



## Recalques Diferenciais em Tanques de Armazenamento Conforme Critérios da American Petroleum Institute 653

Fernando Pinheiro Weber

Eng. De Projetos, Vibra Energia S/A, Porto Alegre, Brasil, [fernandopw@vibraenergia.com.br](mailto:fernandopw@vibraenergia.com.br)

Cesar Alberto Ruver

Docente/Pesquisador, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, [cesar@ufrgs.br](mailto:cesar@ufrgs.br)

Gabriel Seixas P. A. Benitz

Eng. Civil Geotécnico, Geomath Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, [gsbenitz@geomath.com.br](mailto:gsbenitz@geomath.com.br)

Tiago Luiz Costa Silva

Esp. Em Geotecnia, UFRGS, Criciúma, Brasil, [tiagocostadasilva@gmail.com](mailto:tiagocostadasilva@gmail.com)

**RESUMO:** Superfícies cilíndricas com grandes diâmetros, como o caso dos tanques, tem um elevado bulbo de tensões, podendo chegar a dissipação de tensões em camadas superiores a 60 metros de profundidade. Quando produtos combustíveis e inflamáveis são estocados a preocupação é ainda maior, devido a critérios rigorosos de operação. Essas condicionantes tornam a previsibilidade de recalques extremamente importante, principalmente as distorções angulares as quais são responsáveis pela maioria das interrupções de operação dos equipamentos. O objetivo do trabalho é avaliar recalques diferenciais em um tanque de armazenamento conforme metodologia da API 653 devido as características da estatigrafia do terreno e interrupção de um equipamento por dano severo em um bocal. Para isso, foi realizada topografia em toda a base do equipamento com número de pontos suficientes para a consolidação da curva cossenoidal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundações, recalques diferenciais, API 653, tanques de armazenamento de grande diâmetro.

**ABSTRACT:** Storage tanks have a high stress spreading in the soil, this dissipation can be greater than 60 meters deep. When combustible and flammable products are stored, the criteria of operation is rigorous. These conditions make the differential settlement very important, specially the angular distortions. This are responsible for the most interruption in this type of equipment. The objective this work is to evaluate differential settlements in a storage tank, according to API 653 due to the characteristics of the statigraphy of the soil and interruption of the tank for several damage in the nozzle. For this topography was performed on the entire base or the equipment with a sufficient number of points for the consolidation of the curve.

**KEYWORDS:** Foundations, differential settlement, API 653, storage tank

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



## 1 Introdução

A engenharia geotécnica tem em seu escopo quando trabalho com projetos de fundações, a análise da estratigrafia do terreno por métodos diretos e por interpretações de ensaios de laboratório, propondo as melhores soluções de fundações com base nos comportamentos admissíveis de cada estrutura. Em equipamentos com grandes diâmetros o desafio se torna maior devido a distribuição de tensões do bulbo podendo chega a 70 metros de profundidade para a dissipação dos esforços. Como é de conhecimento geral a incerteza é intrínseca a geotecnia, tal fato torna a previsibilidade de recalques, dependente do solo subjacente da estrutura, conseqüentemente, o comportamento de fundações a curto prazo (andensamento primário/recalques imediatos) e ao longo do tempo (compressão secundária).

Em indústrias químicas e petroquímicas o comportamento das fundações de reservatórios são de extrema importância para uma operação segura do terminal ou base de distribuição. Conforme Penmann (1977) deve-se ter muito cuidado com os recalques diferenciais excessivos, especialmente quando executados sobre terrenos com menores capacidade de carga. Diversos autores, como Clarke (1969), Green e Hight (1975), e Bell (1980), destacam a necessidade da correta verificação de deformações nesses equipamentos. A falta de premissas corretas podem levar equipamentos a interrupção de operação ou até mesmo ao colapso. (BROWN e PETERSON, 1964; FELLENIUS e OCHOA, 2013; WEBER. e RUVEN, 2022). Além disso, os autores discutem critérios adequados para a aceitabilidade e controle de recalque nos equipamentos. Em seu estudo Marr et al(1982) estabeleceram critérios de recalques admissíveis para tanques de armazenamento, assim como Andreani e Carr (2007). Os resultados e as análises do estudo foram incorporadas pela American Petroleum Institute (API) 653 – Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction.

Importante ressaltar que o monitoramento do comportamento desse tipo de estrutura passou a ser obrigatório de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6122/2022 devido a significância da variabilidade da carga em relação ao peso próprio. Porém, a norma não especifica um critério de aceitação e validação de projeto. Nesse sentido, o objetivo do trabalho é verificar com base nos critérios da API 653 o comportamento das fundações de um tanque de armazenamento em termos de recalques diferenciais.

