

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE SILOS SOBRE EFEITOS DE RECALQUES  
UTILIZANDO SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS**

**STRUCTURAL ANALYSIS OF SILOS ON THE EFFECTS OF REPRESSIONS  
USING FINITE ELEMENTS SOFTWARE**

**Higor Cesar Fais Invernizzi<sup>1</sup>**

**Viviel Rodrigo José de Carvalho<sup>2</sup>**

**RESUMO**

Este trabalho aborda uma análise estrutural de silos carregados com grãos de café sobre efeitos de recalques diferenciais. Tal abordagem se faz necessária visto que o Brasil é um dos maiores produtores de grãos no mundo e o armazenamento dos mesmos têm uma função essencial neste processo. Os propósitos deste estudo são entender o comportamento dos silos perante os recalques e verificar se os mesmos comprometeram a segurança da estrutura. Estes intentos serão conseguidos através de estudo de caso realizado em um armazém de grãos de café, composto por 272 silos metálicos elevados, localizados no município de Albertina, Minas Gerais, empregando-se coeficientes verticais de molas em um software que utiliza método de elementos finitos (MEF). Para isso, foi realizada a vistoria in loco para inspeção da estrutura e a monitoração dos recalques. A análise comprovou que os recalques afetaram a distribuição de cargas nas fundações dos silos, podendo essa redistribuição de carga chegar a um acréscimo de 35% nas estacas que tiveram menos recalques. Através da análise estrutural realizada juntamente com os dados da capacidade de carga da fundação obtidos, foi proposta a solução de reaprumação da estrutura, sendo este o procedimento adotado pela empresa responsável pelo armazém.

**Palavras-chave:** Método de Elementos Finitos. Silos. Coeficientes de Molas.

***ABSTRACT***

*This work addresses a structural analysis of silos loaded with coffee beans under differential settlement effects. Such an approach is necessary since Brazil is one of the largest grain producers in the world and their storage plays an essential role in this process. The*

<sup>1</sup> Bacharel em Engenharia Civil pelo Grupo Unis, Pós-Graduando em Engenharia de Estruturas pelo Grupo Unis.

<sup>2</sup> Coordenador de Núcleo de Pós-Graduação do Grupo Unis.

*purposes of this study are to understand the behavior of silos in relation to settlements and to verify if they compromised the safety of the structure. These intentions will be achieved through a case study carried out in a coffee bean warehouse, composed of 272 elevated metallic silos, located in the municipality of Albertina, Minas Gerais, using vertical spring coefficients in a software that uses the finite element method. (MEF). For this, an on-site inspection was carried out to inspect the structure and monitor settlements. The analysis showed that settlements affected the distribution of loads in the foundations of the silos, and this load redistribution could reach an increase of 35% in the piles that had less settlement. Through the structural analysis carried out together with the data of the load capacity of the foundation obtained, a solution for reorganizing the structure was proposed, which is the procedure adopted by the company responsible for the warehouse.*

**Keywords:** *Finite Element Method. Silos. Spring Coefficients.*

## **1 INTRODUÇÃO**

Este trabalho trata de uma análise estrutural realizada em silos carregados com grãos de café, sobre efeitos de recalques diferenciais. Surgem-se os problemas: Como a estrutura está se comportando após o aparecimento dos recalques elevados? Estes recalques comprometeram a segurança da estrutura?

Tal abordagem se faz necessária, visto que, segundo o IBGE (2021), a capacidade de armazenamento de grãos no país chegou a 176,3 milhões de toneladas. O número total de unidades armazenadoras ativas é de 7,9 mil. Onde, a maior parte do armazenamento é feita em silos, que corresponde a 87,3 milhões de toneladas, seguido por armazéns graneleiros e convencionais.

É importante ressaltar também a contribuição do trabalho para a comunidade, pois fica evidente que o Brasil é um dos maiores e mais importantes produtores de grãos do mundo. E isso impacta diretamente no investimento e na quantidade de unidades armazenadoras no país, sendo as unidades armazenadoras de grãos extremamente importantes para a movimentação da economia no país.

A finalidade deste estudo é entender o comportamento da estrutura perante os recalques e verificar se os mesmos colocam em risco a segurança da estrutura.

Estas tarefas serão realizadas através de estudo de caso feito em um armazém de grãos de café, composto por 272 silos metálicos elevados, localizados no município de Albertina, Minas

Gerais, empregando-se interação solo-estrutura (IES) em um software que utiliza método de elementos finitos (MEF).

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Estrutura dos silos**

Segundo Lopes Neto, Nascimento e Calil Júnior (2008), silo se caracteriza por ser toda a unidade de armazenamento de produto sólido, onde, normalmente é associada ao armazenamento de produtos agrícolas.

As unidades armazenadoras por meio de silos podem ser fabricadas em estrutura metálica, concreto armado, concreto protendido, alvenaria estrutural e madeira.

Segundo Kock (2018), a capacidade do silo está diretamente relacionada com o tipo de estrutura, assim:

- Silos de madeira – volumes pequenos, 60 a 80 toneladas;
- Silos de alvenaria – de 100 a 1,2 mil toneladas;
- Silos de concreto – 1 tonelada a 3 mil toneladas ou mais;
- Silos metálicos – Podem variar de 60 a 20 mil toneladas ou mais.

Os mais utilizados são em estruturas metálicas, sejam eles apoiados diretamente na base ou elevados. Podem ser fabricados em chapas lisas ou corrugadas, ambas em aço galvanizado, a fim de evitar o processo de corrosão (LAZZARI, 2015).

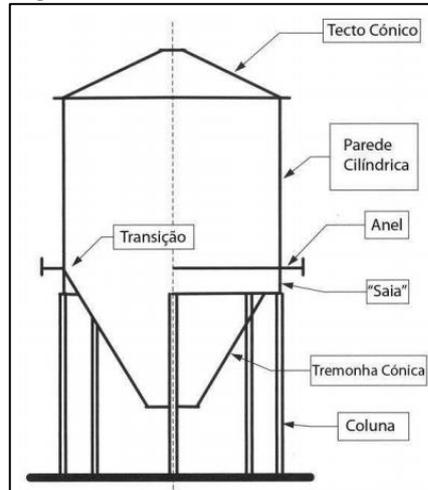
Podemos citar que uma das principais vantagens dos silos em estrutura metálica com relação aos outros materiais é a velocidade de execução da obra, pois, na maioria dos casos, o tempo é um fator de extrema importância no setor agrícola. Além disso, mesmo que não usual, o silo em estrutura metálica pode ser desmontado posteriormente.

Segundo Leite (2008), os silos em estruturas metálicas cilíndricas são mais usuais que as prismáticas e isso se deve ao custo. No entanto, os silos em formatos prismáticos armazenam 27% de volume a mais, em relação a um silo cilíndrico de diâmetro similar ao lado do quadrado.

Percebe-se que existem inúmeros tipos de silos, que variam de acordo com o tipo de material e geometria. Sendo o mais usual e visto pelo Brasil, o de estrutura metálica em base plana apoiada na fundação com formato circular. No entanto, por conta do espaço e tipo de uso, também são utilizados silos metálicos elevados em formatos cilíndricos ou prismáticos.

A estrutura típica de um silo metálico elevado pode ser notada de acordo com a Figura 1 a seguir:

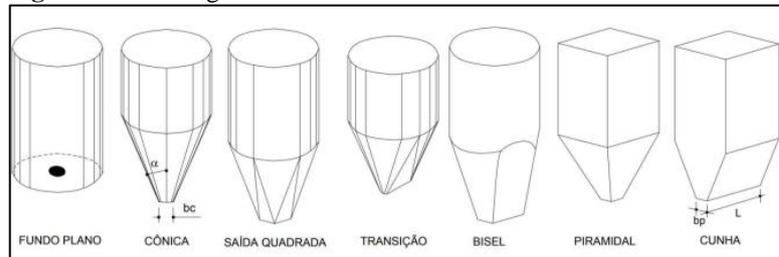
**Figura 1:** Estrutura de um silo elevado.



**Fonte:** Leite (2008).

As geometrias dos silos podem ter diferentes formas. Na Figura 2 é possível observar diversos tipos de tremonhas, a sexta é o tipo piramidal, no qual é o objeto deste trabalho.

**Figura 2:** Formas geométricas das tremonhas.



**Fonte:** (CHEUNG apud KOCK, 2018).

O corpo do silo, na maioria dos casos, é composto por perfis e chapas. Os perfis formam uma espécie de fechamento entre as chapas e concede rigidez à estrutura. As chapas podem ser corrugadas ou lisas. Além disso, as chapas trabalham predominantemente ao esforço normal de tração, devido ao atrito vertical entre o grão e a parede da chapa. No próximo tópico será abordado a respeito das principais características das cargas atuantes em silos.

De maneira geral, o corpo do silo é apoiado sobre as “colunas”, que são pilares em perfis metálicos responsáveis por transferir as cargas do corpo do silo para os elementos de fundação.

## 2.2 Cargas atuantes em silos metálicos com tremonhas

A respeito do comportamento dos grãos dentro de uma estrutura de silo, há grande complexidade na análise.

O comportamento das cargas depende diretamente do tipo de grão, a pressão causada pelos grãos não são as mesmas em todas as direções como a de um fluido, por exemplo, água. Além disso, o atrito entre os grãos e a superfície de contato geram tensões de cisalhamento. Os grãos são considerados materiais semifluidos, por não se comportarem nem como fluidos e nem como sólidos (KOCK, 2018).

