

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/492

Analise dos Recalques medidos In Situ de Fundações para Tanques de Armazenamento de Combustível

Erland González Leño

GEOCOBA – Projetos de Engenharia Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, gonzalez.erland@gmail.com

Rodman Raúl Córdova Rodríguez

GEOCOBA – Projetos de Engenharia Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, eng.raulcordova@gmail.com

RESUMO: Na indústria petrolífera são usados diferentes tipos de tanques para armazenar uma grande variedade de produtos, principalmente aqueles formados por placas metálicas soldadas na base, nas paredes e no teto. Esta pesquisa teve como objetivos: Analisar e Interpretar adequadamente os recalques medidos em campo durante o teste hidrostático, de acordo com as normativas nacionais e internacionais que regulamentam a avaliação dessas estruturas. A metodologia consistiu em interpretar os recalques medidos no contorno das fundações dos tanques, com base ao descrito na normas N-270 (2020) e API-653 (2018). Os resultados evidenciaram que, mediante um tratamento completo dos recalques observados, é possível verificar a conformidade dos recalques permitidos pela norma N-270 (2020) e compreender o comportamento mecânico dos materiais, que constituem os tanques, conforme os requerimentos da norma API-653 (2018). Entre as conclusões deste estudo, destacaram-se resultados significativos que ressaltam a necessidade de considerar os recalques das fundações dos tanques e a avaliação detalhada dos componentes que integram os tanques como parte fundamental da análise.

PALAVRAS-CHAVE: Teste hidrostático; Medição de campo; Recalque fora do plano; curva cosseno.

ABSTRACT: In the oil industry, different types of tanks are used to store a wide variety of products, mainly those formed by metal plates welded to the base, walls and roof. This research aimed to: Analyze and interpret adequately the settlements measured in the field during the hydrostatic test, in accordance with national and international regulations that regulate the evaluation of these structures. The methodology consisted of interpreting the settlements measured on the contour of the tank foundations, based on what was described in standards N-270 (2020) and API-653 (2018). The results showed that, through a complete treatment of the observed settlements, it is possible to verify the conformity of the settlements allowed by standard N-270 (2020) and understand the mechanical behavior of the materials, in accordance with the requirements of the standard API-653 (2018). Among the conclusions of this study, significant results stood out that highlight the need to consider the settlements of the tank foundations and the detailed evaluation of the components that make up the tanks as a fundamental part of the analysis.

KEYWORDS: Hydrostatic test; Field measurement; Out-of-plane settlement; cosine curve.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento do comportamento das fundações de grandes tanques de armazenamento tem sido uma realidade importante nas últimas décadas. Os deslocamentos e deformações que ocorrem na estrutura do tanque e na sua fundação podem causar danos graves aos tanques ou até mesmo criar situações de risco de vida. Grandes tanques podem ser construídos sobre vários tipos de fundações, incluindo fundações tipo anel de concreto preenchidas por solo competente compactado, radier simples ou raders apoiadas em estacas. A escolha depende da competência do solo de fundação (AYARI *et al.*, 2014).

Os deslocamentos e as distorções angulares são de naturezas diferentes, resultantes de uma variedade de causas, sendo que recalques absolutos e diferenciais são os de maior importância. As causas dos recalques absolutos e diferenciais podem ser originados por geometria não homogênea ou compressibilidade do depósito de solo, distribuição não uniforme da carga aplicada à fundação e tensão não uniforme (AYARI *et al.*, 2014).

Os recalques devem ser avaliados com muito cuidado porque a ocorrência de recalques excessivos pode levar a rupturas em setores específicos do tanque. No Brasil existe a norma N-270 (2020) Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico da Petrobras e a norma N – 1807 (2011) Medição de Recalque de Fundações no Teste Hidrostático de Equipamentos, ambas da Petrobrás, que contém premissas para a locação dos pontos de controle e a avaliação dos recalques. No contexto internacional, é realizada a avaliando mais detalhada dos recalques ao redor de tanque conforme o descrito na norma americana API Standard 653 (2018) - *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*.

