

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Civil

AMANDA QUIRINO DA COSTA MACHADO

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM SILO DE
FUNDO PLANO COM ESTACAS ESCAVADAS**

UBERLÂNDIA
2022

AMANDA QUIRINO DA COSTA MACHADO

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM SILO DE
FUNDO PLANO COM ESTACAS ESCAVADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M149 Machado, Amanda Quirino da Costa, 2000-
2022 Estudo da otimização da fundação de um silo de fundo
plano com estacas escavadas [recurso eletrônico] /
Amanda Quirino da Costa Machado. - 2022.

Orientador: Jean Rodrigo Garcia.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. I. Garcia, Jean Rodrigo, 1980-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

AMANDA QUIRINO DA COSTA MACHADO

**ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM SILO DE
FUNDO PLANO COM ESTACAS ESCAVADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Michael Andrade Maedo
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. MSc. Luis Henrique Rambo
Universidade Federal do Amapá

UBERLÂNDIA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que me permitiu chegar até aqui e vencer essa etapa.

Agradeço aos meus pais por me proporcionarem o suporte necessário e sempre me apoiarem para o meu crescimento e à minha irmã que sempre esteve ao meu lado.

Aos meus familiares pelo apoio, preocupação e ajuda mesmo de longe.

Ao meu orientador, Dr. Jean R. Garcia, que aceitou esse desafio comigo, teve paciência, esteve sempre aberto a me atender, ajudar e me ensinou além da parte acadêmica.

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM SILO DE FUNDO PLANO COM ESTACAS ESCAVADAS

Amanda Quirino da Costa Machado¹

Jean Rodrigo Garcia²

RESUMO

O Brasil é um grande produtor agrícola, aumentando sua produção cada vez mais, sendo assim necessária a prática do armazenamento de grãos. Os silos metálicos de fundo plano são comuns no país, porém, não existe no Brasil uma norma que regule o projeto das fundações dos silos. Nesse sentido, avalia-se neste trabalho, algumas possibilidades de otimização das fundações de silos de fundo plano, garantindo os aspectos de segurança e estabilidade inerentes a este tipo de estrutura. Assim foram comparadas diferentes soluções de fundação estaqueadas, visando melhorar o desempenho desta fundação em relação ao comportamento carga e recalque. Para tanto, as estacas foram distribuídas radialmente em um bloco circular plano de baixa rigidez, sendo que os comprimentos das estacas foram variados do centro para a borda do bloco. Para tanto, foram realizadas análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF-2D) em um modelo axissimétrico por meio do software RS2, com estacas e situação do solo baseadas no resultado de uma prova de carga estática e lenta, em uma estaca escavada, de 30 cm de diâmetro e 8 m de comprimento. Após as análises feitas através do software, as soluções otimizadas foram então comparadas ao projeto tradicional com estacas de comprimento uniforme e observou-se que as otimizações geram economia nos insumos utilizados e consequentemente menores emissões de carbono na atmosfera. Os casos com estacas mais longas no centro do radier e mais curtas na borda da laje (PR8-6-4 e PR7-5-3), que apresentaram o melhor desempenho e a melhor relação custo-benefício.

Palavras-chave: fundação plana para silo, radier estaqueado, análise numérica, curva carga e recalque.

¹ Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: amandaquirinom@gmail.com

² Professor da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: jean.garcia@ufu.br

STUDY OF OPTIMIZATION OF THE FOUNDATION SLAB FOR ONE SILO WITH BORED PILES

Amanda Quirino da Costa Machado¹

Jean Rodrigo Garcia²

ABSTRACT

Brazil is a major agricultural producer, increasing its production more and more, thus requiring the practice of grain storage. The slab for metallic silos are common in the country, however, in Brazil there is no standard that regulates the design of silo foundations. In this sense, some possibilities for optimizing the foundations of flat-bottom silos are evaluated in this work, maintaining the safety and stability aspects inherent to this type of structure. Thus, different solutions of piled foundation were compared, aiming to improve the performance of this foundation in comparison to the load and settlement curve behavior. For that, the piles were distributed radially in a circular slab non-stiffened slab, and the lengths of the piles were varied from the center to the edge of the slab. For that, numerical analyzes were carried out by the Finite Element Method (FEM-2D) in an axisymmetric model using the RS2 software, with piles and soil situation based on the result of one static load test (slow maintained load), carried out in a bored pile, of 30 cm in diameter and 8 m in length. After the analyzes made through the software, the optimized solutions were then compared to the traditional design with piles of uniform length, and it was observed that the optimizations generate savings in the inputs used and consequently lower carbon emissions into the atmosphere. The cases with longer piles at the center of the raft and shorter at the edge of the slab (PR8-6-4 e PR7-5-3), which presented the best performance and the best cost-benefit ratio.

Keywords: Slab foundation for silo, piled raft, numerical analysis, load and settlement curve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de safra vs Capacidade de armazenamento estático	11
Figura 2 – Tipos de silo em relação ao solo	13
Figura 3 – Sistemas de Fundação	15
Figura 4 – Comportamento do solo para fundações rígidas e flexíveis.....	15
Figura 5 – Porcentagem de carga sobre o radier	17
Figura 6 – Diminuição do recalque devido acréscimo de estacas	17
Figura 7 – Curva carga versus recalque em diferentes abordagens de radier estaqueado	18
Figura 8 – Diferentes interações entre radier solo e estacas.....	19
Figura 9 – Ensaio de sondagem SPT	20
Figura 10 – Método PDR em formato original	22
Figura 11 Curva carga versus recalque simplificada.....	25
Figura 12 – Silo de fundo plano Pagé	30
Figura 13 – Determinação da altura do radier pelo topo das estacas	31
Figura 14 – Esquema de estacas em metros	35
Figura 15 – Casos inseridos no software para análise	36
Figura 16 – Deformação nas bordas do semiespaço.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do silo modelo	29
Tabela 2 – Parâmetros dos materiais para entrada no software e análise numérica	32
Tabela 3 – Estágios de carga aplicada	34
Tabela 4 - Rigidez da fundação	38
Tabela 5 – Valores da carga de ruptura, carga e recalque admissíveis	39
Tabela 6 – Deslocamentos do radier Caso I	41
Tabela 7 – Deslocamentos do radier.....	42
Tabela 8 – Deslocamentos de centro e borda do radier	42
Tabela 9 – Resistência das estacas posicionadas próximo ao centro do radier	43
Tabela 10 – Resistência das estacas posicionadas próximo a borda do radier	44
Tabela 11 – Resistência da estaca mais próxima ao centro	44
Tabela 12 – Resistencia lateral da estaca mais externa	45

SUMÁRIO

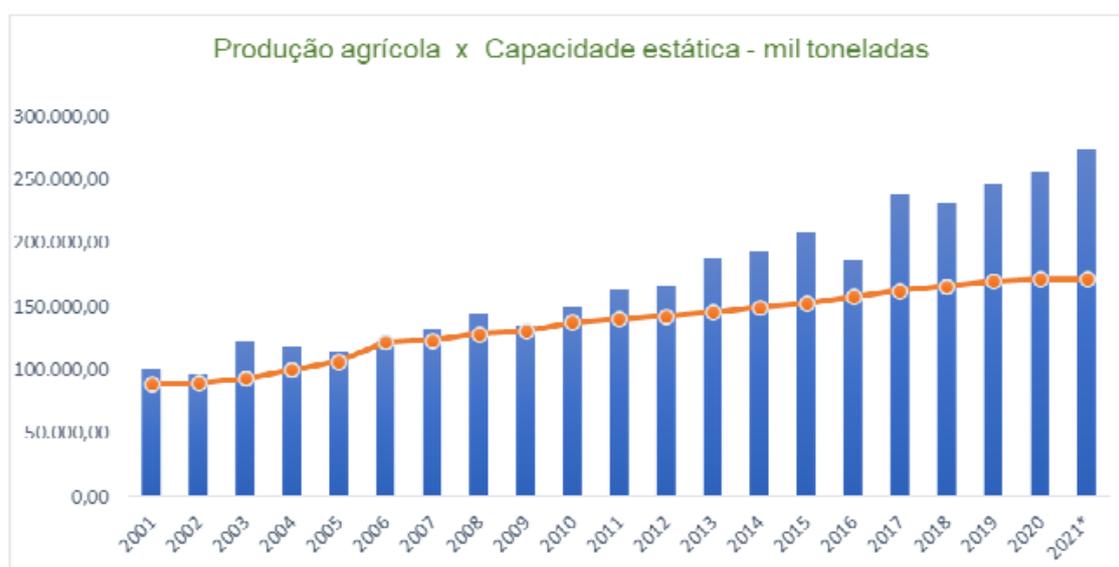
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Silos	13
2.2	Fundação	14
2.3	Investigação geotécnica	20
2.4	Capacidade de carga	21
2.5	Métodos de cálculo	21
2.6	Análise numérica	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Silos de fundo plano	29
3.2	Altura do radier.....	30
3.3	Dados do solo.....	31
3.4	Software RS2	32
4	ANÁLISE DA FUNDAÇÃO.....	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Curva Carga vs recalque	37
5.2	Carga de ruptura e admissível.....	39
5.3	Semiespaço	39
5.4	Comportamento do radier	40
5.5	Tensão nas estacas	43
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	APÊNCIDES	49
	ANEXO A – RELATÓRIO DE SONDAÇÃO DO SOLO COM SPT	55

ANEXO B – RESULTADOS DA PROVA DE CARGA.....	56
ANEXO C – TABELA DE JOSSERT JÚNIOR (2007).....	57
ANEXO D – ESTADO DE COMPACIDADE E CONSISTÊNCIA – ABNT NBR 6484/2020	58

1 INTRODUÇÃO

A safra brasileira continua superando recordes de produção, registra-se inclusive que o agronegócio brasileiro teve condições significativamente favoráveis em 2020, sendo o setor menos afetado pela crise mundial do coronavírus, com a produção de grãos atingindo 251,2 milhões de toneladas. Por outro lado, a capacidade estática de armazenagem não tem acompanhado este crescimento, que a exemplo de cooperativas paranaenses somente podem estocar 54 % da capacidade de produção do seu estado. De acordo com dados recentes, houve um maior investimento do governo paranaense em armazenagem e construção de silos para a safra de 2021/2022 com o Programa federal para Construção e Ampliação de Armazéns (PCA). O gráfico abaixo mostra a produção de grãos comparado a capacidade de armazenagem do Brasil (Figura 1), exposto no boletim logístico da Companhia Nacional de Abastecimento, onde os silos predominam, respondendo por 61,7 % da capacidade armazenadora regional (NITAHARA, 2021).

Figura 1 – Volume de safra vs Capacidade de armazenamento estático



Fonte: (CONAB, 2021)

A armazenagem impacta diretamente a lucratividade da produção. Quando feita corretamente, mantém a qualidade dos grãos, aumentando o poder e tempo para negociação do agricultor, melhorando os ganhos no momento da comercialização. Com a armazenagem própria, há também a redução com custos logísticos, enquanto a ausência de armazenagem compromete em até 15 % a receita dos agricultores. A estimativa em 2017 era que a falta de silos trazia para o Brasil uma perda de 34 milhões de toneladas de

grãos por ano, cálculo do especialista em logística Renato Pavan, que aponta que a deficiência na armazenagem aumenta ainda mais o custo do escoamento da safra de grãos (FORMIGONI, 2017).

Desta forma, é evidente a necessidade de aumento destas estruturas, assim como da importância de serem dimensionadas de forma otimizada para atender adequadamente as necessidades do agronegócio brasileiro.

1.1 Justificativa

No Brasil, a armazenagem de grãos é usualmente realizada em silos de grandes dimensões. Entretanto, não há uma norma específica para o projeto das fundações deste tipo de estrutura, sendo que alguns casos podem ocorrer o sub ou superdimensionamento e conseqüentemente onerando os custos materiais, humanos, prazo de execução, além do aumento da geração de carbono de forma desnecessária. A escassez de estudos sobre a otimização do projeto de fundações de silos tem causado preocupação, visto que, como em qualquer outra estrutura, o desempenho da fundação tem grande impacto no resultado da construção podendo comprometer o seu funcionamento ou até mesmo levando ao colapso da estrutura. Assim, análises de alternativas de projeto de fundação para esta estrutura, que respeitem as características de resistência e deformabilidade do solo, assim como os limites da estrutura, são importantes pois o processo de otimização técnica, pode trazer benefícios para a construção responsável, melhorando a performance de toda a construção, diminuindo o consumo de materiais, a emissão de carbono no meio ambiente, além da redução de custos, desperdícios e dos prazos para execução.

1.2 Objetivos

Analisar a otimização de fundações estacadas para silos de fundo plano, por meio da comparação entre o projeto convencional e solução(ões) que consideram a variação do comprimento das estacas, além de serem estrategicamente posicionadas para um melhorar o desempenho desta fundação em relação ao comportamento carga e recalque.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Silos

Os silos são destinados ao armazenamento de *commodities*, sendo uma importante etapa da cadeia produtiva. A armazenagem de grãos em silos é comum no Brasil, oferecendo a possibilidade aos produtores de esperar o melhor momento para a venda. Silos são células individualizadas, geralmente cilíndricas, construídas em chapas metálicas corrugadas ou lisas, concreto, alvenaria ou madeira e, quando agrupadas, denominam-se baterias, sendo compostos por sistema de carregamento e descarregamento e, além disso, podendo apresentar sistema de ventilação ou não (BADIALE; SÁLES, 1999). Estas estruturas podem ser classificadas em função do material estrutural aplicado, quanto a construção em relação ao solo e pela sua geometria.

Quanto ao material, podem ser construídos em concreto armado, protendido, chapas metálicas, madeira, entre outros. Observando o interior do país nota-se a grande quantidade de silos em chapa metálica ondulada, utilizando de aço galvanizado.

Quanto à construção em relação ao solo podem ser considerados quatro diferentes situações, sendo:

- silos elevados: acima do nível do solo;
- silos planos: construídos no nível do solo;
- silos subterrâneos: compartimento de estocagem abaixo do nível do solo;
- silos semisubterrâneos: intermediário entre subterrâneos e elevados.

Figura 2 – Tipos de silo em relação ao solo



Fonte: BAPTISTA (2021)

Já quanto à geometria Calil e Cheung (2007), apud Batista (2021), citam que ela é um fator importante para a classificação de um silo, sendo divididos da seguinte maneira:

- Silos esbeltos: relação entre altura (H) e diâmetro (D) superior ou igual a 1,5.

- Silos baixos: relação entre altura (H) e diâmetro (D) inferior a 1,5.
- Silos horizontais: a medida da dimensão longitudinal é dominante sobre as outras dimensões do silo.

2.2 Fundação

Fundações são divididas entre profundas e rasas, sendo que, segundo a ABNT NBR 6122:2019, as rasas são aquelas que transmitem a carga para o solo através das tensões sob a área de sua base e a profundidade de assentamento em relação ao terreno seja inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Já as fundações profundas são elementos que transmitem a carga ao solo pelas superfícies laterais e base (resistência de ponta), devendo a ponta estar em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta e no mínimo três metros.

