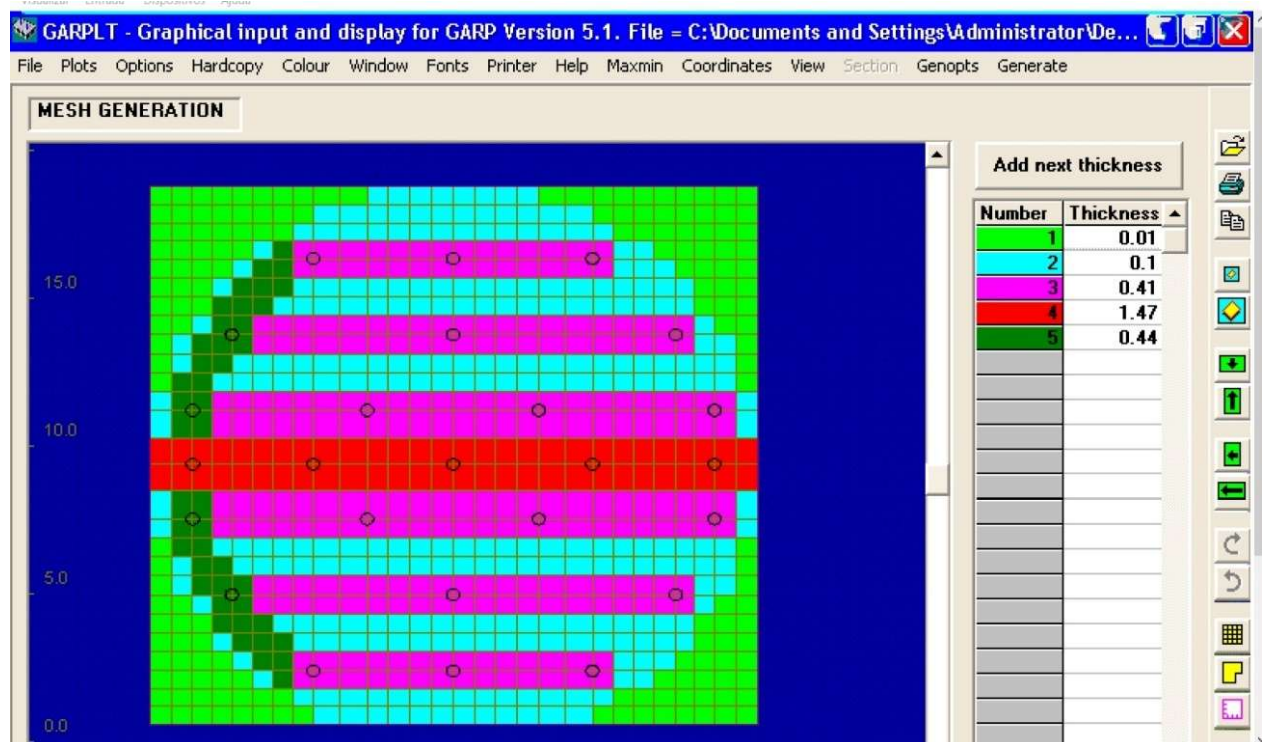


Figura 29. Lançamento no GARP da espessura das camadas.
Fonte: Próprio autor (2025).

A Figura 31 apresenta a locação das estacas inseridas no ambiente gráfico do GARP, representadas pelos círculos verdes posicionados sobre uma malha quadriculada. Essa configuração foi definida com base nas coordenadas previamente estabelecidas no AutoCAD e inserido manualmente no GARP, garantindo o posicionamento preciso de cada estaca conforme o projeto estrutural do radier estaqueado.

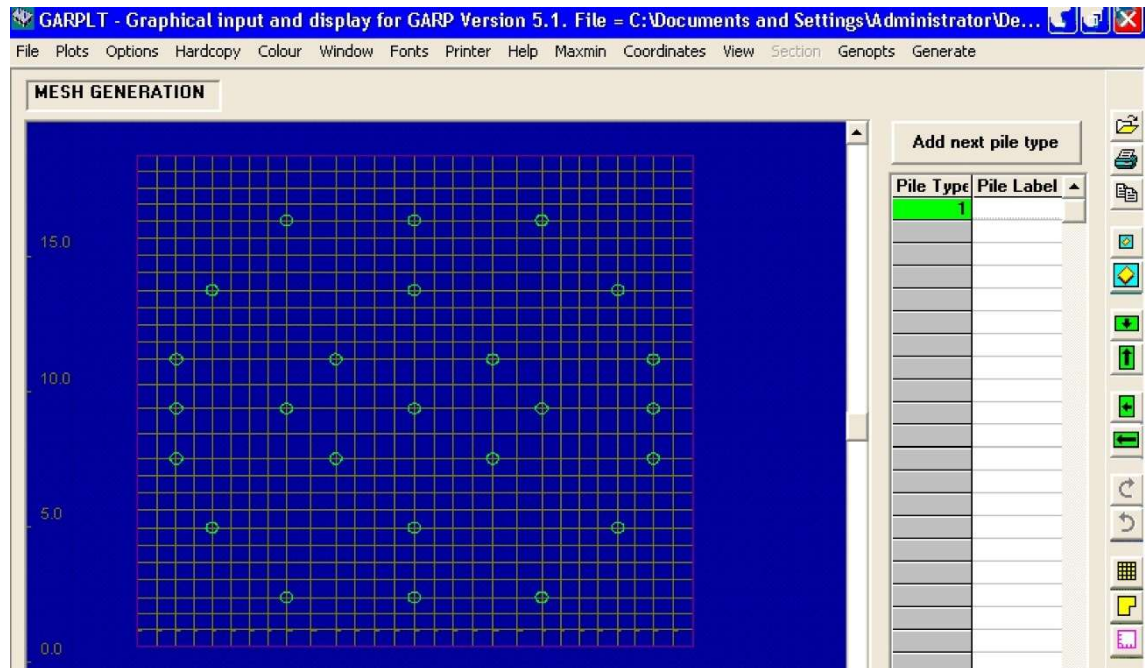


Figura 30. Lançamento no GARP da espessura das camadas.
Fonte: Próprio autor (2025).

Para continuação do lançamento dos cálculos precisa-se de parâmetros em valores de S/D que é a distância entre cada iteração entre o grupo de estacas, com os valores descobertos utilizou-se o software DEFPIG para interpolação dos gráficos apresentados por *Poulos e Davis (Pile Foundation and Design, 1980)* já previamente citados na metodologia. A interpolação deu o seguinte resultado dos fatores de correção para cada grupo de iteração conforme apresentado na Figura 32.

S/D	AA	ARH(B=0)	ARH(B=90)	ARM(B=0)	ARM(B=90)	ATHM(B=0)	ATHM(B=90)
1.500	0.319	0.635	0.496	0.589	0.439	0.014	0.010
2.000	0.289	0.579	0.434	0.528	0.374	0.012	0.008
2.500	0.266	0.529	0.386	0.473	0.322	0.011	0.007
3.000	0.247	0.486	0.347	0.426	0.280	0.009	0.006
4.000	0.218	0.417	0.288	0.349	0.218	0.007	0.004
5.000	0.195	0.363	0.244	0.290	0.174	0.006	0.003
6.000	0.177	0.320	0.211	0.243	0.142	0.005	0.003
7.000	0.161	0.285	0.185	0.205	0.118	0.004	0.002
8.000	0.148	0.256	0.164	0.174	0.099	0.003	0.002
9.000	0.137	0.231	0.147	0.149	0.084	0.003	0.001
10.000	0.127	0.210	0.133	0.128	0.072	0.002	0.001
12.000	0.110	0.176	0.110	0.096	0.054	0.002	0.001
15.000	0.090	0.140	0.087	0.065	0.038	0.001	0.001

Figura 31. Interpolação de S/D software DEFPIG.
Fonte: Próprio autor (2025).

Outro dado necessário, obtido a partir da análise do DEFPIG, é o coeficiente de flexibilidade (inverso da rigidez das estacas). Esse coeficiente é necessário para prosseguimento dos cálculos dentro da interface do GARP, conforme apresentado na Figura 33.

UNIT DEFLECTIONS AND ROTATIONS		
CALCULATED VALUES		
NO. OF ITERATIONS = 1		
RON1	=	0.00526807
ROTT1	=	0.04584632
ROTM1	=	0.00813434
THETAH1	=	0.00793915
THETAM1	=	0.09644078

Figura 32. Coeficiente de flexibilidade software DEFPIG.

Fonte: Próprio autor (2025).

No menu do *Raft Properties* (propriedades do radier, Figura 34), fazer o agrupamento entre as camadas e inserir os dados com os módulos da tensão admissível de cada agrupamento.

Raft Properties

Modulus

Poisson's Ratio

Soil Properties

Compressive strength

Uplift strength

No. of layers

Enter number of layers in the text box above and press 'Enter' to activate grid to the right.

Layer	Thickness	No. sublayers	Modulus	Poisson's Ratio
1	7	100	18000	0.3
2	5	10	54000	0.3
3	3	10	63000	0.3
4	2	10	84000	0.3
5	1	10	87000	0.3
6	4	10	66000	0.3
7	4	10	72000	0.3

Figura 33. Parâmetros do radier software DEFPIG.

Fonte: Próprio autor (2025).

E no menu Pile Data (dados da estaca, Figura 35), preenchidos insere-se os dados definidos até a altura da estaca e os fatores alpha interpolados pelo DEFPIG, que é de 14,45, mas para efeitos de arredondamento foi considerado 15 metros.

Pile data

Type of analysis:
☐ Randolph
☒ Poulos

G/GI = rho: 0 Omega: 0 Hyperbolic factor Rf: 0.9
 Depth of inf = Beta: 0.33 No. of alpha factors: 13 PuRef: 1

Pile Type	Pile Length	Pile diameter	Pile head stiffness	Compression capacity	Tension capacity	Soil Movement
1	15	0.4	189822	1500	1200	0

Point	s/D ratio	Alpha factor
7	6	0.177
8	7	0.161
9	8	0.148
10	9	0.137
11	10	0.127
12	12	0.110
13	15	0.09

NOTE: Tensile capacities are entered as positive numbers, as are compression capacities of piles.

Assign to all Insert Delete Calculate Accept

Figura 34. Parâmetros das estacas software DEFPIG.

Fonte: Próprio autor (2025).

Ao rodar o radier estaqueado no GARP a primeira iteração mostrada é a de cargas nas estacas pela interação entre a estrutura e o radier.

A Figura 36 refere-se à distribuição de cargas verticais no grupo de estacas, conforme modelagem realizada no software GARP. Cada estaca recebe uma carga específica, representada visualmente pela altura das barras verticais, e numericamente listada à direita da imagem. Com base nos dados obtidos, a carga máxima entre as estacas é de 1140,0 kN, enquanto a carga mínima é de 632,9 kN. A carga média aplicada nas estacas é de aproximadamente 832,3 kN.

