

Inclusões rígidas: Uma alternativa de fundação para silos assente em solos moles

Camili Peres Yamamoto

Estudante, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, capeyamamoto@gmail.com

Julián Asdrúbal Buriticá García

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, julianburitica@gmail.com

RESUMO: O Brasil possui uma ampla diversidade climática e grande extensão territorial, por esse motivo o país está entre os maiores produtores e exportadores de grãos. Após a colheita, a produção de grãos não é enviada diretamente para o consumidor final, grande parte da produção de grãos deve ser armazenada em silos até que seja atingida uma quantidade apropriada para o transporte ou inclusive um momento mais rentável para a comercialização. O número de silos na região sul do Brasil é muito alto, sendo assim, torna-se indispensável a preocupação com os projetos estruturais e de fundações das obras de silos de armazenamento. Nos solos complexos, como é o caso dos solos moles presentes em grande parte do litoral Brasileiro, a fundação do projeto representa uma porcentagem elevada do custo total da obra. Por esse motivo, este trabalho tem como objetivo apresentar os principais tipos de fundações utilizados em obras de silos e realizar um comparativo técnico do sistema de fundação com inclusões rígidas e o sistema de estacas convencionais por meio de modelagem numérica, desta forma avaliar a possibilidade de usar alternativas mais econômicas para o projeto garantindo a eficiência, segurança e funcionalidade destas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Silos, Fundações profundas, Solos moles, Inclusões rígidas, Estacas.

ABSTRACT: Brazil has a wide range of climates and a large territory, which is why it is one of the country's largest grain producers and exporters. After harvesting, grain production is not sent directly to the end consumer. A large part of grain production has to be stored in silos until it reaches a quantity suitable for transportation or even a more profitable time for marketing. The number of silos in the southern region of Brazil is very high, so concern about the structural and foundation design of storage silos is essential. In complex soils, such as the soft soils found on much of the Brazilian coastline, the project foundation represents a high percentage of the total cost of the work. For this reason, this work aims to present the main types of foundations used in silo projects and to carry out a technical comparison of the foundation system with rigid inclusions and the conventional pile system using numerical modeling in order to evaluate the possibility of using more economical alternatives for the project, guaranteeing the efficiency, safety, and functionality of these structures.

KEYWORDS: Silos, Deep foundations, Soft soils, Rigid inclusions, Piles.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) apresentado em abril de 2021, no Brasil existem 11.799 armazéns do tipo graneleiros, sendo que aproximadamente 55% estão localizados na região Sul do país, 29% na região Centro Oeste, 9% na região Sudeste, 5% região Nordeste e 2% região Norte. A região Sul do Brasil é uma potência na produção de grãos, nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina a produção de soja e arroz é muito significativa.

Sendo assim, torna-se indispensável a preocupação com os projetos estruturais e de fundações das obras de silos de armazenamento. A inovação e uso de tecnologia nas atividades agrícolas somente é possível devido às contribuições da Engenharia Civil, Engenharia Agrícola, Engenharia Mecânica, etc.

Sobre o projeto de fundação é preciso compreender que as estruturas dos silos no Brasil, em geral, são constituídas por duas partes independentes em que um anel externo (viga perimetral), que suporta as paredes e os montantes, é apoiado comumente sobre estacas, já a laje de fundo dos silos é apoiada diretamente no solo.

Partindo do fato de que a maior parte do carregamento é aplicado após a conclusão da obra, a estrutura pode sofrer recalques significativos imediatos (totais e permanentes), além disso, na presença de solos complexos como o caso de solos moles do litoral da região Sul do Brasil e em solos colapsáveis de diferentes regiões do Brasil, podem haver alteração no comportamento da camada superficial sob a laje devido a variações na umidade e à natureza cíclica dos carregamentos, oriunda do enchimento e esvaziamento dos silos. A falta de reforço do solo sob a laje tem gerado problemas estruturais e operacionais em projetos de silos graneleiros construídos em diferentes regiões do país.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Solos moles

São solos sedimentares em sua maioria argilosos, com alta compressibilidade, possuem elevado teor de umidade e baixo índice de penetração no solo (definido através de ensaios SPT). Diretamente ligados com o índice de consistência, parâmetro que permite determinar a capacidade de carga do solo.

De acordo com a NBR 7250, que aborda a identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens, argilas com índices de resistência à penetração menores que 5, são considerados de consistência mole. Sendo um dos maiores desafios da engenharia civil, seu estudo vem ganhando notoriedade. Comumente encontrados na região litorânea do Brasil, possuindo grande ocorrência na região Sul.