2 TIPOS DE RECALQUES

Normalmente um leve recalque no fundo do tanque, com deslocamentos uniformemente distribuídos, não deve causar problemas na operação dessas estruturas. No caso da ocorrência de recalques diferenciais, principalmente em tanque de teto flutuante, o tanque e as tubulações conectadas ao mesmo podem sofrer danos devido à possibilidade de grandes distorções (COSTA, 2011). O maior valor de recalque geralmente acontece durante o teste hidrostático, as medidas topográficas acompanham o processo de enchimento do tanque, como parte do plano de inspeção da construção. Existem distintos tipos de recalques neste tipo de estruturas: recalque uniforme, recalque com inclinação planar, recalque em forma de prato, recalque localizado e recalque fora do plano inclinado (OOP *out-of-plane*) (MARR *et al.*, 1982).

O recalque uniforme da base do tanque não cria nenhuma ameaça à integridade estrutural de um tanque, mas deve-se prestar atenção às conexões da estrutura com dutos e outros acessórios. O Recalque com inclinação planar, a base do tanque pode inclinar em um plano semelhante à inclinação das paredes, tal inclinação pode não ter consequências prejudiciais para a integridade estrutural da placa do fundo, das paredes do costado ou da união base-costado. No entanto, é aconselhável prestar atenção ao comportamento da estrutura porque a inclinação sofrida pode fazer com que um teto flutuante não funcione corretamente e provoque a ruptura das paredes, da placa de fundo ou da ligação entre os mesmos (MARR *et al.*, 1982).

Recalque em forma de prato, que geralmente ocorre em fundações flexíveis, a placa do fundo do tanque afunda mais no centro do que nas bordas, principalmente em solos muito deformáveis, suportando grandes carregamentos na base do tanque, podendo provocar sua ruptura e escoamento do fluido armazenado (MARR *et al.*, 1982). Recalque localizado ocorre em regiões específicas na base do tanque, que podem estar distantes ou próximas das paredes. A forma deste tipo de recalques é parecida ao recalque em forma de prato, mas é de natureza localizada. Esse tipo de recalque ocorre principalmente em regiões que não têm uma adequada compactação abaixo da base do tanque ou devido a uma área localizada em solos muito deformáveis. O recalque fora de plano será explicado de maneira mais detalhada porque é o objeto de estudo deste trabalho.

2.1 Recalque fora do plano

O recalque fora do plano (OOP *out-of-plane*) é de natureza o mais grave do que os outros recalques mencionados anteriormente porque a deflexão da estrutura em escala local está envolvida e produziria altas tensões locais (Figura 1). Este tipo de recalque (OOP) pode produzir tensões e deformações locais que podem afetar a integridade estrutural do tanque. Outro efeito que pode produzir é a irregularidade (OOR *out-of-roundness*) que afeta a capacidade de manutenção do tanque (AYARI *et al.*, 2014).

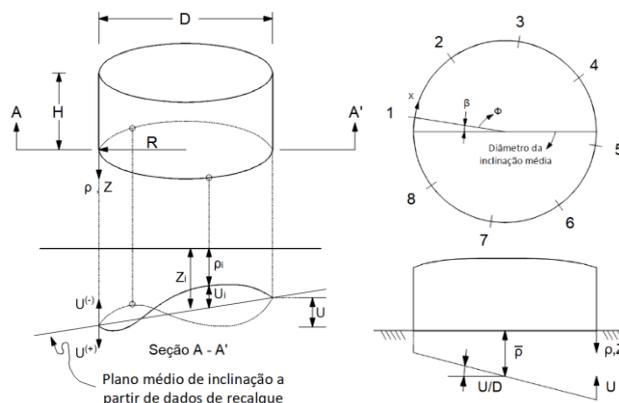


Figura 1 – Recalque fora do plano (modificado de Marr *et al.*, 1982).

3 NORMAS PARA A AVALIAÇÃO DE RECALQUES

3.1 N-270 (2020) Projeto De Tanque De Armazenamento Atmosférico

A verificação e análise dos recalques em relação às recomendações estabelecidos nessa norma para tanques de armazenamento, devem ser seguidos conforme as figuras abaixo:

5.1.1 Os recalques máximos aceitáveis, durante o teste hidrostático, na periferia da base (sob o costado do tanque) são:

- a) recalque absoluto em qualquer parte da periferia: 300 mm;
- b) recalque diferencial entre 2 pontos da periferia: 38 mm em 9000 mm (medido ao longo do perímetro e considerado como de inclinação uniforme entre cada 2 pontos distantes de 9000 mm);
- c) recalque diferencial entre 2 pontos quaisquer da periferia: 50 mm.