Com isso, as principais cargas atuantes no corpo de um silo metálico, são as verticais no fundo do silo ( $p_v$ ), as horizontais ( $p_h$ ) e de atrito ( $p_w$ ) entre o grão e as paredes.

Pela falta de norma nacional no que tange a pressões atuantes em silos, a utilização de normas internacionais se faz necessária. Neste estudo, será utilizado como referência para determinação das cargas atuantes no silo a norma alemã DIN 1055-6:2005.

### 2.2.1 Classificação quanto a geometria do silo

De acordo com a DIN (2005), a geometria do silo deve respeitar os seguintes limites:

- $\frac{hb}{dc} < 10$ ;
- $hb < 100m$ ;
- $dc < 60m$ .

Além disso, para determinação das pressões dentro de um silo, de acordo com a DIN (2005), o silo deve ser classificado quanto sua esbeltez:

- Silo muito esbelto:  $2,0 \leq \frac{hc}{dc}$ ;
- Silo medianamente esbelto:  $1,0 < \frac{hc}{dc} < 2,0$ ;
- Silo pouco esbelto:  $0,4 < \frac{hc}{dc} \leq 1,0$ ;
- Silo muito pouco esbelto:  $\frac{hc}{dc} \leq 0,4$ .

No próximo tópico será abordado a respeito do silo medianamente esbelto visto que se trata do objeto deste estudo.

### 2.2.2 Silo medianamente esbelto

Segundo a DIN (2005), as pressões atuantes em silos na situação de carregamento, com classificação “medianamente esbelto” são dadas pelas seguintes equações:

Para pressão horizontal:

$$Phf = Ph0 * Yr(z)$$

(Equação 1)

Para pressão vertical entre o grão e a parede:

$$Pwf = \mu * Phf$$

(Equação 2)

Para pressão vertical no fundo do silo:

$$Pvf = \gamma * Zv$$

(Equação 3)

Onde:

- $Ph0 = \gamma * \frac{1 * A}{\mu * U}$ ;
- $Yr(z) = \left[ 1 - \left\{ \left( \frac{z-h0}{z0-h0} \right) + 1 \right\}^n \right]$ ;
- $Z0 = \frac{1}{K * \mu} * \frac{A}{U}$ ;
- $n = -(1 + \tan \varphi r) * \left( 1 - \frac{h0}{z0} \right)$ ;
- $Zv = h0 - \frac{1}{(n+1)} * \left( z0 - h0 - \frac{(z-z0-2h0)^{n+1}}{(z0-h0)^n} \right)$ ;
- $h0$  = é a distância vertical do grão no fundo ao ponto mais elevado dentro do silo em contato com a parede;
- $\gamma$  = peso específico do grão;
- $\mu$  = coeficiente de atrito entre o grão e a parede do silo;
- $z$  = é a cota abaixo da superfície equivalente do material;
- $K$  = razão da carga horizontal pelo volume de material;
- $A$  = área da seção transversal do silo;
- $U$  = perímetro da seção transversal;
- $\varphi r$  = ângulo de atrito do grão.

De acordo com a DIN (2005), são fornecidos alguns parâmetros para diferentes tipos de grãos, como: peso específico " $\gamma$ ", ângulo de atrito do grão " $\varphi_r$ ", coeficiente de atrito entre o grão e a parede " $\mu$ ", razão da carga horizontal pelo volume de material " $k$ " (Anexo A).

Além disso, como norma nacional, é possível destacar a ABNT NBR 6120:2019 para obtenção do parâmetro de peso específico do material em estudo (grão de café).

### **2.3 Base elástica – coeficiente de reação vertical**

As transferências das cargas da estrutura para o elemento de fundação geotécnico acontecem por meio da ISE (interação solo-estrutura), que por sua vez, é de grande complexidade.

Dessa forma, não é mais usual considerar que as vinculações entre a estrutura e o solo são restringidas 100% a rotação e/ou a translação. (PORTO et al., 2021).

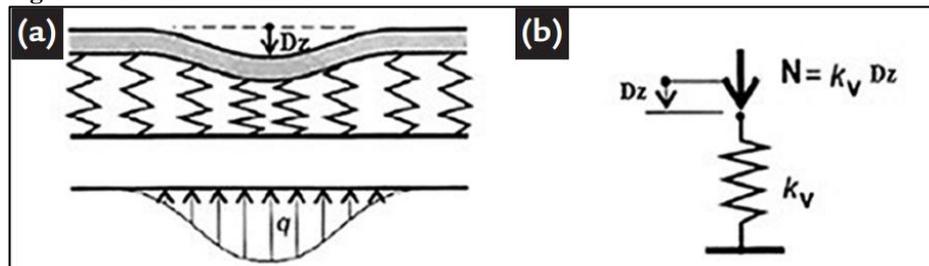
Diferentemente do que era considerado no passado, o maciço de solo pode e deve sofrer deformação ao longo do tempo, mesmo que muito baixa. Um dos maiores desafios na ISE, é justamente compreender a deformação do solo, visto que, o mesmo pode ter uma grande variabilidade em sua formação geológica, além de fatores externos que podem afetar o comportamento do mesmo.

Através da aplicação da ISE, inúmeros estudos apontam grandes divergências quando comparados ao modelo simplista de apoios indesejáveis.

“Por meio da aplicação de ações verticais a dois edifícios sobre fundação rasa, concluíram que os pilares com maiores recalques tendem a ceder parte de suas cargas para os pilares vizinhos com os menores recalques.” (HOLANDA JÚNIOR ET AL. APUD SOUZA; REIS, 2008).

Além disso, segundo Iwamoto (2000), três fatores principais influenciam os efeitos ISE em se tratando da estrutura, sendo eles: influência do tempo, influência da rigidez da estrutura e influência do processo construtivo.

Um dos métodos mais simples e utilizados para simular o comportamento das deformações do solo utilizando a ISE, é a teoria de Winkler de 1867 – Figura 3 - onde é estabelecido que o solo pode ser considerado como uma base elástica (SOUZA; REIS, 2008).

**Figura 3:** Teoria de Winkler

Fonte: Velloso e Lopes apud Porto et al. (2021).

A teoria de base elástica de Winkler, pode ser descrita pela seguinte equação:

$$F = k * d$$

(Equação 4)

Onde:

- $F$  = é a força ou a tensão aplicada no elemento;
- $k$  = é a rigidez do elemento de mola, em função da força pela deformação;
- $d$  = é deformação axial do elemento, ou ainda, o deslocamento da mola.

Vale ressaltar que existem alguns métodos de se encontrar a rigidez equivalente da mola “ $k$ ”, onde o mais utilizado é através das correlações em função da tensão admissível do solo.

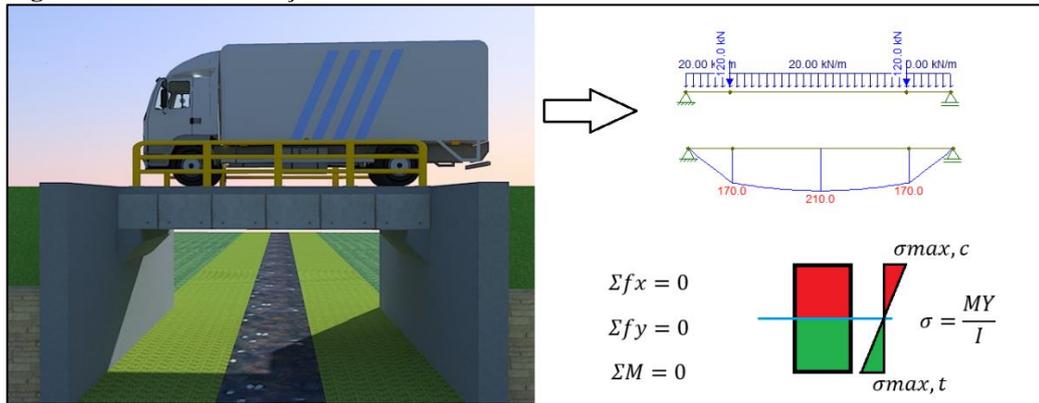
## 2.4 Modelos computacionais – Elementos Finitos

Dependendo da complexidade de diversos problemas na engenharia, nem sempre é possível encontrar a melhor solução através de modelos simples de análise.

Segundo Alves Filho (2009), podemos ter dois grandes caminhos para solução de problemas estruturais na engenharia, a solução exata e solução aproximada.

A solução exata é aplicável em problemas com geometria, carregamentos e condições de apoio simples, como no exemplo da Figura 4 a seguir:

**Figura 4:** Modelo de solução exata.

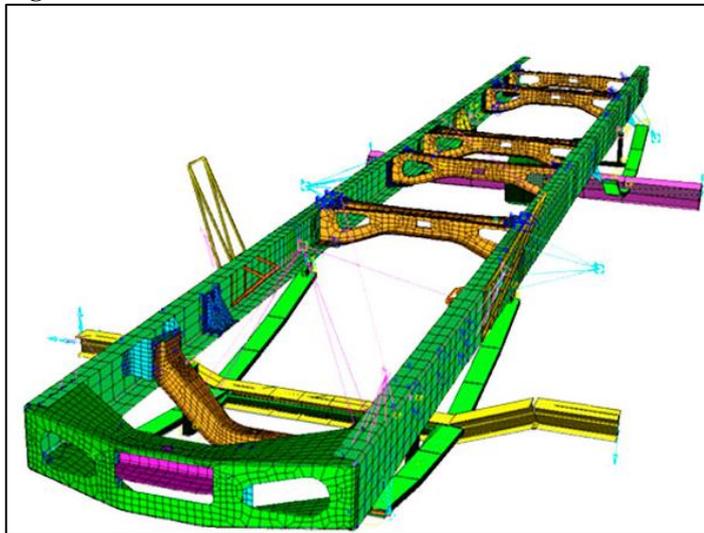


Fonte: O autor (2021).

