

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Reforço de Fundações de Silos Graneleiros com Inclusões Rígidas

Isabelle Moreira Santiago

Mestranda, Universidade de Brasília - UnB, Brasília-DF, Brasil, E-mail: isabellemoreirasantiago@gmail.com

Juan Félix Rodríguez Rebolledo

Professor, Universidade de Brasília - UnB, Brasília-DF, Brasil, E-mail: jrodriguezr72@unb.br

RESUMO: Este trabalho contribui na avaliação da utilização de inclusões rígidas na fundação de silos graneleiros de grande porte que são sujeitos a carregamentos cíclicos de enchimento e esvaziamento, bem como na avaliação do desempenho no controle de recalques em solos sujeitos a colapso, como no Distrito Federal. Buscou-se compreender e resolver o problema de deslocamentos excessivos quando os sistemas de fundação tradicionais são usados, considerando um solo com as características do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília, pois este perfil geotécnico possui certa representatividade para uma grande região do Distrito Federal, além de já ter sido validado para o modelo *Hardening Soil*. Foram desenvolvidos modelos axisimétricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF, Plaxis 2D) para calcular a capacidade de carga das estacas e das inclusões rígidas; com o MEF 3D (Plaxis 3D) foi simulado um silo com inclusões rígidas de comprimento variado, até se encontrar o valor de melhor desempenho; e finalmente foi modelado também com o MEF 3D um conjunto de oito silos para distintas combinações de carregamento. Os resultados mostraram que, para o caso analisado, as inclusões podem diminuir o recalque total em até 80%, o diferencial quase na totalidade, e a abertura da junta em até 91%.

PALAVRAS-CHAVE: Inclusões Rígidas, Fundações, Silos Graneleiros, Modelo *Hardening Soil*, Recalques.

ABSTRACT: This work contributes to the evaluation of the use of rigid inclusion for the foundation of large bulk silos that are subjected to cyclic loading of filling and emptying, as well as in the evaluation of the performance in the control of settlements in soils subjected to collapse, as in the Federal District, Brazil. In this study, it was sought to understand and solve the problem of excessive displacements when traditional foundation systems are used, considering a soil with the characteristics of the Geotechnical Experimental Field of the University of Brasilia (Federal District, Brazil), as this geotechnical profile has certain representativeness of a large region of the Federal District, in addition to having been validated for the *Hardening Soil* model. Axisymmetric models based on the Finite Element Method (FEM, Plaxis 2D) were developed to calculate the load capacity of piles and rigid inclusions; then, with FEM 3D (Plaxis 3D) a silo with rigid inclusions of varying length was simulated, until the best performance value was found; and finally, a group of eight silos for different loading combinations was also modeled with FEM 3D. The results showed that, for the analyzed case, the inclusions can reduce the total settlement by up to 80%, the differential almost entirely, and the joint opening by up to 91%.

KEYWORDS: Rigid inclusions, Foundations, Bulk Silos, *Hardening Soil* Model, Settlements.

1 Introdução

O Brasil é considerado essencialmente um país agrícola por causa do grande volume de grãos produzidos. Estes grãos não são encaminhados diretamente ao consumidor após a colheita, pois são em sua grande maioria destinados à exportação e distribuição para outros estados do país, logo é necessário a armazenagem até que se atinja a quantidade apropriada para que seu transporte seja feito em grande volume.

A estocagem desta alta produção de grãos até os períodos de retirada para exportação e comercialização é realizada em armazéns e silos graneleiros de médio a grande porte, que são estruturas construídas com a finalidade de garantir a preservação e durabilidade de produtos no período pós safra. No entanto, nestes silos graneleiros podem ocorrer patologias ocasionadas em sua maioria devido às fundações. Dentre as patologias mais comuns podem-se citar: recalque da laje de fundo, recalque dos anéis, surgimento de trincas nos anéis e



túneis, infiltrações nos túneis e poços, deformações nas linhas de transporte sobre os silos e deformações laterais causadas por força do vento ou por recalques diferenciais (Conciani, 2016). Sendo assim, em muitos casos são necessárias técnicas de melhoria do sistema de fundações que garantam a estabilidade sem comprometer a completa operacionalidade dos silos (Souza Filho, 2018).