2.2 Silos graneleiros

O Brasil está entre os 10 maiores produtores e exportadores de grãos do mundo, segundo dados da FAO STAT. Entre a produção e a distribuição desses grãos tem-se a necessidade de armazenar o material mantendo a qualidade até que seja feito o seu transporte, para isso são utilizados armazéns e silos graneleiros.

De acordo com o IBGE (2023), em termos de capacidade útil armazenável, os silos predominam no Brasil, tendo alcançado 99,2 milhões de toneladas no segundo semestre de 2022. Os silos predominam na Região Sul, sendo responsáveis por 63,9% da capacidade armazenadora da Região e 47,9% da capacidade total de silos do país. “No Brasil existem 11.799 armazéns do tipo graneleiros, sendo que 6.534, ou seja, 55,37% destes armazéns situam-se na região sul do país.” (Santiago, 2021 apud CONAB, 2019).

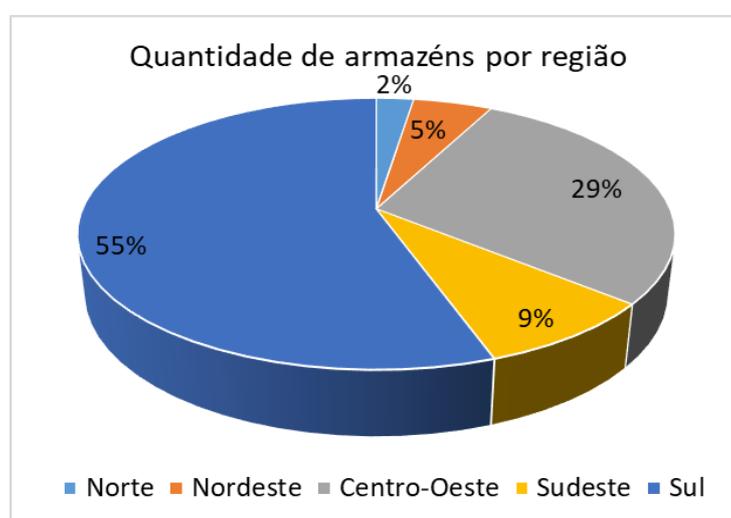


Figura 1. Quantidade percentual de armazéns no Brasil (CONAB, 2019)

Silos são reservatórios projetados para armazenar matéria prima em condições ideais, conservando a qualidade e o valor comercial dos mesmos. Essas estruturas otimizam a comercialização e minimizam os prejuízos, auxiliando em uma administração estratégica das safras.

Os silos podem ser verticais ou horizontais, no silo vertical a altura é muito maior que a largura da base como pode ser observado na Figura 2. Os silos verticais podem ser de fundo plano ou silos elevados de fundo cônico, caracterizados por serem construídos acima do nível do solo. Os silos que serão estudados nesta pesquisa são os silos verticais de fundo plano.



Figura 2. a) silos verticais de fundo plano, b) silos verticais de fundo cônico. Disponível em <https://www.page.ind.br/>

2.3 Tipos de fundações comumente usadas em silos

Devido às cargas e descargas constantes de grandes safras, os silos submetem o terreno a cargas cíclicas, prevalecem as pressões sobre o fundo e as paredes laterais. Levando em conta que as cargas predominantes são do material estocado e não do peso próprio da estrutura, “os materiais granulosos destinados ao armazenamento nos silos como o café, o trigo, a cevada, a areia e outros tem características importantes para o seu dimensionamento” (Santiago, 2021 apud Calil Junior 1983).

Segundo Nascimento (2022), as fundações mais utilizadas são as fundações rasas, profundas e bases de concreto, entretanto são definidas de acordo com a função que irão exercer e as condições de cada projeto.

De acordo com a NBR 6122 (2019) as fundações profundas transmitem a carga ao terreno pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) e devem apresentar sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta com mínimo de 3,0 m. Nas fundações rasas ou superficiais, as cargas são transmitidas ao solo através da base da fundação, sendo reconhecidas pela NBR como fundações diretas e apresentam como definição, que a base deve estar assentada em uma profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

Sobre o projeto de fundação de um silo vertical é preciso compreender que as estruturas dos silos no Brasil, em geral, são constituídas por duas partes independentes, uma viga perimetral e uma laje de fundo. O anel externo (viga perimetral), suporta as paredes e os montantes, é apoiado comumente sobre estacas, já a laje de fundo dos silos é apoiada diretamente no solo.