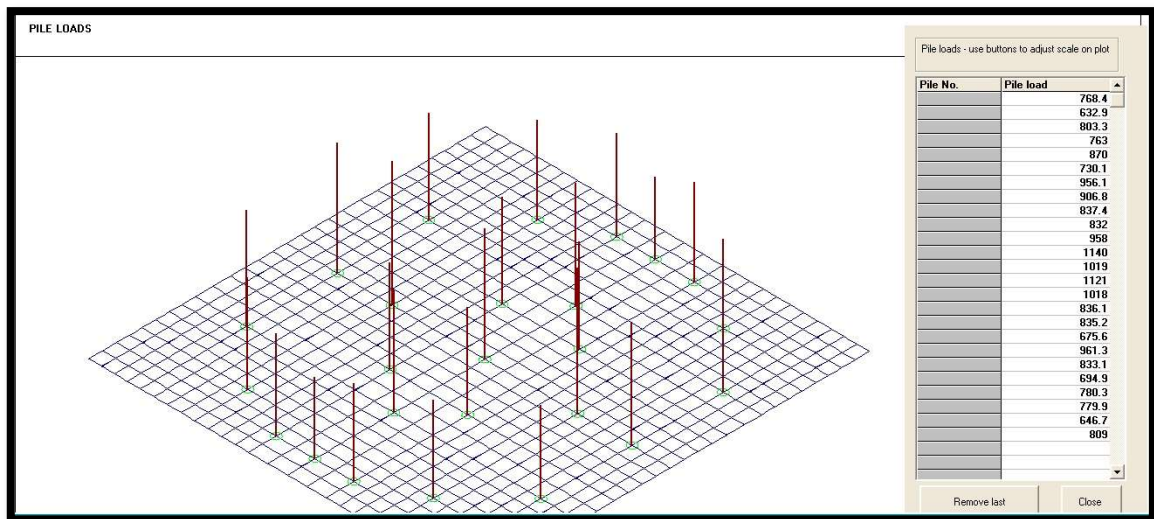


Figura 35. Análise de carga por estaca, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

Outro resultado do GARP é representado na Figura 37, é a tensão de interação entre o solo e o radier estaqueado, essa interação nos da zona na malha quadriculada lançada e as tensões em cada trecho. Essa análise nos mostra o quanto uma parte da estrutura isolada recebe das cargas do silo. A legenda da figura mostra qual o valor dessas tensões de interação.

A análise indica que a interação apresenta maior estabilidade no centro, devido à maior concentração de estacas.

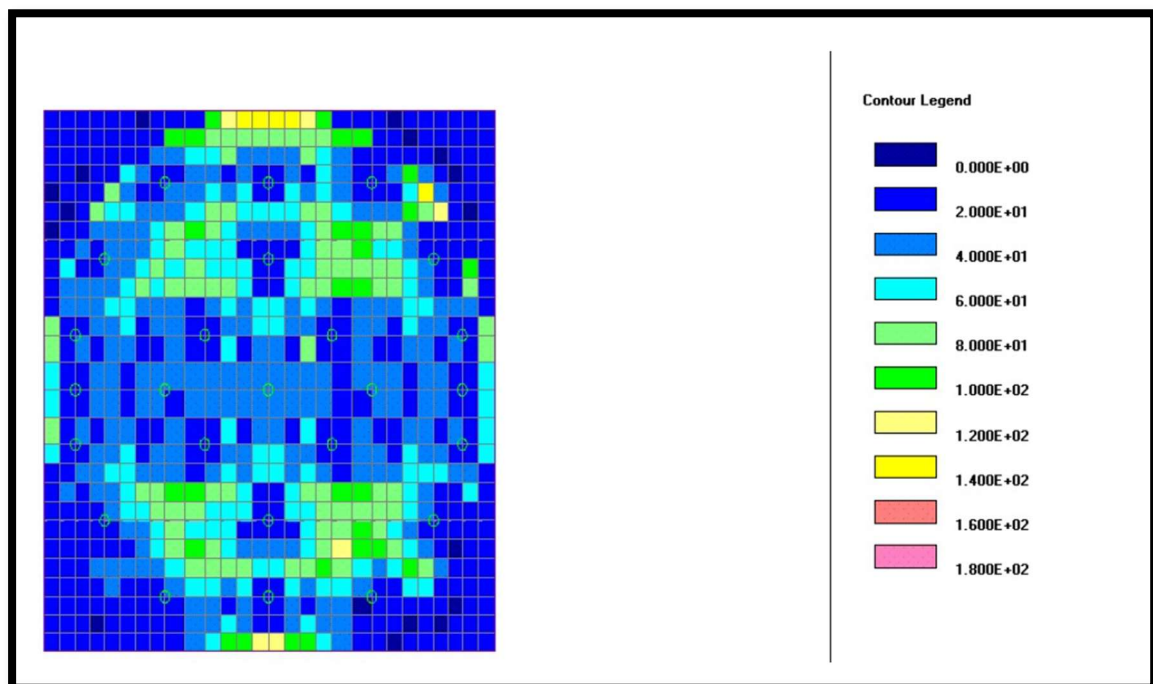


Figura 36. Representação da tensão de interação, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

Cada uma das estacas suporta uma faixa de carga que está descrita no gráfico a seguir (Figura 38).

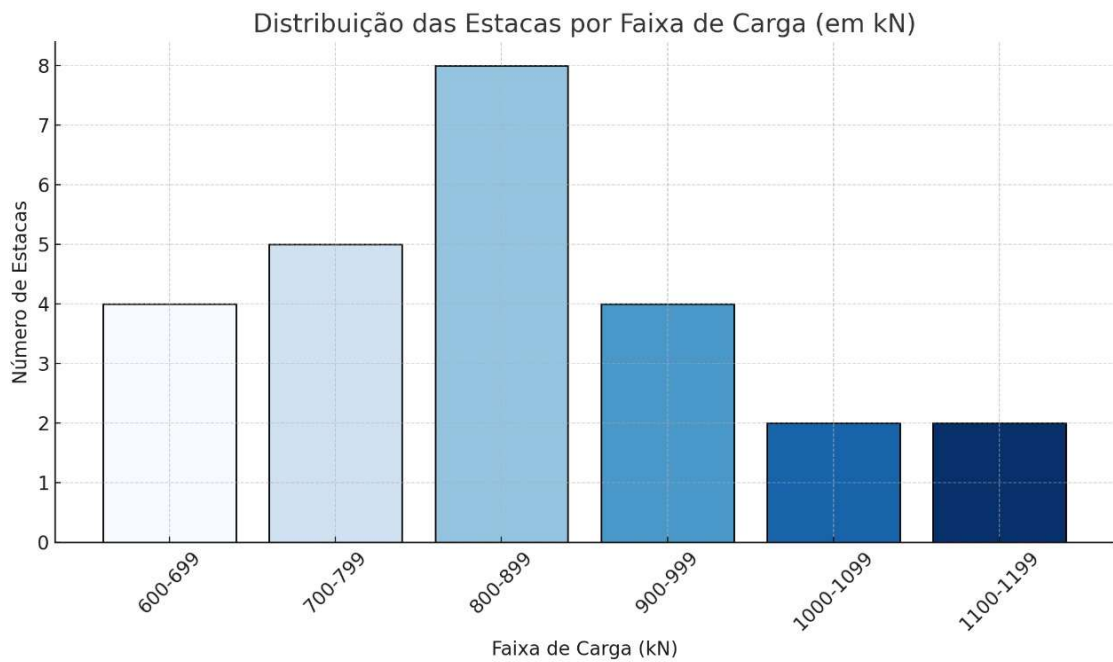


Figura 37. Gráfico de representação faixa de tensões das estacas.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 39 a seguir mostra a locação de onde cada uma das estacas está dentro do radier e indica também pela mesma representação de cor, a carga a ser suportada por elas, realizado a execução do cálculo da fundação no GARP.

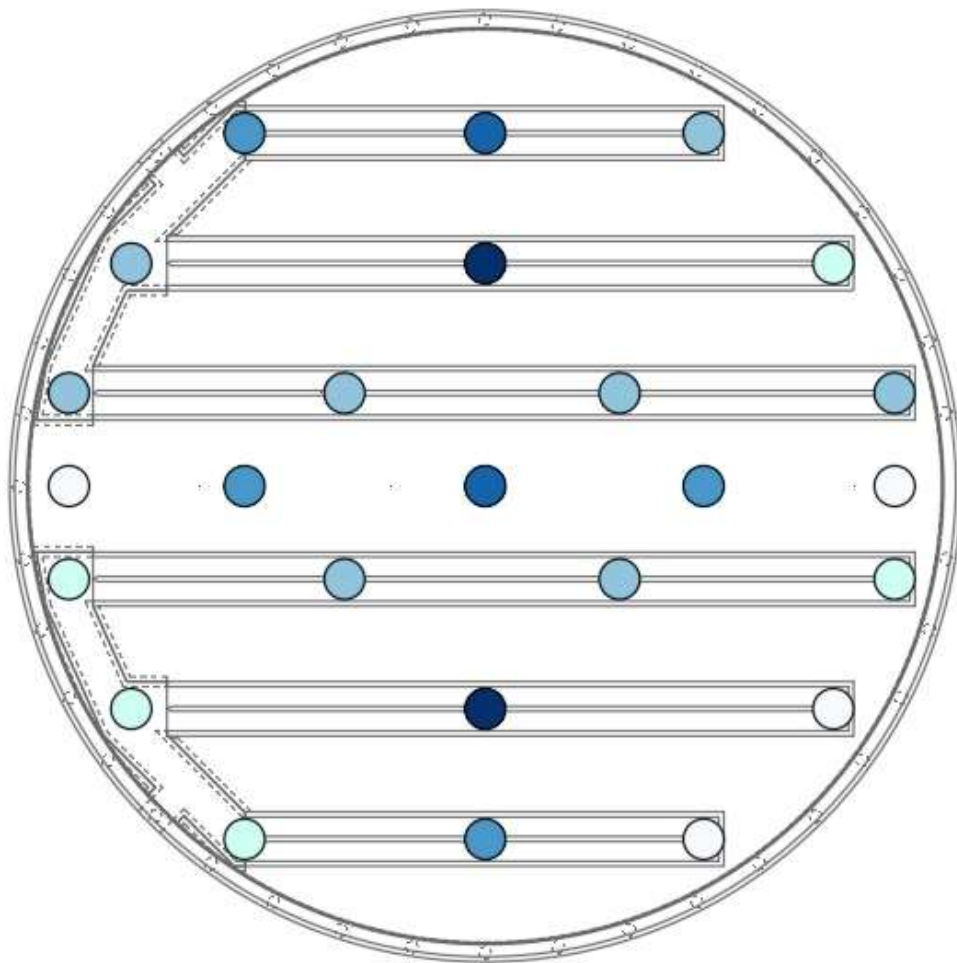


Figura 38. Locação das estacas e cargas no radier.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 40 mostra que 67 % da carga total se transfere para as estacas e 33 % permanece no radier (em relação com a carga total). Isso significa que, ao carregar a estrutura, as estacas suportam a maior parte do peso, aproveitando sua profundidade e rigidez para aliviar o radier. Como resultado, a pressão de contato sob a laje de fundação (o radier) se mantém dentro de limites que evitam grandes assentamentos imediatos, deixando que o solo logo abaixo trabalhe de forma mais uniforme.

Pile Load	=	21208.553
Raft load	=	10415.555
Total react	=	31624.109

Figura 39. Output do Software GARP com relação as cargas totais.
Fonte: Próprio autor, (2025)

Tecnicamente, essa proporção de 67/33 posiciona o projeto confortavelmente dentro da faixa recomendada para aplicações de *creep piling* em solos coesivos de rigidez moderada. As estacas, dimensionadas para deslocar o solo a pressões de até 70–80 % de sua capacidade última. Já o radier, ao suportar aproximadamente um terço da carga, permanece em condição de pré-consolidação estável, proporcionando distribuição de tensões compatível com a rigidez global do solo de fundação.