Uma solução, proposta para o controle dos recalques totais e diferenciais de projetos de silos graneleiros, seria o uso de inclusões rígidas. O sistema de inclusões rígidas atualmente é uma das técnicas de fundações mais empregadas na América do Norte e na Europa, para diferentes tipos de estruturas, devido ao bom desempenho observado e ao seu baixo custo quando comparado com outras soluções existentes (Rebolledo, 2001). A diminuição dos recalques que pode ser obtida com esta técnica deve-se à transferência de uma parte importante dos esforços suportados pelo solo às inclusões.

2 Estrutura Analisada

2.1 Silos Graneleiros

Os silos graneleiros são geralmente grandes estruturas construídas em madeira, aço ou concreto armado, que podem possuir forma prismática ou circular; assentes sobre uma grande fundação direta do tipo laje ou radier, executada sobre um anel perimetral de concreto que confina o solo compactado que receberá parte das cargas aplicadas ao fundo do silo. Este anel perimetral pode ainda apoiar-se sobre sapatas e/ou estacas, sendo mais comum a utilização de estacas do tipo hélice contínua a grandes profundidades, a fim de transmitir as altas cargas provenientes do peso do material costado ao solo reforçado.

Em geral, os silos estão submetidos a altas faixas de carregamento, e que devido ao efeito de sucessivas safras de armazenagem, submetem o terreno a cargas cíclicas, fatores que quando combinados, podem carregá-lo de maneira acentuada e não prevista em projeto, provocando o acúmulo de deformações residuais, podendo ocasionar a ruptura do maciço, principalmente em condições de suporte não favoráveis (Souza Filho, 2018).

A falha de uma estrutura de silo geralmente leva ao colapso catastrófico de todo o silo. Isso se deve em grande parte à falta de reforço estrutural suficiente na maioria das estruturas cilíndricas da concha, bem como à falta de caminho de carga alternativo para redistribuir tensões e forças dentro da estrutura após uma falha ou dano local. A falha estrutural resultante causa não apenas perda de material contido, mas também em alguns casos as falhas completas do silo que são tipicamente quebradiças e repentinas, às vezes causadas por uma explosão. A estrutura do silo com falha também pode cair no celeiro adjacente ou nas instalações industriais, resultando em uma perda adicional e possivelmente ferindo ou matando pessoas e/ou animais (Dogangun, et al., 2009).

Os silos são submetidos a diversas condições de carregamento estático e dinâmico, principalmente devido a características únicas dos materiais armazenados. Como cada material a granel se comporta de maneira diferente sob várias temperaturas, e durante o enchimento e a descarga, é difícil determinar a magnitude e a distribuição das cargas, e os modos de falha correspondentes. Além disso, em muitos casos, procedimentos simplificados de análise não estão disponíveis para capturar a resposta estática ou dinâmica de todo o silo, como na análise e projeto de estruturas convencionais. Como resultado, o projeto ou análise típica de silo geralmente requer uma análise aprofundada ou análise de elementos finitos do sistema de fundação do silo (Dogangun, et al., 2009).

2.2 Inclusões Rígidas

As inclusões rígidas têm sido muito utilizadas em países da Europa e da América do Norte em projetos assentes em solos moles, devido sua capacidade de atribuir maior rigidez ao solo que receberá cargas provenientes de diversos tipos de construções, como estradas, rodovias, pontes, aterros, edificações e outros, como citam em Wang, et al. (2019), Rizal & Yee (2018), Bernuy, et al. (2018) e Briançon, et al. (2015).

As inclusões são elementos cilíndricos ou prismáticos, sem contato direto com a fundação (laje ou sapata) que podem ser locadas no solo usando diferentes técnicas, como estacas escavadas, estaca mega, estaca cravada de pré-moldado de concreto, estaca tubular metálica, micro estaca, hélice contínua, *grouting* de baixa pressão, *jet grouting*, e coluna de areia, isto é, qualquer tipo de fundação profunda que possua rigidez consideravelmente maior que o solo de fundação reforçado (Rebolledo, et al., 2019b).



Neste estudo, assumiu-se que as inclusões rígidas foram construídas usando a técnica de hélice contínua, pois, comparada a outras técnicas, esta produz pequenos deslocamentos na escavação do solo, tem relativa alta performance e é amplamente utilizada no Brasil, entretanto, outros métodos de execução de estacas de fundações também podem ser usados.