No entanto, nem todos os problemas da engenharia são possíveis de serem analisados utilizando a solução exata.

No caso da Figura 5, seria extremamente desgastante e ineficaz analisar um chassi de caminhão, por exemplo, através de soluções analíticas clássicas. Já que o mesmo está sujeito a tensões (normais e cisalhamento) e deformações, em diferentes planos. Assim, o uso do MEF (método de elementos finitos) neste caso, é de grande importância.

**Figura 5:** Malha de elementos finitos de um chassi da caminhão.



Fonte: Alves Filho (2009).

O MEF é um modelo de cálculo que visa construir um protótipo da estrutura virtualmente, de modo que chegue o mais próximo possível do comportamento real da estrutura. A estrutura é dividida em finitos elementos, cada elemento com sua respectiva rigidez e conectados através de nós, formando assim, a matriz de rigidez global da estrutura. (ALVES FILHO, 2009).

Vale ressaltar que não é necessário o uso de computadores para desenvolver a metodologia de elementos finitos, no entanto, os mesmos são indispensáveis pelo tempo de processamento na resolução dos problemas.

Para uma modelagem coerente do protótipo, é necessário conhecer e aplicar corretamente os diferentes tipos de elementos. Podemos citar alguns deles: elemento de mola, elemento de treliça, elemento de barra, elementos bidimensionais e tridimensionais. (ALVES FILHO, 2009).

Em estruturas convencionais, para modelagem de vigas e pilares se utiliza elementos de barra, para modelagem de laje se utiliza elemento bidimensionais. Elementos tridimensionais são utilizados em casos muito específicos, por exemplo, em análises de tensões em consolos ou em blocos sobre estacas, já que os mesmos tem um custo de processamento elevado se comparado aos outros elementos.

### **3 ESTUDO DE CASO**

Antes de tratar os métodos utilizados, para fins de preservação dos dados de terceiros, trata-se os mesmos como:

- Responsável pelo armazém = Empresa C;
- Responsável pelo projeto e produção dos silos metálicos = Empresa P;
- Responsável pelo projeto de fundação = Empresa T.

Trate-se de um armazém de silos de grãos de café. O mesmo está localizado no município de Albertina – MG, sendo de propriedade da Empresa C.

A ideal inicial do estudo foi entender o comportamento e verificar a segurança dos silos, que estavam sofrendo aparentemente de recalques diferenciais elevados. A estrutura, ainda em fase de execução, em alguns pontos gerou um sinal de alerta por parte dos responsáveis, já que, os deslocamentos verticais começaram a ficar visíveis com o passar do tempo e a medida em que os silos foram sendo carregados com os grãos de café.

#### **3.1 Vistoria in loco**

O armazém conta com 272 silos projetados em estrutura metálica, com dimensões de 4,0 x 4,0 metros (largura x comprimento) e 10,5 metros de altura. Os silos são dimensionados e fabricados sobre responsabilidade da Empresa P. A planta de detalhamento pode ser visualizada no Anexo B.

**Figura 6:** Interior do Armazém.



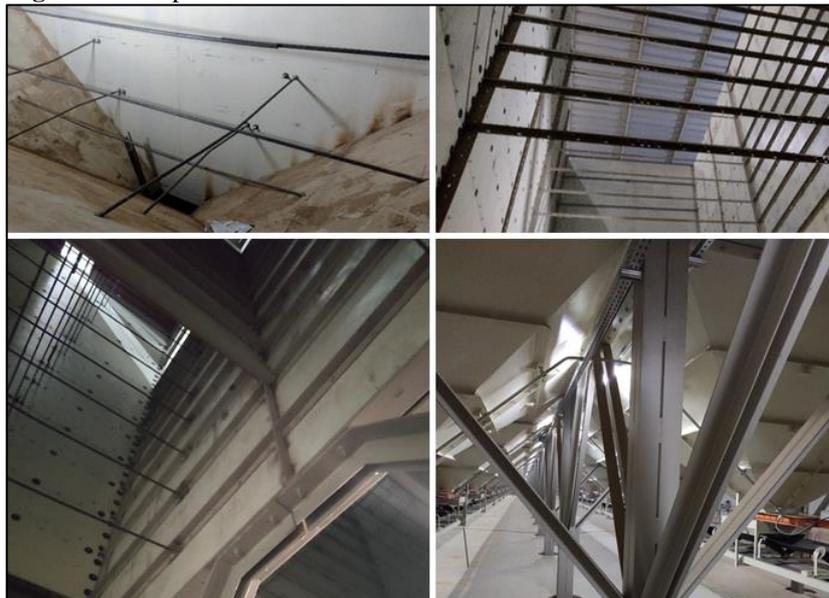
**Fonte:** O autor (2021).

Foi constatado que cerca de 75% dos silos já tinham sido executados. Como pode-se observar na Figura 6, o restante dos silos ainda estava em processo de montagem.

De acordo com a vistoria in loco e o projeto da Empresa P, responsável pelos silos, os corpos dos silos são constituídos por cantoneiras e barras em aço ASTM A-36. Mais especificamente: 4" x 1/4"; 3" x 1/4"; 4" x 5/16"; 2" x 3/16"; barra com diâmetro de 12,7 mm.

Além disso, o corpo da estrutura conta com chapas de 1,5 mm e 2,0 mm fabricadas em aço SAE 1010. Como se pode observar na Figura 7, no interior dos silos se encontram as barras com diâmetro de 12,7 mm, é possível constatar que as mesmas tem a função de tirantes na estrutura.

**Figura 7:** Componentes do silo.



**Fonte:** O autor (2021).

Foi possível confirmar na vistoria que os silos estão interligados entre si por soldas e parafusos, ou seja, os silos não tem um comportamento isolado. No total, são 4 baterias de 68 silos interligados.

Além disso, foram registrados os possíveis recalques nas fundações dos silos. De acordo com a Figura 8, é notório o deslocamento vertical elevado na base da “perna” de cada silo.

**Figura 8:** Detalhe do recalque.



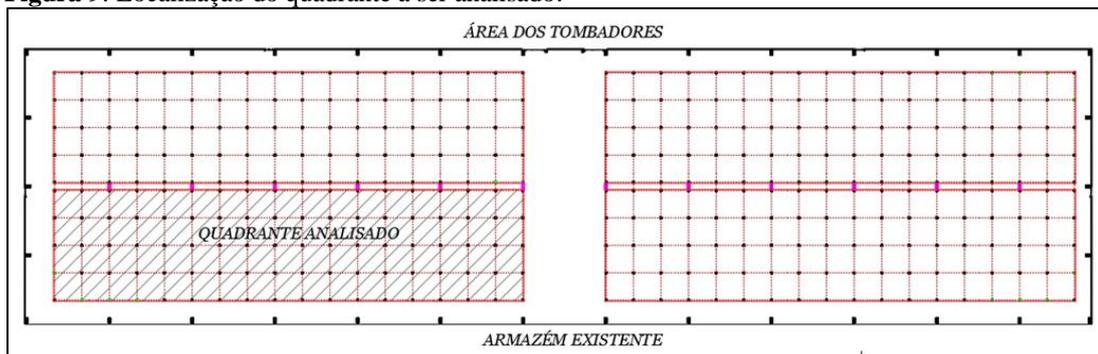
**Fonte:** O autor (2021).

De acordo com o projeto de fundação, os silos estão apoiados sobre estacas do tipo hélice contínua. A transmissão de carga da estrutura metálica para o elemento de fundação se dá por meio de “bolachas”, que são elementos pré-fabricados em argamassa de alta resistência.

Vale ressaltar que não foi constatado nenhum tipo de ligação que restringe a translação da estrutura na horizontal. Ou seja, a estrutura está, de certa forma, simplesmente apoiada sobre a bolacha. Como é possível notar na Figura 8, há um desalinhamento da perna do silo com o elemento de fundação.

Com relação aos recalques, foi realizado a monitoração dos mesmos periodicamente pela Empresa T. De acordo com o Anexo C.

**Figura 9:** Localização do quadrante a ser analisado.



Fonte: O autor (2021).

De acordo com a Figura 9, foi definido que as análises serão realizadas em 1 dos quadrantes dos silos. A escolha desse quadrante foi feita de modo que o mesmo apresentou os recalques mais elevados, assim sendo, a pior situação para estrutura.

### 3.2 Modelagem dos silos

O intuito do estudo é avaliar o conjunto de silos de maneira global e seu comportamento diante dos recalques. Assim, não será objeto de estudo avaliar as condições estruturais das peças dos silos, bem como as chapas e os perfis que os compõe. Visto que, a Empresa P é responsável pelo projeto estrutural e execução dos mesmos.

No entanto, segundo a Empresa P, para manter a segurança estrutural de projeto dos silos, o desnível máximo que poderá ocorrer entre as pernas dos silos é de 15 mm.