A associação de fundações profundas e superficiais denomina-se fundação mista, onde exemplos comuns são sapata associada a estacas e também o radier estaqueado. A diferença entre um radier estaqueado e os grupos convencionais de estacas é que, o termo grupo de estacas sugere a forma clássica de fundação, no qual somente as estacas são responsáveis por absorver e transferir ao terreno o carregamento, tendo o bloco apenas o papel estrutural de ligar as estacas ou estacas e estrutura, enquanto uma fundação mista como o radier estaqueado leva em consideração nos cálculos o contato bloco-solo.

Considerando o caso de Mandolini (2013) para exemplificação, tem-se que a distribuição de carga entre os elementos de um radier estaqueado pode ser caracterizada pelo coeficiente α_{pr} dado por:

$$\alpha_{pr} = \sum Q_{est,i} / Q_{RE} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

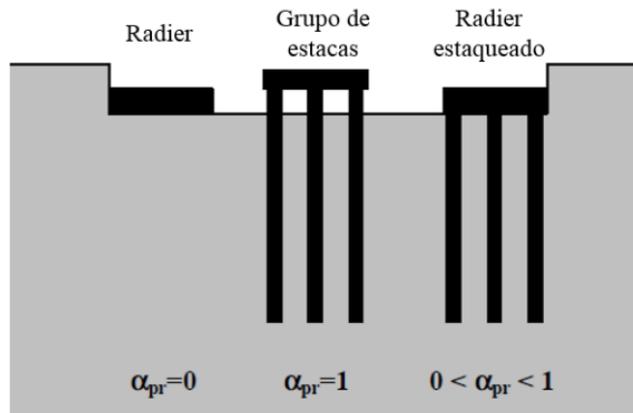
$Q_{est,i}$: é a carga absorvida pela estaca i ;

Q_{RE} : é a carga total aplicada ao radier estaqueado.

Uma fundação superficial sem estacas (radier isolado) é caracterizada por um coeficiente $\alpha_{pr} = 0$, enquanto $\alpha_{pr} = 1$ caracteriza um grupo de estacas interligados por um bloco ausente de contato com o solo, e o intervalo entre $0 < \alpha_{pr} < 1$ é característico de

uma fundação em radier estaqueado, ou seja, tanto o radier quanto o grupo de estacas trabalham concomitantemente na transferência cargas da estrutura ao solo.

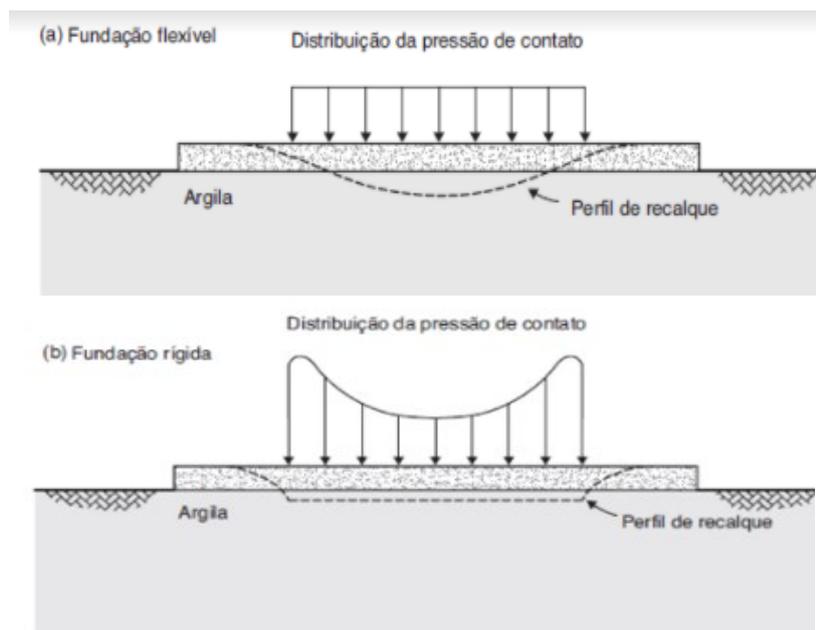
Figura 3 – Sistemas de Fundação



Fonte: MANDOLINI et al., (2013)

Tem-se ainda a classificação do radier pelo seu comportamento quanto à rigidez à flexão, podendo ser rígido ou flexível. Quando a rigidez a flexão é relativamente grande, o elemento estrutural pode ser tratado como um corpo rígido, e normalmente requer maior quantidade de materiais. Os radiers elásticos possuem maior facilidade de execução, são de menor rigidez e os deslocamentos relativos da placa não são desprezíveis. Essa classificação influencia diretamente na pressão de contato e recalque da fundação.

Figura 4 – Comportamento do solo para fundações rígidas e flexíveis



Fonte: Garcia e Albuquerque (2020)

Sobre as estacas, pode-se afirmar que existem diversos tipos, os quais são distinguidos pela maneira na qual a estaca é construída. Em função das características executivas são divididas em:

- Pré-fabricadas: metálica, concreto armado ou protendido e madeira;
- Moldadas *in loco*: broca, escavada, Strauss, barrete, hélice contínua, Franki, ômega, raiz e microestaca;
- Prensadas: mega de concreto ou metálica.

Neste trabalho serão utilizadas estacas escavadas, onde a ABNT NBR 6122:2019 define que são realizadas com o auxílio de um trado mecânico, sem emprego de revestimento ou fluido estabilizante. Onde após perfurado é realizada a concretagem. As estacas da fundação são dimensionadas baseando-se na distribuição de tensões na base do silo. As estacas adotadas são do tipo escavadas de concreto C25 moldadas *in loco* sem fluido, e a tabela 4 da ABNT NBR 6122:2019 deve ser seguida a fim do dimensionamento da armadura. Será adotada uma tensão de compressão (σ_c) menor que 5 MPa, sendo necessária somente a porcentagem mínima de armadura, logo:

$$A_S = 0,04 A_{est} \quad \text{Equação 2}$$

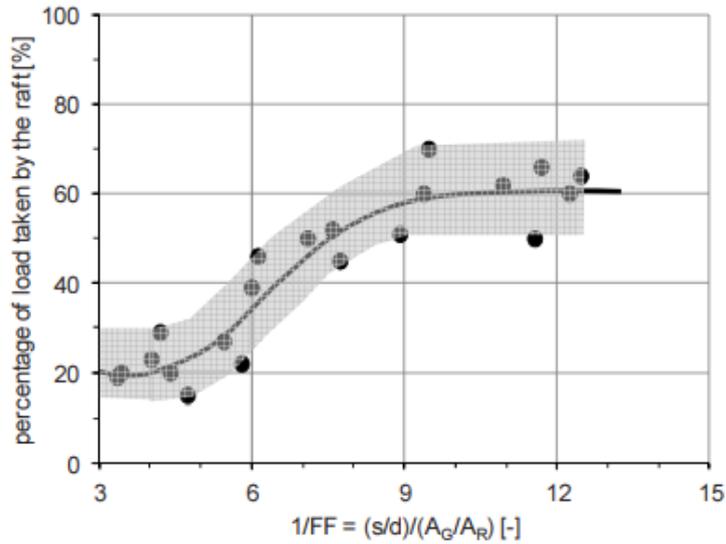
Em que:

A_S : Área de aço;

A_{est} : Área da estaca.

Utiliza-se neste trabalho a fundação mista radier estaqueado. Mandolini *et al.* (2013) cita que a tradicional abordagem para construção de fundações consiste primeiramente em escolher uma fundação rasa, e caso essa não atendesse, uma fundação estaqueada era adotada, assumindo então que todas as cargas estivessem sobre as estacas. Porém os autores trazem evidências experimentais de que para o radier estaqueado, grupos de estacas com relação de espaçamento pequeno s/d (~ 3 a 4) e cobrindo a área total do radier a A_R ($A_G/A_R \sim 1$), a porcentagem de carga suportada pelo radier não é inferior que aproximadamente 20 %, valor que pode aumentar até 60-70 % aumentando o s/d ou diminuindo A_G/A_R .

Figura 5 – Porcentagem de carga sobre o radier

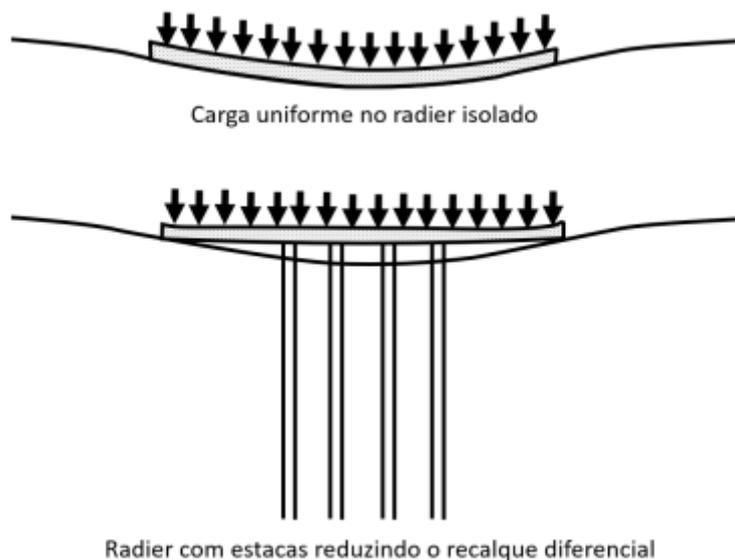


Fonte: MANDOLINI et al., (2013)

Nota-se então que no modelo de radier estaqueado, o elemento superficial em contato com o solo contribui com a redução do recalque no sistema, absorvendo esforços do solo, que influencia na parcela da capacidade de carga que influi sobre as estacas.

Randolph, (1983) afirma que a introdução de estacas na fundação em radier tem como objetivo principal a redução de deslocamentos verticais do solo para um valor aceitável (Figura 6).

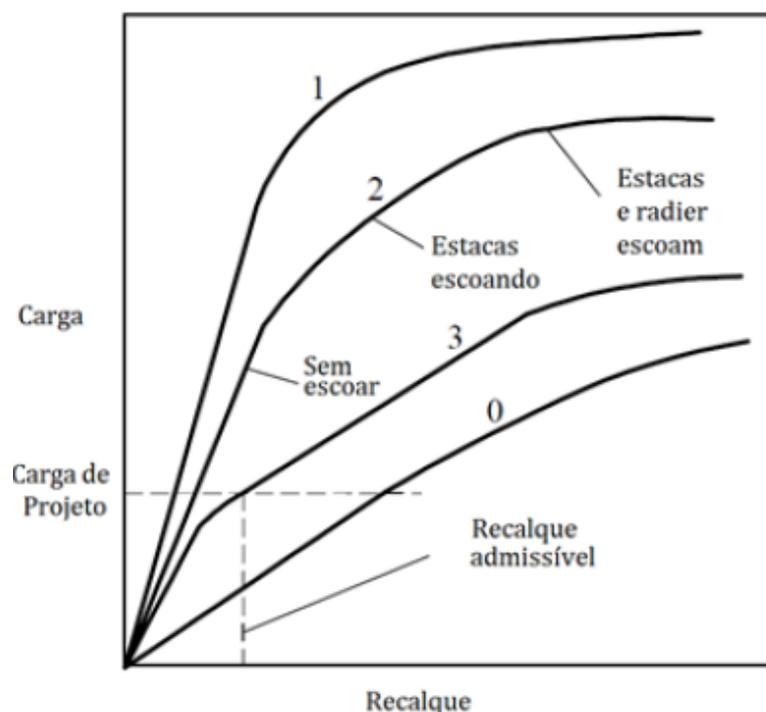
Figura 6 – Diminuição do recalque devido acréscimo de estacas



Fonte: Adaptado de Randolph (1994)

Da abordagem onde as estacas são redutoras de recalque e aumentam a capacidade de carga máxima do sistema de fundação, Poulos (2001) ilustra o comportamento carga *versus* recalque de um radier estaqueado com outros métodos de fundação como mostrado na figura 7, onde a curva 0 representa o comportamento do radier isolado apresentando recalques excessivos, a curva 1 representa o projeto convencional, em que o comportamento do sistema de fundação com radier estaqueado é governado pelo comportamento do grupo de estacas, as quais absorvem o maior percentual do carregamento e apresenta a curva carga versus recalque linear para carga de projeto. A curva 2 representa a abordagem que considera as estacas trabalhando com baixo fator de segurança, mas devido ao reduzido número de estacas, o radier suporta um maior carregamento do que a curva 1. A curva 3 demonstra a utilização de estacas como redutoras de recalque, utilizando a capacidade última das estacas no dimensionamento do projeto. Assim, a curva se apresenta não linear, mas ainda assim o sistema de fundação apresenta margem de segurança adequada e o critério de recalque é satisfeito. Logo, a abordagem representada pela curva 3 é aceitável e se apresenta como a solução provavelmente mais econômica do que as abordagens representadas pelas curvas 1 e 2.

Figura 7 – Curva carga versus recalque em diferentes abordagens de radier estaqueado



Fonte: Poulos (2001) *apud* Garcia (2015)

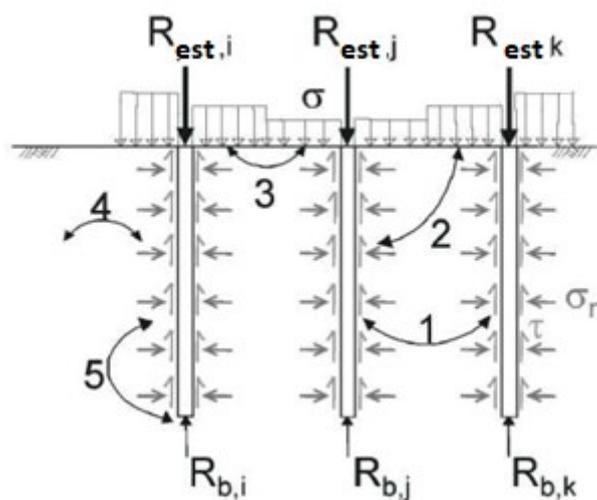
Ainda segundo Poulos (2001), o projeto de uma fundação do tipo radier estaqueado demanda diversas análises, conforme proposição de:

- Capacidade de carga última para carregamento vertical, horizontal e momento;
- Recalque máximo;
- Recalque diferencial;
- Esforços no radier para o projeto estrutural;
- Esforços nas estacas.

É necessário também considerar como citado por Freitas (2018), que o comportamento da fundação em radier estaqueado depende de vários fatores, como o solo; a geometria do radier; a quantidade, diâmetro, comprimento, tipo, espaçamento e posicionamento das estacas sob o radier; o tipo e intensidade do carregamento aplicado; e a interação entre todos os elementos do sistema de fundação.

Levando em conta a interação entre radier, estacas e solo, pode-se considerar que cada elemento é influenciado pelo outro e inevitável a interação entre eles, inclusive com efeitos horizontais e não somente verticais, como de estaca para estaca e solo-estaca que recebe pressão do radier e influi sobre as estacas, compartilhando assim as cargas e influenciando na capacidade de resistência nos eixos.