O perfil da fundação utilizada para o desenvolvimento deste estudo é definido pelas estruturas das fundações em hélice contínua, das inclusões rígidas com capitel, um aterro utilizado como plataforma de transferência de cargas, uma viga perimetral que circunda e delimita o material compactado do aterro, um radier com dutos aeradores e um túnel utilizado para retirada e transporte do material ensilado, Figura 1.

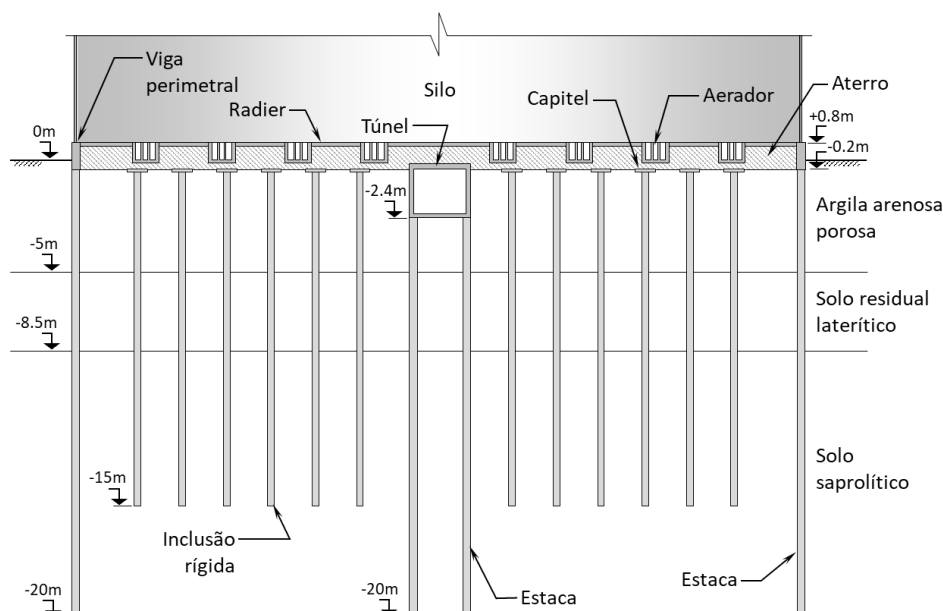


Figura 1. Perfil da fundação com as inclusões.

3 Metodologia

Neste trabalho buscou-se compreender e resolver o problema de recalque excessivo da laje de fundo de silos graneleiros de alta capacidade de armazenamento de grãos; caso o silo estudado estivesse construído em um solo com as características do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília, uma vez que este perfil geotécnico possui certa representatividade para uma grande região do Distrito Federal e cidades vizinhas, além de já ter seu perfil estratigráfico e parâmetros físicos validados para o modelo *Hardening Soil* por Rebolledo, et al. (2019a).

Por tanto, como solução apresentada para correção deste recalque, se estudou o reforço de fundações com inclusões rígidas, e procurou-se analisar se sua utilização realmente teria efeitos positivos na redução de recalques e se caso houvesse uma condição de inundação, chuva ou qualquer umidificação do solo se esses efeitos se manteriam.

Para que tudo isso pudesse ser modelado através do Plaxis, algumas informações básicas, mas importantes, precisaram ser respondidas. Foi preciso determinar quais seriam as dimensões destas inclusões e quais seriam suas capacidades de suporte, além de ter a certeza se as estacas do tipo hélice contínua que comumente são utilizadas nos projetos deste tipo também suportam a carga para a qual são projetadas. Inicialmente se reuniu todas as informações e os parâmetros físicos do perfil do solo estudado; logo após se calculou esta capacidade de carga através do método dos elementos finitos, com Plaxis 2D; de posse destes dados, pôde-se modelar e analisar um único silo e um complexo de oito silos e o efeito que o reforço com inclusões pode causar a sua estrutura.

Este trabalho, portanto, contribuirá na validação de fundações com inclusão rígidas para silos graneleiros de grande porte que são sujeitos a carregamentos cíclicos de enchimento e esvaziamento, bem como na avaliação do desempenho na redução de recalques totais, diferenciais e da abertura da junta estrutural entre o radier e o anel, em solos sujeitos a colapso, como no Distrito Federal.