Diante da complexidade global da estrutura, foi utilizada a metodologia MEF através do software SAP2000 para análise estrutural da bateria de silos.

Para efeitos comparativos, foram realizadas 2 situações diferentes de modelagem. A primeira sendo um modelo que represente o conjunto de silos sem efeitos dos recalques, ou seja, com os apoios indesejáveis. A segunda modelagem levando em conta os efeitos dos recalques monitorados. Para isso, posteriormente será explanada a metodologia utilizada para aplicação desse conceito.

Foram definidos os seguintes tipos de elementos para cada parte do silo:

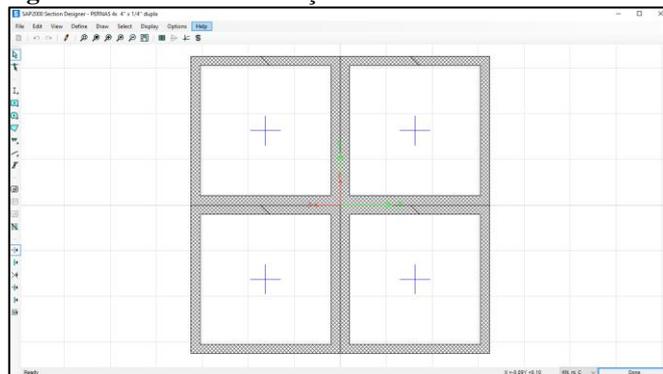
- Parte do corpo com formatos por cantoneiras e barras – elemento de barra (frame).
- Tremonha do silo formado por chapas de aço – elementos de casca (shell).

### 3.2.1 Criação de materiais e seções

Para informações sobre as características dos aços ASTM A-36 e SAE 1010, foi utilizado como fonte a ABNT NBR 8800:2008.

Foram criadas todas as seções de barras dos silos. Algumas seções já se encontram disponíveis e pré-definidas na biblioteca do software, no entanto, a maioria teve de ser criada manualmente no modelador de seções do próprio software. Como, por exemplo, a seção da Figura 10 abaixo.

**Figura 10:** Modelador de seções.



**Fonte:** O autor (2021).

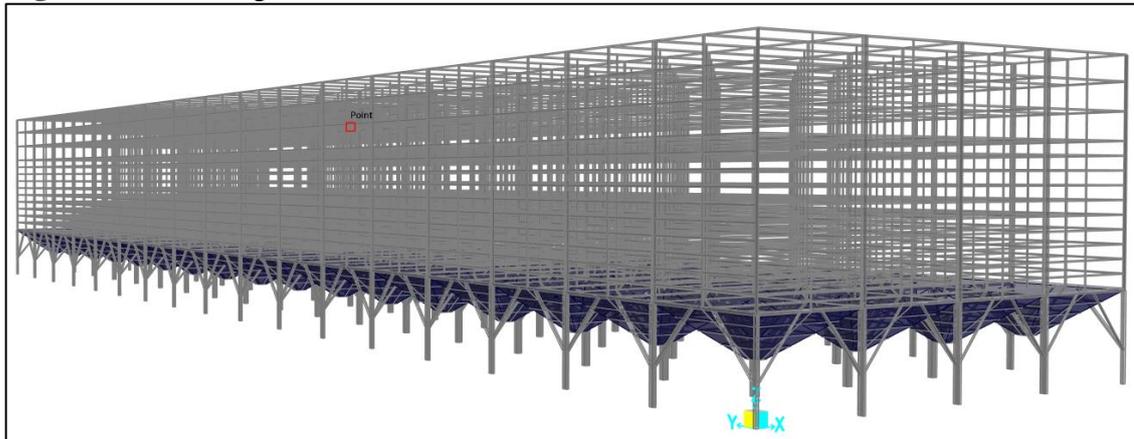
No caso da Figura 10, as “pernas” dos silos são compostas por 4 tubos feitos a partir da junção das cantoneiras.

Assim como os elementos de barras, os elementos de área para simular as chapas também foram criadas no modelador.

### 3.2.2 Lançamento estrutural

Após a criação de materiais e seções, realizou o lançamento da estrutura, seguindo as coordenadas reais retiradas na vistoria.

**Figura 11:** Modelagem estrutural.



**Fonte:** O autor (2021).

Como pode se observar na Figura 11, a estrutura foi lançada com o corpo em barras e chapa, totalizando 68 silos (4 x 17 unidades).

### 3.2.3 Carregamentos

Foram considerados dois tipos de carregamentos, sendo eles ações permanentes devido ao peso próprio e ações permanentes devido ao peso dos grãos.

É de suma importância destacar que não foi considerado carregamento variável devido a ação do vento, visto que, a estrutura se encontra dentro de um galpão pré-moldado totalmente fechado.

Para o carregamento vertical devido ao peso dos grãos foi utilizado, de acordo com a ABNT NBR 6120:2019, um peso específico do material de  $6\text{kN/m}^3$ . Assim, aplicou-se a carga por área no elemento de casca. O volume considerado do silo foi de  $133,33\text{m}^3$ .

Para determinação dos carregamentos horizontais aplicados nos silos devido ao peso dos grãos, considerando a variação de altura do silo de cima para baixo, foi utilizada a Equação 1 citada anteriormente.

De acordo com a tabela conforme Anexo A, foram utilizados os seguintes parâmetros para os grãos de café:  $K = 0,50$ ;  $\mu = 0,50$ ;  $\varphi r = 40$ .

É importante frisar que, como o presente trabalho não tem a finalidade de dimensionar a parte estrutural dos silos, pois, os mesmos já são projetados pela Empresa P. As ações consideradas devido ao peso dos grãos foram analisadas de uma forma mais genérica, com os silos cheios e carga estática, ou seja, a situação em que os valores dos esforços para as fundações são mais prejudiciais.

### 3.2.4 Aplicação das molas

Para avaliar os efeitos causados pelos recalques na estrutura, utilizou-se da teoria de Winkler, aplicando na Equação 4 explanada anteriormente. Para aplicabilidade do modelo, foram utilizados os deslocamentos de cada estaca, obtidos por meio da monitoração dos recalques, conforme disponível no Anexo C.

Foi necessário também realizar o processamento da estrutura com os apoios indeslocáveis para, assim, obter as cargas de reação em cada apoio.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os principais resultados do estudo, bem como as análises estruturais realizadas no conjunto de silos sem os efeitos dos recalques e posteriormente com os efeitos dos recalques.

### 4.1 Carregamentos

Para carga vertical devido ao peso dos grãos de café foi obtido de acordo com o volume do silo e o peso específico do grão, assim a carga total foi de 80 tf.

Para o carregamento horizontal:

**Tabela 1:** Carregamento horizontal.

Z (m)	Phf (kN/m <sup>2</sup> )
0,853	2,36
1,798	4,55
2,743	6,37
3,213	7,16
3,683	7,88
4,153	8,54
4,623	9,14
5,093	9,69
5,563	10,19
6,033	10,64
6,503	11,06
6,973	11,43
7,5	11,82

**Fonte:** O autor (2021).

## 4.2 Coeficientes de rigidez axial das molas

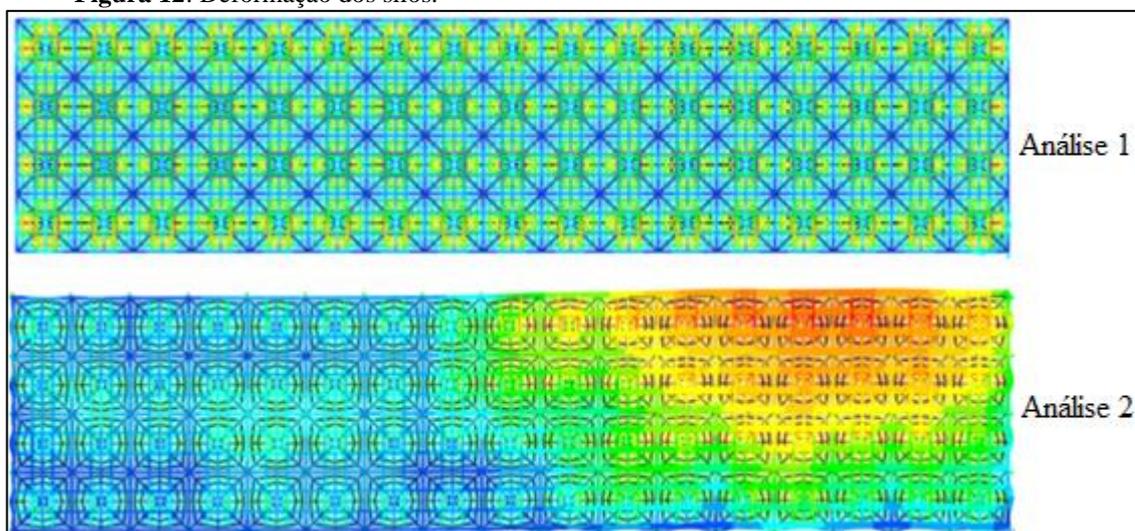
Com os dados de deslocamentos ( $\delta$ ) e carga nodal ( $F$ ), foi possível encontrar um coeficiente de rigidez vertical ( $K_v$ ) para cada mola (no caso em estudo, representando as estacas), de acordo com o Apêndice A.

Nota-se que algumas estacas estão sem valores para o coeficiente de rigidez vertical, isso se deve ao fato de as mesmas não terem apresentado recalques ou deslocamentos nas medições. Assim, as vinculações nessas estacas continuaram sendo, teoricamente, indeslocáveis.

