XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/75

Interação Solo-Estrutura em Projetos de Fundação Apoiada Sobre Colunas de Brita: Estudo de Caso de Tanques de Etanol.

Fabio Marinho da Silva
Gerente de Engenharia, JETbr, Belo Horizonte, Brasil, fsilva@jetbr.eng.br

Nuno Alexandre Braz da Silva
Diretor de Engenharia, JETbr, Lisboa, Portugal, nsilva@jetsj.com

Anderson Dantas de Morais
Engenheiro Estrutural, JETbr, Natal, Brasil, amorais@jetbr.eng.br

Lisandra Oliveira Vieira
Assistente de Engenharia, JETbr, Viçosa, Brasil, loliveira@jetbr.eng.br

Fabio de Paiva Brumano
Gerente Técnico, TECNOGEO, São Paulo, Brasil, fabio.brumano@tecnogeo.com.br

RESUMO: Integrar a resposta mecânica do solo ao comportamento de estruturas de concreto armado é um desafio recorrente no projeto de fundações de grandes tanques industriais. Este artigo apresenta uma metodologia de dimensionamento integrada, baseada na associação entre análise estrutural e modelagem estrutural-geotécnica tridimensional (3D) acoplada, aplicada à avaliação da resposta de fundações apoiadas em solo melhorado por colunas de brita executadas por vibro substituição. O estudo foi desenvolvido para tanques de armazenamento de etanol do complexo agroindustrial da FS Bioenergia, localizado em Campo Novo do Parecis (MT), região caracterizada pela presença de solos argilosos e siltosos de baixa resistência superficial, com valores de NSPT entre 2 e 4 nos primeiros 3 a 4 metros de profundidade, condição que inviabiliza o apoio direto das bases dos tanques sobre o terreno natural. A interação solo-estrutura foi analisada por meio de modelagem numérica no software PLAXIS 3D, utilizando o método dos elementos finitos para simular as etapas construtivas e o teste hidrostático dos tanques. Paralelamente, os recalques foram estimados pelo método analítico de Priebe, possibilitando a comparação entre as abordagens numérica e analítica. Os resultados indicaram que os recalques obtidos na modelagem tridimensional foram inferiores aos estimados pelo método analítico. A abordagem numérica proporcionou previsões mais realistas dos recalques de fundação, deformações e esforços estruturais, permitindo um dimensionamento mais otimizado.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-Estrutura; Colunas de Brita; Modelagem Numérica; Fundações de tanques.

ABSTRACT: Integrating soil mechanical behavior with the structural response of reinforced concrete systems is a recurring challenge in the design of foundations for large industrial storage tanks. This paper presents an integrated design methodology combining structural analysis and coupled three-dimensional (3D) geotechnical–structural numerical modeling to evaluate foundations supported on ground improved with stone columns installed by vibro-replacement. The study was developed for storage tanks at the FS Bioenergia agroindustrial complex in Campo Novo do Parecis, Brazil. The site is characterized by soft clayey and silty soils with low bearing capacity, presenting SPT N-values ranging from 2 to 4 within the first 3 to 4 meters of depth, which makes direct support of tank foundations on natural ground unfeasible. Soil–structure interaction was evaluated through numerical modeling using the finite element software PLAXIS 3D, simulating both construction stages and hydrostatic testing of the tanks. Settlement estimates were also obtained using the analytical Priebe method, enabling comparison between numerical and analytical approaches. Results indicate that settlements predicted by the three-dimensional numerical model were lower than those estimated by the analytical method. The numerical approach provided more realistic predictions of foundation settlements, deformations, and structural forces, allowing a more efficient structural design.

KEYWORDS: Soil–Structure Interaction; Stone Columns; Numerical Modeling; Tank Foundations.

1 INTRODUÇÃO

A implantação de unidades industriais de grande porte em regiões com solos sedimentares de baixa capacidade de suporte exige soluções de fundação que conciliem segurança técnica e viabilidade econômica. Este trabalho aborda o projeto de melhoramento de solo para a fundação dos tanques de armazenamento da FS Bioenergia em Campo Novo do Parecis (MT), especificamente focado no Tanque de Etanol, uma estrutura metálica destinada ao armazenamento de etanol com capacidade de 10.000 m³.

