

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/316

Fundação de Tanques de Etanol de Grande Porte com Recurso de Melhoria de Solos com Coluna de Brita

Thaís Maria Leite Paludeto
Engenheira Geotécnica, JETsj, Lisboa, Portugal, tpaludeto@jetsj.com

Nuno Braz da Silva
Coordenador de Projeto, JETsj, Belo Horizonte, Brasil, nsilva@jetsj.com

RESUMO: A existência de solos com fracas características de resistência de deformabilidade no horizonte de fundação de diversos tanques de etanol no Mato Grosso levou à necessidade de promover o melhoramento dos solos de fundação até a profundidade média de 9,0m com recursos à tecnologia de vibrosubstituição com colunas de brita no sistema bottom-feed. A melhoria ocorre quer pela substituição das areias com um densidade relativa baixa por brita com melhores características de resistência, gerando assim um aumento do ângulo de atrito e respectivos módulos de deformabilidade tal como o efeito de expansão de cavidade pelo deslocamento das partículas sólidas do solo e, assim, um aumento da densidade relativa entre colunas de brita.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento de Solos, Colunas de Brita, Vibrosubstituição.

ABSTRACT: The existence of inadequate soils, with low characteristics of deformability resistance in the foundation ground of ethanol tanks in Mato Grosso led to the need to promote the improvement of foundation ground up to an average depth of 9.0m using vibro replacement technology with stone columns in the bottom-feed system. The improvement occurs by replacing sand with a low relative density with crushed stone with better resistance characteristics, thus generating an increase in the friction angle and respective deformability modules such as the cavity expansion effect due to the placement of solid soil particles and an increase in the relative density between stone columns.

KEYWORDS: Ground Improvement, Stone columns, Vibro Replacement

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta a definição e dimensionamento da solução de tratamento do solo de fundação de 4 tanques de etanol de 25m de diâmetro TF-500-01, TF-500-02, TF-500-03 e TF-500-04 da nova planta de biocombustível localizada na estrada MT-130, a 25 km de Primavera do Leste, Mato Grosso, Brasil. A Figura 1 apresenta a planta de identificação dos tanques. Dada a fraca capacidade portante dos solos coesivos ocorrentes no local, preconiza-se um tratamento por meio da execução de uma malha de colunas de brita. Para a definição da solução levou-se em consideração a geologia local e as condicionantes económicas e de prazo de execução.

Entre as várias as técnicas de melhoramento e de reforço de solos em condições in situ, as que recorrem à não retirada do material original e sim à instalação de elementos lineares preenchidos com material mais rígido e resistente do que o solo apresentam maior versatilidade, maior produtividade na execução e, conseqüentemente, são economicamente mais vantajosas (Domingues, 2006). Como não há a retirada de solo com a introdução de um material com melhores características de resistência, o melhoramento das características geomecânicas do solo natural é devido ao efeito de compactação deste solo em torno da coluna de brita, a qual quando introduzida compacta lateralmente o solo natural que passa a ocupar um menor volume (Priebe, 1995,1998).

Dentre as técnicas disponíveis, a técnica de melhoramento de solo com colunas de brita é uma das mais utilizadas quando se pretende aumentar a capacidade de carga, reduzir ou acelerar recalques, melhorar a estabilidade global ou reduzir liquefação (Domingues, 2006). As inclusões de brita são flexíveis e não coesivas, apresentam elevado módulo de deformabilidade e permeabilidade, portanto, são capazes de reduzir o período de assentamento pela concentração e redistribuição das cargas aplicadas, de aumentar a capacidade de carga do solo e diminuir os recalques (Felix, 2012).