## 2 Recalques em tanques de armazenamento

Apesar de serem consideradas estruturas flexíveis sob ponto de vista estrutural, o comportamento das fundações, especialmente a nível de recalques deve ser estimado com o máximo de precisão possível na fase de projeto. Deformações excessivas podem induzir altas tensões nas chapas metálica e acessórios, distorções no fundo ou nas chapas metálicas do costado. (THUSYANTHAN e ENRIQUEZ, 2022).

Nos reservatórios cilindros metálicos existem seis tipos de deformações para verificação durante elaboração do projeto conforme figura 1.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



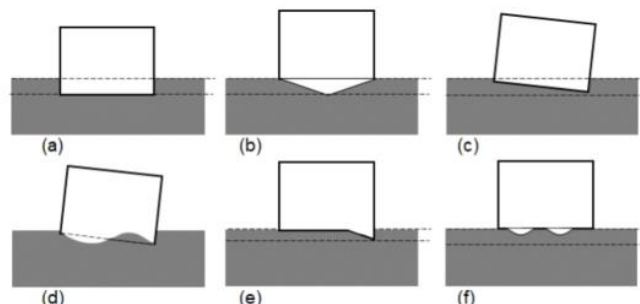


Figura 1. Modos de recalque em tanques: (a) Recalque uniforme (b) Diferença entre borda e centro (c) Adernamento (Planar Tilt) (d) Recalque diferencial na circunferência (out of plane) (e) Afundamento de borda (f) Afundamentos de fundo. Fonte: THUSYANTHANE ENRIQUEZ(2022)

Os modos de assentamento dos tanques tem como objetivo central garantir a integridade do equipamento. Apesar da criticidade maior das deformações diferenciais, o assentamento uniforme também pode induzir tensões inaceitáveis nos sistemas de tubulações e conexões. Nessa fase de estudo dos deslocamentos é fundamental a interface com a disciplina de tubulações na consolidação dos esforços para a escolha do melhor tipo de fundação.

Tendo em vista a criticidade dos recalques fora do plano na periferia dos equipamentos vários autores tem pesquisado sobre o tema, sugerindo critérios a serem adotados no assentamento diferencial de tanques com grande diâmetro com base em dados disponíveis na literatura e também em seus próprios estudos (ROSENBERG e JOUNEAUX, 1982; MARR et al ,1982). Para Rosenberg e Journeaux (1982) os limites aceitáveis para diferença de deformação entre borda e centro é de 1:45 e 1:450 para movimentos de perímetro fora do plano no elemento de apoio da estrutura. Marr et al (1982) detalham os critérios de desempenho dos tanques e relacionam a metodologia com o mecanismo de falha do elemento estrutural.

Em resumo, para definir a questão da compatibilidade entre deformações e esforços admissíveis é necessário considerar a magnitude do recalque, a forma do fundo do tanque no final da acomodação e também o critério de aceitação adequado. (ZANJANI et al, 2009)

Duas razões principais podem ser os motivos das diferenças nos incrementos de deformações. O primeiro, como já mencionado, é a heterogeneidade do solo abaixo do equipamento (especialmente tanques de grandes diâmetros), apresentando camadas de solos diferentes subjacentes a fundação. Outro ponto importante de mencionar é a não conformidade no carregamento do equipamento. (ZANJANI et al, 2009)

## 2.1 Critério de aceitação conforme API 653

Como delimitação deste trabalho, no artigo será empregado o critério de recalque diferencial da API 653 (API, 2018) devido ao caráter normativo do documento, embora existam outros critérios de aceitação para deformações em tanques de armazenamento como EEMUA 159, PIP STE02030, Klepikov (1989), USACE (1990), D’Orazio e Duncan (1987).