Figura 8 – Diferentes interações entre radier solo e estacas



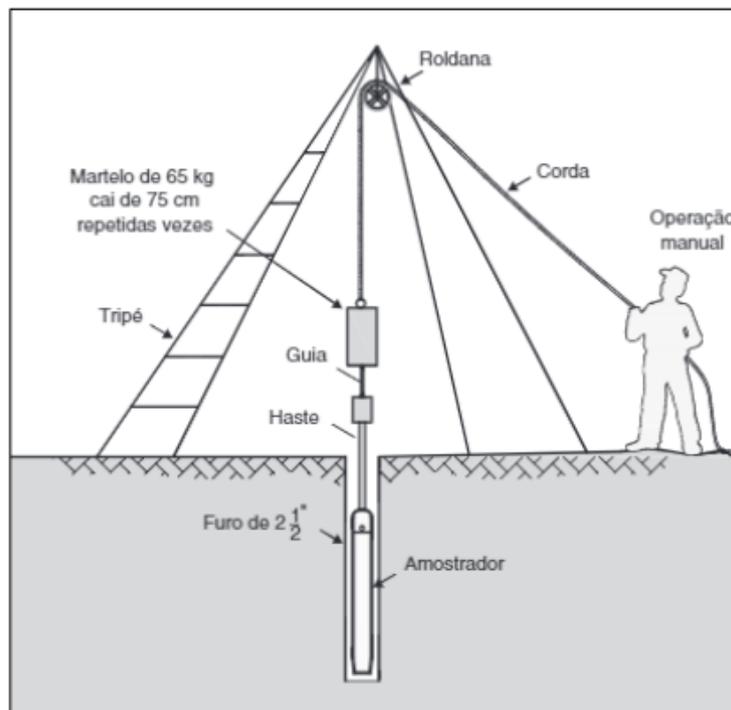
Fonte: Adaptada de Katzenbach et al. (2005)

2.3 Investigação geotécnica

Para início de um projeto de fundação e estrutura é necessário conhecer o solo e subsolo em que irá se trabalhar, obter seus parâmetros e conhecer características físicas, químicas e biológicas. Para isso existem diversos tipos de sondagens, ensaios e testes que servem de reconhecimento inicial e caracterização do solo, como a sondagem a percussão (SPT), ensaio de permeabilidade, piezometria, ensaio de palheta, entre outros que podem ser feitos *in loco* ou em laboratório.

O ensaio SPT, utilizado na validação da estaca deste trabalho, é uma medida de resistência dinâmica feita por meio de uma sondagem de simples reconhecimento. O ensaio consiste em uma cravação de um amostrador padrão, avanço a trado, (revestido ou não), usando da força de queda de um peso de 65 kg a uma altura de 75 centímetros. Com isso, ao final do metro de análise, o valor N_{SPT} representa o número de golpes necessários para o amostrador penetrar 30 cm após ter penetrado os 15 cm iniciais. As amostras representativas são coletadas a cada metro de profundidade e tem início após o primeiro metro ser escavado com trado concha, visando determinar a tipologia do solo presente no local (Figura 9).

Figura 9 – Ensaio de sondagem SPT



Fonte: Albuquerque e Garcia (2020)

2.4 Capacidade de carga

A capacidade de carga, é dividida e conceituada pela NBR 6122:2019 das seguintes formas:

- Carga admissível de uma estaca ou tubulão: máxima carga que, aplicada sobre a estaca ou sobre o tubulão isolados, atende, com fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos (ruptura) e de serviço (recalques, vibrações etc.). Nota: esta grandeza é utilizada no projeto quando se trabalha com valores característicos das ações;
- Carga de ruptura de uma fundação: carga que, se aplicada à fundação, provoca perda do equilíbrio estático ou deslocamento que comprometem sua segurança ou desempenho; corresponde à força resistente última (geotécnica) da fundação;
- Carga de trabalho das estacas: carga efetivamente atuante na estaca, em valores característicos; a tensão de trabalho da estaca corresponde à carga de trabalho dividida pela área da seção transversal.

2.5 Métodos de cálculo

A tensão admissível é a máxima tensão que atende aos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS), com fatores de segurança. Para cálculo de tal tensão através do ELU serão utilizados de métodos semiempíricos, que são métodos que relacionam resultados de ensaios, como por exemplo o SPT (*Standard Penetration Test*), com tensões admissíveis por meio do emprego de fator de segurança. Devendo ser observados os domínios de validade de suas aplicações, bem como as dispersões dos dados e limitações regionais.

Poulos (2001) sugere um processo de projeto para radier estaqueado que passa por três etapas principais:

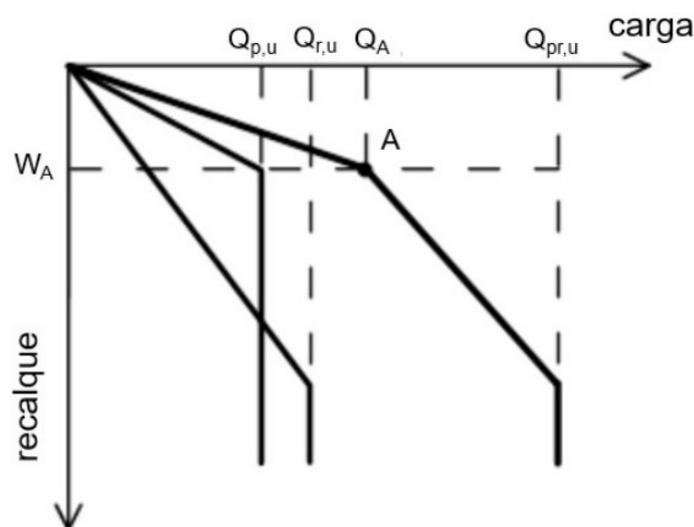
- (a) Fase preliminar para avaliar a viabilidade de usar um radier estaqueado, e o número necessário de estacas para satisfazer os requisitos do projeto.
- (b) Na segunda fase avalia-se onde as estacas são necessárias e as características gerais das mesmas. São estimados valores de momento fletor máximo, cisalhamento, pressões de contato, recalque e requisitos de posicionamento das estacas.

(c) No estágio final de detalhamento do projeto, é obtido o número ideal de estacas, localização, configuração, cargas e momentos atuantes na estaca. As duas primeiras etapas envolvem cálculos relativamente simples, enquanto a etapa detalhada exige o uso de um programa de computador que conta com uma maneira racional de responder a interação entre solo-radier-estaca considerando ainda os efeitos da superestrutura.

O método PDR, combinação de métodos de Poulos e Davis (1980) e Randolph (1994), é citado por Mandolini (2013) e é baseado nas seguintes suposições: (1) estacas e radiers têm comportamento como sistema linear elástico até a ruptura; (2) o radier é rígido e submetido a uma carga central, portanto, apenas um deslocamento vertical uniforme pode ocorrer.

Freitas (2018) cita ainda Mandolini *et al.* (2017) afirmando que no método PDR, a partir do conhecimento do comportamento do grupo de estacas e do radier, considerados como sistemas individuais, é feita uma combinação para prever o comportamento do sistema radier estaqueado. A partir de um ponto de vista conceitual, é possível expressar o recalque do grupo de estacas como o recalque que o grupo de estacas teria na ausência do radier mais uma solução de interação devido à presença do radier. O mesmo se aplica ao comportamento do radier no sistema combinado. São obtidas expressões para a rigidez do radier estaqueado e o compartilhamento de carga. As equações são válidas até que as estacas atinjam a ruptura, apresentado pelo ponto A da Figura 10.

Figura 10 – Método PDR em formato original



Fonte: Mandolini *et al.* (2017) *apud* Freitas (2018)

A rigidez é a razão entre uma determinada carga e o deslocamento que ela provoca, logo, em fase elástica, o recalque de uma fundação (w) é dado por:

$$w = \frac{P}{K_{PR}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde P é a carga aplicada sobre a fundação e K_{PR} a rigidez do radier estaqueado (GARCIA; DE ALBUQUERQUE, 2019).

Para estimar o compartilhamento de carga entre o radier e as estacas, Randolph (1994) utiliza uma abordagem a partir do valor da rigidez tangente inicial da estaca isolada (K_p) e do radier (K_r), obtido a partir do gráfico de prova de carga ou estimado teoricamente, e o fator de interação radier-estaca (α_{rp}), descrita na Equação 4 para o cálculo da rigidez do radier estaqueado (K_{PR}):

$$K_{PR} = \frac{K_{PG} + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}{1 - \alpha_{rp}^2 (K_r/K_{PG})} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

K_{PG} = rigidez do grupo de estacas, K_r = rigidez do radier isolado e α_{rp} = fator de interação estaca-radier.

K_{PG} pode ser obtido a partir da curva carga *versus* recalque da estaca isolada usando a Equação 5

$$K_{PG} = K_p \times (n)^{1-e} \quad \text{Equação 5}$$

Onde n é o número de estacas e o expoente varia entre 0,3 e 0,5 para estacas de atrito.

Tem-se também que K_p é dado pela divisão da carga aplicada pelo deslocamento sofrido devido a carga (δ):

$$K_p = \frac{P}{\delta} \quad \text{Equação 6}$$

A interação entre o radier e o grupo de estacas e a resposta de cada um destes elementos baseado no recalque e rigidez pode ser descrito na Equação 7.

$$\begin{pmatrix} w_{PG} \\ w_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_{PG} & \alpha_{pr}/k_r \\ \alpha_{rp}/k_{PG} & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_{PG} \\ P_r \end{pmatrix} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo: w_{PG} e w_r o recalque, P_{PG} e P_r a carga, e k_{PG} e k_r a rigidez, ambos em relação ao grupo de estacas e ao radier, respectivamente.

Os componentes α_{pr} e α_{rp} são fatores de interação entre o radier e estaca que podem ser obtidos por:

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_1}{k_{PG}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde k_1 é a carga de uma estaca. Para estacas simples com bloco circular de raio r_c , o fator de interação pode ser aproximado pela fórmula:

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_0)}{\zeta} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

r_c = raio médio do radier (correspondente a área do radier pelo número de estacas);

r_0 = raio da estaca;

$\zeta = \ln(r_m/r_0)$;

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

r_m = Raio máximo de influência da estaca;

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

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

ν = Coeficiente de Poisson;

L = Comprimento da estaca;

E_{sl} = Módulo de Young do solo na ponta da estaca;

E_{sb} = Módulo de Young da camada resistente da ponta da estaca;

E_{sav} = Módulo de Young médio do solo ao longo do eixo da estaca.

A proporção de carga transferida pelo radier é calculado da seguinte forma:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k_r(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_{PG} + (1 - 2\alpha_{rp})k_r} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo: P_t = carga total aplicada e P_r = carga transferida pelo radier.

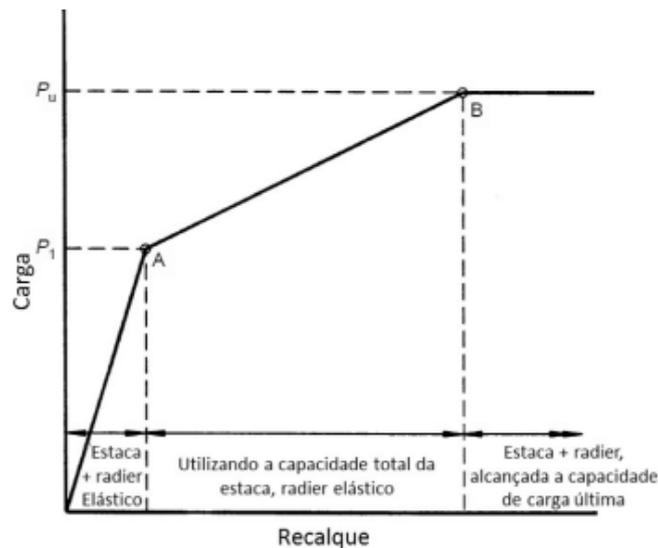
Considerando tais colocações, determinando a rigidez a partir da Equação 4, Poulos (2001) demonstra um método simplificado de curva carga vs recalque para uma análise preliminar na qual a rigidez permanece em atividade até uma mobilização total da carga da estaca (Figura 11).

Supondo que a mobilização da estaca coincida com a carga total aplicada, P_1 , é possível obter a capacidade de carga da estaca a partir da Equação (8) (Ponto A na Figura 11).

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1 - X} \quad \text{Equação 11}$$

Onde: P_{up} é a capacidade de carga última no grupo de estacas e X é a proporção de carga transferida pelas estacas, conforme a Equação 10.

Figura 11 Curva carga versus recalque simplificada



Fonte: Adaptado de Poulos (2001)

Após o ponto A, o recalque desta fundação pode ser calculado de forma diferente da Equação 3 válida para antes desse ponto, sendo:

$$w = \frac{P_A}{K_{PR}} + \frac{P - P_A}{K_R} \quad \text{Equação 12}$$

Mandolini (2003) afirma que o método PDR permite o uso de relações hiperbólicas para prever curvas para carga-recalque de um radier estaqueado, auxiliando na obtenção de um comportamento adequado das fundações. A rigidez do radier estaqueado K_{PR} é dada então pela equação 13:

$$K_{PR} = K_{PG} \times X \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$$X = \frac{1 - 0,6 \times (K_R / K_{PG})}{1 - 0,64 \times (K_R / K_{PG})} \quad \text{Equação 14}$$

A rigidez secante inicial de estacas (K_{PG}) e radier (K_R) pode ser expressa usando a equação de Poulos & Davis (1980):

$$K_{PG} = K_{PG,i} \times \left(1 - R_{PG} \frac{P_{PG}}{P_{PG,ult}} \right) \quad \text{Equação 15}$$

$$K_R = K_{R,i} \times \left(1 - R_R \frac{P_R}{P_{R,ult}} \right) \quad \text{Equação 16}$$

Onde: $K_{PG,i}$ e $K_{R,i}$ são a rigidez tangente inicial do grupo de estacas e do radier, respectivamente.

Fleming *et al.* (1992) propõem que $K_{PG,i}$ pode ser obtido diretamente através do gráfico da curva carga-recalque ou através da Eq. (15). R_{PG} e R_R são fatores hiperbólicos equivalentes a 0,5 e 0,75, respectivamente (Poulos 2000). P_{PG} e P_R são as cargas suportadas pelo grupo de estacas e radier, respectivamente, e $P_{PG,ult}$ e $P_{R,ult}$ são as cargas últimas.

É importante lembrar que métodos analíticos simplificados, como PDR, são adequados para somente um grupo de estacas e não radier estaqueado, pois não consideram o efeito de contato bloco-solo. Porém, certas aproximações podem ser realizadas para a adoção destes métodos em conjunto com modelagens numéricas.

Já o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico que encontra soluções para problemas de valores de contorno de equações diferenciais. É citado por Balakumar, (2008) apud Azevedo, (2021) como uma das ferramentas mais versáteis disponíveis e popular para análises na engenharia, uma vez que os elementos podem ser arranjados e modelados em diversas formas e modelos. Além disso, o método é baseado em equações algébricas simples.

A análise de fundações compostas por meio do MEF possui grandes vantagens quando comparadas com os métodos simplificados. A investigação de uma fundação

estaqueada é complexa pela necessidade de considerar a interação entre os elementos constituintes: estaca, radier e solo. Um Software em MEF fornece elementos de contato avançados para modelar esta interação e permite o emprego de propriedades lineares ou não-lineares na obtenção de uma solução adequada (NOVAK *et al.*, 2005 *apud* AZEVEDO, 2021).