## 4.3 Análise dos silos

Dessa forma, os resultados com relação a deformação da estrutura em planta foram as seguintes:

**Figura 12:** Deformação dos silos.



**Fonte:** O autor (2021).

As regiões de coloração avermelhada representam os maiores deslocamentos sofridos pelas estacas e as de coloração azulada, os menores deslocamentos sofridos pelas estacas.

Na análise 1 da Figura 12, os pontos de apoio em coloração azul, mostram que as estacas não se deslocaram, visto que, os apoios foram definidos como indeslocáveis.

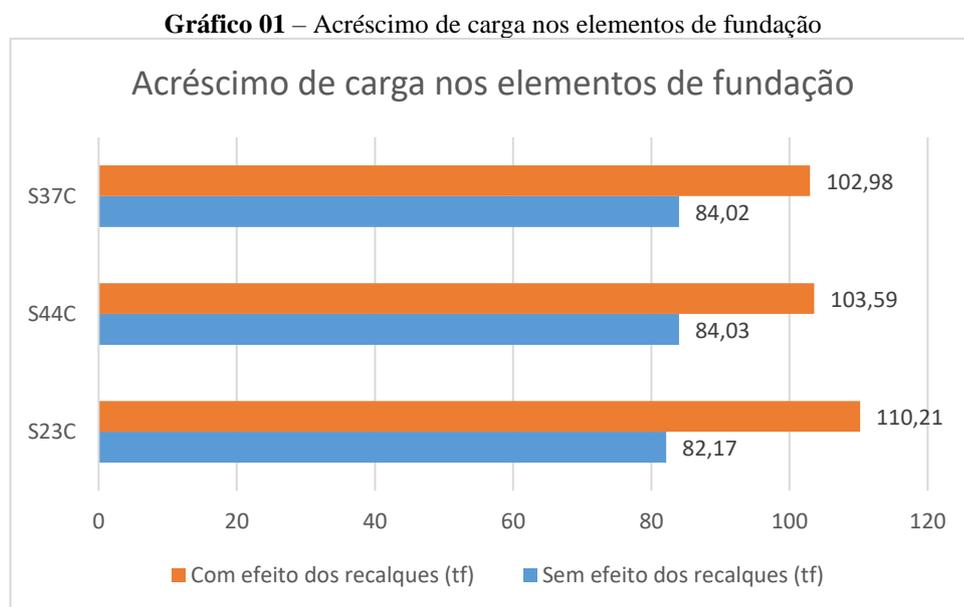
Na análise 2 da Figura 12, é possível observar deformações de diferentes magnitudes ocorrendo na estrutura. Nas regiões avermelhadas, onde ocorreram os maiores deslocamentos, se enquadram justamente onde se apresentaram os maiores deslocamentos nas medições in loco.

E nas regiões azuladas, justamente as estacas que tiveram um recalque monitorado muito baixo ou nenhum recalque considerável.

Como consta no Apêndice B, é apresentado os resultados das reações verticais em cada estaca, sem efeito dos recalques (F1) e com efeito dos recalques (F2). Os valores estão graficamente representados em planta.

Os valores das cargas em destaque representam as estacas que, após os recalques, passaram a operar com cargas mais elevadas comparadas a situação inicial.

Nota-se que a variabilidade é grande, onde algumas tiveram um acréscimo irrisório de carregamento. No entanto, alguns elementos de fundação chamam a atenção pelo aumento considerável do carregamento.



Fonte: O autor (2021).

Conforme observa-se no Gráfico 01, o elemento S23C teve um aumento de aproximadamente 35%. O elemento S44C teve um aumento de aproximadamente 23%. O elemento S37C teve um aumento de aproximadamente 22%.

## 5 CONCLUSÃO

A utilização de uma ferramenta computacional em MEF neste caso foi de suma importância, visto que, devido ao prazo e urgência do caso, seria tecnicamente inviável (tempo e imprecisão) realizar a análise de maneira manual, ou ainda, através de outros softwares mais

simples por pórticos planos. Dessa forma, foi possível construir um protótipo virtual fiel a estrutura real e aplicar os coeficientes de base elástica através da teoria de Winkler.

Com relação a deformação da estrutura, o modelo virtual se convergiu com o real, já que, analisando a deformada do segundo modelo, nas regiões avermelhadas ocorreram os maiores deslocamentos, onde, se enquadra justamente os maiores deslocamentos nas medições in loco. E nas regiões azuladas, precisamente as estacas que tiveram um recalque monitorado muito baixo ou nenhum recalque considerável.

Analisando a deformada da estrutura e os valores das reações antes (F1) e após (F2) os recalques, conforme Apêndice B, as cargas aumentaram significativamente nas regiões em que houveram menores recalques monitorados, ou seja, os esforços foram transferidos para as regiões de menos recalques.

As monitorações dos recalques foram efetuadas de maneira urgente para realização dessa análise, assim, os recalques não haviam atingido a estabilização. Ou seja, possivelmente os deslocamentos tendiam a continuar. Assim, seguindo nestas condições, o acréscimo de carga da fundação S23C, por exemplo, poderia ultrapassar os 35%.

Além disso, o limite de deslocamento de 15 mm entre as pernas dos silos foi atingido, de forma que o aumento dos recalques poderá colocar em risco o sistema estrutural dos silos metálicos.

Dessa forma, através das análises realizadas nesse estudo de caso em conjunto com os dados obtidos da verificação da capacidade de carga da fundação feito por outro responsável técnico, foi possível orientar a empresa C a reaprumar os silos e após isso, realizar periodicamente o monitoramento dos recalques. A orientação foi aceita pela Empresa C e os silos foram reaprumados, como consta no Anexo D.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro, 60 p. 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 237 p. 2008.

ALVES FILHO, A. Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE. 6. ed, [S.l.]: Érica, 2009. 320p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **1055-6:2005-03: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter**. [S.l.], 197 p. 2005.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agro 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: < <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/2013-agencia-de-noticias/releases/30918-capacidade-de-armazenagem-agricola-fica-em-176-3-milhoes-de-toneladas-no-2-semester-de-2020.html>>. Acesso em: 15 set. 2021.

KOCK, M. A. **Dimensionamento de um Silo Metálico com Fundo Plano para Armazenamento de Soja**. 2018. 71f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

LAZZARI, F. A. **A Escolha do Silo Ideal**. In: Campo & Negócios, Uberlândia, 2015. Disponível em: < <http://revistacampoenegocios.com.br/a-escolha-do-silo-ideal/>>. Acesso em 02 out. 2021.

LEITE, L. M. de O. **Silos Metálicos**. 2008. 210f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. Análise Estrutural de Silos Metálicos Prismáticos. **Ciênc. Agrotec**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1252-1258, 2008.

PALINIALVES. **Módulo do Conjunto**. Espírito Santo do Pinhal, 2019.

PORTO, T. B. et al. Study of the interaction of concrete walls with the foundation structure. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 74, n. 2, p. 145-153, 2021.

SOUZA, R. A.; REIS, J. H. C. Interação Solo-Estrutura para Edifícios sobre Fundações Rasas. **Acta Sci. Technol.**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 161-171, 2008.

TULIPA PRÉ-FABRICADOS. **Acompanhamento dos Recalques das Estacas**. Holambra, 2021.

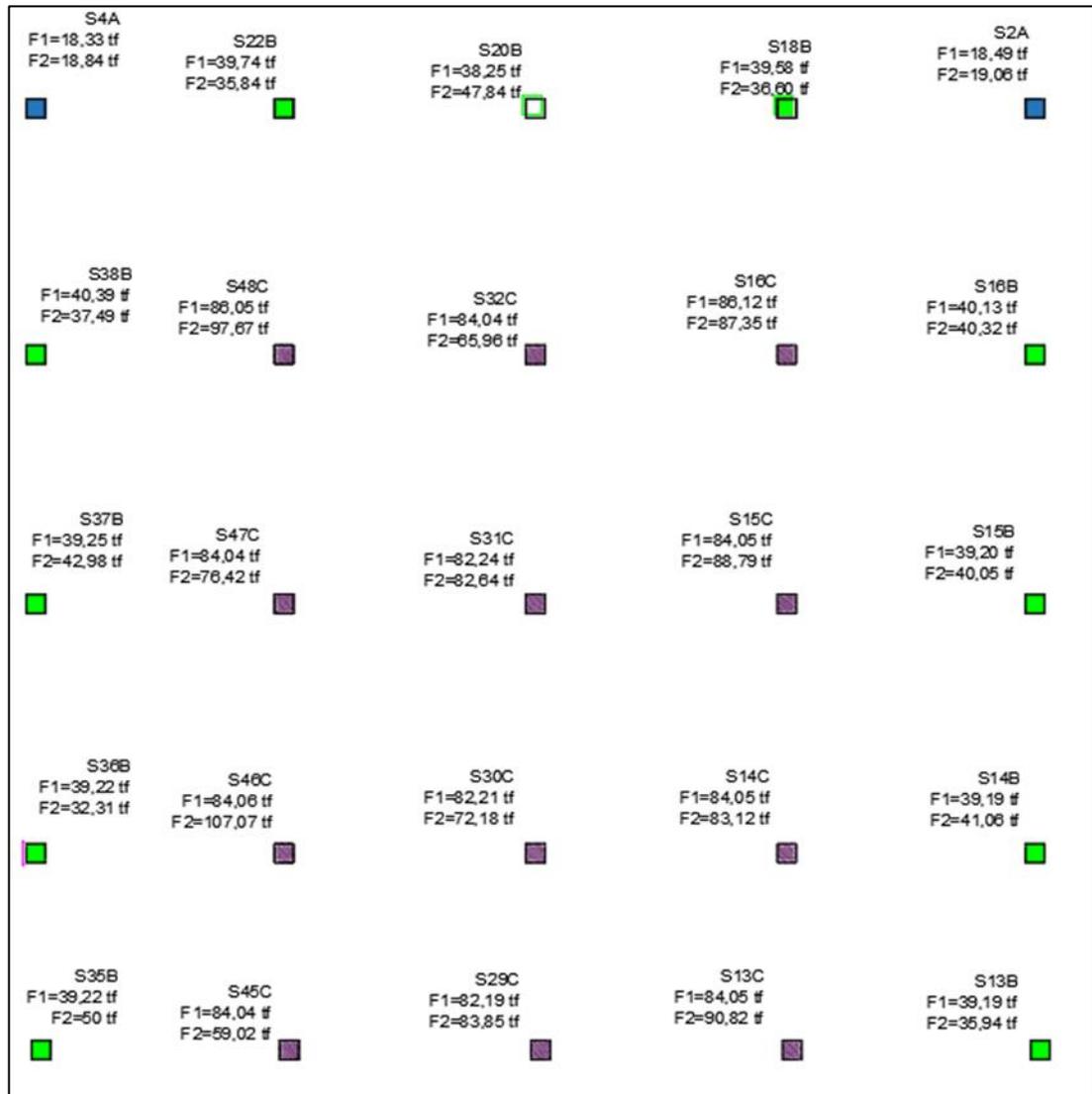
**APÊNDICE A – TABELA KV DE CADA ESTACA**