Conforme API 653 (API, 2018) o monitoramento do equipamento deve ser uma prática comum, devendo ser englobado por programa de monitoramento que inicia durante a construção, continuando no teste hidrostático e operação. Durante a fase de operação, as medições devem ser realizadas com frequência baseada nas previsões de projeto. Caso uma deformação excessiva

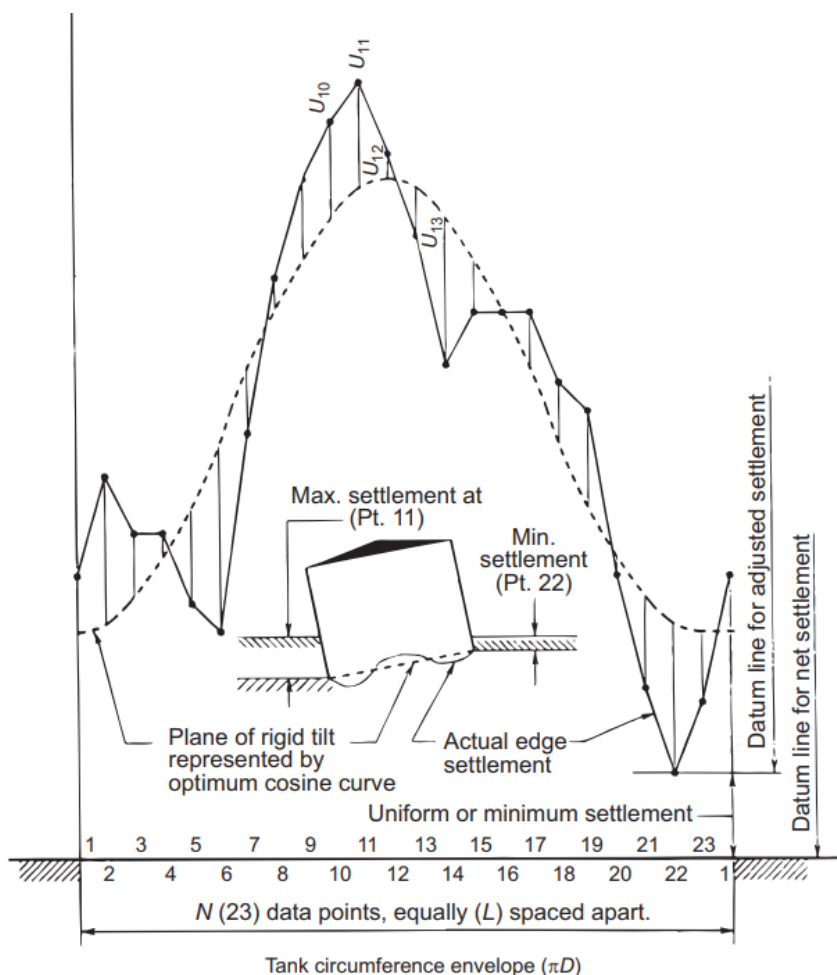
Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



ocorra, o tanque deve ser esvaziado e renivelado, porém é uma operação bastante complexa tanto pela parte da engenharia quanto de logística da unidade. Dessa forma, a decisão é crucial e depende muito da interpretação e avaliação adequada dos dados de monitoramento.

Para o assentamento fora do plano da fundação, como premissa é necessário determinar os valores dos recalques uniformes e inclinação de corpo rígido para cada ponto na periferia do equipamento assim, é possível estabelecer as diferenças das deformações fora do plano. A validação de um plano médio passa pela correlação entre as diferenças em relação a média para a avaliação da melhor expressão de cálculo a ser utilizada.

A avaliação das deformações do equipamento está ligada a verificação de um plano médio pré determinado ( $Z_i$ ). Caso este seja verificado, figura 2, a metodologia utilizada é a representação gráfica ilustrando o comportamento da estrutura definido por uma curva senoidal ou cossenoidal.



Out-of-plane deflection for Point "i" is  

$$S_i = U_i - (1/2 U_{i-1} + 1/2 U_{i+1})$$
, for example  

$$S_{11} = U_{11} - (1/2 U_{10} + 1/2 U_{12})$$

$U_i$  = out-of-plane settlement of Point, "i"  
 (+) when above cos. curve;  
 (-) when below cos. curve, for example:  
 $U_{11} = (+)$   
 $U_{13} = (-)$

Figura 2 – Representação gráfica recalque de recalque diferencial na periferia, conforme API 653. Fonte: API 653 (API, 2018)

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Para a obtenção da curva gráfica de referência, um plano médio da elevação deve ser definido, chamado de  $Z_i$  definido pela expressão 1:

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

Onde:

$\phi_i$  = O ângulo concêntrico medido entre o raio do ponto 1 até o ponto  $i$

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \left[ \left( \sum_{i=1}^N p_i \cos \phi_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N p_i \sin \phi_i \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$\beta = \arctan. \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^N p_i \cdot \sin \phi_i \right)}{\left( \sum_{i=1}^N p_i \cos \theta_i \right)} \right]$$