4 Estratigrafia Usada no Modelo

Para o modelo estudado foram utilizados os parâmetros do solo do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília, conforme a Tabela 1, por se tratar de um perfil típico da região e por serem estes parâmetros calibrados com o modelo *Hardening Soil*, por Rebolledo et al (2019b).

Tabela 1. Parâmetro do solo do CEGUnB (modificado de Rebolledo, et al., 2019b).

Parâmetros	Número da Camada					
	1	2	3	4	5	6
	Argila Arenosa Porosa			Solo Residual Laterítico		Solo Saprolítico
Prof. (m)	0 - 1.5	1.5 - 3.5	3.5 - 5.0	5.0 - 7.0	7.0 - 8.5	8.5 - 20.0
Estado	Nat.	Sat.	Nat.	Sat.	Nat.	Nat.
γ (kN/m ³)	13.1	16.5	12.8	16.4	13.9	14.3
c' (kPa)	5	0	5	0	5	20
ϕ' (°)	25	26	25	26	26	32
ψ (°)	0	0	0	0	0	0
E_{50}^{ref} (MPa)	3.2	2.2	2.5	2.1	4.0	12.0
E_{oed}^{ref} (MPa)	4.9	0.96	1.45	0.83	2.2	6.9
E_{ur}^{ref} (MPa)	14.0	13.0	14.0	13.0	36.9	37.5
m	0.5	0.65	0.5	0.8	0.5	0.5
ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
p^{ref} (kPa)	100	50	100	50	100	100
R_f	0.8	0.75	0.8	0.75	0.9	0.9
POP (kPa)	65.7	16.1	31.8	6.59	0	31.4
K_o^{nc}	0.58	0.56	0.58	0.56	0.56	0.47
K_o	1.37	0.75	0.77	0.75	0.56	0.66

Sendo: γ : peso específico do solo; c' e ϕ' : parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento; ψ : ângulo de dilatação; E_{50}^{ref} : módulo de rigidez de referência secante para o teste tri axial drenado; E_{oed}^{ref} : módulo de rigidez de referência tangente para o carregamento odométrico; E_{ur}^{ref} : módulo de rigidez referente para condições de descarregamento e recarregamento; m: o expoente que define a resistência a depender do estado de tensão; ν_{ur} : coeficiente de Poisson para descarregamento e recarregamento; p^{ref} : tensão isotrópica de referência; R_f : coeficiente de ruptura; POP: Pressão de pré-adensamento; K_o^{nc} : coeficiente de empuxo para estado normalmente consolidado; K_o : Coeficiente de empuxo em repouso.

Para a camada de distribuição de cargas foi considerado um solo compactado de 0,8 m espessura, em substituição da primeira camada do perfil característico do terreno, com valores de parâmetros definidos conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do solo compactado. (Rebolledo, et al., 2019b).

Parâmetro	Valor
Peso específico, γ (kN/m ³)	18,6
Módulo de Young, E (MPa)	60
Coesão, c' (kPa)	80
Ângulo de atrito, ϕ' (°)	38
Coeficiente de Poisson, ν	0,25



Também se analisou o caso em que o solo do local estaria com seus primeiros 3,5 m inundados (Estado Sat., Tabela 1), para conhecer o efeito que a saturação no local poderia ter sob a compressibilidade do solo superficial, por conseguinte, no aumento de recalques, pois o solo estudado é considerado como colapsível, e por este motivo apresenta variações abruptas de volume quando carregado ou quando tem sua umidade natural aumentada.

5 Capacidade de Carga das Estacas e das Inclusões

Para definição da capacidade de carga das estacas e das inclusões foram realizadas simulações no Plaxis 2D, considerando: condições axissimétricas, o modelo constitutivo *Hardening Soil*, os parâmetros do perfil de solo do CEGUnB, estacas de 20 m de comprimento e 0,35 m de diâmetro, e inclusões de 5, 10, 15 e 20 m de comprimento e 0,35 m de diâmetro. Foram inseridos elementos de interface no fuste e na ponta das estacas. Foi simulada uma prova de carga, aplicando-se distintas cargas sobre a cabeça do elemento até a ruptura do solo. Para estacas de 20 m de comprimento foi obtida uma capacidade total (fuste + ponta) de 1.371,62 kN e de 841,42 kN para inclusões de 15 m de comprimento.