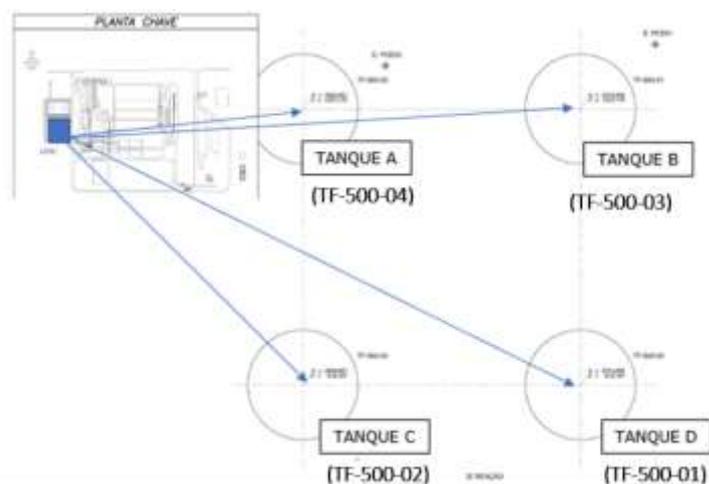


Figura 1. Identificação dos Tanques de Etanol

2 PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A definição e o dimensionamento da solução apresentada tiveram por base a informação recolhida na campanha de prospeção geotécnica por meio ensaio tipo SPT (Standard Penetration Test). Para o dimensionamento, foi considerado para cada um dos tanques, a sondagem mais condicionante executada na proximidade. As sondagens de referência consideradas para cada tanque estão indicadas na Tabela 1 e a Figura 2 apresenta a planta de localização das sondagens em relação aos tanques.

O perfil do subsolo prospectado nas sondagens é composto por uma primeira camada de silte arenoso, fofo, marrom, com espessura entre 3,0m a 4,5m. Segue a esta primeira uma camada de silte argiloso vermelho, mole a rijo até a cota final das sondagens, aproximadamente, 25,0m de profundidade. O nível d'água foi encontrado em todas as sondagens em 12,0m de profundidade.

Tabela 1 – Sondagens de Referência para cada tanque

I.D.	Sondagem de Referência	Cota de topo sondagem (m)	Cota de base do Tanque (m)	Espessura Camada a Escavar (m)
TANQUE A (TF-500-04)	SP-05	580,5	577,5	3,0
TANQUE B (TF-500-03)	SP-04	578,5	577,5	1,0
TANQUE C (TF-500-02)	SP-05	580,5	577,5	3
TANQUE D (TF-500-01)	SP-06	579,0	577,5	1,5

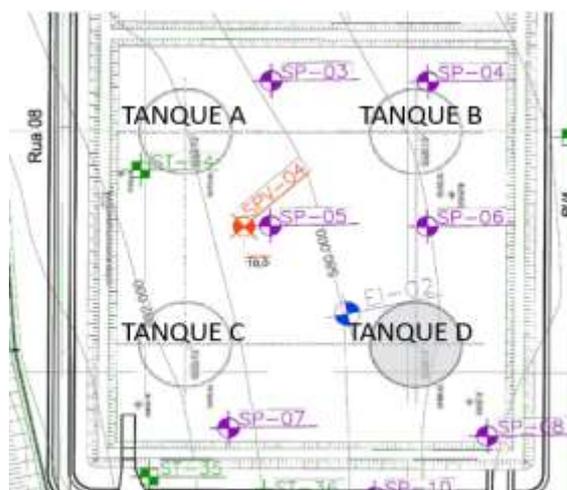


Figura 2. Planta de sondagens locais

2.1 Zoneamento Geotécnico e Parametrização

Para cada uma das sondagens de referência foram definidas quatro zonas geológica-geotécnicas. Para cada zona foram estimadas as propriedades geomecânicas através de correlações com o valor médio do ensaio SPT. As Tabelas 2, Tabela 3 e Tabela 4, a seguir, apresentam para cada uma das sondagens, o referido zonamento e parametrização.

Tabela 2 – Zonamento Geotécnico – Sondagem S4 (Cota boca furo +578,5)

ZG	Prof. topo camada	Prof. base camada	Cota topo camada	Cota base camada	N_SPT médio	γ	c'	ϕ'	E'
-	[m]	[m]	[m]	[m]	[golpes]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]
ZG1	0	8	578,5	570,5	4	16	0	22	7
ZG2	8	14	570,5	564,5	9	17	5	25	13
ZG3	14	17	564,5	561,5	13	18	5	30	21
ZG4	17	-	561,5	-	25	19	10	38	39

Tabela 3 – Zonamento Geotécnico – Sondagem S5 (Cota boca furo +579,0)