As distâncias verticais entre a curva medida e a curva ótima representam o valor das deformações fora do plano representado na figura 2 por  $U_i$ , calculado pela equação 2

$$U_i = p_i - Z_i \quad (2)$$

$p_i$  = Recalque medido em cada ponto de medição

$Z_i$  = Plano médio de referência

Com isso é possível calcular o recalque diferencial fora do plano de projeção da fundação ( $S_i$ ) e compará-lo com o recalque máximo ( $S_{adm}$ ) utilizando a equação 3.

$$S_i = U_i - \left( \frac{1}{2} \cdot U_{-1} + \frac{1}{2} \cdot U_{i+2} \right) \quad (3)$$

A validação da curva senoidal, assim como a sua utilização será validada pela expressão de correlação:

$$R^2 = \frac{S_{yy} - SSE}{S_{yy}} \quad (4)$$

Onde:

$S_{yy}$  = é a soma dos quadrados das diferenças entre a elevação média e a elevação medida

$SSE$  = é a soma do quadrado das diferenças entre as elevações medidas e previstas

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



Para a utilização deste método citado na API 653 (API, 2018) o resultado para a correlação  $R^2$  é de no mínimo 0,9. Validada a utilização do método cossenoidal deve ser utilizada a equação proposta por Marr et al (1982) conforme equação (5):

$$S_{adm} = \frac{11 L^2 f_y}{2 H E} \quad (5)$$

Onde:

$S_{adm}$ : Recalque máximo admissível (m);  
L : comprimento do arco entre pontos de medição (m);  
H: Altura do tanque (m)  
 $f_y$ : Resistência ao escoamento do aço (Mpa);  
E: Módulo de elasticidade do aço (Mpa);

Na impossibilidade da utilização da equação (5) devido a não correlação linear mínima, deverá ser utilizada a equação (6), proposta por Andreani e Carr:

$$S_{adm} = \min \left[ K \cdot S - \text{arc.} \left( \frac{D}{H} \right) \cdot \left( \frac{f_y}{E} \right), 10 \text{cm} \right] \quad (6)$$

$S_{adm}$ : Recalque máximo admissível;  
H: Altura do tanque (m)  
 $f_y$ : Resistência ao escoamento do aço (MPa);  
E: Módulo de elasticidade do aço (MPa);  
K: Coeficiente depende do tipo de tanque conforme API 653);  
S – arc: Comprimento efetivo do arco (Anexo – B seção – 2.2.5.1. API 653, 208)  
D: Diâmetro do tanque (m)

### 3 Caracterização do local de estudo

O local de estudo está situado na zona portuária de Ipojuca/PE, no porto de SUAPE, região caracterizada pela formação sedimentar com intercalações de camadas de características argilosas e arenosas. Especificamente na área em estudo predominam sedimentos superficiais mais resistentes (camada com espessura média de 15m e índice de resistência a cravação do amostrador padrão do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ), em torno de 10). Abaixo desta camada inicial uma espessa camada de argila de consistência mole com espessura média de 18 metros ( $N = 3$ ). Para subsídio do projeto foram executados 19 pontos de sondagem com profundidade de 40 metros. A figura 3 evidencia a disposição das sondagens e a figura 4 exemplifica o perfil estratigráfico representativo do local adotado.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



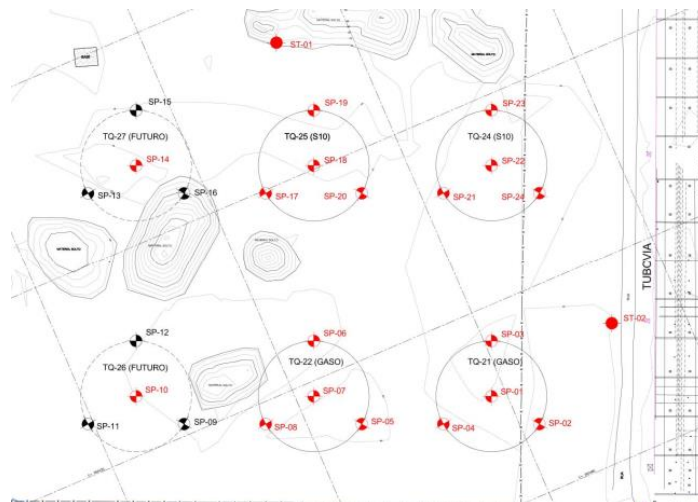


Figura 3 – Posição das sondagens tipo SPT no interior da bacia de tanques. Fonte: O Autor