Figura 2 – Recalques máximos aceitáveis (adaptado da Norma N-270, 2020).

5.1.4.2 Durante o teste hidrostático o recalque diferencial máximo admissível (Δ), entre qualquer ponto da periferia e o centro do tanque, deve ser de:

$$\Delta \leq \frac{D}{A}$$

Onde:

- Δ é o recalque diferencial máximo admissível (em mm);
- D é o diâmetro nominal do tanque (em mm);
- A é 250 (para tanques com caimento para o centro de até 2 %, inclusive) e 450 (para tanques com caimento para o centro de 2 % até 4 %).

Figura 3 – Recalque diferencial máximo (adaptado da Norma N-270, 2020).

Pode se evidenciar que essa norma se limita à verificação e avaliação dos recalques produzidos na fundação do tanque e não leva em consideração as deformações dos elementos que formam parte do tanque por causa tensões adicionais devido a esses recalques.

3.1 API Standard 653 (2018) - Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction

Com base na Figura 4 deve-se determinar a Equação 1 do plano inclinado médio para calcular a inclinação planar e os recalque fora de plano (OOP).

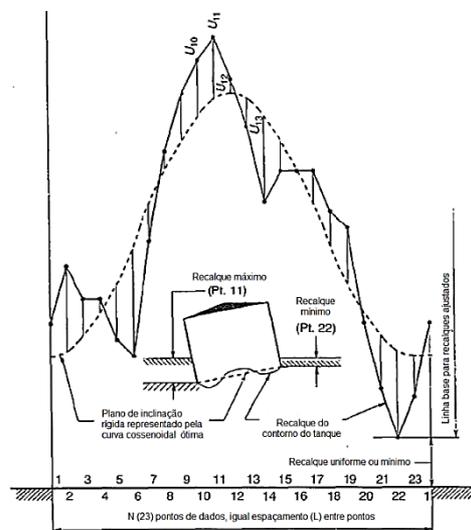


Figura 4 – Plano inclinado médio (Adaptado da API 653, 2018).

O recalque calculado devido à inclinação do tanque é subtraído do valor de recalque medido nos pontos na base do tanque. Os métodos mencionados na literatura para descrever o recalque causado pela inclinação plana consideram a Equação (1).

$$Z_i = A_0 + A_1 \cdot \cos(\phi_i + \beta) \quad (1)$$

$$A_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum \rho_i \text{ recalque medido médio do fundo do tanque} \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \cdot [(\sum \rho_i \cdot \cos \phi_i)^2 + (\sum \rho_i \cdot \sin \phi_i)^2]^{0,5} \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \cdot [(\sum \rho_i \cdot \sin \phi_i) / (\sum \rho_i \cdot \cos \phi_i)] \quad (4)$$

$$U_i = \rho_i - Z_i \quad (5)$$

Onde:

U_i – Recalque fora do plano inclinado médio;

ρ_i – Recalque medido no terreno;

Z_i – Recalque previsto pela curva cossenoide.

O Anexo B apresentado na API-653 (2018) menciona dois critérios de recalque fora do plano. O primeiro, estudado por Sullivan & Nowicki (1974), DeBeer (1969), Malik, Norton & Ruiz (1977), Marr, *et al.* (1982), estabelece que o recalque medido em campo seja modificado em relação a um recalque previsto pela curva cossenoide. A validade desta abordagem depende da qualidade do ajuste da curva cossenoide em relação aos dados de campo, requerendo-se um coeficiente de determinação R^2 maior ou igual a 0,9, conforme a Equação (6).

$$R^2 = \frac{(S_{yy} - SSE)}{S_{yy}} \quad (6)$$

Onde:

S_{yy} – Somatória dos quadrados da diferença entre o recalque médio e o recalque medido;

SSE – Somatória dos quadrados da diferença entre o recalque medido e o recalque previsto.