6 Avaliação do Desempenho

Para avaliar o desempenho da fundação com inclusões rígidas, foram propostas três relações: Fator de Redução de Recalques (SRF, Equação 1), o Fator de Redução de Recalques Diferenciais (DRF, Equação 2) e a Fator de Redução de Abertura da Junta (GRF, Equação 3). O SRF e o DRF foram avaliados para o radier, o túnel coletor e a viga perimetral.

$$SRF = 1 - \frac{\rho_{w/i}^{max}}{\rho_{w/o}^{max}} \quad (1)$$

onde $\rho_{w/i}^{max}$ é o deslocamento vertical máximo obtido quando as inclusões são consideradas e $\rho_{w/o}^{max}$ é o deslocamento vertical máximo obtido para a solução tradicional (sem inclusões). Quando $SRF = 1$, o recalque é reduzido totalmente e o desempenho das inclusões seria o máximo possível, e quando $SRF = 0$, a redução do recalque é nula e o desempenho do sistema seria o mínimo possível.

$$DRF = 1 - \frac{\delta_{w/i}^{max}}{\delta_{w/o}^{max}} \quad (2)$$

onde $\delta_{w/i}^{max}$ é a distorção angular máxima obtida quando as inclusões são consideradas e $\delta_{w/o}^{max}$ é a distorção angular máxima obtida para a solução tradicional.

$$GRF = 1 - \frac{G_{w/i}^{max}}{G_{w/o}^{max}} \quad (3)$$

onde $G_{w/i}^{max}$ é a abertura máxima da junta obtida quando as inclusões são consideradas e $G_{w/o}^{max}$ a abertura máxima da junta obtida para a solução tradicional.

Para obter o comprimento das inclusões a partir do qual é possível obter o máximo desempenho do sistema, foi modelado no Plaxis 3D um silo individual de 32,4 m de diâmetro e 12.000 Ton de capacidade, considerado a solução tradicional de fundação e adicionando inclusões rígidas (mudando o comprimento de 5, 10, 15 e 20m, Figura 2). É importante destacar que o carregamento nos silos foi simulado considerando seu enchimento total, com pressão de 135,3 kN/m² distribuída uniformemente na laje de fundo. As etapas de análise são as definidas na Tabela 3.

Os resultados desta análise mostraram que, para um silo individual, a partir dos 10 m de comprimento, a fundação com inclusões apresenta os valores de desempenho seguintes: SRF de 0,50 a 0,81; DRF de 0,63 a 0,97; e GRF de 0,62 a 0,91. Isto mostra que as inclusões podem diminuir o recalque total em até 80%, o



diferencial quase na totalidade, e a abertura da junta em até 91%; por tanto, para as análises seguintes foram adotadas inclusões de 15 m de comprimento.