2.6 Análise numérica

O uso de softwares atualmente é fundamental para avaliar o comportamento de fundações em solo. Para tanto, neste trabalho utiliza-se o software RS2, que utiliza o método dos elementos finitos bidimensional (MEF-2D) para simular o comportamento de fundações em solos e rochas, sendo possível também fazer análises tridimensionais por meio do modelo axissimétrico.

Pode-se notar que grande parte dos trabalhos existentes sobre o tema “fundações estaqueadas” envolvendo análises numéricas foram fundamentados por meio do método dos elementos finitos, dentre os quais pode-se citar: Balakumar (2008), Poulos (2001), Mandolini (2003), Sales (2000), Bittencourt (2012), Castillo (2013), Freitas Neto (2013), Curado (2015), Perez (2017), Bittencourt (2018), Celik (2019), Garcia (2015), Garcia e Albuquerque (2021), entre outros.

Dentro do software RS2, utilizando do MEF-2D e aplicado a um modelo axissimétrico, o radier estaqueado e o solo são discretizados em elementos finitos, onde se pode levar em conta o comportamento não-linear do solo. Esse método transforma o elemento em uma malha, simplificando assim a geometria para formas conhecidas como triângulos e tetraedros. Já uma estrutura axissimétrica é uma estrutura que pode ser representada por uma secção transversal que contém um eixo de revolução, ou seja, é simétrico em 360 graus, e através dessa axissimetria é possível simplificar um problema tridimensional para um bidimensional, facilitando o dimensionamento e aplicação dentro de softwares.

O software RS2 é capaz também de analisar em fundações a capacidade de suporte, assentamento e comportamento geral de tensão/deformação de fundações rasas e profundas com análise de vários estágios.

Além disso é necessário ainda conhecer alguns aspectos do solo e do concreto como o módulo de elasticidade do solo para cálculo da rigidez do radier e das estacas, o módulo de elasticidade do concreto e o coeficiente de Poisson do solo e do concreto.

A fim de resultados reais, para análise será utilizado o critério de falha de *Mohr-Coulomb*, modelo comumente usados entre geometrias. A especificação deste modelo e seu critério de rendimento normalmente envolve a hipótese de Coulomb, que postulava uma relação linear entre a resistência ao cisalhamento em um plano e a tensão normal que age sobre ele dado pela Equação 9.

$$\tau = c - \sigma_n \tan \phi \quad \text{Equação 17}$$

Onde τ é a resistência ao cisalhamento, σ_n é a tensão normal (tensão positiva), ϕ está no ângulo de atrito interno e c é a coesão.

O comportamento mecânico de um material modelado com o modelo de *Mohr-Coulomb* inclui características como resistência ao cisalhamento isotrópico (pico e residual) que tem característica coesiva-friccional, e aumenta linearmente com o nível de estresse/confinamento; resistência à tração (usando uma função de rendimento de corte de tensão) e dilatância (aumento de volume) ou estado crítico (volume constante) na falha.

O modelo é adequado para avaliação de estabilidade de problemas geotécnicos e de mineração que não incluam ampla gama de estresse/confinamento. Usando o método de redução de resistência ao cisalhamento, este modelo pode avaliar fatores de segurança equivalentes aos calculados com base na abordagem de equilíbrio limite, e em alguns casos fornece melhor previsão dos modos de falha e dos fatores de segurança. Também pode ser usado com sucesso para cálculos de deslocamento de carga em simulações que incluem geomateriais como cascalhos, areias e rochas.

A combinação do critério de Coulomb e o círculo de *Mohr* do estado de tensão e considerando os estados admissíveis, em termos de tensões principais o critério de falha de *Mohr-Coulomb* ser expresso por:

$$F_S = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad \text{Equação 18}$$

Ou em termos de tensão invariante:

$$F_S = q + M_p - N_c = 0 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$$M = \frac{3 \sin \phi}{\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta \sin \phi} \quad , \quad N = \frac{3 \cos \phi}{\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta \sin \phi} \quad \text{Equação 20}$$

Sendo ϕ o ângulo de atrito interno e θ é em função de invariantes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Silos de fundo plano

Atualmente o silo cilíndrico metálico de fundo plano é o mais difundido no agronegócio brasileiro. Usualmente são montados com chapas lisas ou corrugadas de ferro galvanizado ou em alumínio e apoiados sobre uma base de concreto.

Pode-se dividir a estrutura do silo metálico de fundo plano por superestrutura e infraestrutura:

- Superestrutura: estrutura metálica do silo em sua parte superior, podendo ser as paredes, cobertura, telhado, escadas, estruturas de proteção contra queda, correias transportadoras, elevadores, entre outros componentes.
- Infraestrutura: formada pelo conjunto base e fundação. A base destina-se a sustentação do conjunto de anel de coroamento e laje para suportar a pressão dos produtos armazenados e, a fundação representa o suporte para a superestrutura e a base.

O silo modelo escolhido para este trabalho é da marca Pagé, fabricado em chapas de aço estrutural galvanizado tipo ZAR 345 com cobertura de zinco de 350g/m², de alta resistência mecânica e resistência a corrosão, obedecendo aos critérios de normas internacionais de projeto estrutural. O modelo do silo é SL 6404 e as características estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do silo modelo

Modelo	Dimensões (m)		Vol (m ³)
	Φ	A	
SL 6404	6,4	3,66	135,2

Fonte: Adaptado de Pagé (2022)

Figura 12 – Silo de fundo plano Pagé



Fonte: Pagé (2022)

Os silos Pagé também contam com escada interna e externa tipo marinheiro, porta de inspeção na lateral e na tampa, totalmente vedadas que eliminam a saída falsa de ar e a entrada de umidade no silo.

Para a base do silo, pode-se adotar a mesma geometria que a estrutura ou diferente, por exemplo quadrada. Neste trabalho a base do silo adotado é circular a fim de promover uma boa simetria para uso do modelo axissimétrico, com 8,6 metros de diâmetro, com espaço de 1,1 metro da borda do silo. O silo foi escolhido a fim de definir inicialmente o tamanho do radier para modelagem do problema.

3.2 Altura do radier

Para definição da altura do bloco (h_b) pode-se definir a partir da carga máxima suportada pelas estacas, 200 kN, dado obtido a partir da prova de carga (ANEXO B) e seguindo o dimensionamento do Departamento de Transportes Federal dos Estados Unidos, que utiliza da equação:

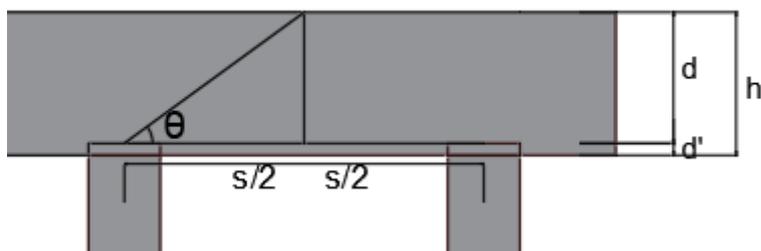
$$h_b = \left(\frac{P_{1e}}{53,38} + 30 \right) \times 0,0254 \quad \text{Equação 21}$$

Sendo (P_{1e}) a carga admissível suportada por uma estaca e o divisor da fração 12 KIPs transformado para quilo newtons.

Considerando as estacas trabalhando com 100 % da sua capacidade de carga, chega-se à altura do bloco de aproximadamente 86 centímetros.

Outro método para calcular essa altura é o método das Bielas, que é calculado através do ângulo (θ) formado entre o topo de duas estacas e a superfície do radier. Segundo este método o ângulo deve obedecer a condição de $40^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ para que não apresente risco de ruptura por punção.

Figura 13 – Determinação da altura do radier pelo topo das estacas



Fonte: Autor (2022)

Sendo que: h é a altura do radier, d' é o embutimento da estaca no interior do radier, considerado igual a 0,05 m e d é a distância do topo da estaca a superfície do radier.

Assumindo um espaçamento de 1,5 m entre as estacas e um ângulo de 40° encontra-se uma altura de cerca de 65 centímetros.

Para modelagem no software foi adotado um radier de 60 centímetros de altura, trabalhando no limite inferior do resultado encontrado, a fim de modelar o radier como flexível e assim permitir uma maior interação no contato bloco-solo.

3.3 Dados do solo

Para análise da estrutura, é necessário conhecer alguns parâmetros do solo, que foram definidos para entrada no software de simulação da análise numérica a partir do relatório de ensaio SPT (ANEXO A), com auxílio da tabela de estado de compactidade e consistência da ABNT NBR 6484:2020 (ANEXO D) e as propriedades adotadas para cada camada de solo conforme valores médios propostos por Joppert Jr.(2007) para parâmetros geotécnicos de vários tipos de solo (ANEXO C – TABELA DE JOPPERT JÚNIOR (2007)), sendo o solo pertencente a cidade de Araguari-MG. A partir daí conclui-se que o solo é homogêneo e composto por um solo de argila porosa vermelha, com N_{SPT} médio de 6. Os valores adotados no software são valores comuns para o solo homogêneo.

Sabe-se ainda, que quando é realizada a perfuração do solo para a execução da estaca, o solo remanescente no fundo do furo apresenta estado típico de um solo fofo, plástico e de baixa resistência, que fica em contato direto com o concreto, levando a uma baixa resistência de ponta de estaca para pequenos deslocamentos durante a realização da prova de carga. Ao considerar esse solo fofo no software é possível alcançar uma representação mais realista dos resultados.

Os parâmetros de entrada no software RS2, tanto do solo como do concreto das estacas e radier estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos materiais para entrada no software e análise numérica

Material	peso específico natural γ (kN/m ³)	Ângulo de atrito ϕ' (°)	coesão c' (kN/m ²)	Es (kPa)	ν
Solo	17	25	30	35000	0,35
Solo fofo	13	25	30	500	0,35
Concreto	25	60	300	25000	0,2

Fonte: Autor (2022)

Os dados do concreto escolhido para inserção no programa foram escolhidos levando em conta parâmetros de modelagem em *Mohr-Coulomb*, segundo Ardiaca (2009).

3.4 Software RS2

O programa é próprio para análise de elementos finitos 2D de estruturas geotécnicas para aplicações civis e de mineração. É composto por três módulos, sendo eles *model*, *compute* e *interpret*.

O *model* é o módulo que consiste no pré-processamento, onde se pode inserir e editar o perfil do solo, os limites do modelo, tensões, condições de contorno, propriedades do material, carregamento e seus estágios e criar a malha de elementos finitos. É onde as configurações do projeto são definidas, pois determinam a disponibilidade e operação de várias opções de modelagem. Ainda no *model*, o software incorpora um gerador de malha de elementos finitos automático bidimensional, que pode gerar malhas com base em elementos finitos triangulares ou quadriláteros. No caso deste trabalho a malha gerada é triangular de seis nós, contando com 3980 nós em cada estágio.

O módulo *compute* é a parte de processamento do modelo e só é habilitado quando a malha de elementos finitos existe. O tipo de solução utilizada que resolve a matriz modelada é a Eliminação de Gauss, que resolve problemas lineares manipulando o sistema através de determinadas operações elementares e transforma a matriz estendida do sistema em uma matriz triangular, ou escalonada. Ao realizar essa transformação no sistema a solução pode ser obtida através de substituição regressiva. A análise é realizada pelo tipo axissimétrico, onde se pode analisar modelos tridimensionais que são simétricas em seus 360 graus em relação a um eixo axial. Embora a entrada seja bidimensional, os resultados da análise se aplicam ao problema tridimensional.

Já o módulo *interpret* faz o pós-processamento onde é feita a interpretação dos resultados da análise realizada e visualização dos dados. É possível gerar relatórios, visualizar dados como tensão, recalques e fator de resistência, e podem ser visualizados no modelo feito ou expressos graficamente e extraídos para formato excel.

4 ANÁLISE DA FUNDAÇÃO

A fundação para análise no software foi convertida de tridimensional para bidimensional através do conceito da axissimetria. Para ajuste do modelo axissimétrico, onde no caso o programa modelaria não estacas, mas uma parede, será necessária uma ponderação no Módulo de Young, propriedade que mensura a rigidez do material, no caso dividiu-se o valor do módulo pelo espaçamento entre estacas conforme a Equação 34:

$$E_{S2} = \frac{E_p}{s} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

E_{S2} = Módulo de elasticidade dividido pelo espaçamento das estacas;

E_p = Módulo de Young;

s = Espaçamento entre estacas.

A carga máxima foi calculada multiplicando a máxima tensão aplicada pela área do bloco, sendo o bloco com diâmetro de 8,6 metros e a aplicação dividida em estágios. A tensão máxima de simulação foi definida em 400 kN/m², e a carga máxima aplicada foi de 23.235 kN.

Tabela 3 – Estágios de carga aplicada

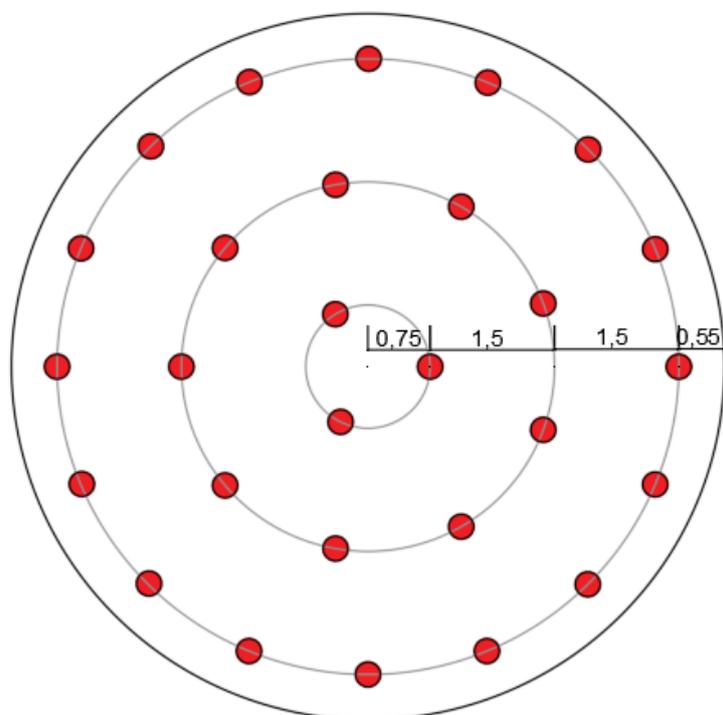
Estágio do carregamento	Porcentagem da carga	Carga Aplicada (kN)
1	0%	0
2	10%	2.324
3	20%	4.647
4	30%	6.971
5	40%	9.294
6	50%	11.618
7	60%	13.941
8	70%	16.265
9	80%	18.588
10	90%	20.912
11	100%	23.235
12	75%	17.426
13	50%	11.618
14	25%	5.809
15	0%	0

Fonte: Autor (2022)

A aplicação da carga segue a NBR 16903/2020, que especifica o teste de carga em fundações profundas, sendo dividida em estágios iguais e sucessivos, não superior a 10% da carga atuante prevista, e o descarregamento realiza-se conforme o mínimo previsto na norma, em quatro estágios. Para o carregamento utiliza-se de 11 estágios, e mais quatro de descarregamento, totalizando 15 para a análise dos deslocamentos totais. O primeiro estágio inicia em 0 % do carregamento e cada estágio recebe um aumento de 10% da carga aplicada até alcançar a tensão máxima aplicada na simulação no estágio 11. Ao atingir o máximo, realiza-se o descarregamento em 4 estágios, estágios 12 a 15, com respectivamente, 75 %, 50 %, 25 % e 0 % da tensão máxima de ensaio aplicada.