O recalque admissível fora do plano é determinado pela Equação (7) proposto por Marr, *et al.* (1982).

$$S_{adm} = \frac{11 \cdot L^2 \cdot f_y}{2 \cdot H \cdot E} \quad (7)$$

Onde:

S_{adm} – Recalque admissível;

L – Mesmo comprimento do arco entre pontos de medição;

H – Altura do tanque;

f_y – Resistência ao escoamento do aço;

E – Módulo de elasticidade do aço.

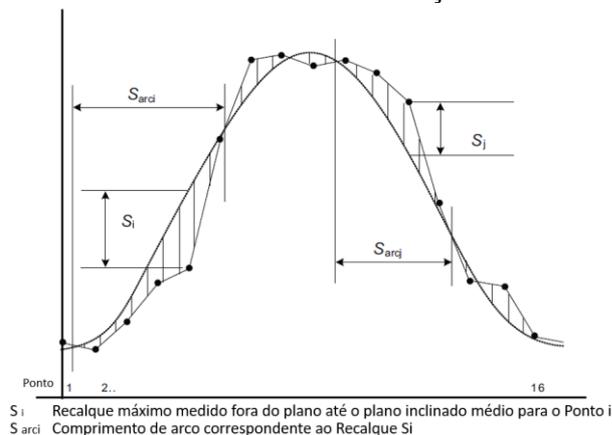


Figura 5 – Representação gráfica do plano inclinado tipo 1 não definido pela curva cossenoide (modificado de API-653, 2018).

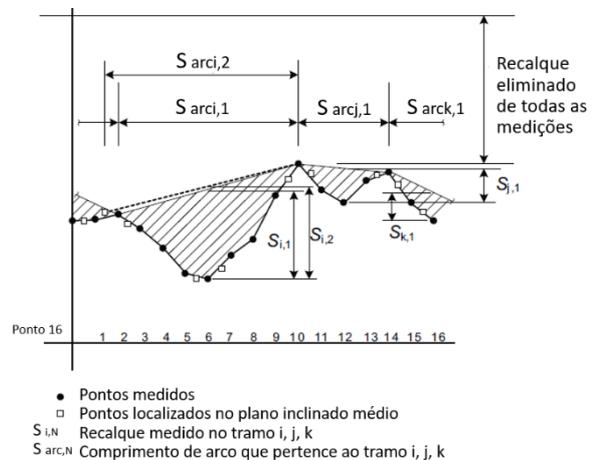


Figura 6 – Representação gráfica do plano inclinado tipo 2 não definido pela curva cossenoide (modificado de API-653, 2018).

O segundo critério mencionado no Anexo B da API-653 (2018) foi proposto por Andreani & Carr (2007) para situações em que o recalque medido não está suficientemente ajustado à curva cossenoide (R^2 menor do que 0,9). Deve-se então avaliar cada tramo relacionando o recalque S_i com o parâmetro S_{arc} , considerado como o comprimento do arco localizado no tramo onde os recalques são iguais ao recalque do plano inclinado médio, conforme mostram as Figuras 5 e 6.

O recalque admissível fora do plano no segundo critério é então definido pela Equação (8).

$$S_{adm} = \min \left[K \cdot S_{arc} \cdot \left(\frac{D}{H} \right) \cdot \left(\frac{f_y}{E} \right), 4 \right] \text{ em polegadas} \quad (8)$$

Onde:

S_{adm} – Recalque admissível;

S_{arc} – Comprimento do arco;

H – Altura do tanque;

f_y – Resistência ao escoamento do aço;

E – Módulo de elasticidade do aço;

K – Coeficiente que depende do tipo de tanque e de suas dimensões (Tabela 1).

Tabela 1 – Valor de K dependendo das características do tanque (modificado de API 653, 2018).