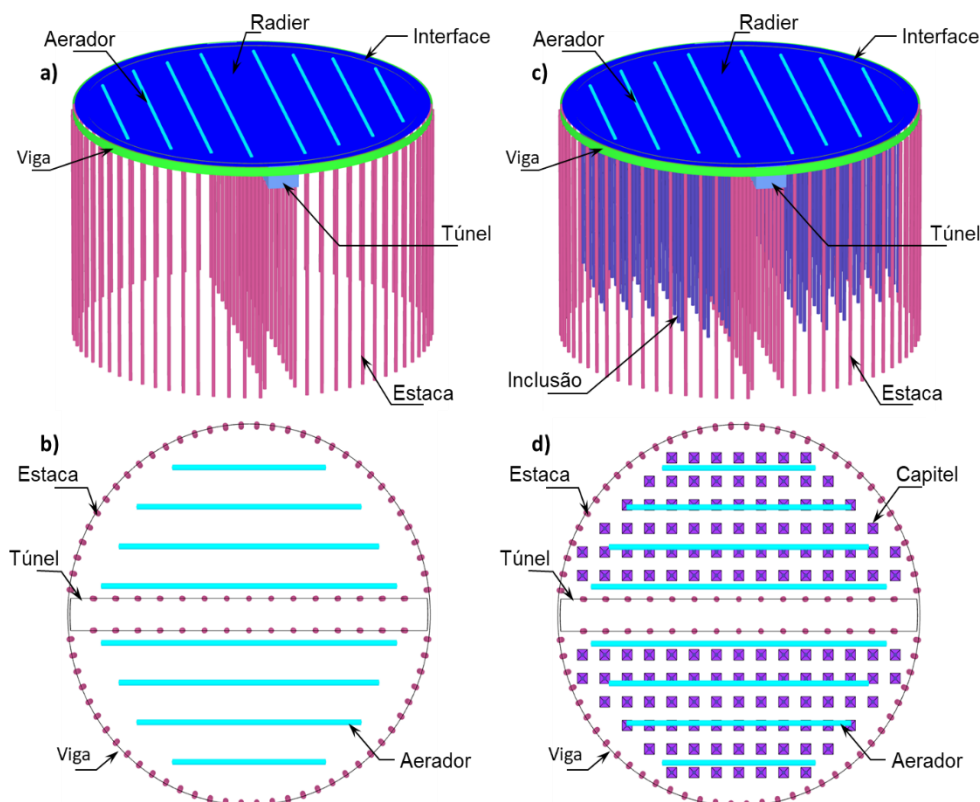


Figura 2. Silo a) vista 3D e b) planta do silo com estacas; e c) vista 3D e d) planta do silo com estacas e inclusões.

Tabela 3. Etapas de análise.

Etapa	Descrição
1	Condição inicial de tensões
2	Construção do silo. Aplicação de carregamento na viga perimetral de 283,1 kN/m
3	Enchimento total do silo. Aplicação de carregamento no radier de 135,3 kPa
4	Esvaziado total do silo.

7 Modelado Numérico do Grupo de Silos

Como mostrado na Figura 3, para a modelagem do conjunto de oito silos, foram consideradas as condições de simetria do problema. Os contornos laterais da malha de elementos finitos foram colocados a uma distância de aproximadamente três vezes o diâmetro do silo. O meio foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 64.477 elementos tetraédricos de 10 nós. As condições de contorno laterais foram fixadas na direção horizontal e as condições de contorno de fundo foram fixadas em ambas as direções. As diferentes combinações de silos carregados (enchimento total) são as indicadas na Tabela 4. A estratigrafia, as propriedades dos solos, as dimensões e características dos silos, o tipo de fundação e as etapas de análise são as mesmas que as expostas nos itens anteriores.

Como resultado pode-se calcular para cada uma das combinações os fatores SRF, DRF e GRF, no radier dos silos, Tabela 4. Para os silos carregados foram obtidos valores de SRF de 0,7, DRF de 0,9 e GRF de 0,8;



de novo as inclusões mostram seu bom desempenho, já que podem diminuir o recalque total em até 70%, o diferencial em até 90% e a abertura da junta em 80%. Para os silos vazios, o valor do desempenho obtido foi baixo, SRF de 0,2, DRF de 0,3 e GRF de 0,1, isto porque os deslocamentos obtidos nesses silos foram consideravelmente baixos (da ordem dos 3 cm). Foi possível observar que, ao considerar o grupo de silos, o desempenho da sua fundação não muda de forma importante quando comparado a um silo trabalhando individualmente.

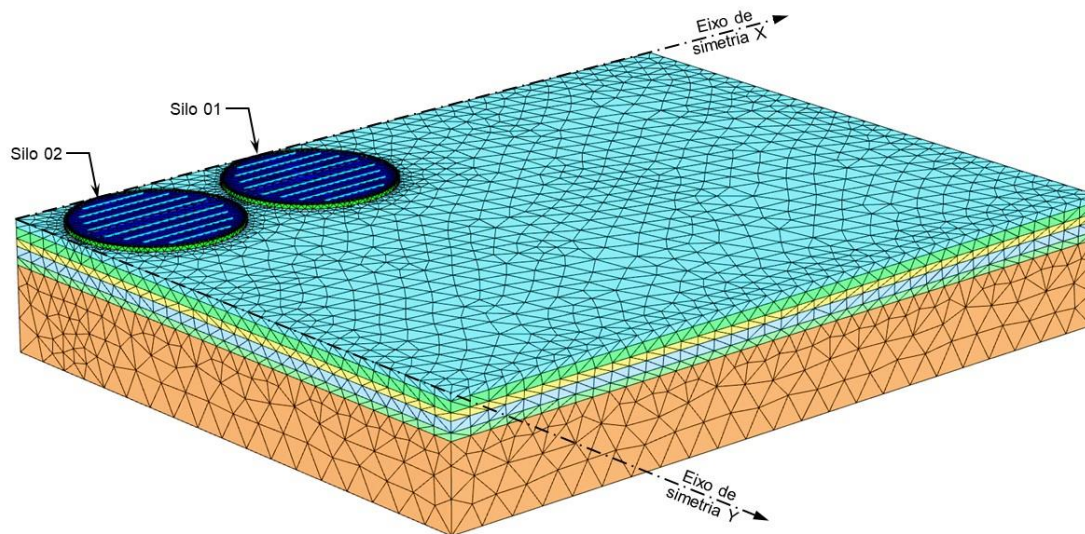
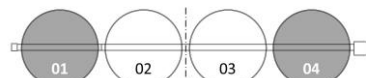
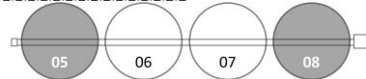
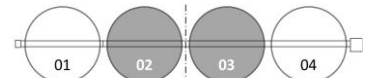
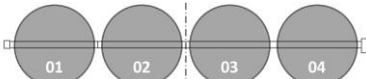