Foi definido o espaçamento de 1,5 metro entre as estacas, radial e diametral, sendo assim o esquema de estacas tem três estacas internas, nove na distribuição central e dezesseis estacas externas, um total de 28 estacas.

Figura 14 – Esquema de estacas em metros



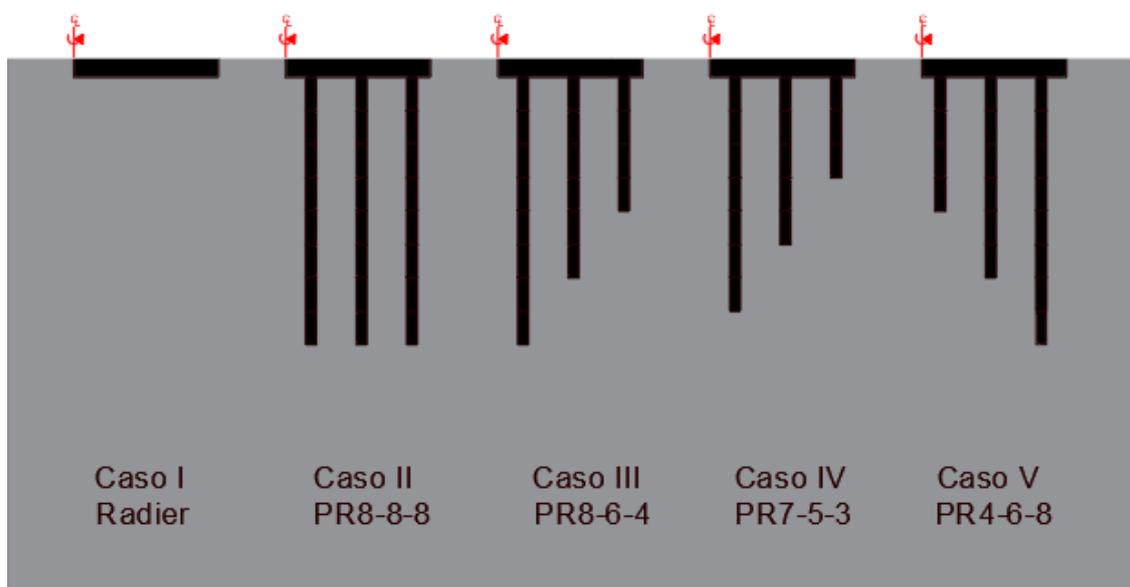
Fonte: Autor (2022)

O critério de falha selecionado no RS2 foi o de *Mohr-Columb*, sendo a malha de análise triangular de 6 nós e a densidade da discretização maior na área mais próxima da fundação, onde se tem maior interesse.

Foram inseridos e analisados no programa cinco casos diferentes ilustrados na Figura 15, sendo eles:

- I. Apenas o radier (Radier);
- II. Radier estaqueado com estacas de oito metros de profundidade (PR8-8-8);
- III. Radier estaqueado com estacas de oito, seis e quatro metros (PR8-6-4);
- IV. Radier estaqueado com estacas de sete, cinco e três metros (PR7-5-3);
- V. Radier estaqueado com estacas de quatro, seis e oito metros (PR4-6-8).

Figura 15 – Casos inseridos no software para análise



Fonte: Autor (2022)

Para facilitar a modelagem no software, lançou-se três círculos radialmente equidistantes para distribuição das estacas de oito metros, divididas em parcelas de um metro, podendo diversificar o material que compõe cada parcela entre solo e concreto, facilitando assim a transição de um caso para o outro.

O semiespaço escolhido para inserção no software foi de 16 metros abaixo do radier, sendo um total de 16,6 metros na vertical e 10 metros na direção horizontal, sendo as bordas foram restringidas na direção x onde os deslocamentos devem ser nulos ou não se devem mais haver deslocamentos significativos, o que foi confirmado após o processamento de cada caso. Assim as condições de contorno atribuídas nas regiões de fronteira foram validadas não interferindo nos resultados das análises.

A análise do caso (I), em radier isolado com 60 centímetros de espessura, objetiva provar os benefícios de uma fundação mista através da comparação do recalque sofrido pela fundação rasa isolada e as propostas de fundação em radier estaqueado.

O caso II, é um caso convencional de radier estaqueado com estacas de mesmo tamanho, é analisado a fim de comparar a capacidade de carga e recalque com as otimizações propostas e o radier isolado, sendo que, se as fundações com a propostas de otimização obtiverem resultados aproximados do radier estaqueado convencional, prova-se a eficácia dessas otimizações. O caso III (PR8-6-4) tem sua distribuição radial de estacas interna com oito metros de profundidade, seguido de estacas com seis metros e externas com quatro metros. Foi realizada ainda uma segunda proposta de otimização da

fundação, o caso IV (PR7-5-3), sendo este com sete, cinco e três metros de profundidade respectivamente do centro para fora.

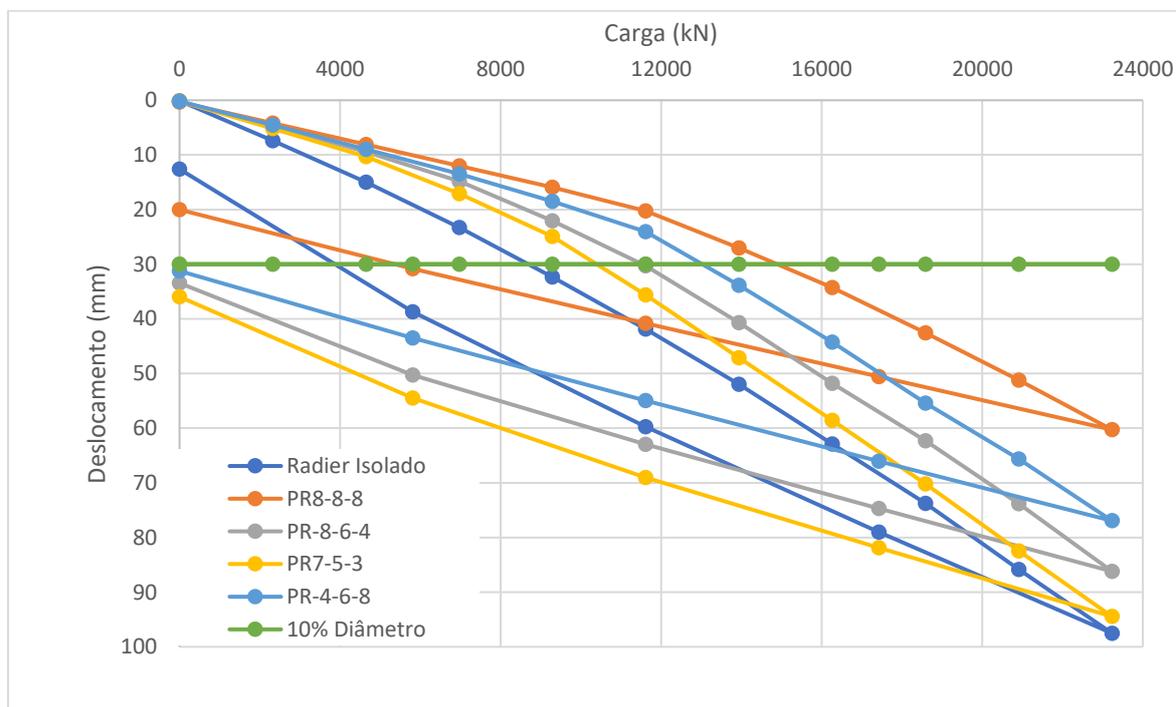
A fim de testar a hipótese de que os maiores esforços são recebidos de forma centralizada na fundação, sendo necessário estacas maiores no centro, foi feita também uma estrutura com as menores estacas ao centro, o caso V (PR4-6-8), sendo a distribuição de estacas com quatro metros internamente, seis e oito metros da direção radial externa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curva Carga vs recalque

Por meio da interpretação dos dados inseridos no RS2 e obtidos os deslocamentos verticais em cada estágio na superfície do radier, onde os esforços são aplicados, pode-se gerar o gráfico carga vs recalque, no intuito de comparar os resultados (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Carga vs recalque



Fonte: Autor (2022)

A partir da representação gráfica das curvas carga vs recalque percebe-se que as curvas se assemelham aos gráficos do método de cálculo PDR.

O caso III (PR8-6-4) teve um recalque 43 % maior quando comparado ao caso II convencional, PR8-8-8, enquanto o caso PR4-6-8 (caso V) obteve 28 % e o caso PR7-5-3 (caso IV) resultou em 57 %.

Nota-se ainda que até cerca de 60 % da carga total aplicada, os casos II e V (PR8-8-8 e PR 4-6-8) sofrem recalques sem grande discrepância, com deformação próxima à da estrutura convencional de radier estaqueado quando passa pela linha da carga de ruptura. A diferença ao chegar em 100 % de carga aplicada entre os dois casos é de cerca de 17 milímetros. O caso III (PR8-6-4) apresenta quase 25 milímetros de diferença para o caso convencional.

Observa-se também que o caso do radier isolado obteve um deslocamento ao receber a carga máxima de quase 10 centímetros, o que o torna inviável.

A visualização dos esforços no solo em cada caso obtidas através do RS2, estão nos apêndices deste documento.

Ainda através do gráfico de carga vs recalque, é possível extrair a rigidez da fundação (K_{pr}). Separando os elementos de estaca e elaborando seu gráfico é possível obter a rigidez do radier (K_r) e estacas (K_p) separadamente.

Tabela 4 - Rigidez da fundação

PR8-8-8	PR-8-6-4	PR7-5-3	PR-4-6-8	Radier isolado
Rigidez da fundação (K_{pr})				
598	479	419	524	
Rigidez das estacas (K_p)				
599	479	420	525	
Rigidez do radier (K_r)				
227	144	106	255	301

Fonte: Autor (2022)

Ao observar os resultados nota-se que o radier isolado (Caso I) tem a rigidez significativamente inferior aos valores obtidos para as fundações num todo, sendo o caso V (PR4-6-8) o de maior rigidez. Observa-se ainda que o radier do caso IV (PR7-5-3) apresenta um valor baixo, levando a um recalque maior desse elemento.

5.2 Carga de ruptura e admissível

Com a gráfico de carga vs recalque é possível realizar a análise da capacidade de carga da fundação. A carga de ruptura de cada caso foi definida correspondendo ao valor obtido quando a fundação atinge o recalque correspondente a 10 % do diâmetro da estaca, este equivalente a 300 milímetros, sendo o deslocamento da carga de ruptura correspondente a 30 milímetros (Tabela 5). Adotando um fator de segurança igual a dois obtém-se a resistência admissível (R_{adm}) de cada caso e assim o recalque correspondente através da curva carga vs recalque.

Tabela 5 – Valores da carga de ruptura, carga e recalque admissíveis

CASOS	Radier Isolado (I)	PR8-8-8 (II)	PR-8-6-4 (III)	PR7-5-3 (IV)	PR-4-6-8 (V)
Carga de ruptura (kN)	8750	14850	10800	9600	13100
R_{adm} (kN)	4375	7425	5400	4800	6550
Recalque para R_{adm} (mm)	13,8	13	11,5	11	13

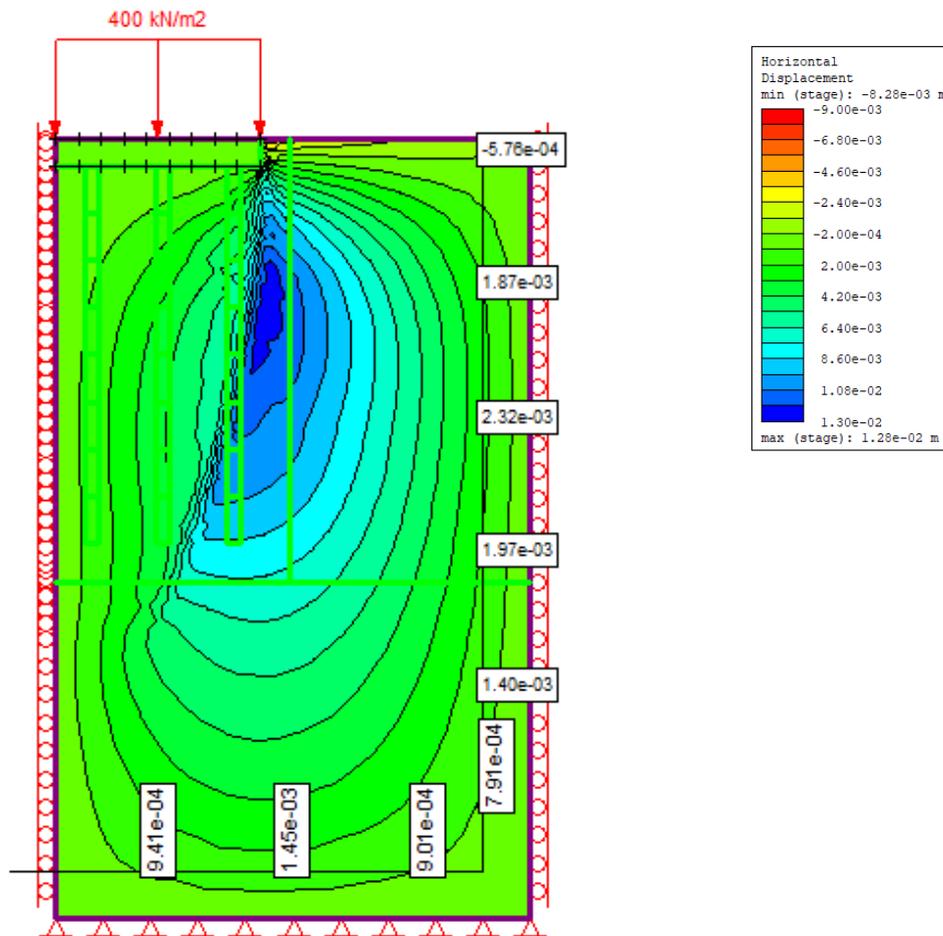
Fonte: Autor (2022)

No aspecto de capacidade de carga, nota-se que os casos III (PR8-6-4) e V (PR4-6-8) são os que suportam maior carga de ruptura depois do caso de estaqueamento convencional, sugerindo uma melhor condição de trabalho.