Diâmetro do tanque		Tanque de teto flutuante	Tanque de teto fixo
[ft]	[m]	K	K
$D \leq 50$	$D \leq 15,24$	28,7	10,5
$50 < D \leq 80$	$15,24 < D \leq 24,38$	7,8	5,8
$80 < D \leq 120$	$24,38 < D \leq 36,58$	6,5	3,9
$120 < D \leq 180$	$36,58 < D \leq 54,86$	4,0	2,3
$180 < D \leq 240$	$54,86 < D \leq 73,15$	3,6	Não é aplicável
$240 < D \leq 300$	$73,15 < D \leq 91,44$	2,4	Não é aplicável
$300 < D$	$91,44 < D$	Não é aplicável	Não é aplicável

4 AVALIAÇÃO DOS RECALQUES MEDIDOS EM CAMPO

O projeto encontra-se localizado no Complexo Industrial de Suape (Figura 7), local situado no município de Ipojuca, localizado na região metropolitana de Recife (a 49 km da capital) próximo à foz dos rios Tatuoca e Masangana, entre o Cabo de Santo Agostinho e o Pontal do Cupe.



Figura 7 – Localização do projeto dos tanques (modificado de Google Earth, 2019).

A Figura 8 mostra uma imagem de satélite, com a localização da área específica (quadrado verde) do projeto que consta de 4 tanques (Tanques 21, 22, 24, 25) com fundação superficial de um anel perimetral e solo compactado competente cada, possui um diâmetro de 28,366 m e altura de 14,734 m. Com base nos resultados de recalque medidos em campo, no teste hidrostático realizados nos tanques TQ-21, TQ-22, TQ-24, TQ-25, a Tabela 2 resume os valores nos 8 pontos de controle no perímetro do radier (Figura 9) na situação de tanques totalmente cheios de água.



Figura 8 – Localização da área do projeto (modificado de Google Earth, 2019).

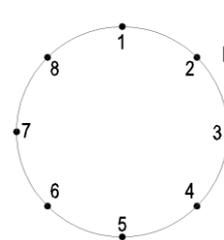


Figura 9 – Pontos de controle nos 4 tanques.

Tabela 2 – Recalques medidos nos pontos de controle (modificado de Itiza, 2020).

PONTO	Recalque medidos nos pontos de controle [mm]			
	TQ-21	TQ-22	TQ-24	TQ-25
1	80	150	150	60
2	70	110	150	100
3	70	120	170	80
4	90	110	120	70
5	180	90	120	30
6	140	80	120	100
7	70	130	140	30
8	110	230	140	10

Realizou-se a verificação dos requisitos na norma N-270 (2020) da Petrobras (Figuras 2 e 3):

- Em relação ao item a) da Figura 2, verificou-se que todos os recalques medidos no teste hidrostático são inferiores a 300 mm.
- Em função ao item b) da Figura 2, a Tabela 3 mostra o recalque diferencial entre intervalos de pontos de controle consecutivos, lembrando que a distorção admissível prescrita pela norma é 38 mm/9000 mm ou 1/237. Considerando que o comprimento de arco entre os pontos do radier é 11139 mm (portanto superior ao valor máximo de 9000 mm estabelecido pela norma) o recalque diferencial não deveria ultrapassar 47 mm. Observa-se que existem intervalos nos tanques TQ-21, TQ-22, TQ-24, TQ-25, destacados na Tabela 3, e que esta condição não é satisfeita.

Tabela 3 – Recalques diferenciais entre pontos de controle.

Intervalo	Recalque diferencial entre os pontos de controle [mm]			
	TQ-21	TQ-22	TQ-24	TQ-25
1 - 2	10	40	0	40
2 - 3	0	10	20	20
3 - 4	20	10	50	10
4 - 5	90	20	0	40
5 - 6	40	10	0	70
6 - 7	70	50	20	70
7 - 8	40	100	0	20
8 - 1	30	80	10	50

Tabela 4 – Maiores recalques diferenciais.

Intervalo	Recalque diferencial entre os pontos de controle [mm]			
	TQ-21	TQ-22	TQ-24	TQ-25
Menor	70	10	0	10
Maior	180	100	50	70
Diferencial	110	90	50	60

- Em relação ao item c) da Figura 2, verifica-se que o recalque diferencial máximo entre os pontos de controle (independente das respectivas localizações), listados na Tabela 4, também é superior ao prescrito pela norma (50 mm), nos tanques TQ-21, TQ-22 e TQ-25, com o tanque TQ-24 na situação limite.

