

Efeitos estruturais do recalque diferencial da fundação em tanques verticais de armazenamento

Structural effects of the planar settlement in vertical storage tanks

DOI:10.34117/bjdv7n7-275

Recebimento dos originais: 12/06/2021

Aceitação para publicação: 12/07/2021

José Roberto Rasi

Engenheiro Civil pela UNESP

Mestre em Estruturas e Construção Civil pela UFSCAR

Instituição: Tamoyo Tupã Ind. e Com. de Artefatos de Cimento Ltda.

Endereço: Rod. Comandante João Ribeiro de Barros – Km. 528, Tupã – SP,

E-mail: jroberto.rasi@gmail.com

Roberto Bernardo

Engenheiro Mecânico pela UNESP

Mestre em Agronegócio e Desenvolvimento pela UNESP

Doutor em Engenharia de Produção pela UFSCAR

Instituição: Faculdades FADAP

Endereço: Rua Mandaguaris, 1010 – Tupã / SP

E-mail: betobernardo@uol.com.br

Jorge Augusto Serafim

Engenheiro Civil pela UFPR

Mestre em Estruturas e Construção Civil pela UFSCAR

Instituição: Solver Engenharia, Projetos e Consultoria Ltda

Endereço: R. Antônio Costa, 685 - Vista Alegre, Curitiba – PR

E-mail: jaserafim@solver.eng.br

Wellington Mazer

Engenheiro Civil pela UFPR

Mestre em Engenharia Hidráulica pela UFPR

Doutor em Ciência pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Endereço: Av. Sete de Setembro, 3.165 - 80230-901 - Curitiba PR.

E-mail: mazer.utfpr@gmail.com

Donizete Caunetto

Engenheiro Civil pela UNIMAR – Universidade de Marília

Especialista em Engenharia de Estruturas

Instituição: Suportte Engenharia Ltda

Endereço: Rua Chavantes, 394, Tupã – SP,

E-mail: donizete@suportteengenharia.com.br

Jonathan Figueiredo Broetto

Engenheiro Civil pela UNIMAR – Universidade de Marília

Instituição: Dipawa Ltda

Endereço: Rod. Comandante João Ribeiro de Barros – Trevo principal s/n, Tupã – SP,
E-mail: engenharia@dipawa.com.br

RESUMO

Tanques verticais de aço soldado para o armazenamento de líquidos se utilizam de diferentes tipos de fundações. Para esse tipo de tanque, algumas vezes são usadas fundações em camadas de solo e com maior frequência, fundações de concreto armado em forma de anel com substrato compactado de cascalho e areia dentro desses anéis e laje sobre estacas de concreto. Em operações de longo prazo, o solo sob o fundo de aço do tanque passa por um processo de deformações permanentes, na forma de recalque vertical não uniforme. Este recalque pode ter diferentes causas, mas em todos eles, afeta o estado de tensão e deformação nas placas de fundo e nas bordas inferiores das virolas do casco. O principal efeito estrutural causado pelo recalque da fundação é o tombamento causado pelo peso do líquido do tanque que se inclina sobre o costado. Este trabalho tem como objetivo avaliar por meio de análise numérica, usando o Método de Elementos Finitos, o comportamento estrutural de tanques verticais de aço soldado, cuja base sofreu recalque diferencial e comparar com os limites de verticalidade previstos em diversas normas técnicas apropriadas, verificando a segurança estrutural específica para cada norma em função da inclinação máxima permitida.

Palavras-Chave: Tanque de Aço Vertical, Recalque Diferencial, Inclinação.