Devido ao fato de que a maior parte do carregamento é aplicado após a conclusão da obra, a estrutura pode sofrer recalques significativos (totais e permanentes) durante a etapa de operação, além disso, na presença de solos colapsáveis pode haver alteração no comportamento da camada superficial sob a laje devido a variações na umidade e aos carregamentos no fundo do silo, que são cíclicos por causa do enchimento e esvaziamento.

Nos últimos anos no Brasil, têm sido desenvolvidas algumas pesquisas sobre o uso de inclusões rígidas em fundações de prédios quando se utiliza como plataforma de transferência de carga um material coesivo, típico da região centro oeste do Brasil e o uso do mesmo material melhorado com cimento.

Podem ser mencionadas os trabalhos de Perez (2017), Rebolledo et al. (2019) que realizaram análises comparativa a partir de modelagem numérica entre fundações do tipo radier direto, radier estaqueado e inclusões rígidas buscando prever o comportamento diante da indução do colapso da camada superficial do solo de Brasília, com destaque para os recalques máximos e distorção angular observados, bem como a distribuição de carga nas inclusões.

Garcia et al., (2021) avaliaram o mecanismo de transferência de carga na camada de distribuição (formada pelo solo superficial de Brasília compactado) por meio de modelos físicos em escala real e modelos reduzidos em centrifuga geotécnica.

2.3 Inclusões rígidas

Segundo Rebolledo et al. (2019) Inclusões rígidas são elementos de reforço de solo, cilíndricos ou prismáticos, não conectados com a fundação (sapata ou radier). Podem ser executados de diferentes formas como: estaca escavada, estaca encamisada, estaca cravada de concreto pré-moldado, estaca cravada de aço, micro estaca, estaca hélice contínua, injeção a baixa pressão, “jet grouting” e colunas de brita, ou de misturas de solo com cal ou cimento.

A principal diferença das inclusões rígidas para os demais métodos convencionais de fundações, é a ausência de conexão das inclusões com a fundação superficial, é colocado uma plataforma de transferência de carga (PTC) entre o radier e o solo. A PTC, geralmente feita com material compactado ou granular, funciona distribuindo o carregamento nas cabeças das inclusões de maneira desigual e transferindo as cargas para a porção profunda e mais rígida do solo.

“O sistema de inclusões rígidas utilizado para fundações é muito utilizado por países da Europa e América do Norte, sendo ainda pouco conhecido e utilizado no Brasil, de tal maneira que a Norma Brasileira Regulamentadora nº 6122 de 2019 (Projeto e Execução de Fundações) ainda não aborda este tipo de fundação em seu escopo. No entanto, diversos estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de incorporar o método de inclusões rígidas como fundação utilizada principalmente em estruturas de grande porte que necessitam de redução de recalques.” (SANTIAGO, 2021, p.17)

Uma fundação de inclusões rígidas conta com elementos principais indispensáveis, são eles a sapata/radier, a plataforma de transferência de carga (PTC), as estacas, o solo circundante e os capitéis (opcional). “As inclusões rígidas são dispostas no solo mole, formando uma malha e repousando ou não em um substrato rígido.” (Santiago, 2021)

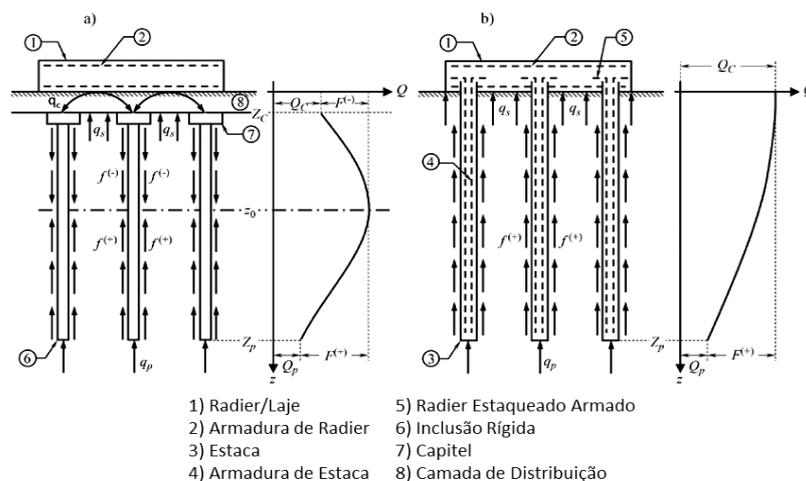


Figura 3. Comparativo entre sistema de inclusões rígidas e radier estaqueado (Rebolledo et al. 2019)

Sobre elas é colocado a PTC, que tem por objetivo garantir que as cargas sejam transferidas para as extremidades das estacas uniformizando os recalques. Segundo Móczár (2016), uma espessura mínima, variando dos 40 a 80 cm, é necessária para permitir que a plataforma realize a transferência de carga de maneira

adequada entre inclusões e o solo, bem como para limitar as forças dentro da estrutura suportada e reduzir os momentos fletores nas lajes.