Em relação ao requisito mostrado na Figura 3, este não pôde ser analisado devido à inexistência de medidas de recalque nos centros das fundações dos tanques. Essa falta de medidas não permite a verificação

da existência de possíveis danos aos elementos estruturais da base do tanque, ainda que as medições apenas na periferia tenham atendido às normas. Com base nas mesmas medições de campo da Tabela 1, procedeu-se a verificar os requisitos recomendados pelos critérios de recalque estabelecidos na norma API 653 (2018).

A Figura 10 mostra a variação dos recalques fora do plano (OOP) para o tanque TQ-21 ajustados pelo método de Marr *et al.* (1982), com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,27$). Nota-se que este baixo coeficiente é decorrente dos valores medidos nos pontos de controle 7 e 5, o que sugere que os intervalos entre os pontos 6 – 8 e 4 – 6 precisam ser avaliados pelo critério do Andreani & Carr (2007). Resultados similares foram obtidos para o tanque TQ-22 (Figura 11) mostrando o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,54$). As mesmas análises foram executadas para os tanques TQ-24 (Figura 12) e TQ-25 (Figura 13). A Tabela 6 apresenta os resultados de avaliação de recalques fora do plano (OOP) pelo método de Andreani & Carr (2007).

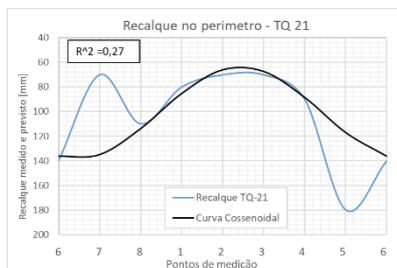


Figura 10 – Recalque fora do plano TQ-21

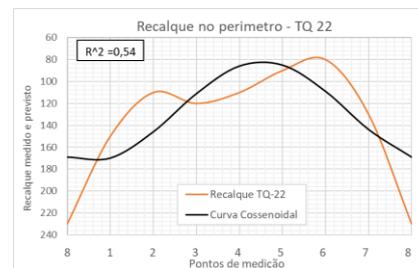


Figura 11 – Recalque fora do plano TQ-22

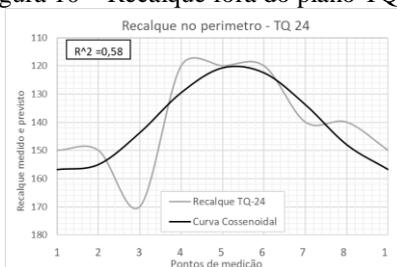


Figura 12 – Recalque fora do plano TQ-24

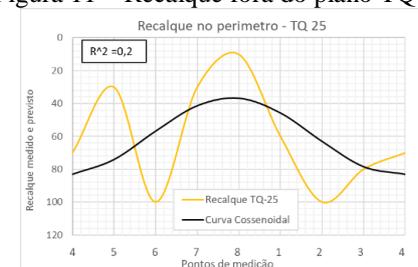


Figura 13 – Recalque fora do plano TQ-25

Com base na geometria dos tanques e de suas propriedades mecânicas (Tabela 5), a Tabela 6 mostra a avaliação do recalque pelo critério do Andreani & Carr (2007), conforme a API 653 (2018), dos quatro tanques.

Tabela 5 – Geometria e propriedades mecânicas dos 4 tanques.

Geometria		Propriedades físico-mecânicas	
Diâmetro D	93 [ft] = 28,366 [m]	Resistencia ao escoamento f_y	400 [MPa]
Altura H	48 [ft] = 14,734 [m]	Modulo de elasticidade E	200000 [MPa]

Tabela 6 – Avaliação do recalque fora do plano dos quatro tanques.

Tanque	Intervalo	S_{arc} [m]	K -	S_{adm} [mm]	S_{medido} [mm]	Resultado
21	6 – 8	23,393	3,9	[351 ; 100]	48 < 100	Atende
	4 - 6	24,506	3,9	[368 ; 100]	48 < 100	Atende
	1 -3	23,393	3,9	[351 ; 100]	32 < 100	Atende
22	3 - 5	26,734	3,9	[401 ; 100]	28 < 100	Atende
	5 - 7	22,279	3,9	[334 ; 100]	28 < 100	Atende
	7 -16	16,709	3,9	[250 ; 100]	60 < 100	Atende
24	2 -4	17,823	3,9	[267 ; 100]	28 < 100	Atende
	3 -5,5	26,734	3,9	[401 ; 100]	76 < 100	Atende
25	5,5 - 7	8,911	3,9	[133 ; 100]	45 < 100	Atende
	7 - 1	25,620	3,9	[384 ; 100]	26 < 100	Atende
	1 -3	27,848	3,9	[418 ; 100]	36 < 100	Atende