O Tanque de Etanol possui um diâmetro de base de 25,35m e impõe uma carga total de trabalho de 20,22 ton/m². Devido à estratigrafia local, que apresenta camadas superficiais de solo mole, a solução adotada consistiu no reforço do terreno por meio de colunas de brita executadas por vibrossubstituição. O objetivo principal é o controle de recalques totais e diferenciais, garantindo que a laje de concreto armado de fundo e a viga perimetral operem dentro dos limites de serviço e segurança.

2 CONDICIONANTES DE PROJETO

2.1 Contexto Geológico-Geotécnico

O subsolo da região de Campo Novo do Parecis é composto predominantemente por argila siltosa e silte argiloso. As investigações geotécnicas (Figura 1) revelaram um perfil crítico, relativamente homogêneo, com aumento de resistência progressivo com a profundidade: os primeiros 5 a 6 metros apresentam Nspt variável entre 2 e 4 golpes, caracterizando um solo mole de alta compressibilidade (SAS1). O ganho de resistência é gradual, atingindo solos rígidos (NSPT>20) apenas em profundidades superiores a 25 metros (SAS4).

Prof (m)	SP-05	SP-06	SP-07	SP-08	SP-41	SP-46
1	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	3	2	1	3
4	3	2	4	2	2	4
5	4	4	4	6	2	4
6	4	4	7	4	4	5
7	7	5	6	5	5	6
8	8	6	7	9	8	5
9	8	6	9	9	7	7
10	9	7	10	8	8	8
11	9	8	10	11	9	9
12	11	9	8	13	9	9
13	11	8	10	13	10	10
14	12	9	11	13	11	11
15	12	10	12	14	12	13
16	14	10	11	14	13	11
17	14	11	13	15	14	13
18	16	13	13	18	15	14
19	18	13	14	18	16	13
20	17	14	14	19	16	15
21	19	14	14	19	16	15
22	20	15	15	17	18	15
23	19	14	16	16	16	16
24	21	15	17	18	19	17
25	23	17	18	19	19	18
26	30	17	18	21	18	19
27	19	22	25	26	20	20
28	19	19	23	22	20	22
29	21	21	25	25	23	23
30	22	24	27	24	23	24
31		27	25	25	27	26

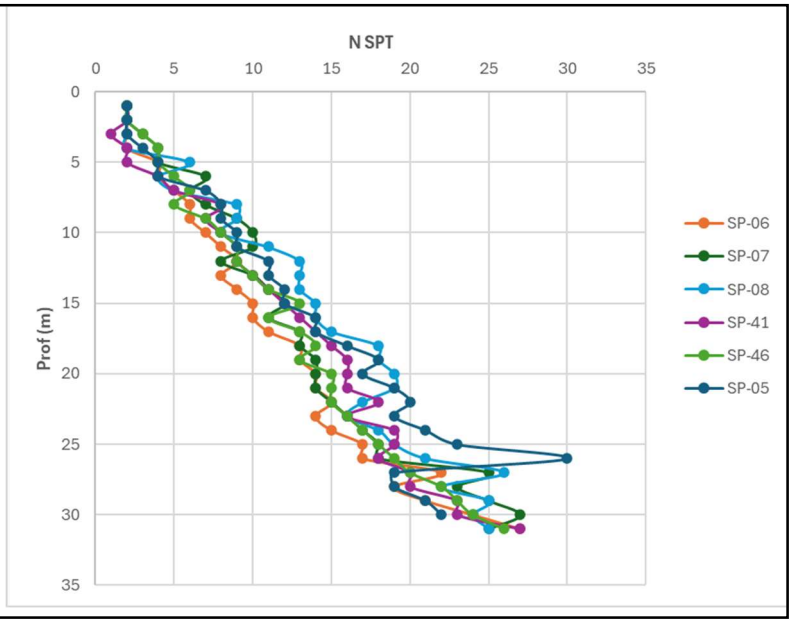


Figura 1 – Distribuição de valores de NSPT das sondagens realizadas na zona de implantação dos tanques.

Para o modelo tridimensional do Tanque de Etanol, a estratigrafia foi simplificada em cinco camadas principais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Espessura das camadas de solo do modelo tridimensional típico.