ABSTRAT

Vertical welded steel tanks for liquid storage use different types of foundations. In such tanks, foundations in soil layers are sometimes used, and much more often, reinforced concrete foundations in the form of a ring with a compacted substrate of gravel and sand inside these rings and slabs on concrete piles. During the long-term operation of the tanks, the soil under the steel bottom of the tank undergoes a permanent deformation process in the form of non-uniform vertical settlement. This settlement can have different causes, but in each case, it affects the state of stress and deformation on the bottom plates and the lower edges of the shell ferrules. The main structural effect of foundation settlement is the toppling effect caused by the weight of the liquid from the tilting tank on the side. This paper evaluates the structural behavior of welded steel vertical tanks, whose base has undergone differential settlement compares with the plumb limits provided for several technical standards and checking the safety of structure for each standard as a function of the maximum allowable inclination.

Keywords: Vertical Steel Tank, Planar Settlement, Tilt of Tank.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Tanques metálicos construídos acima do solo usados para armazenamento de produtos, vem sendo utilizados em diversas aplicações, como nas indústrias, refinarias de petróleo, plantas petroquímicas, processamento de água entre outras. Esses tipos de Tanques são conhecidos por serem construídos a partir de uma estrutura flexível de

paredes finas, capazes de suportar grandes cargas diferenciais (WISNUGROHO; SUTOMO, 2018)

Os tanques de armazenamento metálicos normalmente são construídos com chapas de aço carbono calandradas (curvas), conhecidas como ‘virolas’, cujas dimensões dependem da indústria siderúrgica fabricante. Essas chapas são sequencialmente soldadas para formar o corpo cilíndrico do tanque. Em consequência da espessura das chapas, consideradas finas, esses tanques estão sujeitos a colapso estrutural por flambagem e frequentemente esta tipologia de colapso são conhecidas por flambagem elástica (GODOY, 2016).

Os tanques verticais formados a partir de chapas de aço carbono em formato cilíndricos, utilizados para armazenamento de líquidos, são montados nos mais diversos tipos de fundações. Esses tanques, algumas vezes se utilizam de fundações em camadas de solo e muito mais frequentemente, fundações de concreto armado em forma de anel com substrato compactado de cascalho e areia dentro desses anéis e laje sobre estacas de concreto. Durante operações de longo prazo, o solo (fundação) em contato com o fundo de aço do tanque, passa por um processo de deformação permanente na forma de recalque vertical não uniforme. Este recalque pode ter diferentes causas, mas em todos eles, afeta o estado de tensão e de deformação nas placas de fundo e nas bordas inferiores das virolas do casco (HOTALLA; IGNATOWICZ, 2019).

O principal efeito estrutural do recalque da fundação é o efeito de tombamento causado pelo peso do líquido do tanque inclinado sobre o costado. O efeito de capotamento é de natureza semelhante àquela oriunda de carregamento lateral devido ao vento (PALMER, 1994).

Esse artigo tem por objetivo principal analisar o comportamento estrutural de tanques metálicos cilíndricos de armazenamento de água, cuja base sofreu recalque diferencial e comparar com os limites de verticalidade previstos em diversas normas técnicas pertinentes, verificando a segurança estrutural específica para cada norma em função da inclinação máxima permitida e as tensões admissíveis do aço empregado. Para isso, se utilizará da análise numérica, por meio do Método de Elementos Finitos.