Determinou-se que 6 dos 8 pontos de controle, no teste hidrostático no tanque TQ-21 investigado pela medição dos recalques em campo atendem ao critério de recalque admissíveis de Marr *et al.* (1982). Porém,

apresentam dois intervalos entre os pontos 6-8 e 4-6 (dos pontos de controle 7 e 5 respectivamente) que foram avaliados pelo critério de Adreani & Carr (2007), ambos critérios recomendados pela norma API-653 (2018). Em relação aos outros três tanques (TQ-22, TQ-24 e TQ-25), investigados pela prova de hidrostática, atendem ao critério de recalques admissíveis recomendado pelo critério de Adreani & Carr (2007).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, na análise dos recalques dos tanques (21, 22, 24, 25), com base nas duas normas utilizadas neste documento, verificaram-se que recalques medidos não atenderam as recomendações de valores admissíveis da norma N-270 (2020). Portanto, conclui-se a necessidade de realizar uma análise mais rigorosa considerando o comportamento estrutural das placas metálicas, incluindo as juntas (soldas) dos elementos que constituem o tanque (base e costado) e reforçá-los onde for necessário.

É importante realizar uma avaliação do desempenho de tanques de armazenamento com base nos recalques produzidos por teste hidráulico, considerando as recomendações das normas N-270 (2020) e complementadas pelas diretrizes da norma API-653 (2018).

O recalque fora do plano é um componente fundamental do processo de avaliação, uma vez que possibilita quantificar o impacto da deflexão ao longo do perímetro da base do tanque na ocorrência de elevados valores de tensão em pontos específicos da estrutura. Essa análise é essencial para antecipar e mitigar possíveis problemas estruturais, contribuindo assim para a segurança e eficácia do projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Pedricto Rocha Filho, pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho, à Vibra Energia, por ter fornecido todas as informações do projeto estudado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2018). *Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction (Annex B)*. API STANDARD 653. Third edition. Washington D. C.: API Publishing Services.
- ANDREANI, J. L.; CARR, N.A. (2007), *Final Report on The Study Of Out-Of-Plane Tank Settlement*, API, Washington, D.C., United States of America.
- AYARI, H.; TRUONG, D.; SEHN, D. TRUONG, K. T. (2014) "A Nonlinear Finite Element Study on Settlement and Releveling Procedure of a Large Deformed Steel Tank", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 136, Boucherville, Canada.
- BARROS, S. M. (2014), *Tanques de armazenamento*, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.
- COSTA, O. (2011) *Tanques de Armazenamento. Apostila de tanques*. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/assemilmontagens/apostila-de-tanques-2011>. Acesso em: 20 agosto 2022.
- GONZÁLEZ, E. (2023), *Análise numérica e experimental do comportamento de fundações de tanques de combustível* Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- MALIK, Z., MORTON, J., AND RUIZ, C., (1977), *Ovalization of Cylindrical Tanks as a Result of Foundation Settlement*, *Journal of Strain Analysis*, Vol 12, No. 4 pp. 339-348.
- MARR, W A., ASCE, M., RAMOS, J.A., WILLIAM LAMBE, T. and ASCE, F, (1982), *Criteria for Settlement of Tanks*, *Journal of the Geotechnical Engineering Division. American Society of Civil Engineers. US.*
- PETROBRAS, N 270 (2020), *Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico*, Brasil.
- PETROBRAS, N 1807 (2011), *Medição de Recalque de Fundações no Teste Hidrostático de Equipamentos*, Brasil.
- SULLIVAN, R.A., NOWICKI, J., F., (1974), *Differential Settlement of Cylindrical Oil Tank*, *Proceedings of Conference on Settlement of Structures*, Cambridge University, John Willey and Sons, Inc., pp 420-424.