A análise de contorno de recalques mostra que as maiores deformações ocorrem logo abaixo das áreas onde as estacas estão concentradas — representadas pelos tons mais quentes (bege a amarelo, entre 24 mm e 28 mm). Isso indica que, apesar do suporte adicional das estacas, o radier ainda sofre assentamentos localizados próximos aos carregamentos principais. Já a região imediatamente adjacente aos blocos de estacas apresenta valores intermediários (verde a verde-claro, em torno de 16 mm a 20 mm), fruto do efeito combinado de rigidez do radier e da redução gradual da pressão de solo pelas estacas.

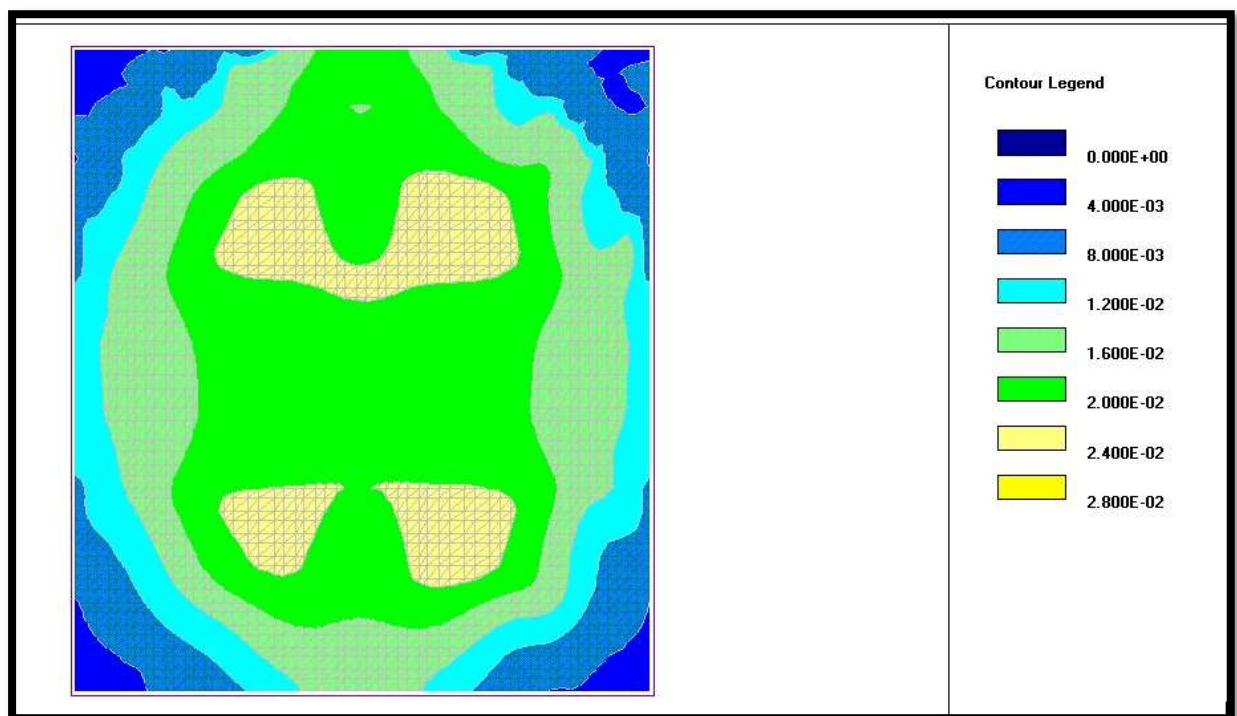


Figura 40. Recalques no radier estaqueado, Software GARP.

Fonte: Próprio autor, (2025).

A medida que se afasta centro de carregamento, os recalques diminuem de forma quase simétrica, passando pelos níveis de 12 mm (ciano) e 8 mm (azul-claro), até valores mínimos próximos de zero (azul-escuro) nas bordas externas do arranjo.

4.3 Dimensionamento por Inclusão Rígida

Para realizar o dimensionamento no método de inclusão rígida foi necessário que adotar alguns valores, esses estão descritos na Figura 42.

VALORES ADOTADOS PARA INÍCIO AOS CÁLCULOS	
DESCRIÇÃO	VALOR
Q adm por estaca =	420 kN
Espaçamento entre estacas =	1,5 m
Largura do capitel (quadrado) =	0,6 m
Ângulo Atrito Solo =	34°
Peso esp. Solo =	18 kN/m ³
Altura do aterro =	1,3 m
Sobrecarga no aterro =	118 kPa
Ffs =	1,3
Fq =	1,3
Tipo est.: (1) ponta; (2) flutuante:	2

Figura 41. Dados para início dos cálculos
Fonte: Próprio autor, Adaptado de Gustavo (2025)

Para o dimensionamento das forças atuantes, utilizou-se o método de Hewlett e Randolph, conforme descrito na metodologia, a partir da Equação 30, que fornece diretrizes específicas para estruturas de solo reforçado.

Este método considera fatores empíricos que permitem avaliar de forma mais realista o comportamento do solo reforçado e os efeitos da inclusão de reforços, como as geogrelhas, principalmente em relação à interação solo-reforço e ao carregamento do muro.

Adotaram-se os seguintes parâmetros:

- **Kp = 3,5:** Coeficiente de pressão passiva do solo.
- **Fator A = 0,075:** Relacionado à deformação do solo e rigidez do reforço.
- **Fator B = 1,016:** Influência da densidade relativa e geometria.
- **Fator C = 0,610:** Considera o tipo de reforço e sua interação com o solo.
- **Beta = 4,1:** ângulo de atrito equivalente.

Com base nesses parâmetros, foram obtidos os seguintes resultados:

- **Ecrown = 48,9%:** Representa a eficiência da ancoragem ou confinamento do reforço na parte superior da estrutura.
- **Ecap = 80,4%:** Eficiência do reforço na base da estrutura, onde ocorrem os maiores esforços de tração.

- **$W_t = 167,8 \text{ kN/m}$** : Valor da força total de tração distribuída no reforço por metro de comprimento.

O método de Marston, conforme apresentado na BS8006-1:2010 e explicado na metodologia, é utilizado para estimar a tensão vertical transmitida ao solo ou elementos estruturais, como o capitel de estacas ou fundações profundas, a partir do carregamento vertical de aterros ou solo sobrejacente.

Os coeficientes utilizados, denominados fatores C_c , variam de acordo com o tipo de contato e confinamento:

- **C_c (ponta) = 4,045**: Refere-se ao caso de contato fixo ou rigidez total na base, onde há maior mobilização da carga vertical.
- **C_c (flutuante) = 3,18**: Considera o caso de fundação “flutuante”, com menor rigidez na base, que resultou em menor transmissão de carga vertical.

Além disso, realizou-se verificações geométricas para determinar qual equação de Marston deve ser aplicada:

- A condição **$H > 1,4 \times (s - a)$** é **verdadeira**, indicando que o solo possui altura suficiente para desenvolvimento completo das tensões verticais.
- A condição alternativa **$0,7 \times (s - a) \leq H \leq 1,4 \times (s - a)$** é **falsa**, portanto, desconsiderada neste caso.

Com base nessas premissas, obteve-se:

- **Tensão vertical no capitel = 396 kPa**: Valor da carga vertical aplicada diretamente sobre o capitel da fundação, estimado com base nas condições de confinamento do solo.
- **$W_t = 34,5 \text{ kN/m}$** : Carga linear equivalente transmitida pela fundação ao solo, útil para análise estrutural e verificação de capacidade de carga.

Este método é particularmente útil em situações em que a distribuição de carga vertical não é uniforme, como em fundações profundas sob estruturas de contenção ou geossintéticos. Com as análises completas pelos dois métodos é possível determinar a tensão no geossintético e o espaçamento máximo entre as estacas, que ficam definidos conforme a Figura 43.

Tensão no Geossintético	Wt mín (kN/m) =	41,36
	Aterro raso ?	Não
	Deformação máxima no reforço:	0,11
	Tensão no Reforço (kN/m) =	120,30
Espaçamento máximo entre estacas (m) =		1,72

Figura 42. Resultado do dimensionamento por inclusão rígida.
Fonte: Próprio autor, Adaptado de Gustavo (2025)

Com isso, realizou-se a disposição das estacas em formato triangular, seguindo o espaçamento onde $e = 1,5$ metro na horizontal e de $v = 0,866 * e$ na vertical, obtendo-se a distribuição das estacas conforme a Figura 45.

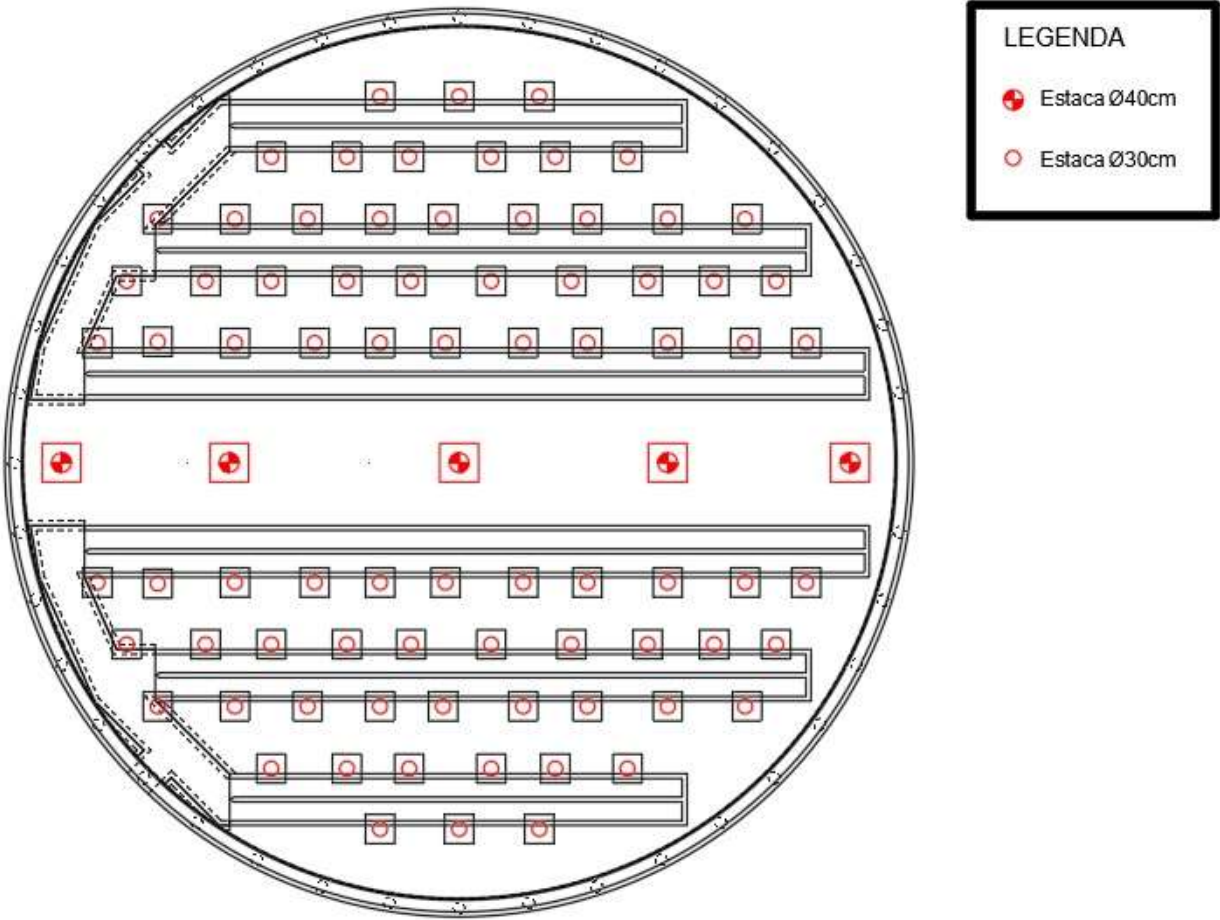


Figura 43. Distribuição das estacas na base do silo
Fonte: Próprio autor, (2025).