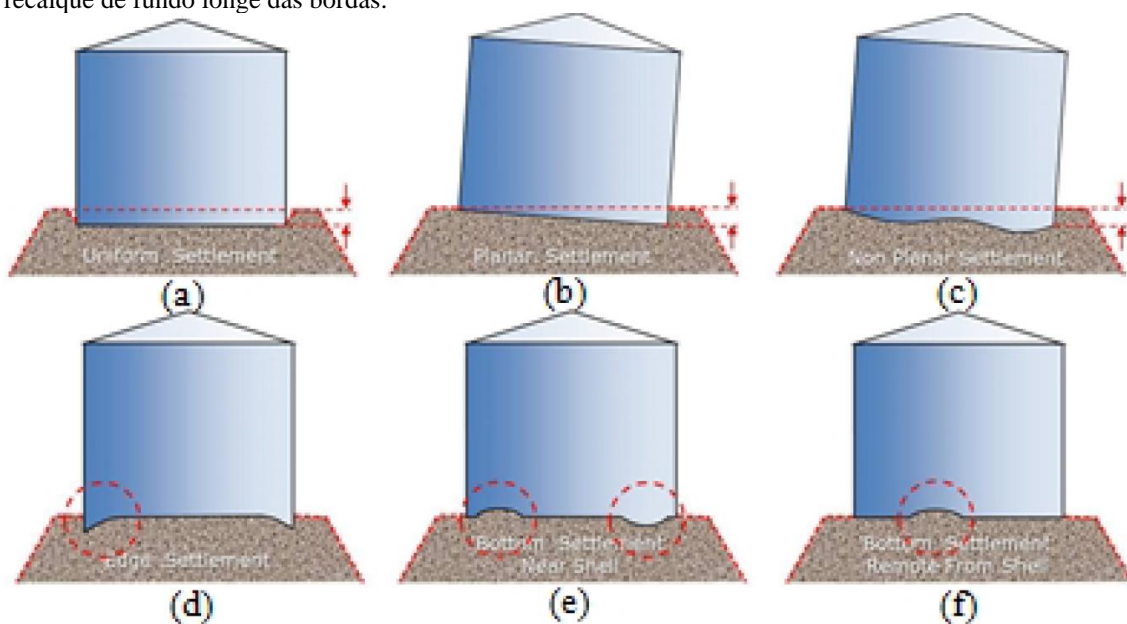
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O recalque é a principal causa de deformação da fundação do tanque de armazenamento de líquido. O recalque excessivo pode afetar a integridade estrutural do tanque de armazenamento e trazer risco potencial significativo. Para garantir a segurança

durante a operação dos tanques de armazenamento de líquido, é necessário realizar inspeção e manutenção regulares (SHI et al, 2017).

De acordo com Wisnugroho e Sutomo (2018), o recalque é um efeito da base que ocorre em tanques construídos novos ou tanques existentes. API 653 dividiu os recalques em dois tipos. O recalque imediato geralmente ocorre na base do novo tanque como efeito da compactação da fundação durante o teste hidrostático. O recalque de consolidação ocorre na base do tanque existente, e é causado por diferenças de propriedades do solo, podendo ter duração de até anos. Os principais tipos de recalques de acordo com API 653 (2014) são: recalque uniforme, recalque planar (diferencial), recalque não planar, recalque de borda, recalque de fundo perto das virolas e recalque de fundo remoto da casca, como representados na Figura 1.

Figura 1 – Recalques em tanques verticais cilíndricos (API 653): (a) recalque uniforme, (b) recalque diferencial, (c) recalque não planar, (d) recalque de borda, (e) recalque de fundo perto das virolas e (f) recalque de fundo longe das bordas.



Fonte: Wisnugroho e Sutomo, 2018

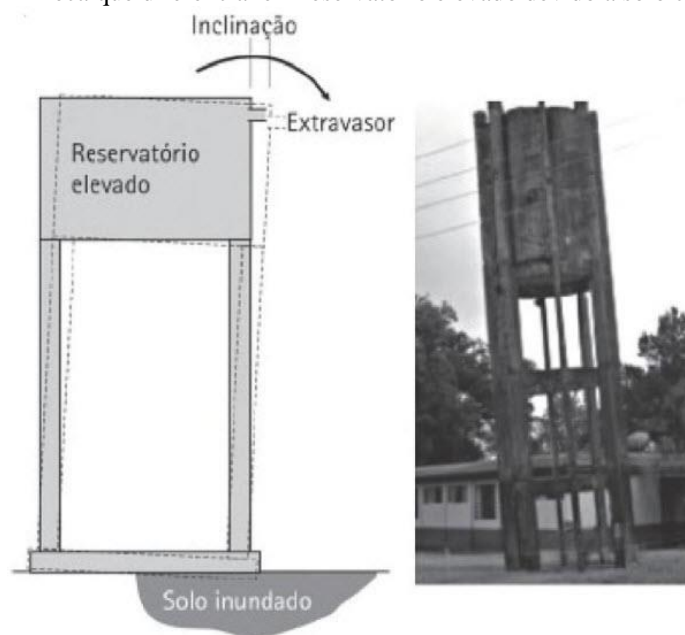
Os recalques normalmente dependem das tensões aplicadas, das condições de umidade e das propriedades geotécnicas de cada tipo de solo. Esses recalques são classificados como normais e tendem a se estabilizar ou cessar após um período de tempo.