5.3 Semiespaço

Com as fronteiras do semiespaço delimitadas, é feita a análise dos casos no semiespaço escolhido. É feita a aferição dos valores de deslocamento próximos às fronteiras, verificando o deslocamento horizontal nas fronteiras laterais, e deslocamento horizontal e vertical na base, dado que na lateral não há restrição para os deslocamentos verticais. Em todos os casos nota-se que a movimentação nas fronteiras é próxima a zero, validando a escolha do mesmo. Os valores obtidos de deslocamento horizontal, em metros, em pontos das bordas vertical e horizontal no Caso I (radier), sendo a média de deslocamentos na base 1,1 milímetro na horizontal e no limite lateral de 1,3 milímetro (Figura 16). Isso foi feito para aferição do deslocamento vertical, encontrando uma média de 3 milímetros de deslocamento na base. As figuras dos deslocamentos verticais sofridos nos demais casos estão disponíveis em apêndice deste documento.

Figura 16 – Deformação nas bordas do semiespaço



Fonte: Autor (2022)

5.4 Comportamento do radier

No caso da base isolada, pode-se definir a partir do seu comportamento no solo, ao receber uma carga, se é uma fundação rígida ou flexível. Se a deformação for uniforme ao longo da superfície do bloco significa que a fundação é rígida, caso contrário será flexível.

Os deslocamentos no estágio 11 foram medidos no local onde as cargas foram aplicadas, o topo do radier, e os valores avaliados e dispostos na Tabela 6 para visualização do comportamento da fundação. Percebe-se a partir desta que a fundação em radier isolado tem uma pequena diferença entre o deslocamento no centro e na borda, sendo essa diferença menor que três milímetros, demonstrando comportamento pouco flexível, mesmo sem estacas, uma vez que o carregamento aplicado é uniformemente distribuído.

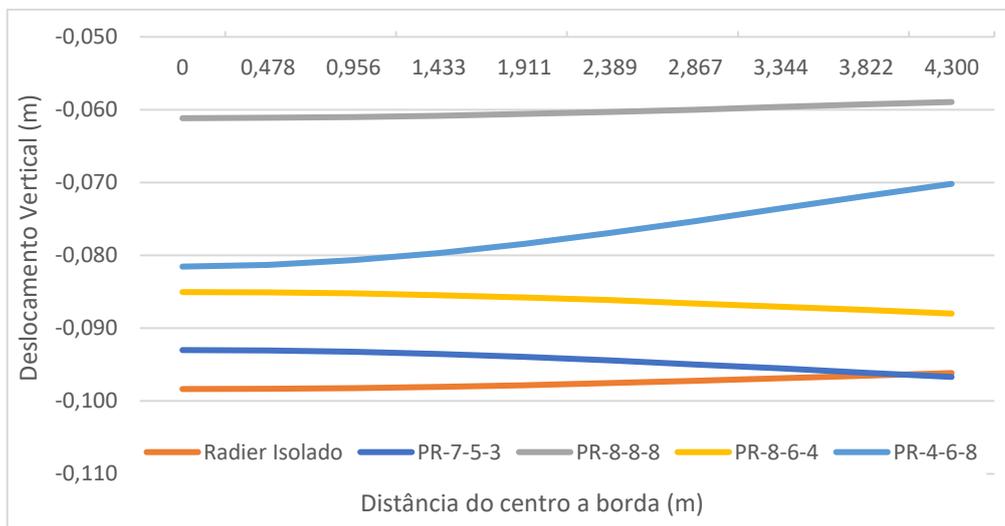
Tabela 6 – Deslocamentos do radier Caso I

Deslocamento Vertical CASO I – Base isolada	
Estágio	Valor (mm)
11	-98,35
11	-98,32
11	-98,21
11	-98,05
11	-97,82
11	-97,55
11	-97,23
11	-96,89
11	-96,53
11	-96,16

Fonte: Autor (2022)

A fim de observar o comportamento da base, é feita a comparação os deslocamentos do radier ocorridos nos cinco casos no estágio 11 (carregamento máximo), conforme deslocamentos medidos no topo do radier do centro até a sua extremidade (Gráfico 2). Quando espelhado, o gráfico forma o perfil de recalque de todo o radier.

Gráfico 2 – Deslocamento do radier do centro à extremidade



Fonte: Autor (2022)

Ainda de acordo com esse gráfico, é possível identificar que o radier isolado tem o maior recalque e o radier do caso convencional com estacas de igual comprimento, o menor, pois as estacas são mais longas e uniformes, e assim absorvem uma parcela

significativa da carga aplicada ao radier, reduzindo os deslocamentos verticais, trabalhando em conjunto na transferência de cargas para o solo, e observando os demais casos também se comprova que o posicionamento das estacas, variando seu comprimento, tem influência direta sobre o comportamento da fundação. Para o caso PR4-6-8, com estaca de tamanhos variados em 4, 6 e 8 metros, do centro para a borda, o comportamento difere dos demais casos, pois apresenta deslocamento maior no centro do radier se aproximando ao caso do radier isolado.

A seguir são apresentados os valores de deslocamentos medidos em cada um dos casos analisados (tabelas 7 e 8).

Tabela 7 – Deslocamentos do radier

CASO	Deslocamento médio (mm) 100% carga	Maior deslocamento (mm)	Menor deslocamento (mm)
Base Isolada (I)	-97,51	-96,16	-98,35
PR8-8-8 (II)	-60,29	-58,95	-61,17
PR-8-6-4 (III)	-86,19	-85,04	-87,99
PR7-5-3 (IV)	-94,45	-93,01	-96,69
PR-4-6-8 (V)	-76,94	-70,18	-81,54

Fonte: Autor (2022)

Tabela 8 – Deslocamentos de centro e borda do radier

CASO	Deslocamento centro (mm)	Deslocamento borda (mm)	Recalque diferencial centro e borda (mm)	Distância do centro à borda (mm)	Distorção (1:X)
Base Isolada (I)	-98,35	-96,16	2,20	4300	1:1955
PR8-8-8 (II)	-61,17	-58,95	2,22	4300	1:1936
PR-8-6-4 (III)	-85,04	-87,99	-2,95	4300	1:1457
PR7-5-3 (IV)	-93,01	-96,69	-3,69	4300	1:1165
PR-4-6-8 (V)	-81,54	-70,18	11,36	4300	1:378

Fonte: Autor (2022)

A partir das tabelas 7, 8 e do gráfico 2, percebe-se que os maiores deslocamentos se concentram no centro do bloco, exceto pelo caso PR8-6-4 e PR7-5-3. Os casos I e III são os de maior deslocamento absoluto da base, com recalques próximos a 100 milímetros, que se explica no caso III pelo menor tamanho das estacas que diminuem sua capacidade de carga no geral provocando maiores deslocamentos.

Considerando as fundações estaqueadas, os casos III e IV apresentam maior recalque na extremidade, sendo da ordem de 88 e 97 mm, respectivamente. Pode-se

explicar o maior deslocamento nas extremidades pelo menor comprimento das estacas nessa região, e assim, suportarem uma carga menor e deixando uma parcela maior de carga para o radier.

Nota-se também que todos os casos analisados apresentaram recalque diferencial entre a borda e o centro variando de dois a doze milímetros aproximadamente. Sendo que o caso V foi o que apresentou o maior recalque diferencial da ordem de 11 milímetros, o que pode ser limitante a sua utilização, uma vez que recalques diferenciais são considerados mais críticos para estruturas quando comparado ao recalque absoluto. Entretanto, ao se considerar o recalque diferencial específico, tem-se a proporção de 1:378 que torna a fundação do caso V (PR4-6-8) inviável para se considerar como uma opção que assegure estabilidade e segurança a estrutura. Normalmente a maior carga recebida pelo radier está no centro, o que explica o que foi constatado para o caso V, pois as estacas no centro possuem menor comprimento e conseqüentemente menor capacidade de suporte considerando-as individualmente.

5.5 Tensão nas estacas

Como pode-se observar na Tabela 9, o deslocamento do radier sofre alterações conforme as estacas são adicionadas. Para tanto, a tensão que foi recebida inicialmente no caso I, somente pelo radier, foi então distribuída e transmitida para as estacas a fim de diminuir o recalque diferencial a partir da interação destas com o solo, ou seja, pela resistência lateral e de ponta. Ao se comparar a tensão recebida no topo da estaca com a da ponta é possível saber quanto da tensão foi absorvida por atrito lateral e quanto da tensão é resistida pela ponta. Verifica-se que nas estacas mais próximas ao centro do radier há uma maior concentração de carga e conseqüentemente deslocamento, uma vez que o radier foi dimensionado como semiflexível. Através da Tabela Tabela 99 e 10 pode-se visualizar a tensão no topo e na ponta das estacas centrais e externas respectivamente do radier em cada caso, com 100% de carga aplicada na fundação.

Tabela 9 – Resistência das estacas posicionadas próximo ao centro do radier

CASO	PR8-8-8 (II)	PR8-6-4 (III)	PR7-5-3 (IV)	PR4-6-8 (V)
Tensão no topo (kPa)	1.760	3.278	2.978	1.173
Tensão na ponta (kPa)	159	124	409	185
Porcentagem de tensão na ponta	9%	4%	14%	16%

Fonte: Autor (2022)

A parcela de tensão média medida na ponta é de aproximadamente 10 % em todos os casos da estaca mais interna, demonstrando que a adoção do material representando o solo amolgado abaixo da ponta consegue representar a condição executiva neste tipo de estaca, uma vez que sabidamente a parcela de ponta em estacas escavadas de pequeno diâmetro é pouca representativa na capacidade de carga da estaca.

Tabela 10 – Resistência das estacas posicionadas próximo a borda do radier

CASO	PR8-8-8 (II)	PR8-6-4 (III)	PR7-5-3 (IV)	PR4-6-8 (V)
Tensão no topo (kPa)	2797	2553	1860	6540
Tensão na ponta (kPa)	762	516	493	1070
Porcentagem de tensão na ponta	27%	20%	27%	16%

Fonte: Autor (2022)

Nota-se maior tensão na ponta das estacas externas, que pode ser explicada pelo fato de as estacas mais externas estarem numa região de menor confinamento, onde os deslocamentos medidos no topo do radier são maiores (Gráfico 2).

A partir da análise de transferência de carga, verifica-se que as estacas centrais trabalham com carga mais elevada nos casos III e IV, demonstrando um melhor aproveitamento da capacidade de carga das estacas, comparado com os casos II e V que transferem menos carga para as estacas posicionadas ao centro do radier (Tabela 11).

Ao analisar os casos III e IV verifica-se que a carga absorvida pela ponta é maior no caso IV, mesmo com menor carga medida no topo, que pode ser justificado devido aos menores comprimentos das estacas (Tabela 11).

No caso V verifica-se processo inverso onde as estacas são menos carregadas no centro devido a sua menor capacidade de carga e maior susceptibilidade ao recalque, ao passo que na região da borda desta fundação, as estacas foram mais solicitadas, demonstrando uma variação significativamente elevada da ordem de 450 % entre a maior e menor carga medida no topo das estacas que compõem a fundação.

Tabela 11 – Resistência da estaca mais próxima ao centro

CASO	PR8-8-8(II)	PR8-6-4(III)	PR7-5-3 (IV)	PR4-6-8(V)
Carga no topo	124	232	211	83
Resistência de ponta	11	9	29	13
Resistência lateral	113	223	182	70
Atrito lateral unitário	15	30	28	19

Fonte: Autor (2022)

Tabela 12 – Resistencia lateral da estaca mais externa

CASO	PR8-8-8 (II)	PR8-6-4 (III)	PR7-5-3 (IV)	PR4-6-8 (V)
Carga no topo	198	180	131	462
Carga na ponta	54	36	35	76
Carga nas laterais	144	144	97	387
Atrito lateral unitário	19	38	34	51

Fonte: Autor (2022)

Em todos os casos analisados e nas diferentes posições das estacas distribuídas no radier, verifica-se que a carga na ponta é coerente com o tipo de estaca considerado nas análises, uma vez que a porcentagem de carga absorvida é em média de 11% para as estacas da região central do radier e 23 % para as estacas situadas próximas a borda do radier.

6 CONCLUSÃO

Após a análise das diferentes propostas de otimização da fundação, estudando sua aplicabilidade através de alterações em sua geometria, provocando mudanças na rigidez e recalque, almejando a economia e eficácia da construção, chegou-se as seguintes conclusões:

Quando considerado os aspectos de capacidade de carga, recalque e recalque diferencial específico e custo, a melhor solução é dada pelo caso III (PR8-6-4), inclusive porque o recalque para a carga admissível é ligeiramente menor que no caso IV (PR7-5-3).

De modo geral, os casos III e IV obtiveram os melhores resultados de desempenho e otimização da fundação convencional.

O caso V (PR4-6-8) apresenta-se como solução adequada sob o aspecto de capacidade de carga e recalque, entretanto, se torna inviável perante o elevado valor de recalque diferencial específico igual a 1:378 que comprometeria o desempenho da superestrutura podendo gerar trincas e fissuras na construção.

O caso IV apresenta um recalque ao receber 100% da carga que se equipara ao do radier isolado, porém apresenta um recalque uniforme, apenas oito milímetros maior que o caso III, o que ainda o torna viável. Quanto à rigidez o caso III apresenta resultados melhores que o caso IV.

Ao se considerar a otimização gerada com a adoção da solução de fundação com os casos III e IV a economia na quantidade de insumos utilizados nas estacas é de 25 % e 37,5 % respectivamente.

Por fim, sendo as duas opções viáveis, os casos III e IV, enfatiza-se que para a escolha da melhor solução deve-se observar o projeto como um todo, levando em consideração a interação solo-estrutura, a relação custo-benefício já que o caso III apresenta resultados de desempenho melhores e o caso IV apresenta mais economia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6123: 1988 - Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16903: Solo – Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ARDIACA, D. H. Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. **Plaxis Bulletin**, n. Spring, p. 12–15, 2009.

BAPTISTA, G. G. **Estudo e análise de fundação destinada à silos metálicos de fundo plano para armazenagem de grãos em Uberlândia**. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2021.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento - Superintendência De Logística Operacional E Superintendência De Mato Grosso. Boletim logístico Ano V - Abril . 2021.

FORMIGONI, I. **Confira a perda de grãos devido a falta de silo no País**. Disponível em: . Acesso em: 20 dez. 2021.

FREITAS, A. P. **Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica**. [s.l: s.n.].

GARCIA, J. R.; DE ALBUQUERQUE, P. J. R. Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 6, p. 1–22, 2019.

GARCIA RODRIGO, J.; ALBUQUERQUE, P. J. R. DE. **Engenharia de Fundações**. [s.l: s.n.].

GARCIA, J. R.; DE ALBUQUERQUE, P. J. R. Numerical analysis of the influence of block geometry on the behavior of piled foundations. **IBRACON de Estruturas e Materiais**. p. 1-15, 2021

Guia do usuário RS2. Disponível em:

<<https://www.roscience.com/help/rs2/documentation>>. Acesso em: 18 jul. 2022.