Também se utilizou o método de Decourt-Quaresma para determinação da profundidade das estacas com o diâmetro de 30cm. A profundidade foi definida pelo primeiro valor que atenda a tensão admissível para cada estaca somando a parcela lateral e a parcela de ponta.

Conforme demonstrada na Figura 46, para uma profundidade de 12 metros, a tensão apresenta valor satisfatório em relação ao que foi adotado como mínimo.

amostra	tipo de solo	prof.	N	N'	k'	qs	ø	qp	PL	PP	Qu	QAdmin
	relatorio spt	m	n° nspt no relatori o	media 3 camada s	tab. 3 (kN/m²)	kN	m	kN	kN	kN	kN	kN
0	Silte Argiloso	0,45	4	4,97	200	0		0	0	0	0	0
1	Argila Siltosa	1,45	6	5,26	120	22,78	0,30	994,44	21,47	70,29	42,56	21,28
2	Argila Siltosa	2,45	6	6,63	120	30,37	0,30	631,11	57,25	44,61	70,63	35,31
3	Argila Siltosa	3,45	8	7,39	120	29,44	0,30	795,56	83,25	56,23	100,12	50,06
4	Argila Siltosa	4,45	8	7,24	120	36,48	0,30	886,67	137,53	62,67	156,33	78,17
5	Argila Siltosa	5,45	5	7,15	120	37,96	0,30	868,89	178,90	61,42	197,32	98,66
6	Argila Siltosa	6,45	8	7,65	120	27,96	0,30	857,78	158,13	60,63	176,32	88,16
7	Argila Siltosa	7,45	10	9,78	120	35,56	0,30	917,78	234,57	64,87	254,03	127,02
8	Argila Siltosa	8,45	12	13,54	120	42,96	0,30	1173,33	323,93	82,94	348,81	174,41
9	Silte Argiloso	9,45	19	19,81	200	49,26	0,30	1624,44	417,83	114,83	452,28	226,14
10	Silte Argiloso	10,5	29	22,00	200	73,15	0,30	3962,96	689,41	280,13	773,44	386,72
11	Silte Argiloso	11,5	18	22,63	200	105,74	0,30	4400,00	1096,24	311,02	1189,55	394,48
12	Silte Argiloso	12,5	21	20,11	200	71,11	0,30	4525,93	804,25	319,92	900,22	450,11
13	Silte Argiloso	13,5	21	20,50	200	79,44	0,30	4022,22	973,37	284,31	1058,66	529,33
14	Silte Argiloso	14,5	20	23,22	200	80,56	0,30	4100,00	1062,91	289,81	1149,85	574,92
15	Silte Argiloso	15,5	29	24,83	200	75,00	0,30	4644,44	1060,29	328,30	1158,78	579,39
16	Silte Argiloso	16,5	26	27,83	200	106,67	0,30	4966,67	1608,50	351,07	1713,82	856,91
17	Silte Argiloso	17,5	29	28,92	200	96,67	0,30	5566,67	1548,81	393,48	1666,85	833,43
18	Silte Argiloso	18,5	32	31,58	200	105,00	0,30	5783,33	1781,28	408,80	1903,92	951,96
19	Silte Argiloso	19,5	34	25,58	200	117,50	0,30	6316,67	2104,08	446,50	2238,03	1119,02
20	Areia Fina	20,5	11	18,67	400	123,33	0,30	5116,67	2324,78	361,68	2433,28	1216,64
21	Areia Fina	21,5	12	12,50	400	45,00	0,30	7466,67	890,64	527,79	1048,98	524,49
22	Areia Fina	22,5	16	14,50	400	48,33	0,30	5000,00	1002,17	353,43	1108,20	554,10
23	Areia Fina	23,5	17	21,83	400	61,67	0,30	5800,00	1336,75	409,98	1459,74	729,87
24	Silte Arenoso	24,5	34	26,67	250	65,00	0,30	8733,33	1470,27	617,32	1655,46	827,73
25	Silte Arenoso	25,5	30	31,75	250	121,67	0,30	6666,67	2866,70	471,24	3008,07	1504,04

Figura 44. Cálculo profundidade da estaca Decourt-Quaresma
Fonte: Próprio autor (2025)

Para a inserção de dados no software GARP, realizou-se também a criação da malha nos pontos de influência principais da disposição das estacas. A Figura 47 apresenta a disposição desses pontos dentro da malha quadriculada, cujas coordenadas foram posteriormente inseridas no programa.

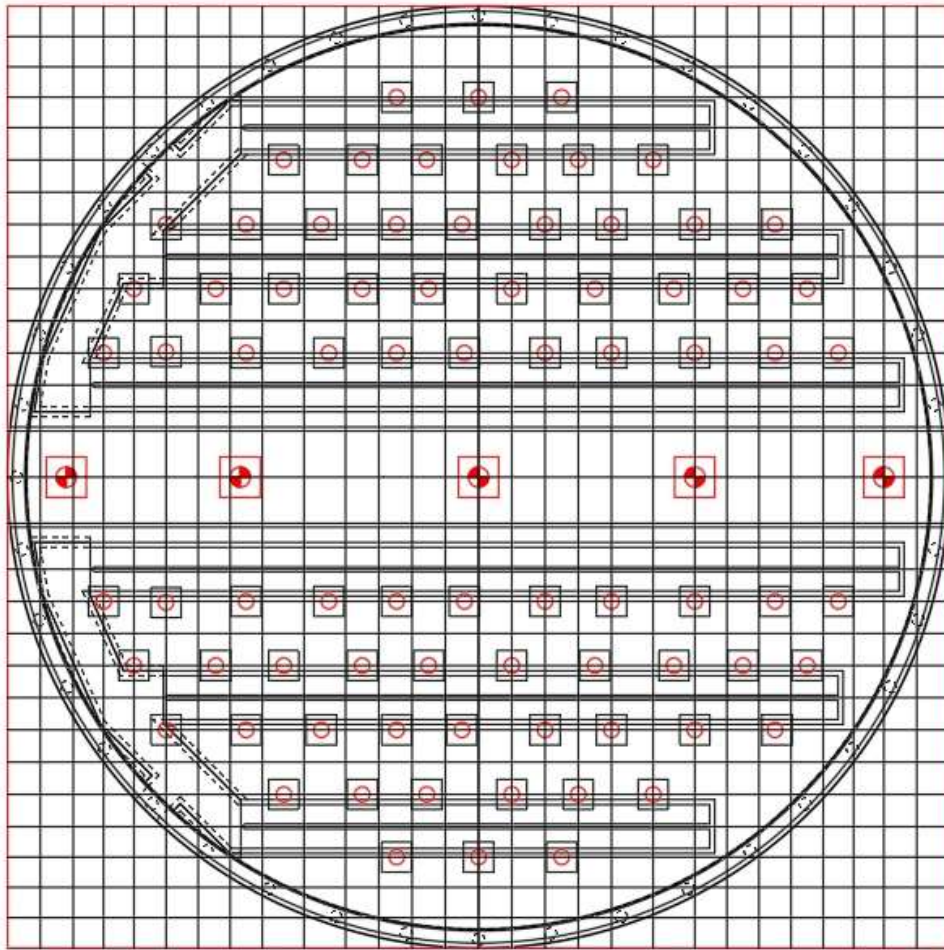


Figura 45. Estacas na malha quadriculada

Fonte: Próprio autor, (2025).

Realizou-se também a inserção dos dados no GARP, considerando a malha quadriculada das estacas e seus pontos relativos à malha. Outra informação necessária é a carga atuante dentro do anel do silo, representada na malha, assumindo-se uma carga desprezível nas regiões externas para fins de cálculo.

A Figura 48 mostra a disposição final dentro do ambiente do GARP.

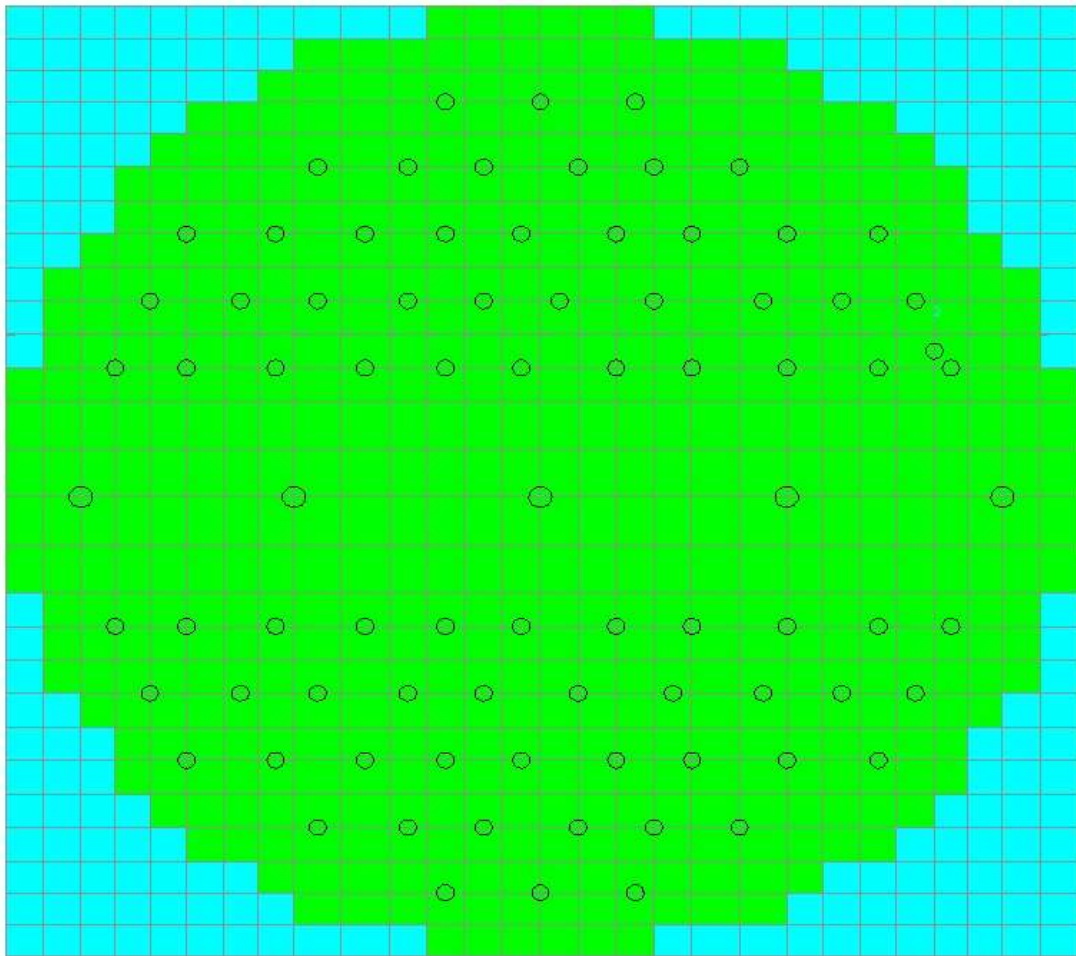


Figura 46. Tela do Software GARP após inserção dos dados iniciais
Fonte: Próprio autor, (2025).