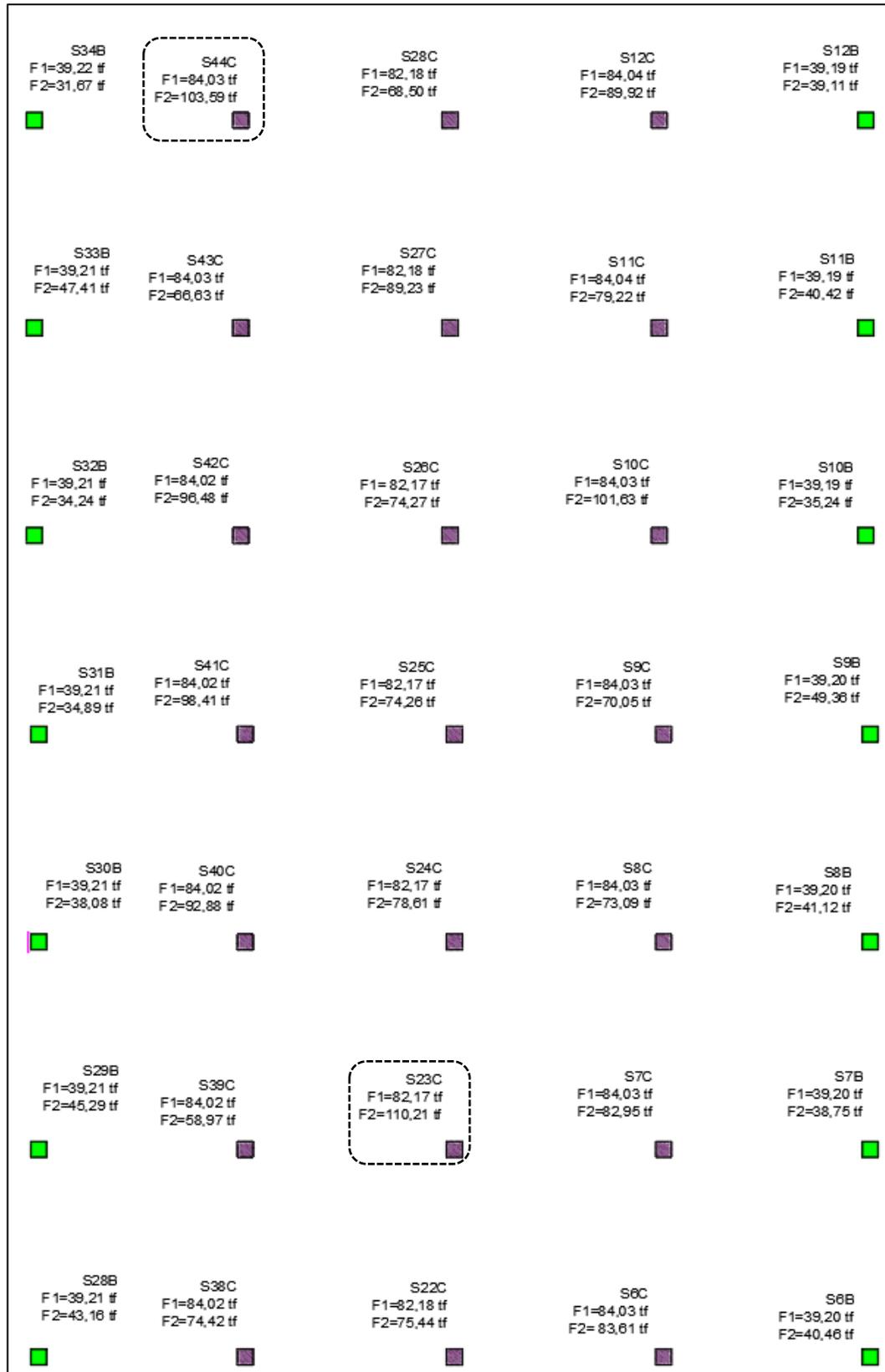
Estaca	F (kN)	$\delta$ (mm)	Kv (kN/m)
E1	181,35	2	90675
E2	393,54	4	98385
E3	384,41	1	384410
E4	384,29	3	128097
E5	384,3	7	54900
E6	384,33	5	76866
E7	384,35	6	64058
E8	384,37	7	54910
E9	384,39	10	38439
E10	384,4	27	14237
E11	384,43	33	11649
E12	384,46	40	9612
E13	384,5	52	7394
E14	384,54	49	7848
E15	384,49	52	7394
E16	383,54	47	8160
E17	393,62	38	10358
E18	176,57	24	7357
E19	388,12	6	64687
E20	844,56	7	120651
E21	824,23	3	274743
E22	824,29	4	206073
E23	824,21	4	206053
E24	824,15	4	206038
E25	824,11	7	117730
E26	824,08	5	164816
E27	824,07	25	32963
E28	824,06	35	23545
E29	824,07	30	27469
E30	824,1	37	22273
E31	824,13	38	21688
E32	824,19	49	16820

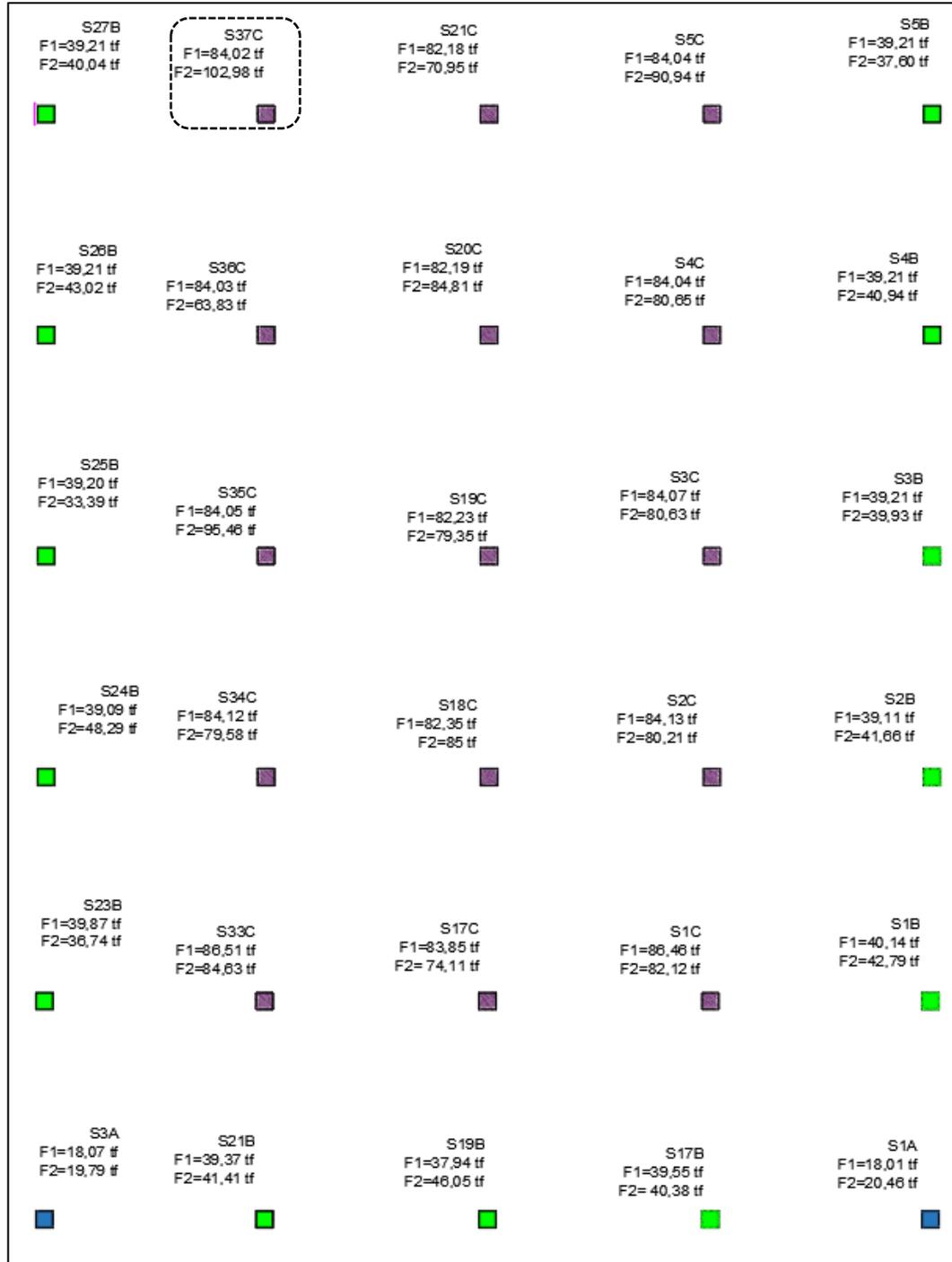
E33	824,45	51	16166
E34	825,06	50	16501
E35	847,83	45	18841
E36	387,82	30	12927
E37	375,12	0	
E38	824,19	13	63399
E39	806,52	9	89613
E40	806,19	11	73290
E41	806,05	12	67171
E42	805,95	14	57568
E43	805,88	9	89542
E44	805,83	10	80583
E45	805,81	17	47401
E46	805,81	19	42411
E47	805,83	13	61987
E48	805,87	33	24420
E49	805,94	40	20149
E50	806,05	39	20668
E51	806,44	40	20161
E52	807,62	35	23075
E53	822,32	39	21085
E54	372,08	16	23255
E55	389,75	0	
E56	843,88	1	843880
E57	824,16	3	274720
E58	824,3	0	
E59	824,18	14	58870
E60	824,09	4	206023
E61	824,03	8	103004
E62	823,99	0	
E63	823,97	1	823970
E64	823,96	7	117709
E65	823,97	29	28413
E66	823,98	27	30518
E67	824	15	54933