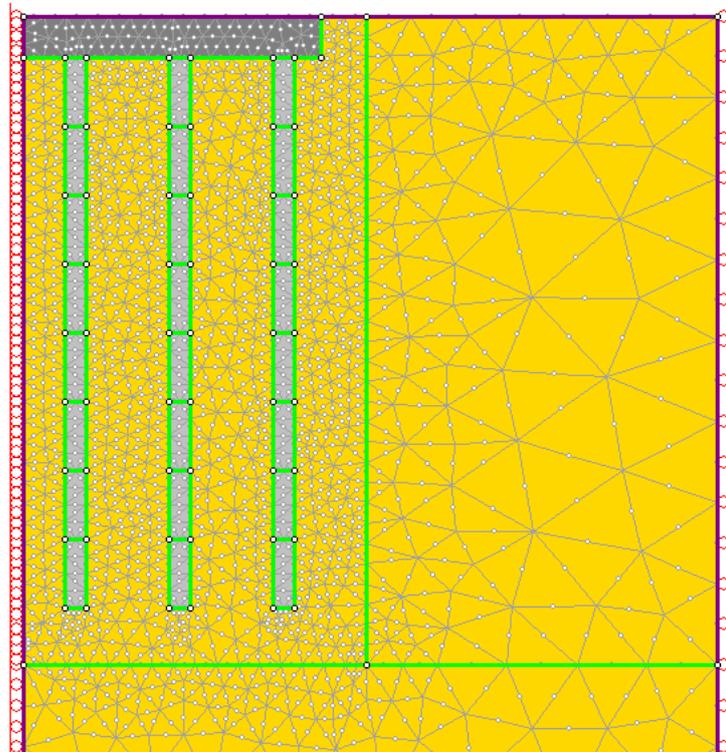
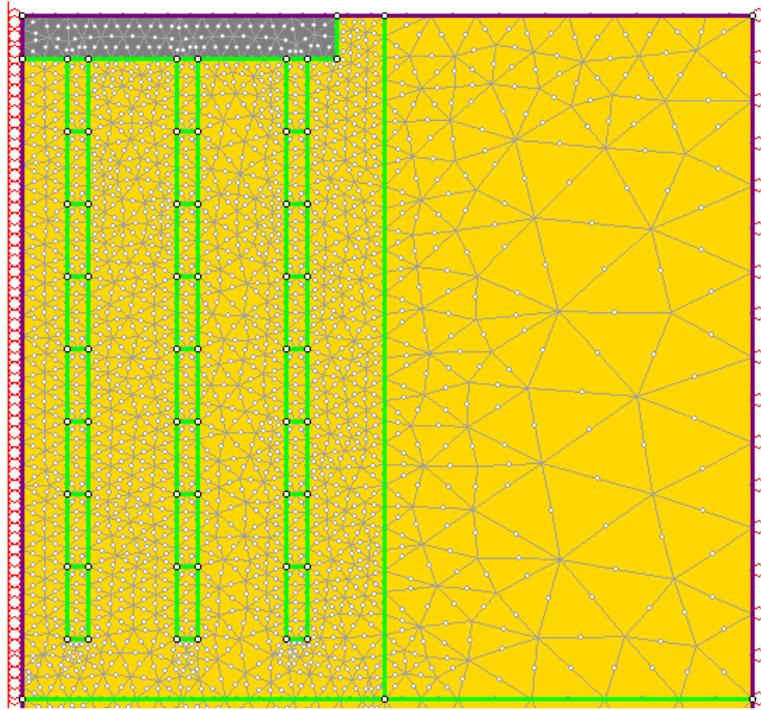
MANDOLINI, A. Design of Piled Raft Foundations: practice and development. **C, International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles.**, p. 22, 2003.

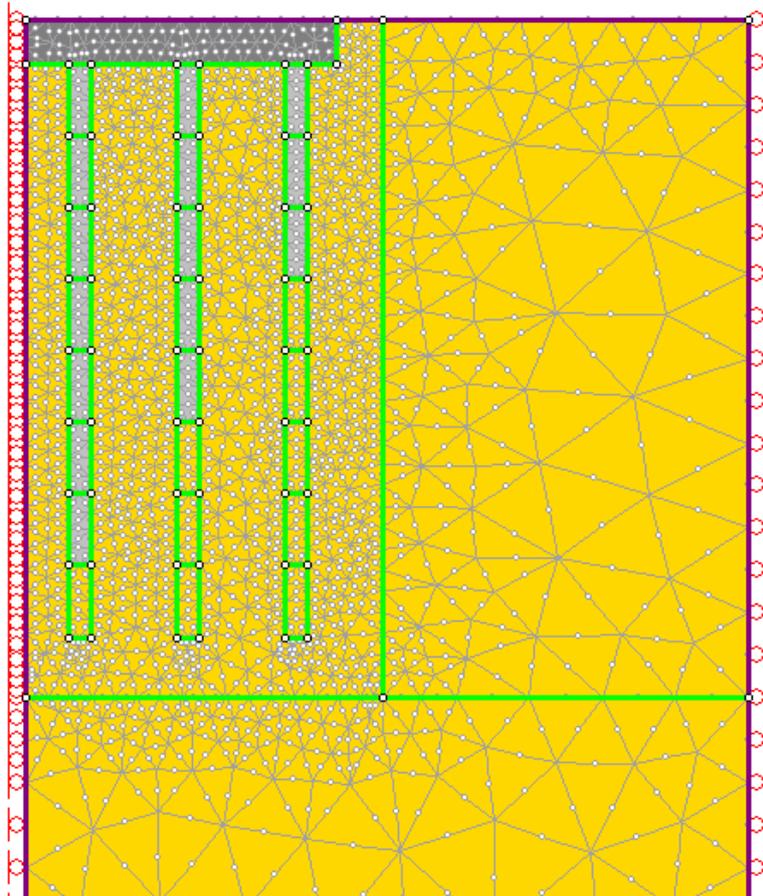
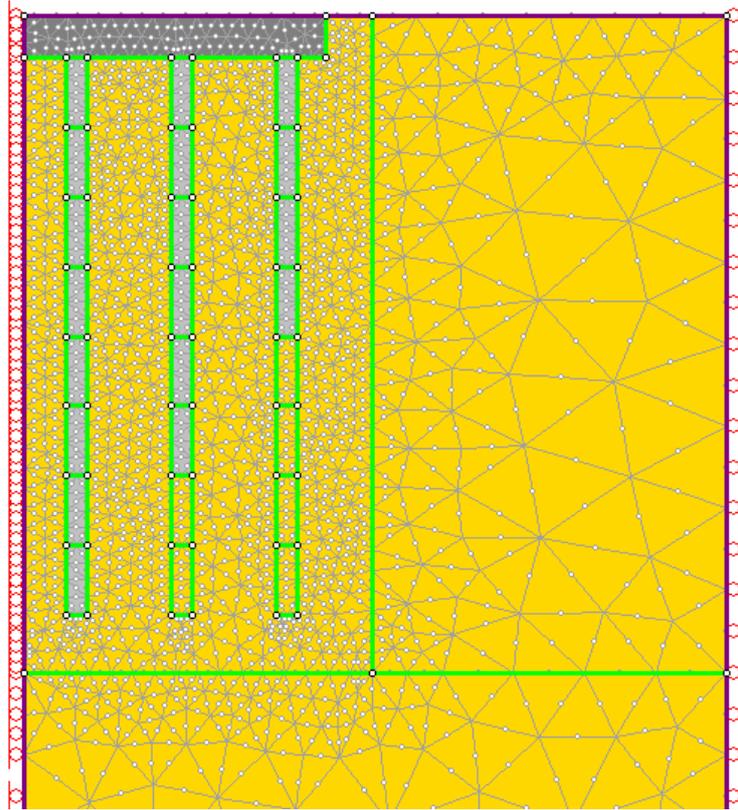
MANDOLINI, A.; DI LAORA, R.; MASCARUCCI, Y. **Rational design of piled raft.** Procedia Engineering. **Anais...**Elsevier Ltd, 2013

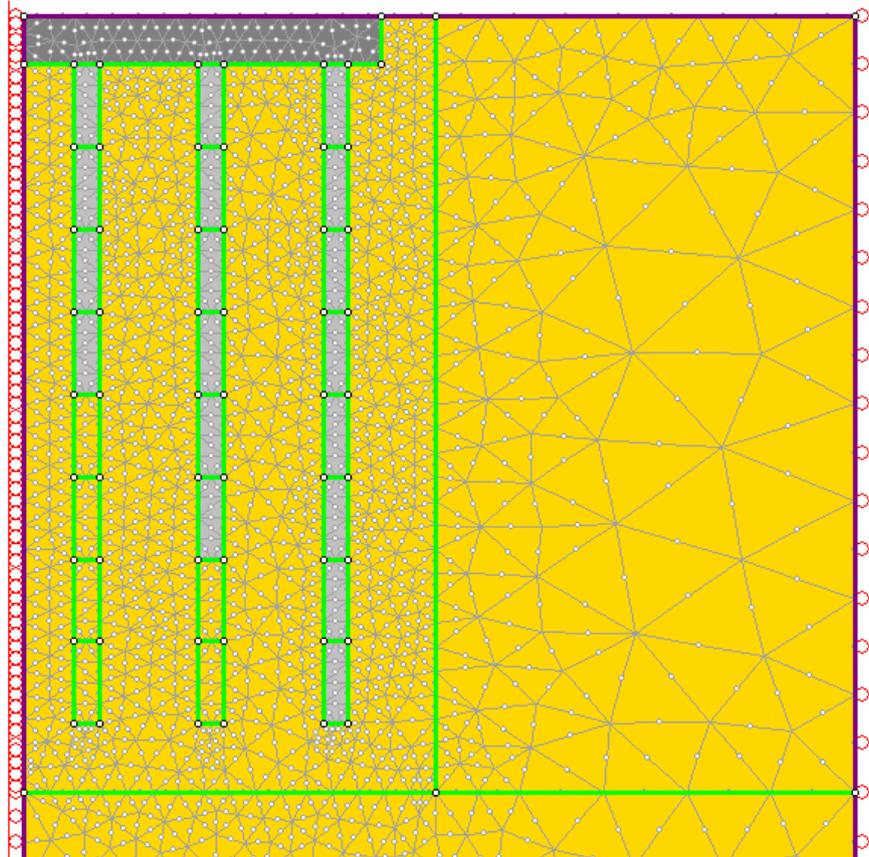
NITAHARA, A. **IBGE: capacidade de armazenagem agrícola tem leve retração | Agência Brasil.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-06/ibge-capacidade-de-armazenagem-agricola-tem-leve-retracao>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

POULOS, H. G. Piled raft foundations: design and applications. **Géotechnique**, v. 51, n. 2, p. 95–113, 2001.