Camada	Espessura (metros)
1 – Aterro	1,8
2 – SAS1	6

3 – SAS2	7
4- SAS3	13
5 – SAS4	6

2.2 Materiais

As propriedades dos materiais foram rigorosamente estabelecidas nos critérios de projeto para garantir a compatibilidade com o modelo de interação solo-estrutura:

(i) Aterro Compactado: O projeto definiu o uso de solo de 1ª categoria, predominantemente argiloso ou siltoso, com índice de plasticidade IP < 15. Ensaios de laboratório validaram parâmetros de densidade seca máxima de 1,572 g/cm³ e CBR de 12,4%.

(ii) Colunas de Brita: Foram especificadas colunas executadas com brita nº 2. Os parâmetros mecânicos definidos para o material incluíram ângulo de atrito de 40º, coesão nula e um módulo de deformabilidade (E') de 100 MPa.

(iii) Estrutura de Concreto: Para a laje e a viga perimetral, o projeto estabeleceu concreto classe C30 e aço CA-50. Devido ao ambiente industrial, definiu-se a classe de agressividade ambiental CAA III, com abertura de fissuras limitada a W_k< 0,3mm.

2.3 Carga de Projeto

Conforme as definições de projeto fornecidas, o dimensionamento do Tanque de Etanol baseou-se exclusivamente em duas cargas críticas:

(i) Carga Periférica: Valor de 23,54 kN/m, representando o peso próprio do casco metálico do tanque aplicado sobre o eixo da viga perimetral.

(ii) Carga de Enchimento (Etanol ou Água): Valor de 202 kN/m². Para simular o cenário mais severo (teste hidrostático e operação plena).

Tabela 2. Diâmetro da fundação e cargas atuantes referentes aos tanques de Etanol.

Tanque	Diâmetro (m)	Carga Periférica (kN/m)	Carga Enchimento (kN/m^2)
Etanol	25,35	23,54	202

3 MELHORAMENTO DE SOLO – COLUNAS DE BRITA

O projeto estabeleceu uma malha radial de colunas de brita sob a projeção do tanque (Figura 2 e Figura 3), garantindo também o alinhamento das colunas no raio mais externo da malha com a viga perimetral, visando a otimização da transferência de carga na periferia. Ao todo, foram projetadas 182 colunas com diâmetro nominal de 800 mm. O comprimento mínimo definido foi de 12 metros, garantindo o engastamento em solo com N_{SPT} >10. A malha radial resultou em uma taxa de substituição de solo de 18,12%.

Para viabilizar a transição entre o melhoramento de solo e a fundação, foram definidos os seguintes componentes e parâmetros de controle:

(i) Camada Granular de 30 cm (Aterro de Conquista): Construída sobre o topo das colunas, de modo a possibilitar o tráfego dos equipamentos de obra e atuar como dreno horizontal.

(ii) Geotêxtil Separador: Sobre a camada granular, especificou-se um geotêxtil bidirecional, com resistência nominal mínima à tração de 50 kN/m (T_N, min=50 kN/m). Sua função é impedir a migração de finos e manter a integridade mecânica do sistema.

(iii) Aterro de Regularização: Acima do geotêxtil, previu-se um aterro compactado (Proctor Intermediário GC > 98%) para atingir a cota de assentamento da laje de fundação