A retirada dos valores dos coeficientes de influência também foi feita conforme o dimensionamento passado, usando o Software DEFPIG para a interpolação dos gráficos de Poulos e Davis (1980), as Figuras 49 e 50 mostram os resultados.

S/D	AA	ARH(B=0)	ARH(B=90)	ARM(B=0)	ARM(B=90)	ATHM(B=0)	ATHM(B=90)
1.500	0.336	0.636	0.506	0.585	0.447	0.025	0.018
2.000	0.307	0.589	0.450	0.535	0.387	0.021	0.015
2.500	0.284	0.543	0.404	0.486	0.339	0.019	0.013
3.000	0.265	0.503	0.366	0.443	0.299	0.017	0.011
4.000	0.236	0.437	0.308	0.371	0.238	0.014	0.009
5.000	0.213	0.386	0.265	0.314	0.194	0.011	0.007
6.000	0.195	0.344	0.231	0.269	0.161	0.010	0.005
7.000	0.180	0.309	0.205	0.231	0.135	0.008	0.004
8.000	0.167	0.280	0.183	0.199	0.115	0.007	0.004
9.000	0.156	0.255	0.165	0.173	0.098	0.006	0.003
10.000	0.146	0.233	0.150	0.151	0.085	0.005	0.003
12.000	0.128	0.198	0.126	0.116	0.065	0.004	0.002
15.000	0.108	0.160	0.101	0.081	0.046	0.002	0.001

Figura 47. Interpolação dos fatores de influência software DEFPIG.
Fonte: Próprio autor, (2025).

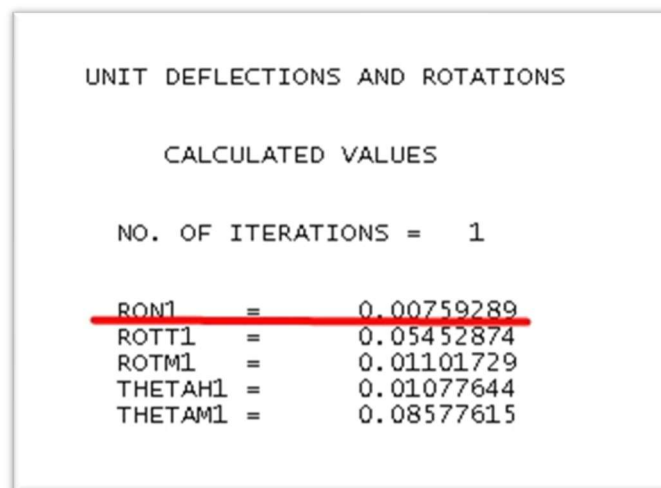


Figura 48. Coeficiente de flexibilidade software DEFPIG.
Fonte: Próprio autor, (2025).

No software GARP, inserem-se os dados provenientes do DEFPIG. O coeficiente de flexibilidade corresponde ao inverso da rigidez, e os valores dos fatores α inseridos conforme a Figura 51.

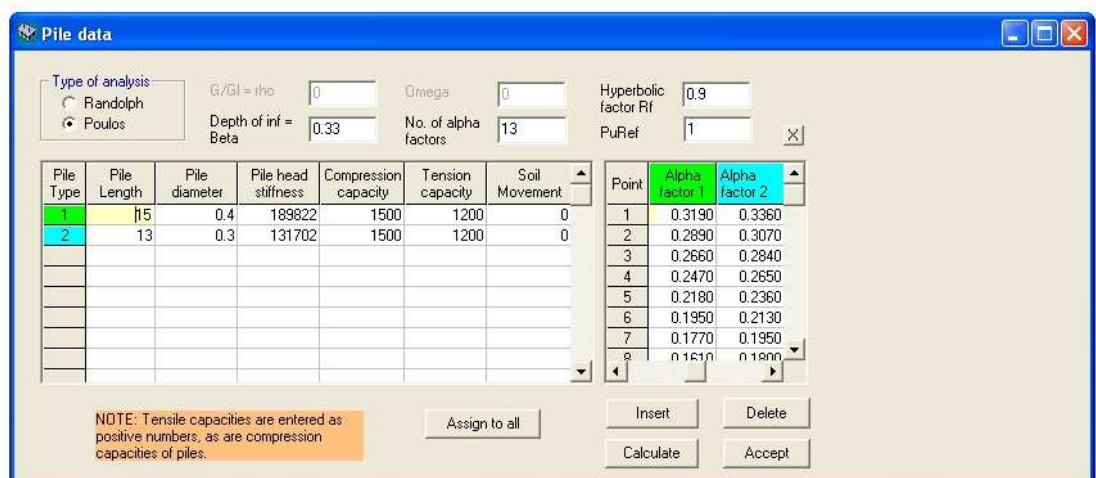


Figura 49. Pile Data, Software GARP
Fonte: Próprio autor, (2025).

Como resultado da execução do GARP, após a inserção de todos os dados, obtém-se, inicialmente, a Figura 52, que apresenta a tensão suportada por cada estaca, bem como um desenho isométrico indicando aquelas com maior influência no suporte do carregamento do silo.

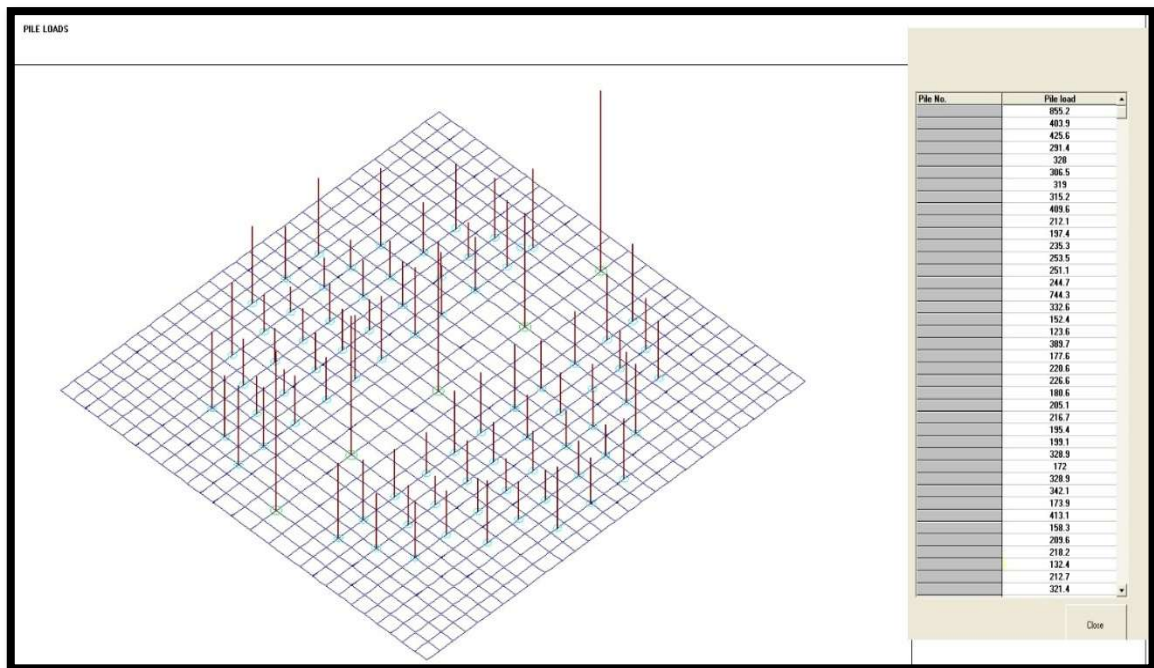


Figura 50. Influência das estacas no suporte do carregamento, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A tabulação dos dados mostra que nas estacas onde o diâmetro é igual a 30cm, onde a tensão máxima é 425,60 kN, a mínima 112,70 kN e a média 260,43 kN.

O gráfico da Figura 53 mostra as faixas de carga das estacas calculadas para o caso de inclusão rígida. E a Figura 54 com a mesma indicação de cores do gráfico demonstra a locação de cada uma delas.



Figura 51. Gráfico das faixas de carga das estacas.
Fonte: Próprio autor, (2025).

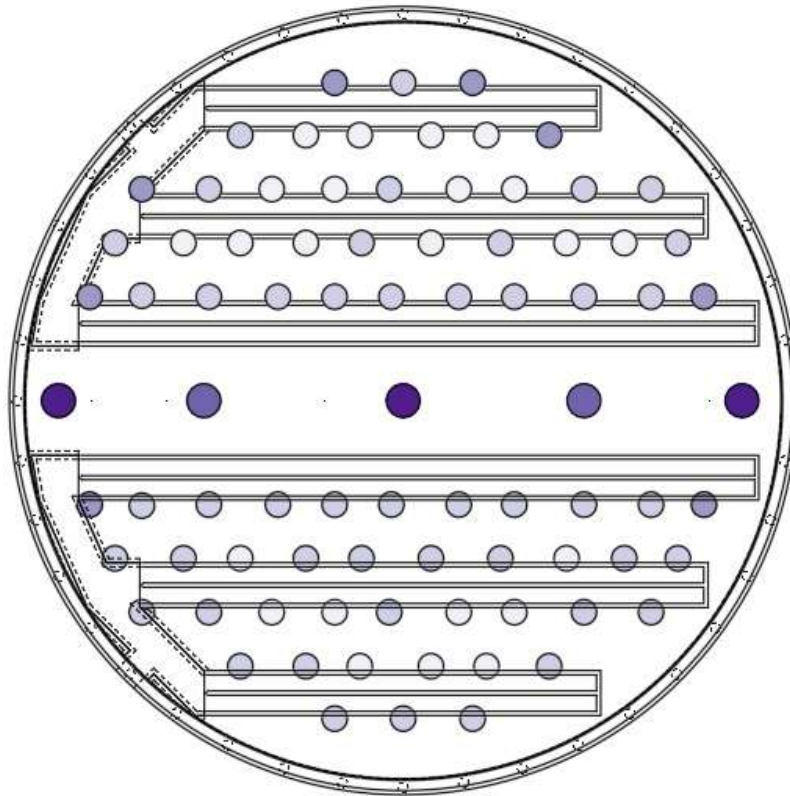


Figura 52. Localização das estacas e cargas no radier.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 55, mostra a interação entre as tensões para cada trecho da malha quadriculada e as cargas aplicadas em suas iterações.

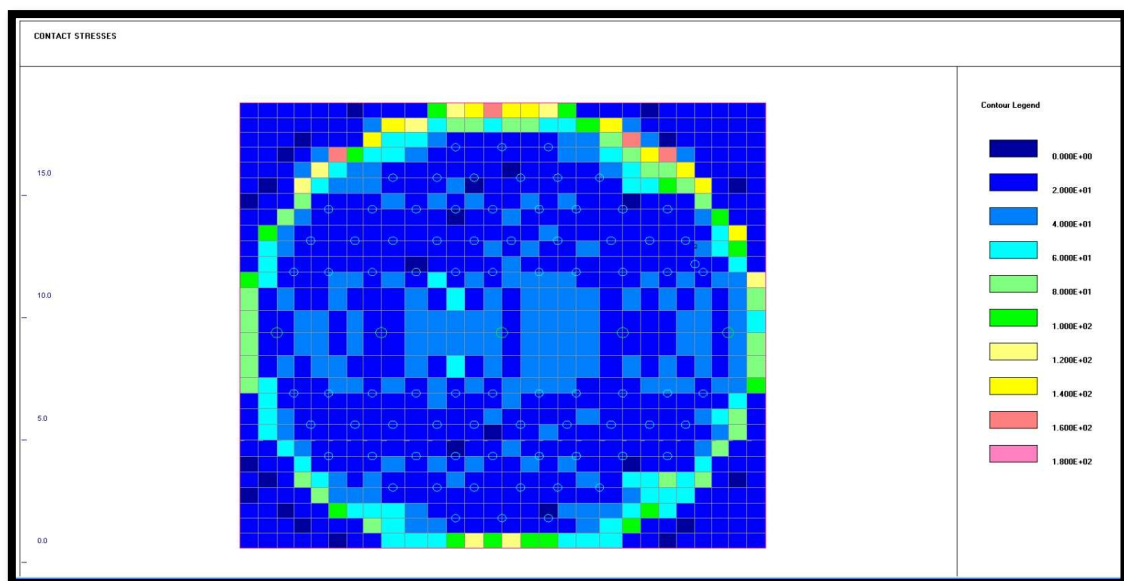


Figura 53 Representação da tensão de interação, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 56 detalha os recalques calculados pelo GARP na estrutura, e os plota em regiões.