Segundo Cintra (1998), existe um recalque que é chamado de colapso e esse solo onde ocorre esse fenômeno é classificado como colapsível. Gutierrez et al (2004), afirma que esse tipo de solo é normalmente não saturado, podendo causar uma espécie de colapso em sua estrutura, caracterizado por um recalque suplementar, repentino e de grandes proporções, após aumento de umidade.

Para o correto dimensionamento de fundação com estacas em solos colapsíveis, Rasi et al (2019) recomenda em majorar o carregamento com fator de segurança adicional, que resultaria em maiores comprimentos de estacas, embutindo parte significativa do fuste em estrato não colapsível.

A Figura 2 mostra um caso em que um reservatório elevado com fundações diretas, construído em solo colapsível, na cidade de Carazinho (RS), apresentou um adernamento lateral significativo, devido ao extravasamento de água por longo período.

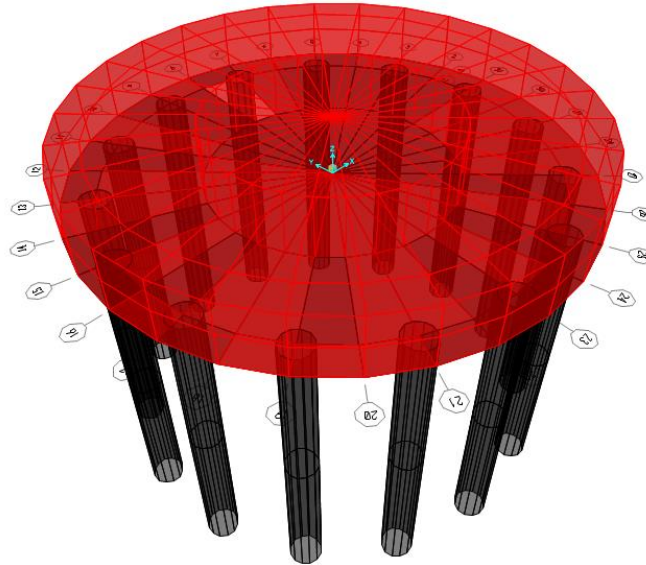
Figura 2 – Recalque diferencial em reservatório elevado devido a solo colapsível



Fonte: Milititsky et al, 2008

Rasi et al (2021a) afirmam que para as bases de tanques metálicos, o projetista deve levar em consideração alguns parâmetros fundamentais, como a altura do bloco e conseqüentemente, aumento da rigidez, de modo que o comportamento estrutural da base do reservatório seja alterado, com significativas diferenças dos valores das reações nas estacas e dos recalques. Na Figura 3 é mostrado a modelação numérica tridimensional (3D) de uma base sobre estacas de um reservatório vertical soldado, realizado pelo software SAP 2000.