Figura 3. Malha 3D para a simulação do grupo de oito silos.

Tabela 4. SRF, DRF e GRF para o grupo de silos.

Combinação	Silo	SRF	DRF	GRF
	Exterior (01, 04, 05, 08)	0,67	0,90	0,83
	Interior (02, 03, 06, 07)	0,17	0,17	0,09
	Exterior (01, 04, 05, 08)	0,20	0,20	0,13
	Interior (02, 03, 06, 07)	0,66	0,90	0,84
	Exterior (01, 04, 05, 08)	0,66	0,92	0,84
	Interior (02, 03, 06, 07)	0,66	0,93	0,85

8 Conclusões

Os resultados mostraram que, para o caso analisado, as inclusões podem diminuir o recalque total em até 80%, o diferencial quase na totalidade, e a abertura da junta em até 91%.

O desempenho da fundação reforçada com inclusões é pouco afetado quando considerados os silos funcionando em conjunto. Quando necessário, para realizar uma análise paramétrica para o dimensionamento da fundação, i.e., para determinar o comprimento, o diâmetro e o número de inclusões e/ou estacas, a análise



de um silo trabalhando individualmente pode ser considerada adequada. Para a revisão final dos estados limites de serviço, seria recomendável analisar os silos trabalhando em conjunto, considerando as dimensões obtidas na primeira análise, se algum ajuste fosse necessário, seria mínimo.

Portanto, o uso de inclusões rígidas para reforço de fundações de silo graneleiros além de ter mostrado um alto desempenho na redução de recalques, constitui uma alternativa prática na solução dos problemas atualmente enfrentados pelos silos graneleiros assentes em solos colapsáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Fundo de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelo suporte e parceria no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernuy, C. et al., (2018). LNG tanks on rigid inclusions: Kuwait. *Springer Nature Switzerland*, Issue 3, p. 80.
- Briançon, L., Dias, D. & Simon, C., (2015). Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions-reinforced industrial building. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), pp. 1592-1604.
- Conciani, W., (2016). *Possíveis Melhoramentos no Projeto e Construção de Silos. Tese de Candidatura à Classe de Professor Titular*. Brasília: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília.
- Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A. & Sezen, H., (2009). Cause of Damage and Failures in Silo Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 01 Abril, Volume 23, pp. 65-71.
- Rebolledo, J. F. R., (2001). *Uso de Inclusiones Rígidas para el Control de Asentamientos en Suelos Blandos - Tesis de Maestría*. D.F. México: UNAM - Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P. & Camapum de Carvalho, J., (2019a). Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, pp. 61-74.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P. & Camapum de Carvalho, J., (2019b). Performance Evaluation of Rigid Inclusion Foundations in the Reduction of Settlements. *Soils and Rocks*, pp. 265-279.
- Rizal, M. & Yee, K., (2018). *Bridge Approach Embankments on Rigid Inclusions*. Yogyakarta: International Conference on Geotechnics.
- Souza Filho, H. L., (2018). *Dissertação de Mestrado: Estudo da Técnica de Sistemas em Radier Estaqueado para Fundações de Silos Graneleiros do Centro-Oeste*. Brasília: Universidade de Brasília.
- Wang, D., Sánchez, M. & Briaud, J.-L., (2019). Numerical study on the effect of rigid inclusions on existing railroads. *Int J Numer Anal Methods Geomech.*, 43(18), pp. 2772-2796.