ZG	Prof. topo camada	Prof. base camada	Cota topo camada	Cota base camada	N_SPT médio	γ	c'	ϕ'	E'
-	[m]	[m]	[m]	[m]	[golpes]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]
ZG1	0	7	579,0	572,0	3	16	0	22	4
ZG2	7	11	572,0	568,0	9	17	5	25	13
ZG3	11	16	568,0	563,0	15	18	5	30	22
ZG4	16	-	563,0	-	25	19	10	38	39

Tabela 4 – Zonamento Geotécnico – Sondagem S6 (Cota boca furo +580,5)

ZG	Prof. topo camada	Prof. base camada	Cota topo camada	Cota base camada	N_SPT médio	γ	c'	ϕ'	E'
-	[m]	[m]	[m]	[m]	[golpes]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]
ZG1	0	7	580,5	573,5	4	16	0	22	6
ZG2	7	12	573,5	568,5	9	17	5	25	13
ZG3	12	15	568,5	565,5	16	18	5	30	25
ZG4	15	-	565,5	-	30	19	10	38	46

3 A SOLUÇÃO

A solução de tratamento do solo de fundação dos tanques consiste em uma malha de colunas de brita executada por vibrosubstituição de 900mm de diâmetro configurando uma porcentagem de substituição em área de 24% (Figura 3). O comprimento das referidas colunas será variável em função da profundidade das camadas mais competentes.

Para cada um dos tanques, o comprimento das colunas de brita foi definido tendo em consideração a informação em profundidade de cada uma das sondagens de referência, de forma a que a base das colunas de brita ficassem apoiadas ao nível de materiais caracterizados por valores do ensaio SPT superiores a 10 golpes. A Tabela 5 resume a solução de tratamento adotada para cada um dos tanques incluindo o comprimento das colunas de brita.

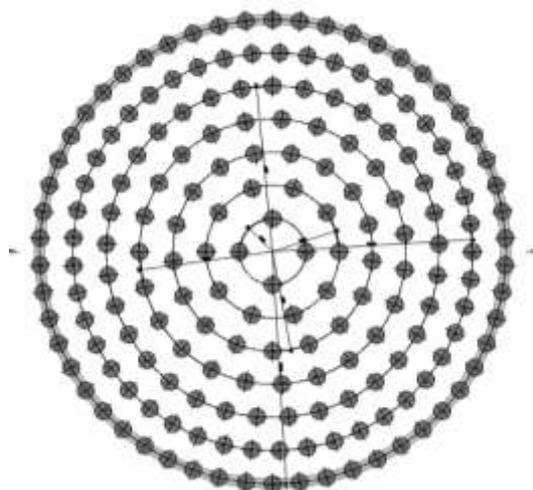


Figura 3. Solução de Tratamento do Solo – Colunas brita D900mm

Tabela 5 – Solução de tratamento de solo com colunas de brita

I.D.	Sondagem de Referência	Diâmetro Colunas (mm)	Nº colunas (un)	Taxa de substituição (%)	Comprimento Colunas (mm)
TANQUE A (TF-500-04)	S5	900	186	24%	8
TANQUE B (TF-500-03)	S4	900	186	24%	13
TANQUE C (TF-500-02)	S5	900	186	24%	8
TANQUE D (TF-500-01)	S6	900	186	24%	10

Previamente ao início da execução das colunas de brita de melhoramento do solo, foram realizadas colunas teste, próximas a cada sondagem de referência, de modo a aferir o controle eletrônico dos equipamento de vibrosubstituição por resistência, medida em Amperagem (A), e o número de golpes do ensaios SPT modelado em projeto ($NSPT \geq 10$). Atingiu-se uma boa concordância entre a resistência de compactação/vibração e o número de golpes (base da coluna de brita) do ensaio $NSPT \geq 10$, com exceção do tanque TF-500-02, onde obteve-se um valor limite de 200A aos 8,0m de profundidade, ou seja, um diferencial superior a 5,0m ao previsto de acordo com a sondagem SP-04 ($L=13,0m$). Considerou-se como tolerância admissível, variações de até 1,50m para o comprimento previsto das colunas de brita, em fase de projeto.

4 MODELO NUMÉRICO

A validação das soluções preconizadas teve por base a realização de modelos numéricos tridimensionais, utilizando para tal o software PLAXIS 3D, permitindo determinar o adequado comportamento do tanque para a fase de teste hidrostático tendo em consideração os requisitos da norma N270 Petrobrás, a qual determina os critérios admissíveis para os recalques absolutos e diferenciais durante e após o Hidroteste.