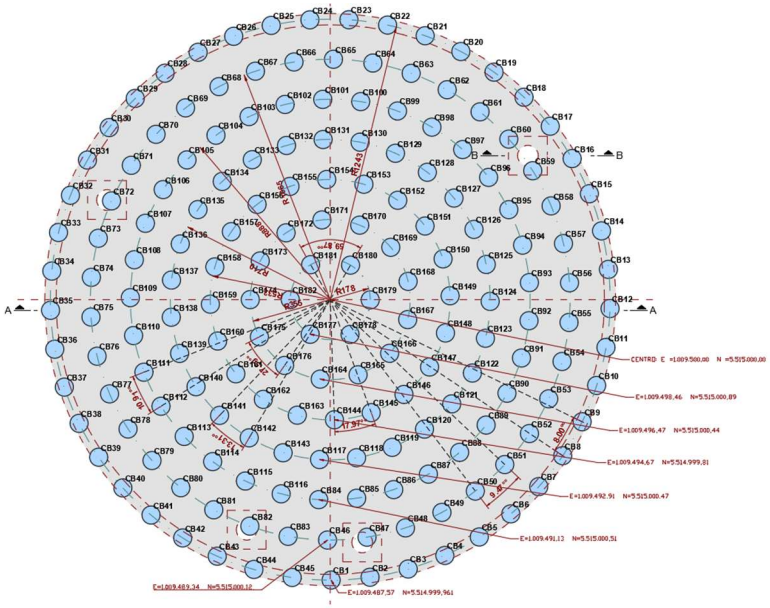


Figura 2. Malha de colunas de brita utilizada para o tanque de etanol.

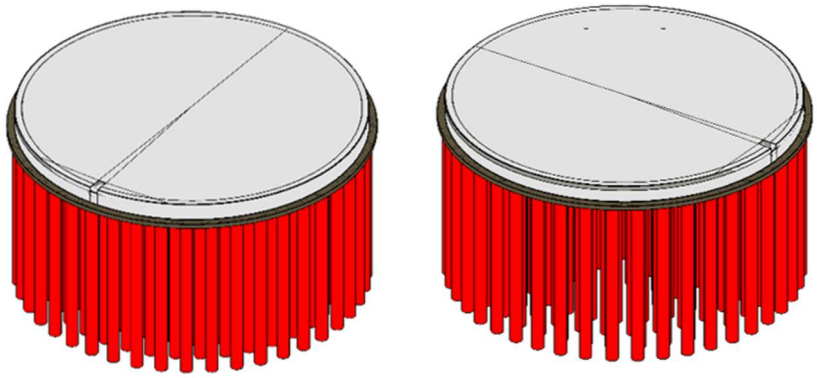


Figura 3. Vista Isométrica do modelo BIM desenvolvido

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Esta seção detalha a modelagem numérica tridimensional desenvolvida para o tanque de etanol, utilizando o software PLAXIS 3D baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O objetivo primário da análise foi realizar um estudo acoplado de Interação Solo-Estrutura (ISE), permitindo simular o comportamento do maciço reforçado com colunas de brita e a resposta estrutural da laje e viga perimetral sob as condições de carregamento operacional e de teste hidrostático.

4.1 Faseamento construtivo

A modelagem numérica permitiu representar as principais etapas executivas da obra, garantindo que o histórico de tensões e deformações fosse preservado ao longo do tempo. O faseamento adotado no modelo seguiu seis etapas críticas:

Tabela 3. Faseamento Construtivo simulado no modelo numérico

ID	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 das vigas periféricas do tanque
4	Enchimento do tanque (teste hidrostático)
5	Esvaziamento do tanque (teste hidrostático)

4.2 Modelo constitutivo dos materiais

Para representar o comportamento mecânico dos elementos que compõem o sistema, foram adotados modelos simplificados específicos:

(i) Modelo Mohr-Coulomb (Linear Elástico e Perfeitamente Plástico): Aplicado às camadas de solo natural e às colunas de brita. Este modelo considera a rigidez elástica inicial e o critério de ruptura por cisalhamento de Mohr-Coulomb. Nesse contexto, a principal limitação do modelo está relacionada ao uso de um módulo único para representar carregamento e descarregamento, gerando uma superestimação dos deslocamentos resultantes da expansão do solo no descarregamento.

(ii) Modelo Elástico Linear (Teoria da Elasticidade): Adotado para os elementos estruturais de concreto armado (laje de fundo e viga perimetral). A laje de fundo foi modelada como elemento de placa (teoria de placas planas) e a viga como elemento de barra com definição de inércia nas direções x, y e z.

(iii) Elementos de Geogrelha: Utilizados para simular o comportamento do geotêxtil StrataTex ST W5050, permitindo que o material resista apenas a esforços de tração e auxilie na redistribuição de cargas na interface com a camada granular.