2.4 Uso de Inclusões rígidas na indústria da construção de tanques, reservatórios e silos

Além do uso amplamente conhecido das inclusões rígidas na construção de aterros sobre solos moles, também é possível encontrar na literatura técnica algumas referências sobre o uso da técnica para fundações de edifícios residenciais, comerciais, industriais, de tanques de armazenamento de resíduos nucleares (Matsson et al., 2013; Briançon et al., 2015), assim como para o uso em fundações de aterros de linhas de trens de alta velocidade com uso de placa rígida de concreto (Zheng et al. 2011; Briançon & Simon, 2017) e construção de fundações de tanques de armazenamento de gás natural (Bernuy et al., 2018) como apresentado na Figura 4.

Bernuy et al. (2018) apresentaram o projeto da *The Kuwait Integrated Petroleum Industries Company* (KIPIC) que consiste na construção de 8 tanques de armazenamento de gás natural, com capacidade individual de 225.000 m³, 96 m de diâmetro, 28,65 m de profundidade e 45 m de altura. A fundação proposta foi um sistema de 1.128 inclusões rígidas construídas com hélice contínua para cada tanque, de 80 cm de diâmetro numa malha quadrada de 2,8 m de separação e uma camada de distribuição de 2 m de espessura.



Figura 4. Execução projeto tanques de gás natural (a) Processo de escavação hélice contínua (b) inclusões rígidas finalizadas (Bernuy et al., 2018)

As inclusões rígidas também podem ser utilizadas em fundações de silos de armazenamento em solos complexos como o caso dos solos colapsáveis e solos moles, para evitar elevados recalques permanentes durante as etapas de construção e operação.

3 ESTUDO DE CASO

Para estudar a viabilidade do uso dos sistemas de inclusões rígidas no controle de recalques em projetos de silos graneleiros construídos em solos moles, foi realizado um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos comparando dois sistemas de fundação para um silo originalmente projetado com a solução de radier estaqueado.

A modelagem numérica Axissimétrica utilizando o programa computacional PLAXIS 2D consistiu inicialmente da calibração de um modelo geotécnico representativo para um perfil típico da cidade de Joinville.

3.1 Descrição geral do estudo de caso hipotético

O projeto típico analisado, é comum na cidade de Joinville e em algumas regiões do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul para o armazenamento de arroz.

O silo escolhido é um silo de fundo plano de 18 m de diâmetro e altura de 26 m, com capacidade de 4.353 toneladas ou 76.175 sacas. A transferência de carga por meio de uma placa rígida na base do silo apresenta uma tensão aplicada de 150 kPa.

A solução inicial consiste de uma solução convencional de fundação profunda, estacas de 40 cm de diâmetro no anel periférico e estacas de 30 cm de diâmetro na área central, profundidade de 22 m e espaçamento médio de 2,4 m.

3.2 Perfil geotécnico

O perfil geotécnico considerado na análise foi o perfil típico definido por Telesse (2023) para a cidade de Joinville. Os parâmetros do material argiloso foram calibrados usando o modelo constitutivo *Hardening Soil*, a partir de ensaios triaxiais e ensaios de adensamento em amostras indeformadas.

Tabela 1. Parâmetros da modelagem (Telesse, 2023)

	Solo Residual	Solo Natural	Aterro	Estaca	Capitel
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Mohr-Coulomb	Elastic	Elastic
Diâmetro (m)	-	-	-	0,6	1
H (m)	-	-	-	21	1
γ (kN/m ³)	-	13	17	24	24
E_{ref}	40,00E3	-	50E3	25,04E6	25,04E6
E_{50} (kN/m ²)	-	3650	-	-	-
E_{oed} (kN/m ²)	-	2600	55,56E3	-	-
E_{ur} (kN/m ²)	-	12E3	-	-	-
ν	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
G_{ref}	15,38E3	-	20,83E3	-	-
e	0,5	1	0,5	-	-
c'	10,00	11	0	-	-
ϕ	35	21	33	-	-
OCR	-	1,90	-	-	-

3.3 Solução alternativa

Como solução alternativa, foi proposto um projeto de inclusões rígidas de 30 cm de diâmetro, espaçamento médio de 1,5 m e comprimento total de 9 m.