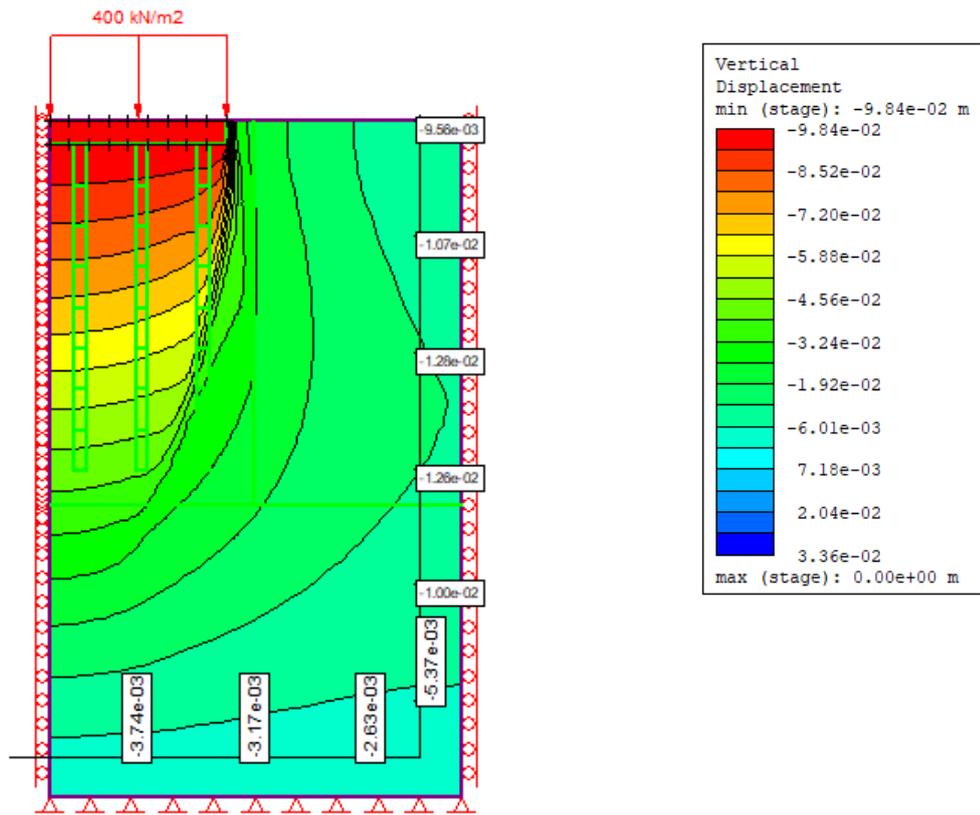
APÊNCIDES



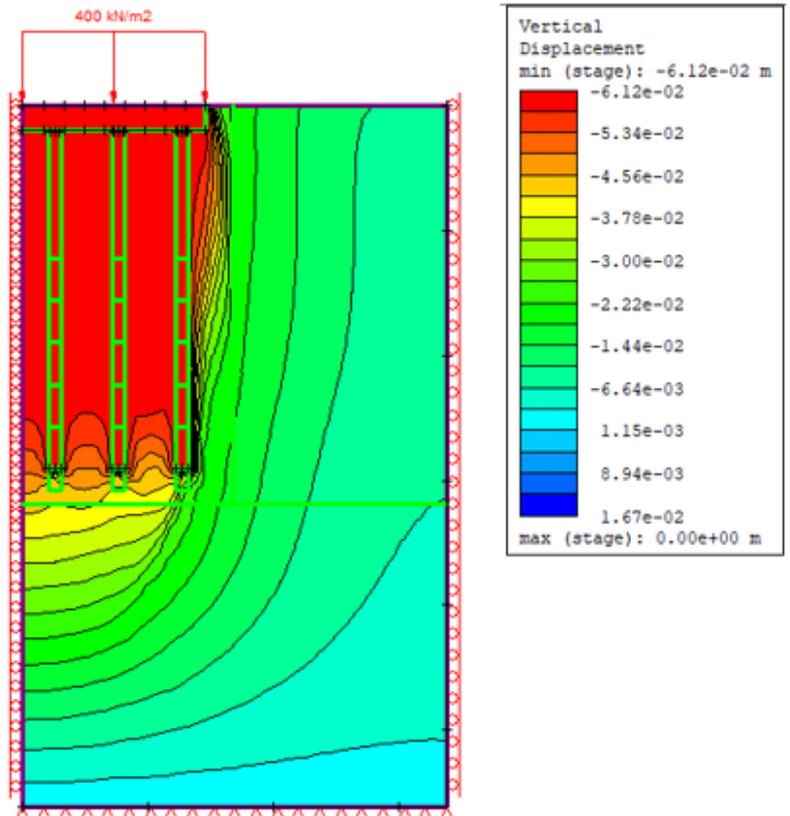




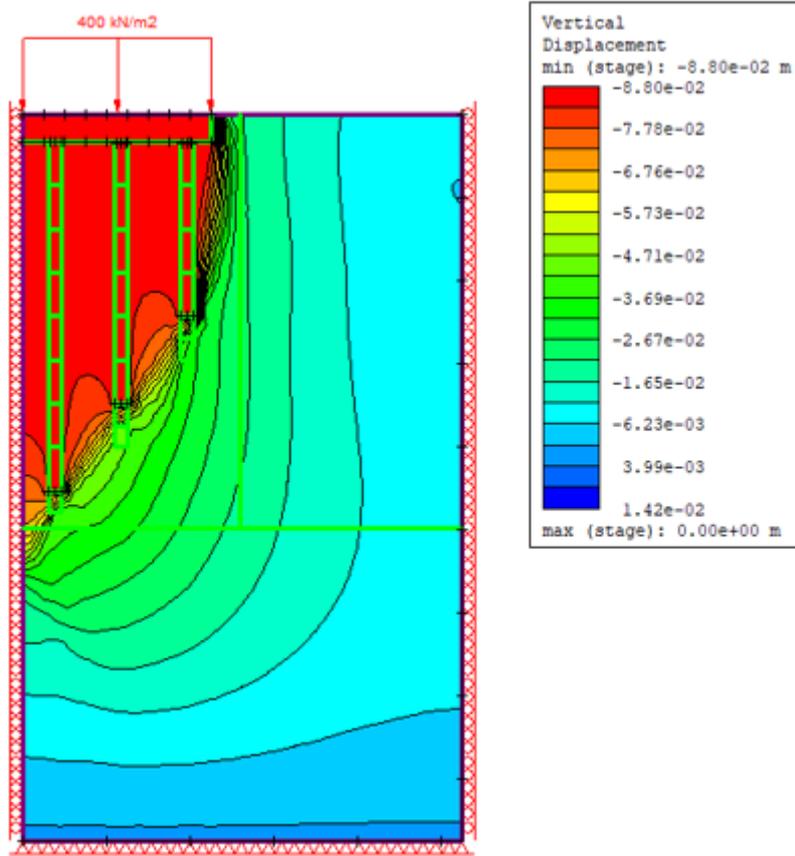
BASE ISOLADA



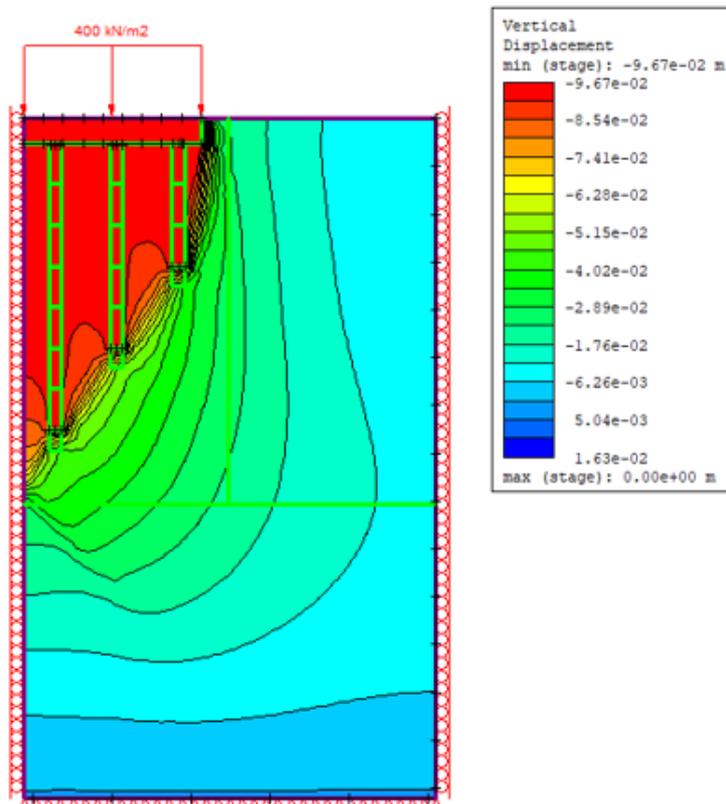
PR8-8-8



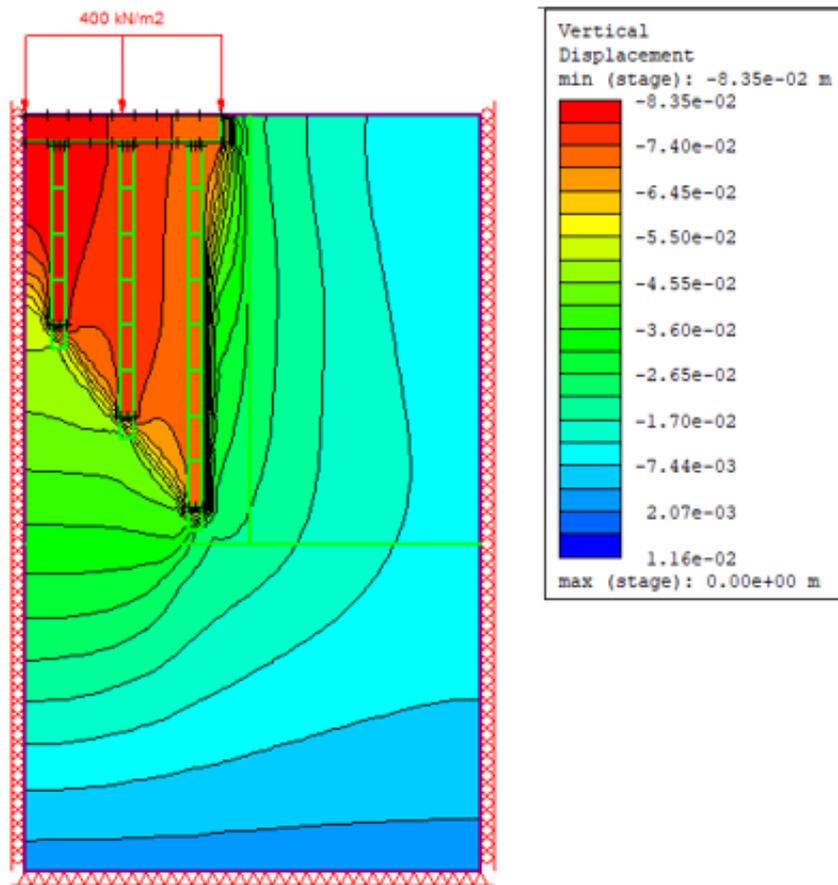
PR8-6-4



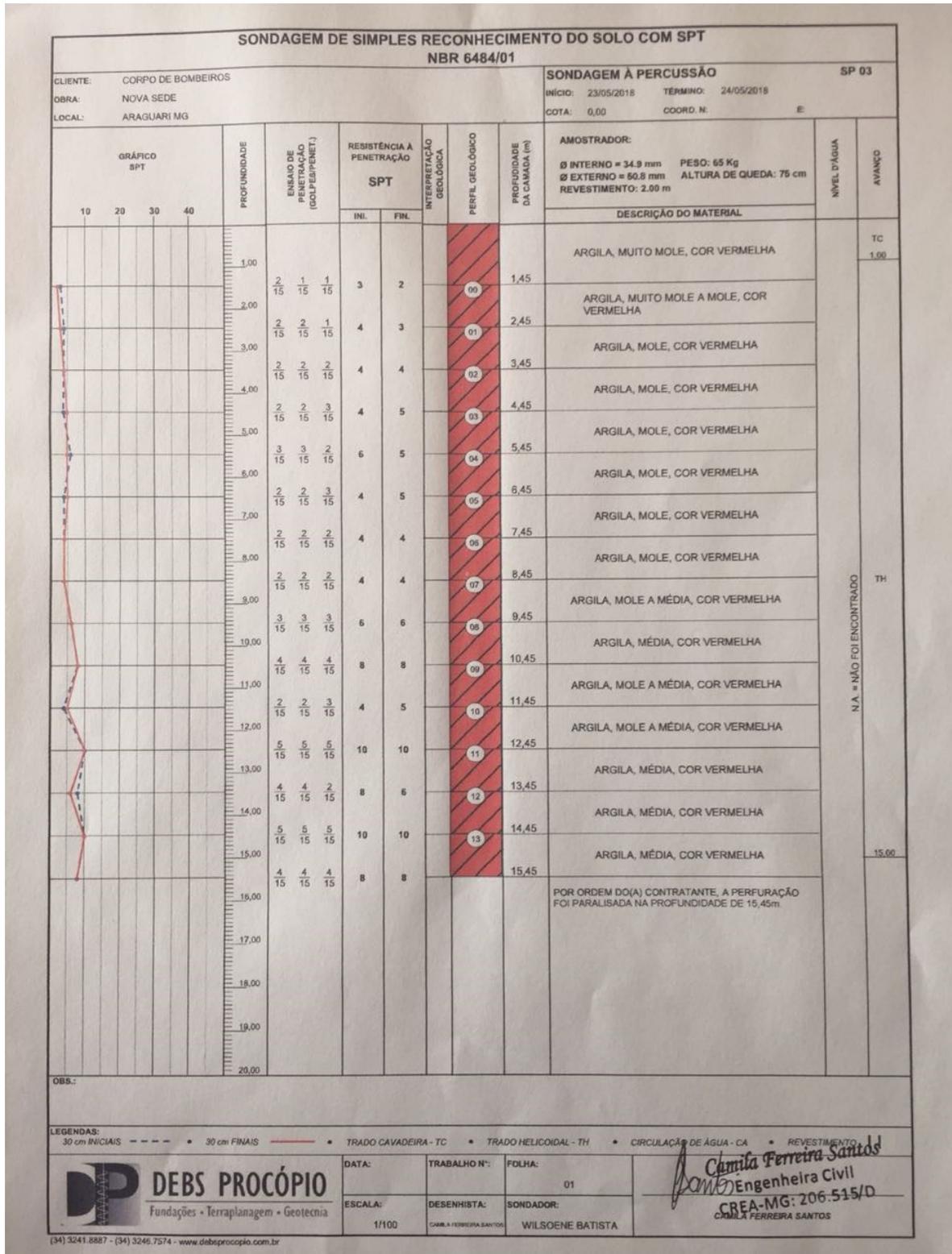
PR7-5-3



PR4-6-8

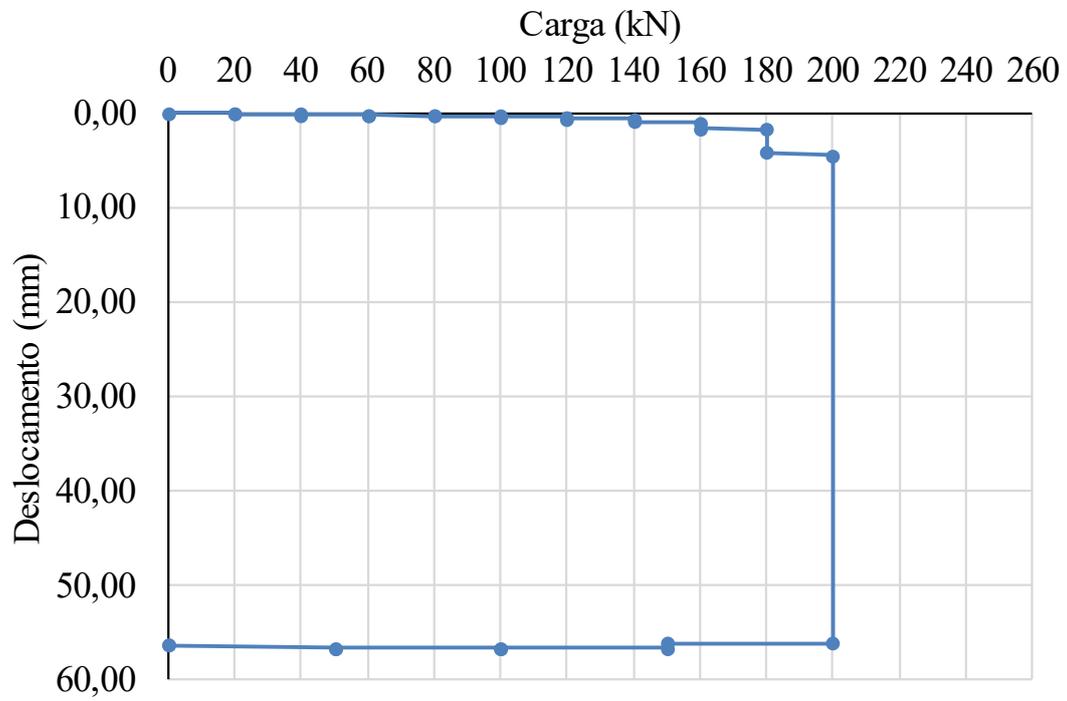


ANEXO A – RELATÓRIO DE SONDAGEM DO SOLO COM SPT



ANEXO B – RESULTADOS DA PROVA DE CARGA

PCE-01-E300mm -L=8m



ANEXO C – TABELA DE JOPPERT JÚNIOR (2007)

Tipo de solo	Faixa de STP	Módulo de elasticidade (t/m ²)	Peso específico (g)		Ângulo atrito efetivo (f)	Coesão efetiva (tf/m ²)
			Natural (t/m ³)	Saturado (t/m ³)		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0 - 4	2000 - 5000	1,7	1,8	25°	–
	5 - 8	4000 - 8000	1,8	1,9	30°	–
	9 - 18	5000 - 10000	1,9	2,0	32°	–
	19 - 41	8000 - 15000	2,0	2,1	35°	–
	≥ 41	16000 - 20000	2,0	2,1	38°	–
Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	2000	1,7	1,8	25°	0
	5 - 8	4000	1,8	1,9	28°	0,5
	9 - 18	5000	1,9	2,0	30°	0,75
	19 - 41	10000	2,0	2,1	32°	1,0
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	200 - 500	1,5	1,7	20°	0,75
	3 - 5	500 - 1000	1,6	1,7	23°	1,5
	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25°	3,0
	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25°	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	20°	0,75
	3 - 5	100 - 250	1,8	1,9	23°	1,5
	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24°	2,0
	11 - 19	500 - 1000	1,9	1,9	24°	3,0
	20 - 30	3000 - 10000	2,0	2,0	25°	4,0
	≥ 30	10000 - 15000	2,0	2,0	25°	5,0
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15°	1,0
	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15°	2,0
	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18°	3,5
	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20°	5,0
	≥ 20	3500 - 5000	2,0	2,0	25°	6,5
Turfa / argila orgânica (quaternário)	0 - 1	40 - 100	1,1	1,1	15°	0,5
	2 - 5	100 - 150	1,2	1,2	15°	1,0
Solo arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	8000	1,8	1,9	25°	1,5
	9 - 18	1000	1,9	2,0	26°	2,0
	19 - 41	15000	2,0	2,0	27°	3,0
	≥ 41	20000	2,1	2,1	28°	5,0

**ANEXO D – ESTADO DE COMPACIDADE E CONSISTÊNCIA –
ABNT NBR 6484/2020**

Solo	Índice de resistência à penetração <i>N</i>	Designação ^a
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)
^a As expressões empregadas para a designação da compactidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.		