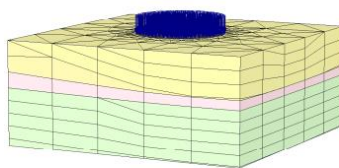


Figura 4 – Perfil estratigráfico do terreno. Camadas amarela e magenta representam o substrato mais resistente. A camada verde representa a camada de argila mole/média. Fonte: Relatório Técnico VIBRA Energia

## 4 Metodologia

A metodologia apresentada neste trabalho consistiu em avaliar o perfil geotécnico em uma bacia de tanques de uma grande distribuidora de combustíveis no porto de Suape, composto por 4 tanques em operação e 2 atualmente em fase de execução das fundações. Todos os equipamentos do projeto foram executados em fundação direta (anel tipo API). Devido a característica do terreno, após dois anos em operação foi executado levantamento topográfico conforme indicado na API 653 (API, 2018) ao longo do perímetro do equipamento para verificação das elevações. Com os dados das elevações, primeiramente, foi estabelecida a curva cossenoidal prevista na norma para verificação da correlação e possível utilização da expressão proposta por Marr et al (1982). Caso o grau de correlação não seja suficiente será utilizada a equação proposta por Andreani e Carr (2007) para verificação da conformidade dos recalques diferenciais.

## 5 Resultados e conclusões

O equipamento em estudo é responsável pela armazenagem de 9.311 m<sup>3</sup> de armazenamento de gasolina, neste trabalho indicado o TAG TQ-24 da unidade operacional. O diâmetro do equipamento é de 20,13m e altura de 12,20m. O tempo em operação do equipamento é de aproximadamente 3 anos. Cabe ressaltar que não estão sendo comparadas as leituras do teste

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



hidrostático e sim a última medição topográfica para verificação dos recalques diferenciais no equipamento. A tabela 1 evidencia as leituras topográficas.

Tabela 1 – Medição das elevações do anel periférico do TQ-24

Levantamento topográfico TQ-24	
Ponto	Elevação (m)
P1 (0°)	8,2842
P2 (45°)	8,2938
P3 (90°)	8,2949
P4 (135°)	8,3011
P5 (180°)	8,3019
P6 (225°)	8,3048
P7 (270°)	8,2948
P8 (315°)	8,2984

Utilizando a equação 5 é possível calcular o recalque máximo entre pontos subsequentes, resultando em 39 mm. Na tabela 2, os dados necessários para o cálculo são compilados para a plotagem das curvas (prevista e medida). Na figura 5, as curvas são sobrepostas indicando o nível de correlação.

Tabela 2 – Dados para plotagem das curvas de projeção prevista e medida

Curva API 653 - TQ 24						
N	Elev	$\phi_i$	Elev	U <sub>i</sub>	S <sub>i</sub>	S <sub>adm</sub>
	Med		curva coss.			(mm)
	[m]	[°]	[m]	[mm]	[mm]	<b>39,586</b>
1	8,284	0	8,287	-2,975	-5,104	Atende
2	8,294	45	8,290	4,259	6,028	Atende
3	8,295	90	8,295	-0,564	-2,506	Atende
4	8,301	135	8,301	-0,374	0,983	Atende
5	8,302	180	8,304	-2,150	-3,521	Atende
6	8,305	225	8,302	3,116	4,672	Atende
7	8,295	270	8,296	-0,961	-2,519	Atende
8	8,289	315	8,290	0,000	1,968	Atende