A plataforma de transferência de carga utilizada consiste de um solo residual compactado estudado em detalhes em Garcia et al. (2021). Os Parâmetros geotécnicos utilizados são apresentados na Tabela 2. O modelo constitutivo utilizado foi *Hardening Soil*.

Tabela 2. Parâmetros da plataforma de transferência de carga (Garcia et al. 2021).

		Parâmetros
		SN
Resistência	c' (kPa)	51,0
	ϕ (°)	28,0
	ψ (°)	0
Rigidez	E_{50}^{ref} (MPa)	12,0
	E_{oed}^{ref} (MPa)	6,7
	E_{ur}^{ref} (MPa)	24,0
	m	0,9
Avançados	ν_{ur}	0,2
	p^{ref} (kPa)	100,0
	K_o^{nc}	0,53
	R_f	1

4 RESULTADOS

Foi utilizado o programa Plaxis 2D para comparar as duas soluções de fundação. Considerando a solução de radier estaqueado (Figura 5) o recalque máximo calculado foi de 16 cm para o carregamento máximo de 150 kPa que é uma carga elevada.

A Figura 5 apresenta os resultados da simulação numérica axissimétrica da alternativa de radier estaqueado. É possível observar que existe conexão estrutural entre a laje de fundação e a estaca. Os deslocamentos máximos foram 16 cm e as tensões verticais máximas atuantes foram de 148 kPa.

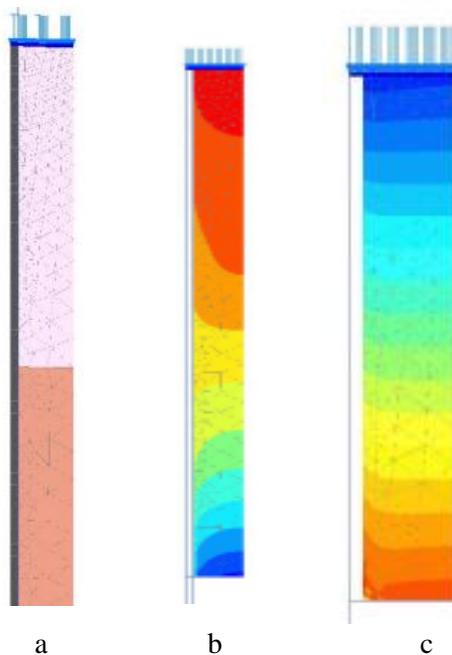


Figura 5. Modelagem numérica da solução inicial – radier estaqueado. A) malha deformada, b) deslocamentos verticais, c) tensões verticais atuantes

A Figura 6 apresenta a malha deformada, deslocamentos verticais e tensões verticais (respectivamente) da solução alternativa de inclusões rígidas.

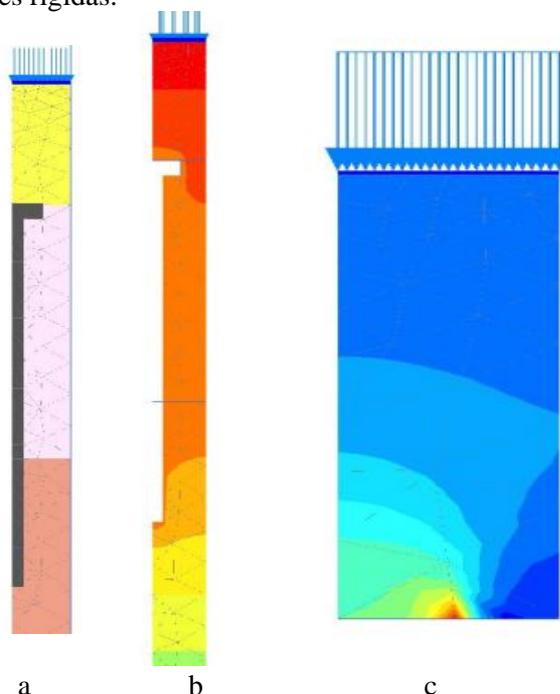


Figura 6. Modelagem numérica da solução alternativa proposta em inclusões rígidas. A) malha deformada das inclusões rígidas, b) deslocamentos verticais c) tensões verticais máximas

Os deslocamentos máximos para o sistema de inclusões rígidas foram de 18 cm e as tensões verticais de 343 kPa no canto do capitel. É importante mencionar que os resultados representam um elemento de fundação central e não é representativo para elementos de borda e canto. É necessário realizar outras simulações numéricas 2D e 3D para melhorar a compreensão do fenômeno.