Foram executados 3 modelos numéricos, um para o tanque A e C (sondagem S5), um modelo para o tanque B (sondagem S4) e um terceiro modelo para o tanque D (sondagem S6). As cargas aplicadas nos modelos estão apresentadas na Tabela 6.

Para as colunas de brita foi estimado, como parâmetros para a modelagem, um módulo de elasticidade de 80MPa, ângulo de atrito de 40° e coesão nula.

Tabela 6 – Modelo Numérico – Cargas

Tanque	Diâmetro (m)	Carga Periférica (kN/m)	Carga Enchimento (kN/m ²)
Etanol	25,45	24	210

A malha de elementos finitos foi gerada a fim a se obter uma discretização e refinamento adequados próximo à interface solo-estrutura. Na Figura 4 e Figura 5 estão apresentadas a discretização da malha em uma perspectiva geral e em uma perspectiva aproximadas, respectivamente.

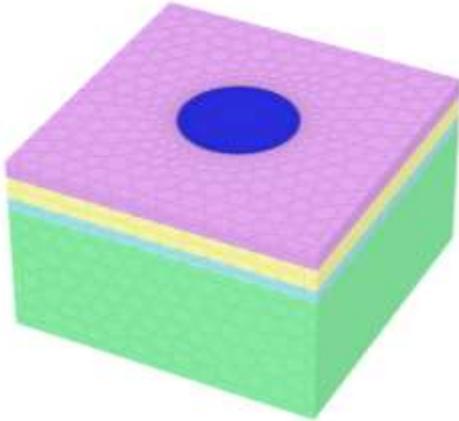


Figura 4. Malha de Elementos Finitos – Vista Geral

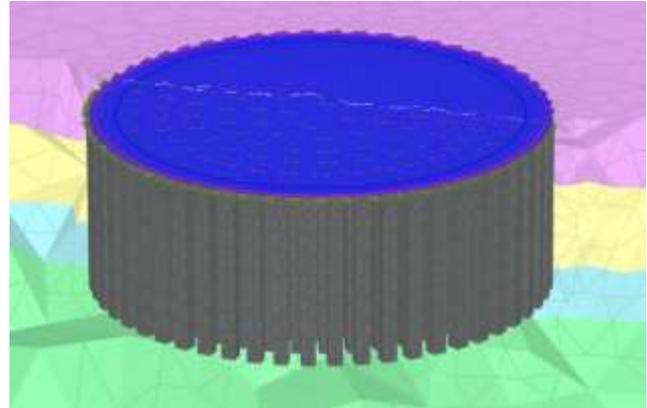


Figura 5. Malha de Elementos Finitos – Vista Aproximada

A Tabela 7 resume o faseamento construtivo considerado nas análises dos modelos numéricos. Na Figura 6 a Figura 11 estão apresentadas o modelo numérico em cada uma das etapas do faseamento construtivo.

Tabela 7 – Modelo Numérico - Faseamento Construtivo

I.D.	Descrição
0	Fase inicial – Geração das tensões iniciais
1	Escavação e execução das colunas brita
2	Execução da Laje de Fundo do tanque
3	Execução da parede periférica do tanque
4	Enchimento do tanque
5	Esvaziamento do tanque