Os parâmetros geotécnicos das camadas simuladas no modelo (Tabela) foram estimados a partir dos resultados de ensaios SPT, por meio de correlações consagradas na literatura técnica e da experiência da JETbr na caracterização desse tipo de material. Para o concreto da estrutura, adotou-se a classe C30, com peso específico de 25 kN/m³ e coeficiente de Poisson igual a 0,20. As colunas de brita foram modeladas considerando ângulo de atrito de 40° e módulo de deformabilidade (E') de 100 MPa.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para as camadas de solo.

Camada	γ	ν	φ'_s	c'_s	E'
[-]	[kN/m²]	[-]	[º]	[kPa]	[Mpa]
1 – Aterro	18	0,33	29	5	40
2 – SAS1	15	0,33	22	0	4
3 – SAS2	16	0,33	26	2	15
4- SAS3	17	0,33	28	5	33
5 – SAS4	18	0,33	30	10	55

5 MÉTODO ANALÍTICO

O método de Priebe (1995) foi adotado para estimar os recalques considerando o comportamento elástico dos materiais e o conceito de célula unitária. A formulação baseia-se na teoria de Rankine e assume que a coluna está apoiada sobre uma camada rígida, admitindo-se que a falha ocorre por cisalhamento da coluna (expansão lateral) enquanto o solo ao redor reage elasticamente. O fator básico de melhoria (η_0), que representa a razão entre o recalque do solo natural e o solo reforçado, é calculado considerando o coeficiente de Poisson do solo igual a 0,33, pela seguinte expressão:

$$\eta_1 = 1 + \frac{1}{\frac{A}{A_{col}} + \Delta\frac{A}{A_{col}}} \times \left[\frac{1}{K_{a,col}\left(\frac{\frac{A}{A_{col}} + \Delta\frac{A}{A_{col}}}{\frac{A}{A_{col}} + \Delta\frac{A}{A_{col}} - 1} + \frac{1}{4} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

Onde A_{col}/A é a taxa de substituição de área e $K_{a,col}$ é o coeficiente de empuxo ativo da coluna. Para tornar a previsão mais realista, o método incorpora o fator de profundidade (f_d), que considera o aumento do confinamento lateral conforme a profundidade aumenta, reduzindo as deformações radiais e os recalques. O fator de profundidade e o fator de melhoria final (η_2) são dados por:

$$f_d = \frac{1}{1 - y\frac{\Sigma(\gamma_{sol} \cdot \Delta d)}{p}} \quad (2)$$

$$\eta_2 = f_d \cdot \eta_1 \quad (3)$$

Sendo o fator de influência obtido por ábacos, γ_{sol} o peso específico do solo e "p" a carga aplicada.

6 RESULTADOS

6.1 Método Numérico

A modelagem tridimensional via PLAXIS 3D simulou a Interação Solo-Estrutura (ISE) durante o teste hidrostático (carregamento e descarregamento). Na fase de enchimento pleno (Fase 4 - ver Figura 4), o recalque máximo no centro do tanque de etanol foi de -252 mm. Na periferia (Figura 6), os recalques foram uniformes, variando entre 233 mm e 234 mm. Após o esvaziamento (Fase 5 – ver Figura *5* e Figura 7), observou-se um recalque residual de 110 mm no centro e 86 mm na periferia.

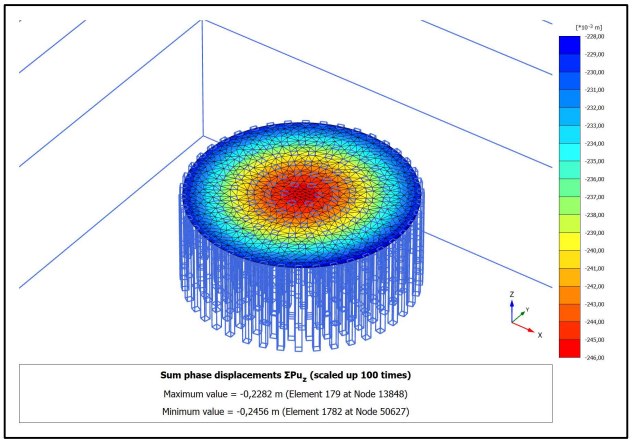


Figura 4. Deslocamentos verticais da laje – Fase 4 [$u_{z,\,mín}$ = -246 | $u_{z,máx}$ = -229 mm | $\Delta u_{z,máx}$ = 17 mm].