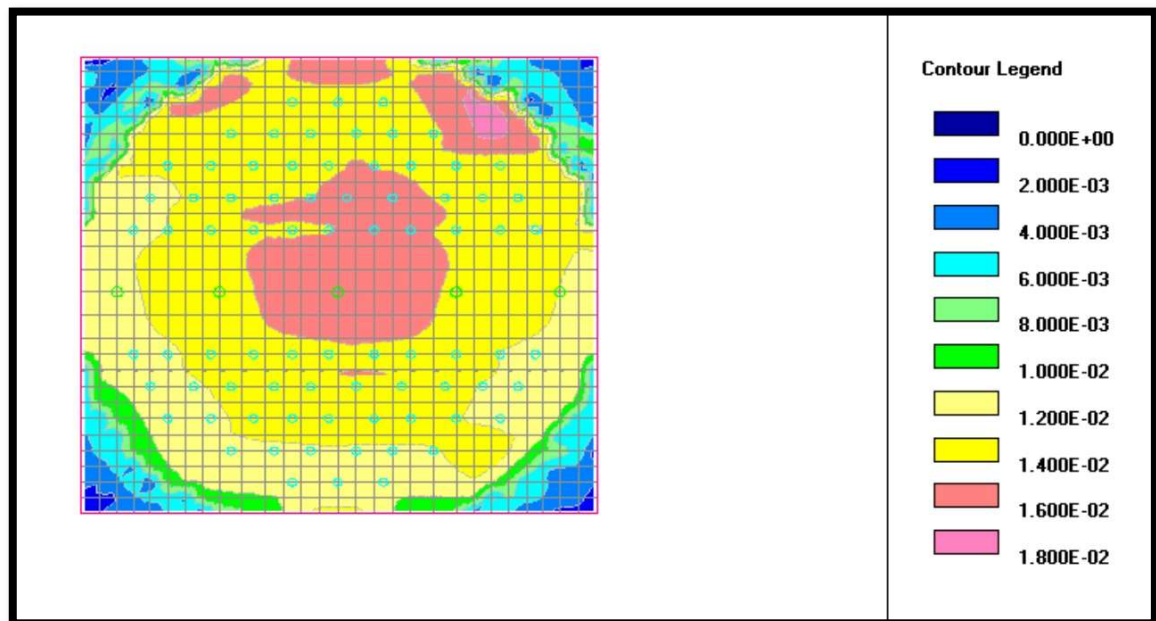


Figura 54. Recalques no radier estaqueado, Software GARP.

Fonte: Próprio autor, (2025).

No gráfico de contorno mais recente, observa-se uma “ilha” de recalque máximo logo no centro da área do silo, onde os valores atingem cerca de 16 mm (vermelho) e pontualmente 18 mm (rosa). Essa concentração de deformação corresponde à região de maior carregamento e menor influência direta das estacas mais periféricas, indicando que o conjunto carrega ali quase sua capacidade plena antes que o conjunto estaca-aterro entre em regime de distribuição mais uniforme.

Em torno do núcleo central, os recalques decrescem gradualmente para faixas entre 12 mm (amarelo claro) e 14 mm (amarelo), antes de atingir as zonas de 8–10 mm (verde) e valores ainda menores nos cantos (0–4 mm em tons de azul). Esse gradiente homogêneo evidencia a eficácia do arranjo de estacas, que reduz o recalque geral, mantendo a diferença máxima entre centro e borda em cerca de 1,4 cm, garantindo assentamentos controlados e minimizando o risco de fissuras por deformações diferenciais.

4.4 Análise comparativa

A comparação entre o radier estaqueado e a fundação com inclusões rígidas é realizada por meio da verificação da distorção angular e do quantitativo do concreto das fundações. Essa

análise permite avaliar o comportamento diferencial das soluções frente aos recalques e à redistribuição de esforços nas estruturas de fundação.

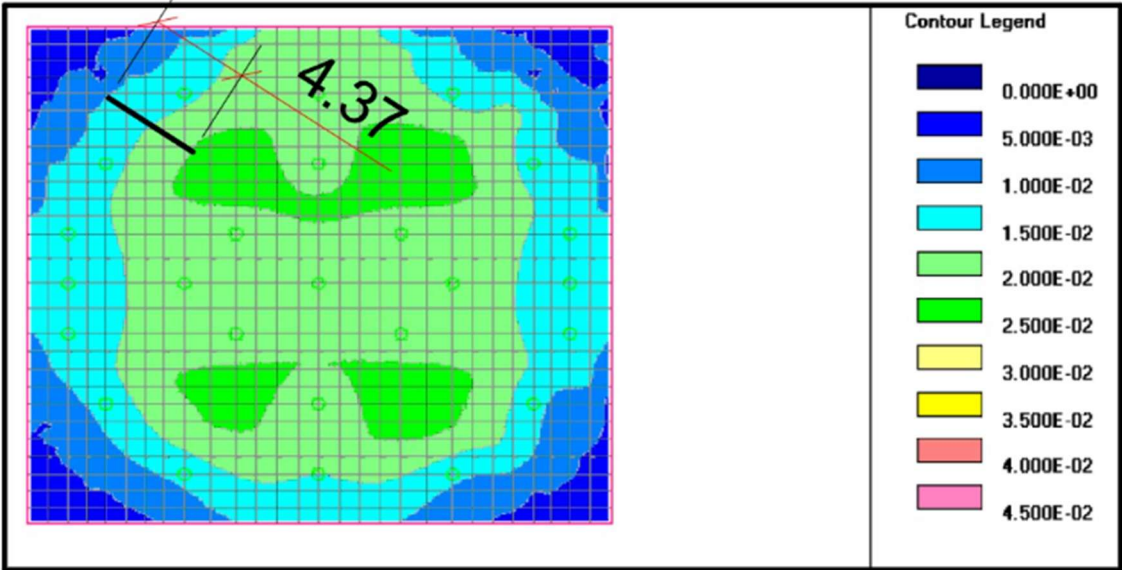


Figura 55. Plotagem do recalque total na fundação por radier estaqueado, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A comparação entre a Figura 57 e a Figura 58 é fundamental para a verificação da distorção angular. Para cada metro de distância entre as camadas de maior influência, calculou-se a variação de recalque nas camadas definidas da malha quadriculada.

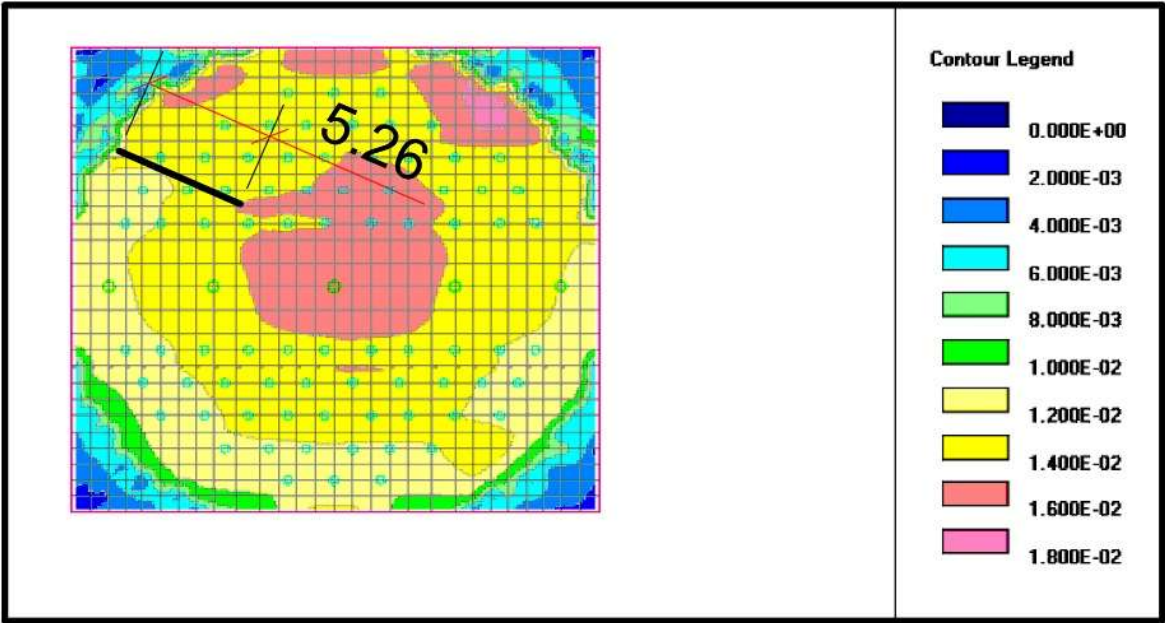


Figura 56. Plotagem do recalque total na fundação por radier estaqueado, Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

Na Figura 57, que apresenta o recalque no radier estaqueado, observa-se uma variação de 15 mm a 25 mm em uma distância de 4,37 metros, que resultou em uma razão de distorção angular de aproximadamente 1/437. Esse valor se aproxima do limite usual de 1/500, considerado uma boa relação entre custo e desempenho para fundações.

Já na Figura 58, referente à fundação com inclusão rígida, verifica-se um recalque que varia de 12mm a 18mm em um trecho de 5,26 metros, sendo uma razão de distorção angular de 1/876 significativamente menor, o que implica em uma razão de distorção angular ainda mais elevada (ou seja, um denominador maior). Embora isso indique um excelente desempenho técnico, o valor obtido está consideravelmente acima do limite usual, caracterizando um superdimensionamento da fundação.

Visto o limite de distorção angular na casa de 1:500, nota-se que a fundação por inclusão rígida pode ser otimizada, reduzindo-se suas dimensões ou quantidade de inclusões, de modo a alcançar uma relação mais próxima do valor de 1/500.

A Figura 59 demonstra o cálculo de concreto estimado para os dois tipos de fundação.

COMPARAÇÃO CONSUMO DE CONCRETO					
Caso	Tipo de Fundação	Estacas Ø40cm x 15m (unid)	Estacas Ø30cm x 13m (unid)	Volume Total de Concreto (m³)	Observações
1	Radier-Estaqueado	25	0	47,12	25 estacas Ø40cm x 15m
2	Inclusão Rígida	5	78	81,1	5 estacas Ø40cm x 15m + 78 estacas Ø30cm x 13m

Figura 57. Cálculo de concreto.
Fonte: Próprio autor, (2025).

Conforme demonstrado nos modelos utilizados para os dimensionamentos, a fundação por inclusão rígida inevitavelmente apresentou maior consumo de concreto em comparação ao radier estaqueado. No entanto, esse sistema pode ser otimizado com o objetivo de reduzir o consumo de materiais e, ao mesmo tempo, manter níveis adequados de segurança e desempenho.