Figura 6. Fase 0

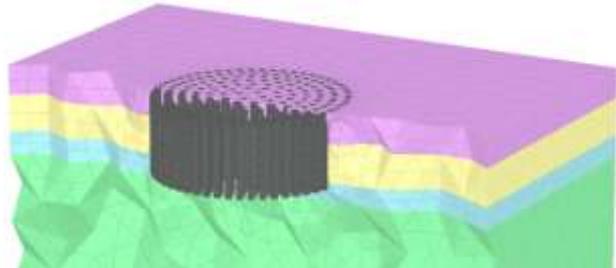


Figura 7. Fase 1

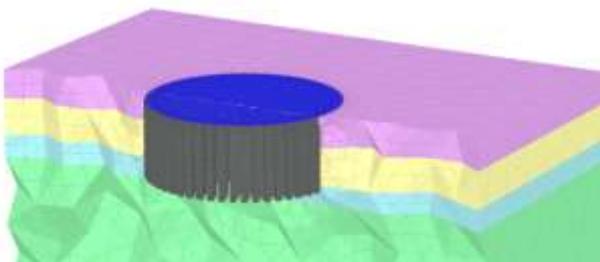


Figura 8. Fase 2

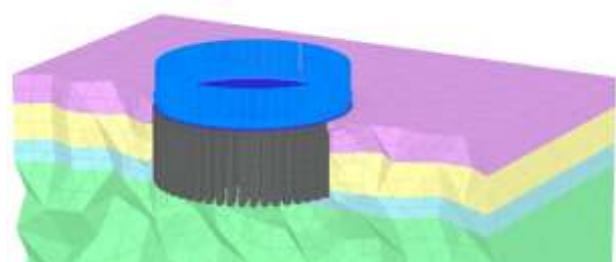


Figura 9. Fase 3

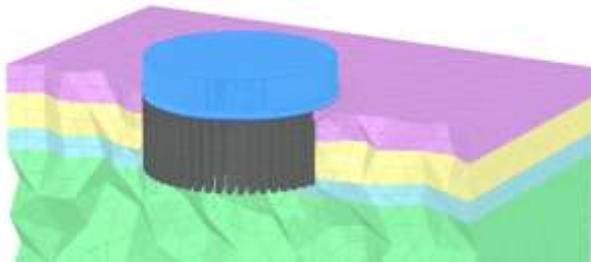


Figura 10. Fase 4

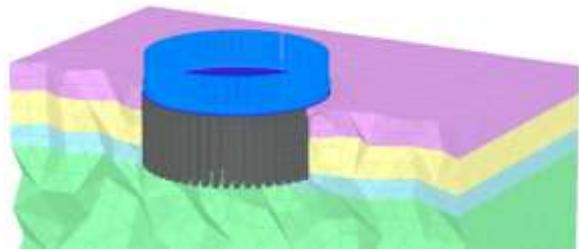


Figura 11. Fase 5

4.1 Resultados - Modelos Numéricos

Para cada um dos modelos numéricos desenvolvidos foram analisados os assentamentos e as tensões atuantes ao nível das colunas para a fase de carga e para a fase de descarga. As Figura 12 a Figura 17 apresentam os resultados obtidos para os deslocamentos verticais dos tanques e das lajes de fundo.

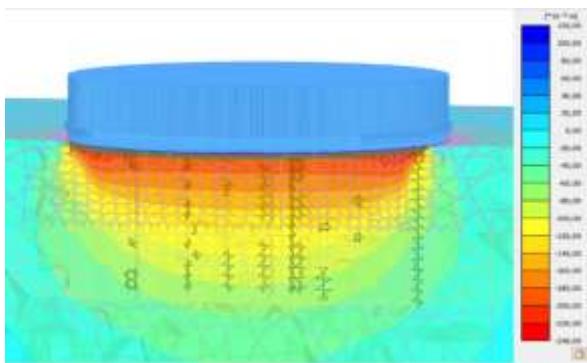


Figura 12. Deslocamentos verticais – Tanque B – Sondagem S4 – Fase 4 [uz,máx = -232mm]

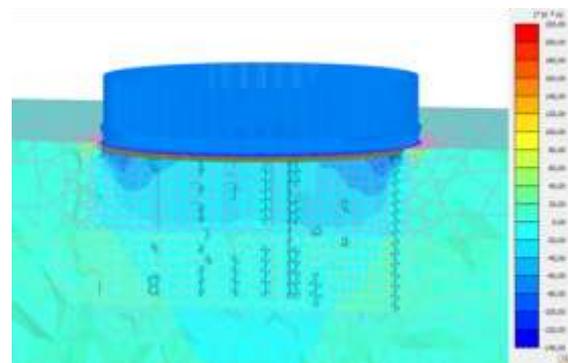


Figura 13. Deslocamentos verticais – Tanque B – Sondagem S4 – Fase 5 [uz,máx = -125mm]