E68	824,03	40	20601
E69	824,26	21	39250
E70	824,97	22	37499
E71	848,35	23	36885
E72	386,13	11	35103
E73	179,75	0	
E74	396,06	1	396060
E75	384,93	0	
E76	384,66	0	
E77	384,59	0	
E78	384,57	5	76914
E79	384,55	0	
E80	384,53	3	128177
E81	384,52	2	192260
E82	384,51	0	
E83	384,51	4	96128
E84	384,52	4	96130
E85	384,52	0	
E86	384,52	11	34956
E87	384,42	12	32035
E88	383,32	0	
E89	391	10	39100
E90	177,16	0	

## APÊNDICE B – REAÇÕES VERTICAIS EM CADA ESTACA





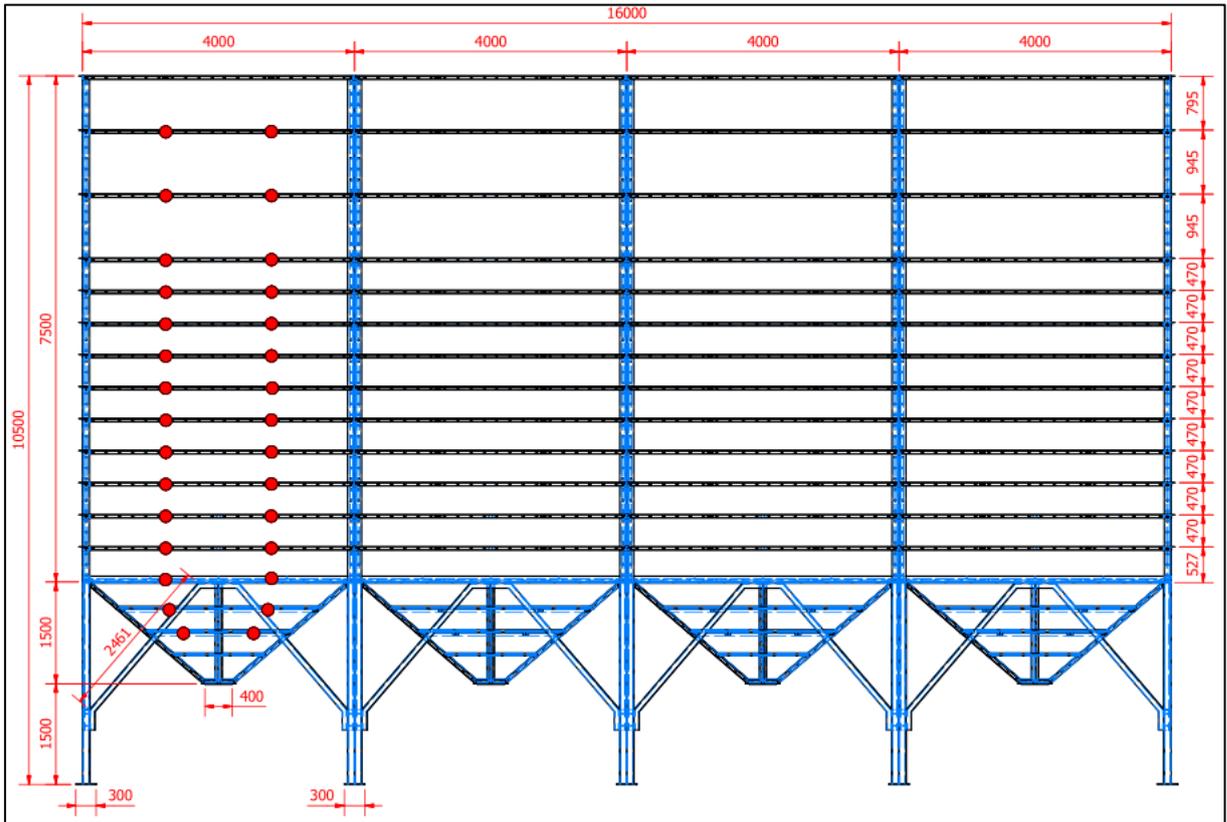


## ANEXO A – PARÂMETROS PARA DIFERENTES TIPOS DE GRÃOS

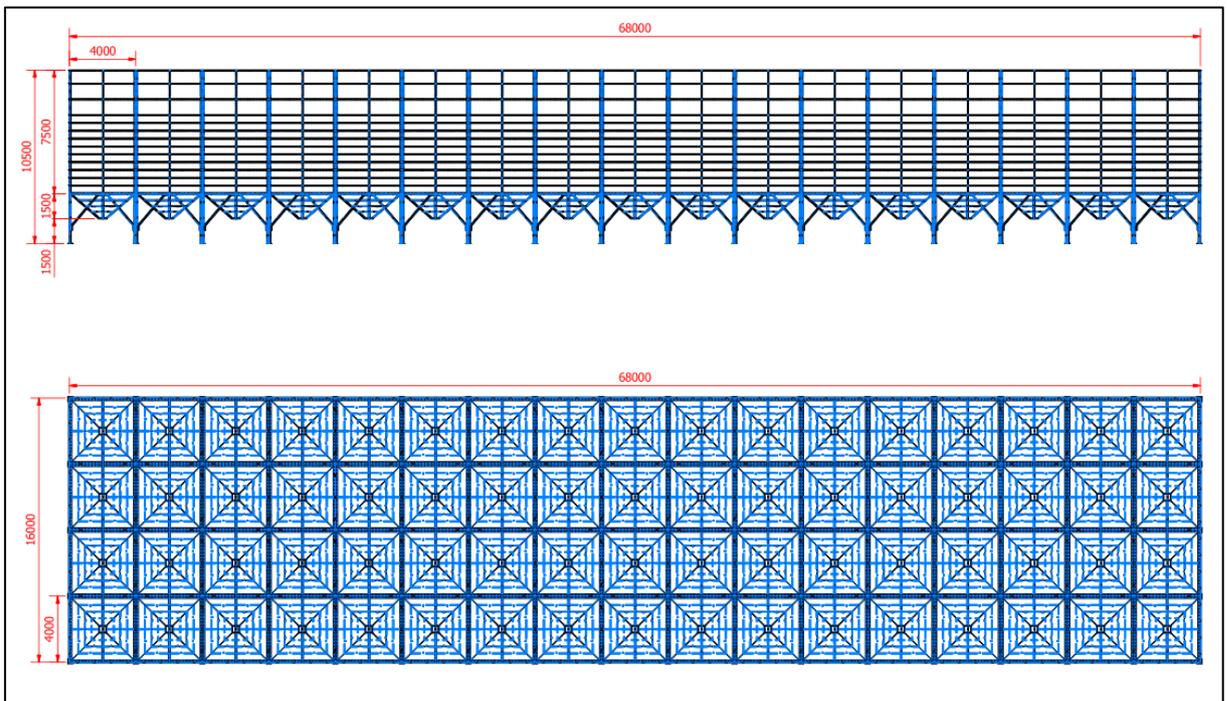
Type of bulk material	Density $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>		Gradient of slope $\varphi_r$ degree	Angle of internal friction $\varphi_i$ degree		Horizontal load ratio $K$		Coefficient of wall friction <sup>b</sup> $\mu$ ( $\mu = \tan \varphi_w$ ) (Mean value)				Parameter for reference surface load $C_{op}$
	Lower value $\gamma_1$	Upper value $\gamma_2$		Mean value	Conversion factor	Mean value $K_m$	Conversion factor $a_k$	Wall type D1	Wall type D2	Wall type D3	Conversion factor $a_\mu$	
general bulk material	6.0	22.0	40	35	1.3	0.50	1.5	0.32	0.39	0.50	1.40	1.0
Concrete gravel	17	18	36	31	1.16	0.52	1.15	0.39	0.49	0.59	1.12	0.4
Aluminium	10	12	36	30	1.22	0.54	1.2	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Concentrated feed mixture	5	6	39	36	1.08	0.45	1.1	0.22	0.30	0.43	1.28	1
Concentrated feed pellets	6.5	8	37	35	1.06	0.47	1.07	0.23	0.28	0.37	1.20	0.7
Barley	7	8	31	28	1.14	0.59	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.5
Cement	13	16	36	30	1.22	0.54	1.2	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
Cement clinker <sup>c</sup>	15	18	47	40	1.20	0.38	1.31	0.46	0.56	0.62	1.07	0.7
Coal	7	10	36	31	1.16	0.52	1.15	0.44	0.49	0.59	1.12	0.6
Coal dust	6	8	34	27	1.26	0.58	1.2	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Coke	6.5	8	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.6
Fly ash	8	15	41	35	1.16	0.46	1.20	0.51	0.62	0.72	1.07	0.5
Flour	6.5	7	45	42	1.06	0.36	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.6
Iron pellets	19	22	36	31	1.16	0.52	1.15	0.49	0.54	0.59	1.12	0.5
Lime hydrate	6	8	34	27	1.26	0.58	1.20	0.36	0.41	0.51	1.07	0.6
Limestone powder	11	13	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.51	0.56	1.07	0.5
Maize	7	8	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9
Phosphate	16	22	34	29	1.18	0.56	1.15	0.39	0.49	0.54	1.12	0.5
Potatoes	6	8	34	30	1.12	0.54	1.11	0.33	0.38	0.48	1.16	0.5
Sand	14	16	39	39	1.09	0.45	1.11	0.38	0.48	0.57	1.16	0.4
Slag clinker	10.5	12	39	36	1.09	0.45	1.11	0.48	0.57	0.67	1.16	0.6
Soya beans	7	8	29	25	1.16	0.63	1.11	0.24	0.38	0.48	1.16	0.5
Sugar	8	9.5	38	32	1.19	0.50	1.2	0.46	0.51	0.56	1.07	0.4
Sugar beet pellets	6.5	7	36	31	1.16	0.52	1.15	0.35	0.44	0.54	1.12	0.5
Wheat	7.5	9.0	34	30	1.12	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16	0.5