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





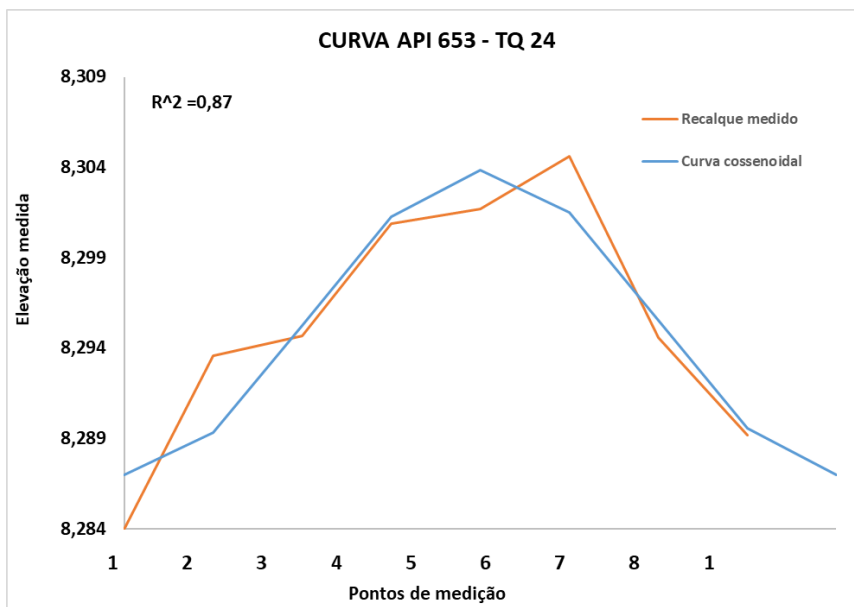


Figura 5 – Curva cossenoidal (prevista) x curva de recalque medido fora do plano (elevação em metros). Fonte: O Autor

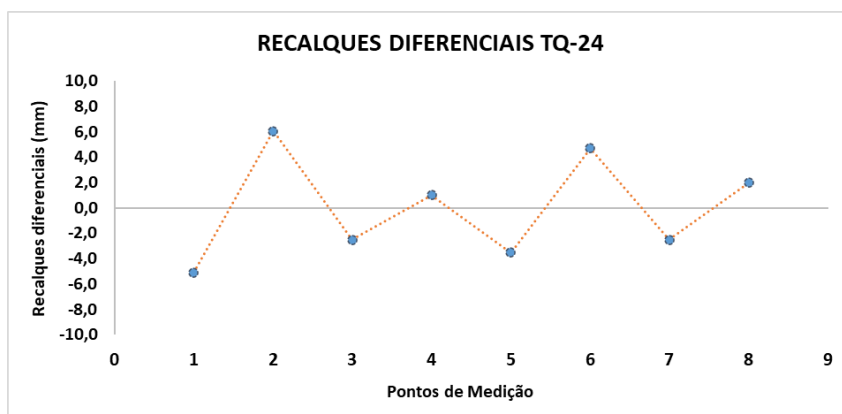


Figura 6 – Recalque diferencial  $S_i$  (mm) ao longo do perímetro do tanque 24. Fonte: O Autor

Apesar do atendimento ao recalque diferencial, a correlação  $R^2$  ficou um pouco inferior a 0,9, conforme recomenda a API 653 (API, 2018). Com isso, para a admissibilidade de recalques admissíveis entre pontos subsequentes a norma indica a utilização da equação 6 proposta por Andreani e Carr (2007), resultando em deformações admissíveis máximas entre pontos subsequentes de 29,87mm. Na figura 6 é possível observar a evolução das deformações ao longo do perímetro do equipamento.

Conforme exposto, é possível atestar que o equipamento opera com segurança em relação aos recalques diferenciais ao longo do perímetro. Estes dados corroboram até o momento a

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



decisão de projeto adotada, embora o acompanhamento deva ser constante. Diante disso, não existe evidência para imputar aos recalques diferenciais algum esforço adicional, fora do previsto em projeto, responsáveis pela interrupção do equipamento ou dano de algum componente estrutural.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2022

American Petroleum Institute. API 650: Welded Tanks for Oil Storage. Washington, DC. 2018

American Petroleum Institute. API 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Washington, DC. 2018

Andreani, J., Carr, N. Final Report on the study of Out-of-Plane Tank Settlement. API SCASST, 2207

D’Orazio; Duncan JM. Differential Settlements in Steel Tanks. Journal of getechnical engineering. Division ASCE 1987;

Fellenius, B.H., Ochoa, M. Large Liquid Storage Tanks on Piled Foundations. Proceedings of the international Conference on Foundation and Soft Ground Engineering. HoChiMinh, pp. 3-17, 2013.

Marr A, Ramos JA, Lambe TW. Criteria for settlement of tanks. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE 1982;

Thusyanthan, I.; Enriquez, H.; Design guidance for evaluating storage tank settlements and acceptable tank settlement criteria. Proceedings of the 20<sup>th</sup> Internacional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney. 2022.

Zanjani, A.A.; Fakher, A.; Sadatieh, S.R.; A numerical study on effect of uneven settlements of oil storage tank. 2<sup>o</sup> Internacional Conference on New Developments in Soil Mechanichs on Geotechnical Engineering, 2009.

Weber, F.P.; Ruver, C.A.; Avaliação diagnóstica preliminar de recalque em tanque de armazenamento de derivados de petróleo. XI Seminário de engenharia geotécnica do Rio Grande do Sul, GEORS, 2022.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