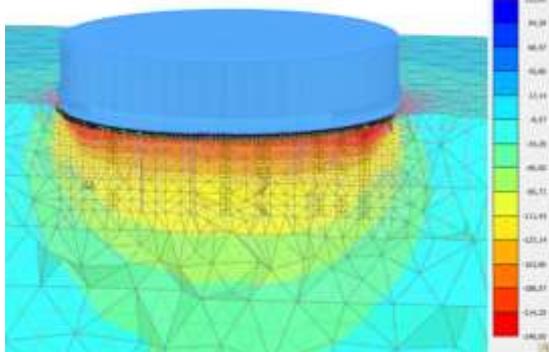


Figura 14. Deslocamentos verticais – Tanque A e C – Sondagem S5 – Fase 4 [uz,máx = -278mm]

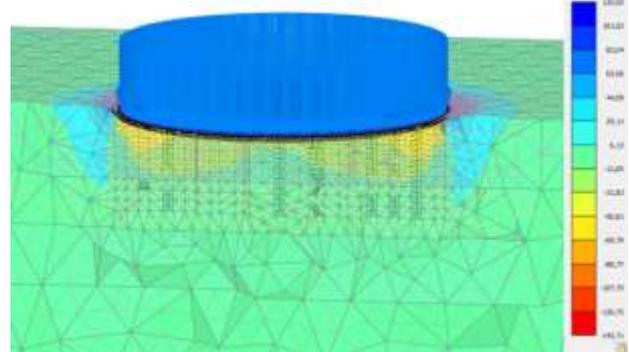


Figura 15. Deslocamentos verticais – Tanque A e C – Sondagem S5 – Fase 5 [uz,máx = -146mm]

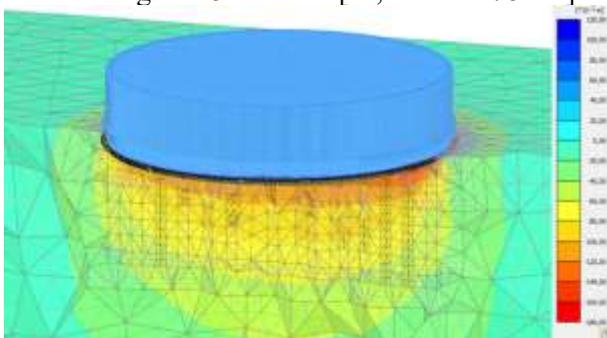


Figura 16. Deslocamentos verticais – Tanque D – Sondagem S6 – Fase 4 [uz,máx = -179mm]

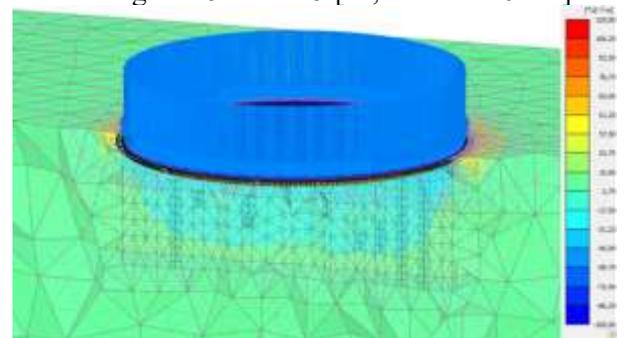


Figura 17. Deslocamentos verticais – Tanque D – Sondagem S6 – Fase 5 [uz,máx = -93mm]

A Tabela 8 e a Tabela 9 resumem os assentamentos absolutos obtidos, por meio dos modelos numéricos, para as fases de carga e descarga, ao nível da laje de fundo do tanque e ao nível da periferia da laje de fundo dos 4 tanques, respectivamente.

Tabela 8 – Análise Numérica – Resumo Resultados – Assentamentos Laje Fundo

Tanque	Sondagem Referência	Comprimento Colunas (m)	Assentamento Fase 4 (carga)			Assentamento Fase 5 (descarga)		
			uy,máx (mm)	uy,mín (mm)	Δ uy (mm)	uy,máx (mm)	uy,mín (mm)	Δ uy (mm)
A	5	8	-273	-256	17	-84	-14	70
B	4	13	-228	-216	12	-85	-20	65
C	5	8	-273	-256	17	-84	-14	70
D	6	10	-175	-167	8	-51	-2	53

Tabela 9 – Análise Numérica – Resumo Resultados – Assentamentos na Periferia da Laje Fundo

Tanque	Sondagem Referência	Comprimento Colunas (m)	Assentamento Fase 4 (carga)			Assentamento Fase 5 (descarga)		
			uy,máx (mm)	uy,mín (mm)	Δ uy (mm)	uy,máx (mm)	uy,mín (mm)	Δ uy (mm)
A	5	8	-270	-272	2	-83	-82	1
B	4	13	-227	-223	4	-83	-82	1
C	5	8	-270	-272	2	-83	-82	1
D	6	10	-175	-173	2	-50	-49	1

Apresenta-se na Tabela 10 a verificação ao estado limite de utilização de acordo com os critérios indicados em relação aos recalques admissíveis pela norma N270 Petrobrás.