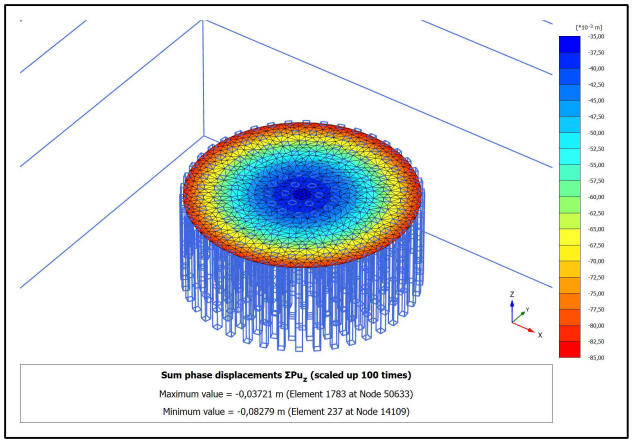


Figura 5. Deslocamentos verticais da laje – Fase 5 [$u_{z,\,mín}$ = -83 mm | $u_{z,máx}$ = -37mm | $\Delta u_{z,máx}$ = 46 mm].

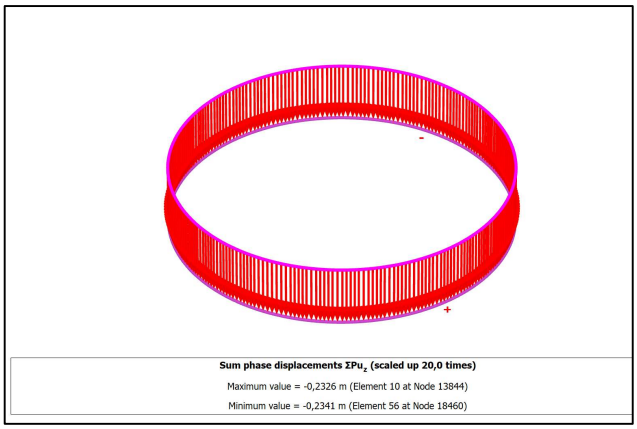


Figura 6. Deslocamento vertical na periferia da base do tanque – Fase 4 [$u_{z,mín}$ = -234mm | $u_{z,máx}$ = -233mm | $\Delta u_{z,máx}$ = 1mm].

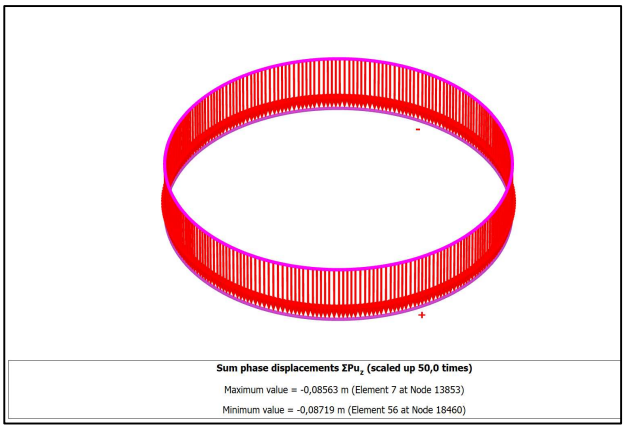


Figura 7. Deslocamento vertical na periferia da base do tanque – Fase 5 [$u_{z,mín}$ = -87mm | $u_{z,máx}$ = -86mm | $\Delta u_{z,máx}$ = 1mm]

A segurança do sistema no estado limite de serviço é confirmada pela Tabela 5, que demonstra que todos os valores obtidos estão abaixo dos limites da Norma Petrobras N270, referência para esse tipo de estrutura:

Tabela 5. Verificação ao Estado Limite de Serviço/Uitlização (Norma Petrobras N270).