A Figura 60 ilustra essa diferença, indicando que o volume de concreto consumido pela fundação com inclusão rígida é aproximadamente 72% superior ao da fundação por radier estaqueado.

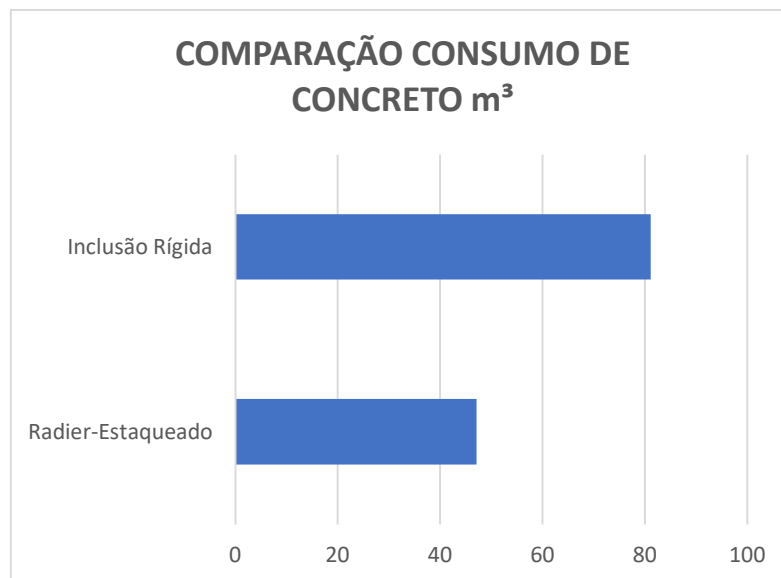


Figura 58. Comparação consumo de concreto.
Fonte: Próprio autor, (2025).

4.5 Otimização da fundação

Como a fundação por radier estaqueado apresenta uma razão de distorção angular de 1:437 valor próximo da relação ideal máxima para fundação de acordo Zhang e Ng (2005) e também Bjerrum (1963), no valor de 1:500. No caso, optou-se por manter o dimensionamento como aceitável.

Por outro lado, a fundação com inclusão rígida apresentou um coeficiente de distorção angular de 1/876.

Considerando essa abordagem, a primeira tentativa de otimização foi feita utilizando estacas com 9 metros de comprimento uma redução de 4 metros em relação à estaca adotada na análise inicial. A nova configuração manterá o mesmo arranjo geométrico apresentado na Figura 47, o qual também é replicado no modelo computacional do software GARP, conforme ilustrado na Figura 48.

Para apoiar esse redimensionamento, foram utilizados os parâmetros de resistência do solo previamente obtidos, especialmente aqueles calculados com base no método de Decourt-Quaresma, conforme planilha apresentada na Figura 46.

A primeira diferença entre os cálculos é na obtenção dos parâmetros alpha no software DEFPIG, onde foram inseridos os dados para uma estaca de 9 metros, o resultado é mostrado na Figura 61.

S/D	AA	ARH(B=0)	ARH(B=90)	ARM(B=0)	ARM(B=90)	ATHM(B=0)	ATHM(B=90)
1.500	0.454	0.609	0.471	0.532	0.390	0.061	0.044
2.000	0.411	0.547	0.408	0.469	0.327	0.052	0.036
2.500	0.379	0.496	0.360	0.415	0.278	0.046	0.030
3.000	0.353	0.453	0.322	0.370	0.239	0.040	0.025
4.000	0.313	0.385	0.265	0.297	0.182	0.031	0.018
5.000	0.283	0.332	0.224	0.241	0.143	0.025	0.014
6.000	0.258	0.291	0.193	0.198	0.114	0.020	0.011
7.000	0.237	0.258	0.169	0.164	0.093	0.016	0.008
8.000	0.219	0.231	0.150	0.137	0.077	0.013	0.007
9.000	0.204	0.208	0.134	0.115	0.065	0.010	0.005
10.000	0.190	0.189	0.121	0.098	0.055	0.008	0.004
12.000	0.166	0.158	0.101	0.072	0.041	0.006	0.003
15.000	0.138	0.126	0.079	0.047	0.028	0.003	0.002

Figura 59. Interpolação dos fatores de influência (reanálise), software DEFPIG.

Fonte: Próprio autor, (2025).

Ainda no DEFPIG foi obtido o coeficiente de flexibilidade, mostrado na Figura 62.

UNIT DEFLECTIONS AND ROTATIONS

CALCULATED VALUES

NO. OF ITERATIONS = 1

RON1 = 0.01108516
 ROTT1 = 0.07067005
 ROTM1 = 0.01919251
 THETAH1 = 0.01879849
 THETAM1 = 0.06675498

Figura 60. Coeficiente de flexibilidade reanálise.

Fonte: Próprio autor, (2025).

Com base nos dados previamente obtidos, foi possível dar continuidade à reanálise utilizando o software GARP. Nesse ambiente computacional, os parâmetros das estacas foram definidos no menu Pile Data, conforme ilustrado na Figura 63.

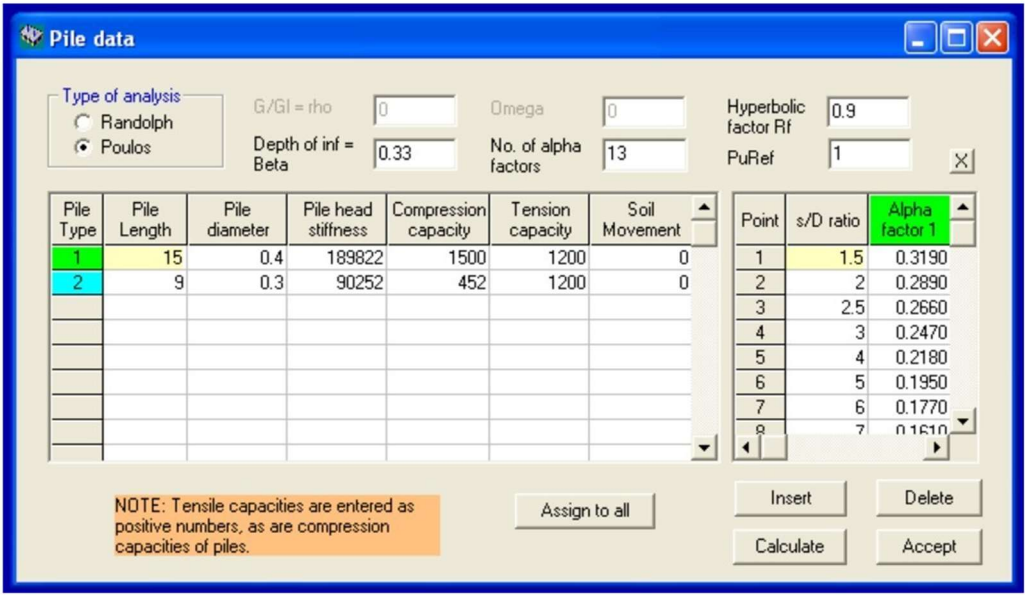


Figura 61. Pile data (reanálise).
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 64, mostra a interação entre as tensões para cada trecho da malha quadriculada e as cargas aplicadas em suas iterações.

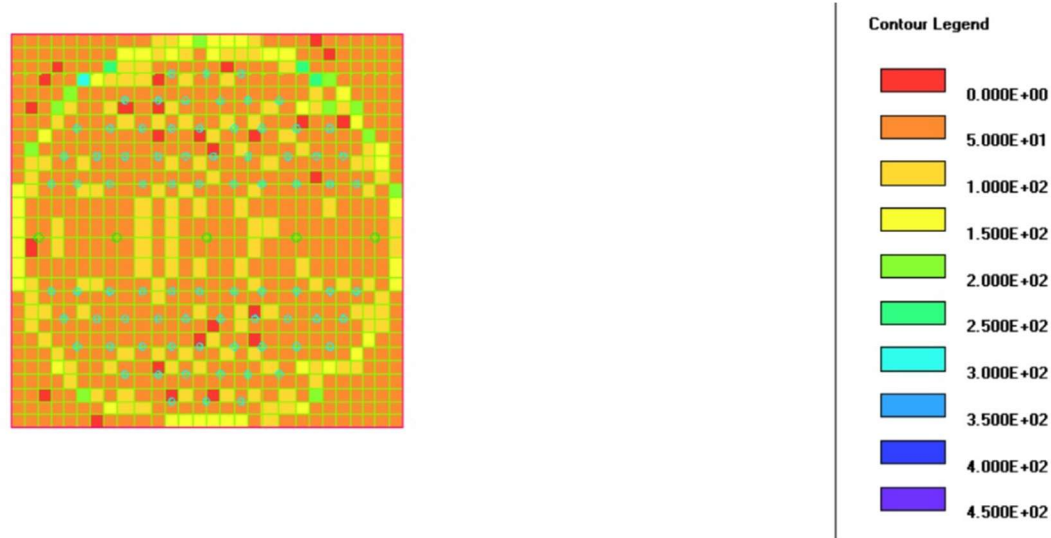


Figura 62. Representação da tensão de iteração (Reanálise), Software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A distribuição das tensões em cada uma das estacas fica determinado pela Figura 65.

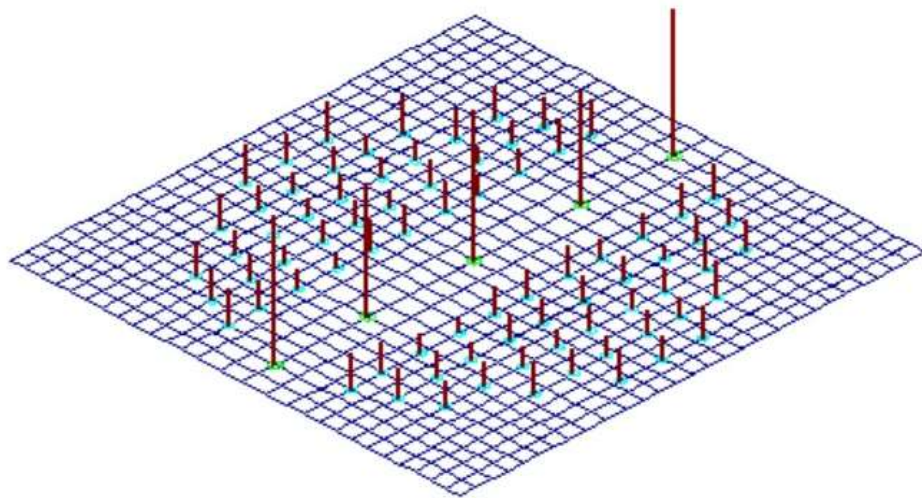


Figura 63. Tensão em cada uma das estacas.
Fonte: Próprio autor, (2025).

A Figura 66 é o resultado do cálculo do recalque feito pelo software GARP que foi utilizada para cálculo da distorção angular.