Tabela 10 – Verificação ao Estado Limite de Utilização

Critério N270 Petrobrás	Recalque Admissível	Tanque B (Sondagem 4)	Tanque A e C (Sondagem 5)	Tanque D (Sondagem 6)
Recalque absoluto em qualquer ponto da periferia durante o teste hidrostático	$uz \leq 300\text{mm}$	227 mm	270 mm	175 mm
Recalque diferencial entre dois pontos da periferia durante o teste hidrostático	$\Delta uz \leq 38\text{mm}$ ao longo de 900mm	2 mm	1 mm	1 mm
Recalque diferencial entre dois quaisquer pontos da periferia durante o teste hidrostático	$\Delta uz \leq 50\text{mm}$	4 mm	2 mm	2 mm
Recalque diferencial entre um qualquer ponto da periferia e um ponto interno a 1150mm do longo do raio após o teste hidrostático	$\Delta uz \leq 70\text{mm}$	7mm	8mm	7mm
Recalque diferencial entre um qualquer ponto da periferia e o centro do tanque durante o teste hidrostático	$\Delta uz \leq 100\text{mm}$	12mm	17mm	8mm

5 RESULTADOS DE CAMPO

As colunas de brita teste foram executadas próximas as sondagens de referência para avaliação dos comprimentos previstos para as colunas de brita. Com a execução das colunas testes próximas as sondagens de referência foi possível calibrar o controle eletrônico dos equipamento de vibrosubstituição e validar os comprimentos previstos em projeto, e assim, seguir com a execução das colunas de brita do melhoramento de

solo. A Tabela 11 apresenta os comprimentos finais das colunas de brita para cada tanque, após a validação dos comprimentos e calibração da persistência de vibrocompactação, comparadas com os comprimentos previstos em projeto.

Tabela 11 – Solução de tratamento de solo – As Built

I.D.	Comprimento Previsto das Colunas (m)	Comprimento Colunas AS-BUILT (m)
TANQUE A (TF-500-04)	8	7 - 9
TANQUE B (TF-500-03)	13	11 - 13
TANQUE C (TF-500-02)	8	6 - 9
TANQUE D (TF-500-01)	10	8 - 9

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A solução de tratamento do solo com colunas de brita por vibrosubstituição para a fundação dos tanques foi proposta considerando-se as grandes vantagens desta técnica em relação a outros métodos de tratamento de solos. Entre as vantagens estão a expressiva redução no prazo de execução da obra, devido à alta produtividade do método. Além disso, trata-se de um processo que não agride o meio ambiente, já que a brita é um material mineral natural e inerte.

De acordo com os resultados apresentados, a solução de tratamento dos solos fofos e moles, superficiais, com recurso a colunas de brita vibrocompactadas permitem o cumprimento dos critérios de recalques absolutos e diferenciais de acordo com a norma N270 Petrobrás.

Analisando-se os comprimentos finais das colunas de brita, verifica-se que a campanha de prospeção complementar permitiu atestar a qualidade da solução executada, tal como a adequabilidade dos comprimentos das colunas de brita definidos no projeto.

AGRADECIMENTOS

A JETsj agradece à Tecnogeo Ground pela colaboração e disponibilidade no envio dos dados necessários para a elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Felix, M. (2012) Melhoria de solo com coluna de brita. *Revista Techne*, Edição 187.

Petrobras (2014). N270: *Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico*.

PLAXIS2D CONNECT Edition V21.01 - Material Models Manual. 2021

Priebe, H. J. (1995). *The design of vibro replacement. Ground Engineering*. Vol. 28, nº 10.

Priebe, H. J. (1998). Vibro replacement to prevent earthquake induced liquefaction. *Ground Engineering Review*.