Descrição	Critério	Resultado obtido
Recalque absoluto em qualquer ponto da periferia durante o teste hidrostático	uz ≤ 300mm	234 mm
Recalque diferencial entre dois pontos da periferia durante o teste hidrostático	Δ uz ≤ 38mm ao longo de 900mm	1,1 mm
Recalque diferencial entre dois quaisquer pontos da periferia durante o teste hidrostático	Δ uz ≤ 50mm	1,51 mm
Recalque diferencial entre um qualquer ponto da periferia e um ponto interno a 1150mm ao longo do raio após o teste hidrostático	Δ uz ≤ 70mm	20 mm
Recalque diferencial entre um qualquer ponto da periferia e o centro do tanque durante o teste hidrostático	Δ uz ≤ 100mm	17 mm

6.2 Método Analítico

O Método de Priebe (1995) estimou o efeito do reforço através de fatores de melhoria baseados na taxa de substituição de 18,12%. Para o carregamento infinito, a estimativa indicou uma redução de recalque de 508,0 mm (solo natural) para 297,5 mm (solo melhorado).

7 CONCLUSÕES

A solução de reforço das fundações para o Tanque de Etanol objeto deste estudo, baseada na execução de colunas de brita por vibro substituição, mostrou-se tecnicamente adequada frente às características geotécnicas locais da planta de Campo Novo do Parecis (MT). Com base nos estudos realizados, estabelecem-se as seguintes conclusões:

A modelagem tridimensional via software PLAXIS 3D comprovou o pleno atendimento dos estados limites de serviço (ELS) e estados limites últimos (ELU) da estrutura, apresentando recalques totais de -252 mm no centro e -234 mm na periferia durante a fase de enchimento. O recalque diferencial verificado de 20

mm atende confortavelmente ao limite de 100 mm da norma Petrobras N270 (PETROBRAS, 2020), enquanto os esforços estruturais calculados, como o momento fletor de -93,08 kN.m/m na laje e de 1.191,13 kN.m na viga, validaram o dimensionamento de armaduras realizado.

A aplicação do método de Priebe (1995) quantificou uma redução superior a 40% nos recalques totais, reduzindo a estimativa analítica de 508,0 mm no solo natural para 297,5 mm com o uso das colunas de brita, na taxa de substituição de 18,12%.

Ao confrontar as metodologias, a análise numérica tridimensional, mesmo com modelos constitutivos simplificados, consolidou vantagem ao registrar um recalque máximo 15% inferior à estimativa obtida pelo método analítico de Priebe (252 mm contra 297,5 mm). Essa divergência fundamental decorre da capacidade do modelo numérico em simular o acoplamento real da Interação Solo-Estrutura (ISE), integrando a rigidez da laje e da viga perimetral ao comportamento do maciço reforçado com colunas de brita discretizadas, superando as limitações do método analítico que se baseia na hipótese simplificadora de carga infinita e no tratamento do solo reforçado como um elemento unitário sem a discretização individual das colunas. Como diferencial, a abordagem numérica 3D fornece o mapeamento completo da distribuição de recalques ao longo de toda a projeção da fundação, garantindo uma análise mais realista do comportamento mecânico sistema.

Em suma, os menores valores de recalque verificados na análise numérica fornecem indícios de que a Interação Solo-Estrutura (ISE) pode otimizar os dimensionamentos para o estudo de caso em questão, permitindo ainda a otimização de dimensionamentos estruturais, como taxas de armadura,e geotécnicos, como taxa de substituição de solo, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade global do projeto.

Por fim, destaca-se que os testes hidrostáticos conduzidos após a implantação dos tanques, resultaram em valores de recalque ainda inferiores aos estimados no modelo 3D. O uso de modelos constitutivos elastoplásticos mais avançados, nos casos em que há dados de ensaios adequados para a obtenção dos parâmetros geomecânicos desses modelos, tendem a permitir uma otimização ainda maior das taxas de substituição empregadas nesse tipo de solução, aproximando os recalques estimados numéricamente àqueles obtidos nos testes hidrostáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6118:2023 .*Projeto de estruturas de concreto procedimento.* Rio de Janeiro.

PETROBRAS. N-270 (2020). Projeto de tanque de armazenamento atmosférico. Rio de Janeiro: Petrobras, rev. G, jul. 2020.

Priebe, H. J. (1995) The design of vibro replacement. Ground Engineering, v. 28, n. 10, p. 31–37, 1995.