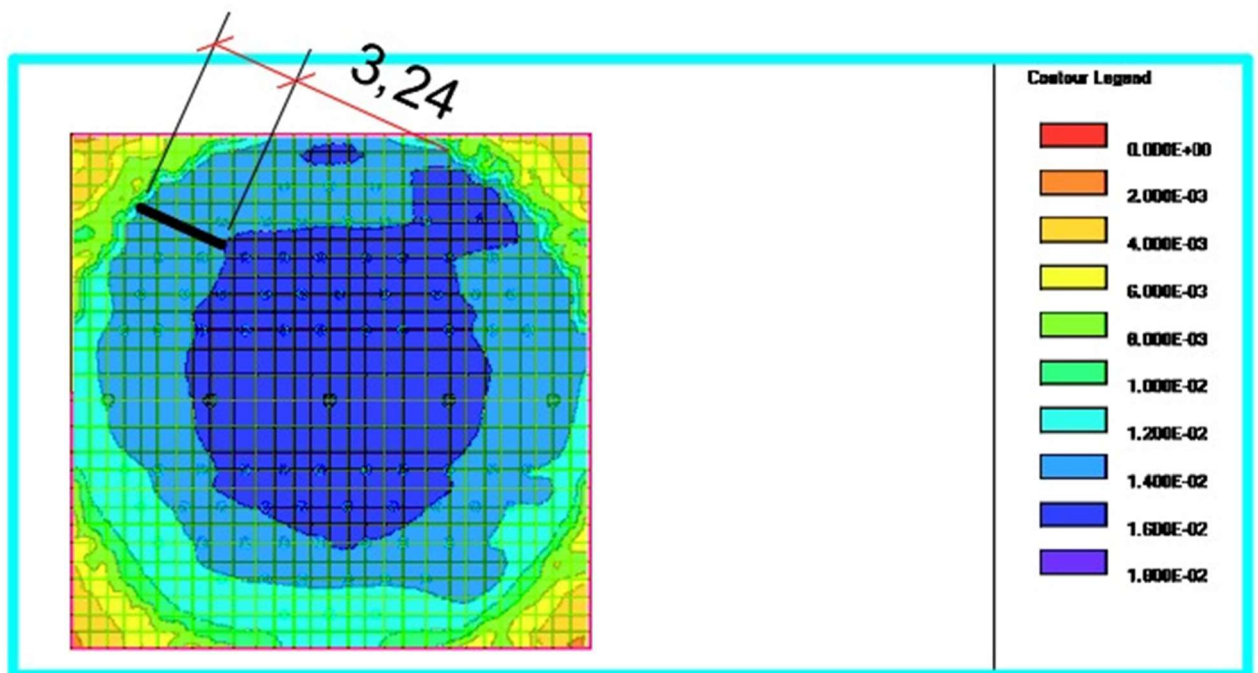


Figura 64. Zonas de recalque, software GARP.
Fonte: Próprio autor, (2025).

No novo modelo, observa-se uma variação de recalque de 10 mm a 16 mm em um trecho de 3,24 metros, que resulta em uma distorção angular de aproximadamente $1/540$. Esse valor está bastante próximo da meta de $1/500$, considerada ideal para o equilíbrio entre desempenho estrutural e viabilidade. Dessa forma, conclui-se que essa é a melhor configuração obtida para

a fundação com inclusão rígida, sendo necessária apenas a redução do comprimento das estacas de 13 para 9 metros.

Com relação a análise do gasto de concreto, a diminuição em m³ é dada pela Figura 67.

COMPARAÇÃO CONSUMO DE CONCRETO					
Caso	Tipo de Fundação	Estacas Ø40cm x 15m (unid)	Estacas Ø30cm x 13m (unid)	Volume Total de Concreto (m³)	Observações
1	Radier-Estaqueado	25	0	47,12	25 estacas Ø40cm x 15m
2	Inclusão Rígida	5	78	59,02	5 estacas Ø40cm x 15m + 78 estacas Ø30cm x 9m

Figura 65. Comparação consumo de concreto entre radier estaqueado e reanálise inclusão rígida.

Fonte: Próprio autor, (2025).

Observa-se que, com a adoção de estacas de 9 metros, o dimensionamento da fundação por inclusão rígida resulta em um consumo de concreto aproximadamente 25% superior ao do radier estaqueado. No entanto, essa diferença é compensada pelo melhor desempenho geotécnico da solução, evidenciado por um menor coeficiente de distorção angular.

5 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi identificar a solução de fundação estaqueada mais viável do ponto de vista técnico para a implantação de silos graneleiros no solo do município de Rio Verde – GO. Para tanto, compararam-se dois modelos de fundação: radier estaqueado e fundação com inclusão rígida.

O conhecimento das diferentes possibilidades de dimensionamento amplia significativamente as alternativas disponíveis ao projetista. A partir do domínio de modelos empíricos e do embasamento em normativas relevantes, como a BS 8006 e a NBR 6122, é possível estabelecer parâmetros sólidos para o desenvolvimento de projetos de fundação que garantam tanto a segurança estrutural quanto a viabilidade.

O dimensionamento e a modelagem das fundações foram realizados com o suporte dos softwares GARP e DEFPIG, ferramentas fundamentais que possibilitaram uma análise detalhada de todos os elementos envolvidos, com base em metodologias empíricas e normativas. A utilização desses programas tornou viável a comparação entre os sistemas, ao sintetizar a grande quantidade de cálculos necessários para cada tipo de fundação.

A verificação da distorção angular revelou-se essencial para avaliar a viabilidade e a segurança de cada solução. Os resultados indicaram que, para as condições do solo estudado e para as cargas provenientes do silo analisado, a fundação com inclusão rígida, após otimização com estacas de menor comprimento, apresentou desempenho mais próximo da razão ideal de 1/500, considerada o equilíbrio entre segurança estrutural e custo de execução. Dessa forma, conclui-se que, apesar do maior consumo de concreto, a fundação com inclusão rígida otimizada constitui a alternativa mais vantajosa para as condições analisadas.

O radier estaqueado apresenta como principal vantagem a necessidade de um menor número de estacas mobilizadas, que resulta em um sistema de fundação eficiente na transferência de cargas. Por outro lado, requer estacas armadas e um dimensionamento cuidadoso da armadura nas canaletas de aeração, que devem atuar como parte integrante do radier para garantir a adequada transmissão de esforços entre a laje e as estacas.

O radier sobre inclusões rígidas possibilita o uso de estacas menos profundas e, em alguns casos, a substituição por estacas escavadas sem armadura, simplificando e tornando mais econômico o processo executivo. Contudo, essa solução requer maior controle de compactação na camada de transferência de carga entre os capitéis das estacas e o fundo da laje, além do custo adicional com a aquisição e instalação do geossintético (como a geogrelha bidirecional), necessário para o correto funcionamento do sistema.

Considerando as análises técnico-econômicas, ambas as soluções se mostraram viáveis e apresentam resultados similares em termos de desempenho estrutural e custo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Apostila do curso de fundações de silos, reservatórios e graneleiros**. 1. ed. [S.l.]: Engeduca, 2020.

ASIRI NATIONAL PROJECT. **Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements**. França: IREX, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12110**: Silos metálicos de chapas corrugadas – Requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2019.

BERNARDES, Hélio C. *et al.* Numerical analysis of piled raft foundations designed for settlement control on steel grain silos in collapsible soils. **International Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 6, p. 607-622, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00586-5>.

BJERRUM, Laurits. Allowable settlement of structures. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1963, Wiesbaden. **Proceedings...** Wiesbaden, 1963. p. 135–137.

BRIANÇON, Luc; DIAS, Daniel; SIMON, B. Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions - reinforced industrial building. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 11, p. 1592-1604, 2015.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8006-1**: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills – Part 1: General. London: BSI, 2010.

CASTILLO, David Javier Apaza. **Uso da Técnica de Radier Estaqueado Para Pequenos Edifícios Assentes Sobre Solo Mole Colapsível**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CONCIANI, Washington. **Possíveis Melhoramentos no Projeto e Construção de Silos**. 2016. 91 f. Tese (Candidatura à Classe de Professor Titular) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, Brasília, 2016.

COOKE, R. W. Piled raft foundations on stiff clays—a contribution to design philosophy. **Géotechnique**, London, v. 36, n. 2, p. 169-203, 1986.

DÉCOURT, Luciano. Dimensionamento de estacas a partir de ensaios SPT: Atualização do método Décourt-Quaresma. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 10., 1996, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 1996.

DOGANGUN, Adem *et al.* Cause of damage and failures in silo structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 23, n. 2, p. 65-71, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2009\)23:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2009)23:2(65)).

EMBRAPA. Tipos de Silos. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**, 2019. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01_308_217200392413.html. Acesso em: 20 ago. 2024.

FARIA, Guilherme Augusto Isaac; ROCHA, Marcella Tahan. **Modelagem analítica e numérica de fundações para silos metálicos graneleiros**. 2018. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

GEOFIX. **Estacas Escavadas de Grande Diâmetro e/ou Barrete**. Disponível em: <https://www.geofix.com.br/servico-estaca-barrete.php>. Acesso em 20 ago. 2025.

GEOTECHDATA. **Angle of friction**. [S.l.: s.n.], (2013). Disponível em: <https://www.geotechdata.info/parameter/angle-of-friction>. Acesso em: 18 maio 2025.

GEOTECHDATA. **Young's Modulus**. [S.l.: s.n.], [2012]. Disponível em: <https://www.geotechdata.info/parameter/soil-young-s-modulus>. Acesso em: 18 maio 2025.

GOMES, Fabíola C.; CALIL JUNIOR, Carlito. Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 7, p. 35-63, 2005.

GSI. **Armazenagem de Grãos**. Disponível em: <https://www.grainsystems.com/sa/pt/produtos/armazenagem-de-graos/>. Acesso em 20 ago. 2025.

LÓDÖR, K.; MÓCZÁR, B.; MAHLER, A. Análise numérica em 3D de um silo com um sistema de fundações de inclusão rígida (húngaro). *In*: GEOTECHNIKA 2016

KONFERENCIA, 2016, Budapeste. **Anais [...]**. Budapeste, 2016.

MENDES, Gabriel Campos Araújo. **Análise geológico-geotécnica da cidade de Rio Verde – GO e desenvolvimento de cartas de aptidão para fundações com base em sondagens SPT utilizando o QGIS**. 104 f. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

MÓCZÁR, B. *et al.* Back analysis of settlements beneath the foundation of a sugar silo by 3D finite element method. **Plaxis Bulletin**, p. 12-17, Spring issue, 2016.

NETO, Elpídio de S. P. **Notas de aula MEC SOLOS 2**. [S.l.]: Universidade Federal de Sergipe, [2012]. Disponível em: <https://ecivilufes.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/notas-de-aula-ufse.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

POULOS, Harry G. An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 18, n. 2, p. 73–92, 1994.

POULOS, Harry G.; DAVIS, Edward H. **Pile foundation analysis and design**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

REBOLLEDO, J. F. R. *et al.* Performance evaluation of rigid inclusions for settlement control of grain silos in tropical soils. **Soils and Rocks**, v. 45, n. 4, p. 1-15, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.28927/SR.2022.004822>.

REBOLLEDO, J. F. R.; LEÓN, R. F. P.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Performance evaluation of rigid inclusion foundations in the reduction of settlements. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 3, p. 265-279, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.28927/SR.423265>.

SALES, Maurício Martines. **Análise do comportamento de sapatas estacadas**. 2000. 229 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

SANTIAGO, Igor M. **Inclusões rígidas para fundações de silos graneleiros**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SILVA NETO, Ivaldo T. da. **Estado da Arte de Silos Verticais de Madeira**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

SOUZA FILHO, Homero L. de. **Estudo da técnica de sistemas em radier estacado para fundações de silos graneleiros do Centro-Oeste**. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

ZEN, Felipe B. **Armazém Graneleiro: Projeto com placas pré-fabricadas de concreto**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ZHANG, L. M.; NG, A. M. Y. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations. **Géotechnique**, v. 55, n. 2, p. 151–161, 2005.

ANEXOS
ANEXO A - PLANTA MECANICA DO SILO ESTUDADO