Fonte: DIN (2005).



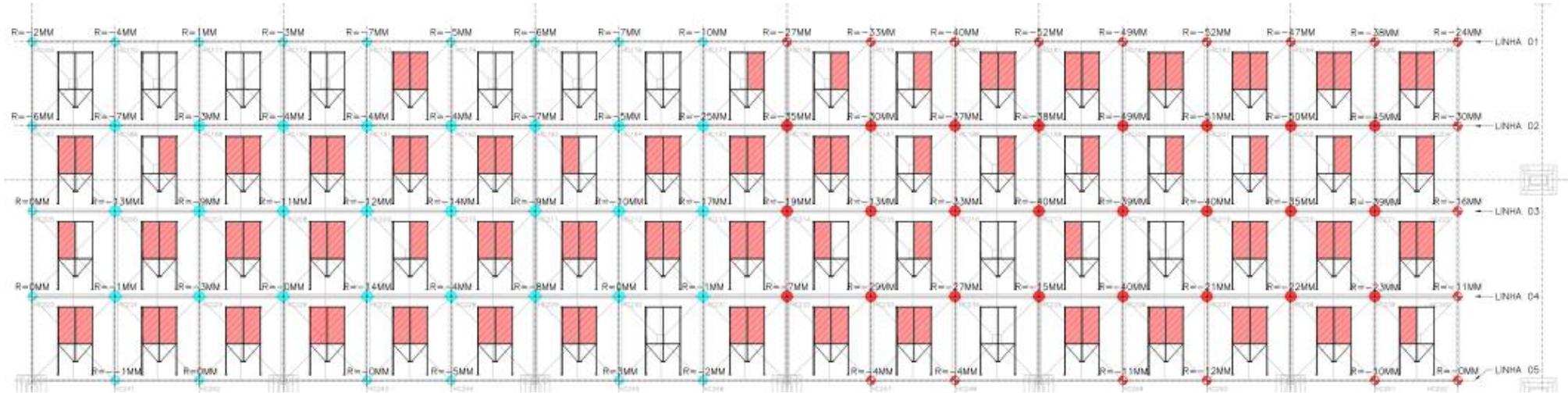


Fonte: Palini Alves (2019).



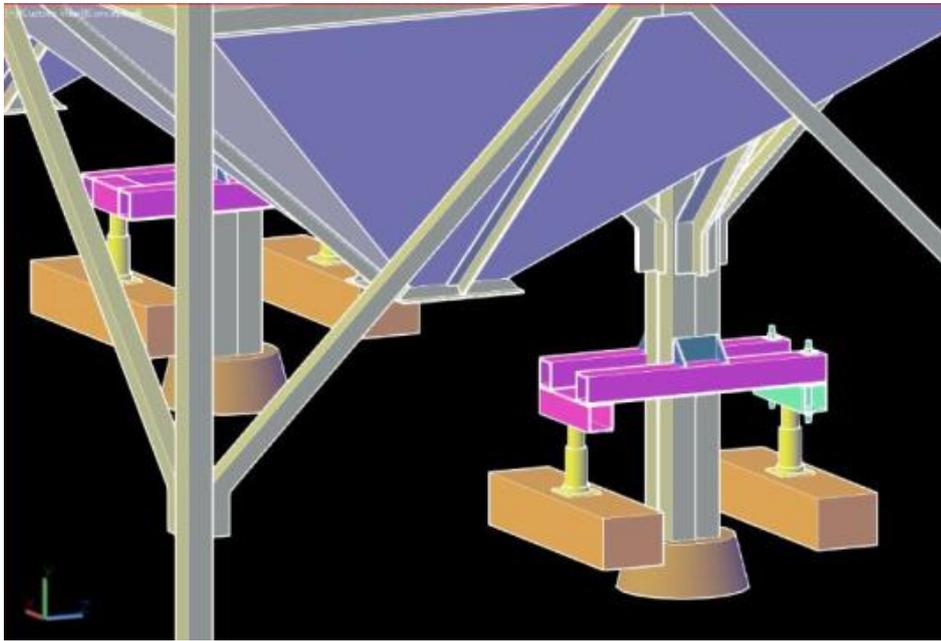
Fonte: Palini Alves (2019).

## ANEXO C – MONITORAÇÃO DOS RECALQUES



Fonte: Tulipa Pré-Fabricados (2021).

## ANEXO D – REAPRUMAÇÃO DOS SILOS



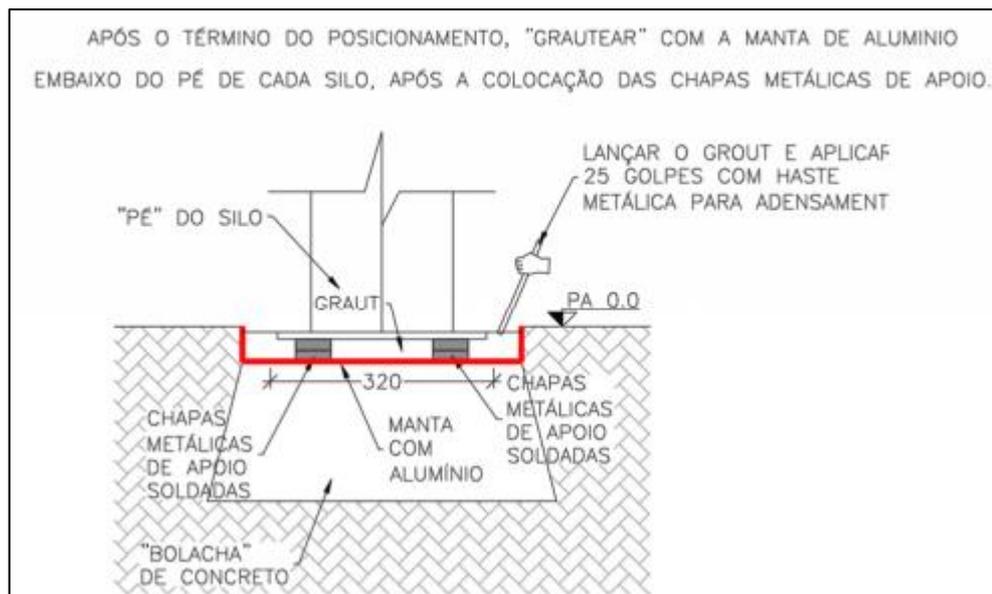
Fonte: Tulipa Pré-Fabricados (2021).



Fonte: Tulipa Pré-Fabricados (2021).



Fonte: Tulipa Pré-Fabricados (2021).



Fonte: Tulipa Pré-Fabricados (2021).