5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil

6 CONCLUSÕES

A técnica de inclusões rígidas se mostrou viável para controlar recalques em silos graneleiros. As soluções em inclusões rígidas apresentam menor custo devido à não existência de conexão estrutural entre a laje rígida e os elementos verticais, o que faz com que a taxa de armadura dos elementos estruturais seja consideravelmente menor. Apesar da maior densidade de elementos (menor espaçamento) os elementos apresentam profundidades menores. De qualquer forma, deve ser feito um comparativo econômico detalhado para estabelecer o real benefício econômico. Se passou de elementos de 22 m de profundidade a elementos verticais de 9 m de profundidade com nível de recalques relativamente semelhantes.

Este trabalho tem uma finalidade acadêmica, devem ser realizadas outras análises, modelos físicos, modelos numéricos e estudos mais detalhados sobre o assunto.

A Modelagem numérica em 3D é necessária para avaliar a interação entre todos os elementos da fundação. A altura da Plataforma de Transferência de Carga de 1,5 m de altura se mostrou suficiente para evitar concentração de tensões elevadas que possam gerar punção na laje.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980). NBR 7250/82 – Identificação e Descrição de Amostras de Solo em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos.. Rio de Janeiro, 03p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122 - Projeto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Bernuy, C., Hor, B., Kim, S., Song, M., & Alqoud, S.Y. (2018). LNG tanks on rigid inclusions: kuwait. Innovative Infrastructure Solutions.
- Briançon, L., Dias, D., & Simon, C. (2015). Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions-reinforced industrial building. Canadian Geotechnical Journal.
- Briançon, L., Dias, D., & Simon, C. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line.
- Calil, Carlito Junior. Recomendações de Fluxos e de Cargas para Projetos de Silos Verticais. 1990. São Carlos - Universidade de São Paulo, Departamento de Estruturas.
- Conab (2021). Safra Brasileira de Grãos – Companhia Nacional de abastecimento. [Online] Available at: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>
- García, J.A.B., Rodríguez-Rebolledo, J.F., Mutzenberg, D.V., Caicedo, B., & Gitirana Junior, G.F.N. (2021). Experimental investigation of a load-transfer material for foundations reinforced by rigid inclusions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- IBGE, 2023. Capacidade de armazenagem agrícola cresce 1,8% e chega a 192,2 milhões de toneladas no 2º semestre de 2022. [Online] Available at: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/37136-capacidade-de-armazenagem-agricola-cresce-1-8-e-chega-a-192-2-milhoes-de-toneladas-no-2-semester-de-2022>
- Mattson, N., Menoret, A., Simon, C., and Ray, M. (2013). Case study of a full-scale load test of a piled raft with an interposed layer for a nuclear storage facility. Géotechnique, 63: 965–976.
- Móczár, K. Lődör, B. (2016). Effects of pile modelling in case of rigid inclusion ground improvement. Budapest University of Technology and Economics, Department of Engineering Geology and Geotechnics.
- Nascimento, Charlison Lima. Patologias nas Fundações de Silos de Armazenadores de Grãos. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Pitágoras de Imperatriz.
- Perez, R.F. (2017). Inclusões rígidas para o controle de recalques nos solos colapsáveis do Distrito Federal. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-284/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 160p.
- Rebolledo, J.F.R.; León, R.F.; Camapum De Carvalho, J. (2019b). Performance Evaluation of Rigid Inclusion Foundations in the Reduction of Settlements. Soils and Rocks, 42(3):265-279
- Rebolledo, J. F. R., Casagrande, M. T., Cardoso, L. C. (2019). Estudo do Comportamento Mecânico da Camada de Distribuição de Carga para Sistema de Inclusões Rígidas. Geocentro, Brasília DF.
- Santiago, Isabelle Moreira. Inclusões rígidas para fundações de silos graneleiros. (2021). Dissertação de Mestrado em Geotecnia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- Zheng, G., Jiang, Y., Han, J. & Liu, Y. F. (2011). Performance of cement-fly ash-gravel pile-supported high-speed railway embankments over soft marine clay. Marine Georesources and Geotechnology, 29, No. 2, 145–161.