Figura 3 – Bloco circular sobre estacas para tanque vertical

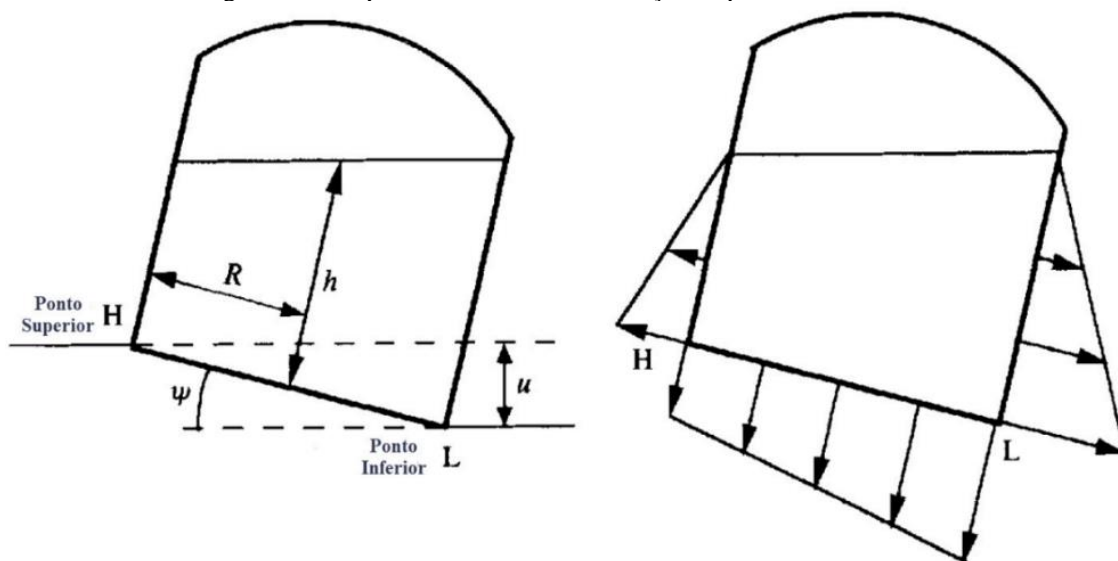


Fonte: Rasi et al (2021a)

De acordo com Palmer (1994), o recalque diferencial em torno do anel da fundação abaixo do costado de um tanque de armazenamento cilíndrico vertical é particularmente uma forma severa de recalque, podendo causar distorção e tensões excessiva no costado do tanque. O principal efeito estrutural da inclinação da fundação é o tombamento, que é o efeito causado pelo peso do conteúdo líquido do tanque no costado do tanque. Esse efeito de capotamento é semelhante ao que ocorre na natureza experimentada por um tanque sujeito a movimento lateral do solo ou carregamento do vento (Figura 4). A inclinação resulta em um momento de capotamento e uma força de cisalhamento e as tensões causadas são consideradas separadamente baixo, mas em geral, a virola inferior mais baixa do costado apresenta os valores máximos de momento de capotamento e força de cisalhamento.

Alguns tanques de armazenamento, particularmente tanques de teto fixo, são ancorados em suas fundações para evitar a elevação do reservatório do tanque quando sujeito a cargas verticais causadas pelo vento ou cargas sísmicas. Palmer (1994) afirma ainda que a ancoragem aumenta efetivamente a rigidez de um reservatório do tanque, ajudando assim a reter a circularidade das virolas. As tensões causadas pela inclinação de um tanque ancorado são consideradas baixo.

Figura 4 – Tanque inclinado com distribuição da pressão hidrostática



Fonte: Palmer, 1994

Tanques de água elevados, estão sujeitos a vários tipos de carregamento, como seu próprio peso, pressão hidrostática do líquido armazenado, cargas de vento e em alguns casos cargas sísmicas (ELTALY et al., 2014).

Devido à falta de norma específica para tratar desse assunto, os projetistas brasileiros, vem utilizando para dimensionamento estrutural dos reservatórios metálicos em aço destinados à reservação de água, as normas API 650 e NBR 7821 (RASI et al, 2021b).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste artigo, foram analisados cinco modelos por meio do método dos elementos finitos. Os modelos analisados não possuem tetos e não foram ancorados. As medidas dos diâmetros, das alturas e as proporções entre elas (H/D) estão descritas na Tabela 1. A simulação estática foi feita com a aplicação do peso próprio do tanque, da carga hidrostática devido ao fluido e da inclinação do recalque diferencial da base do tanque.

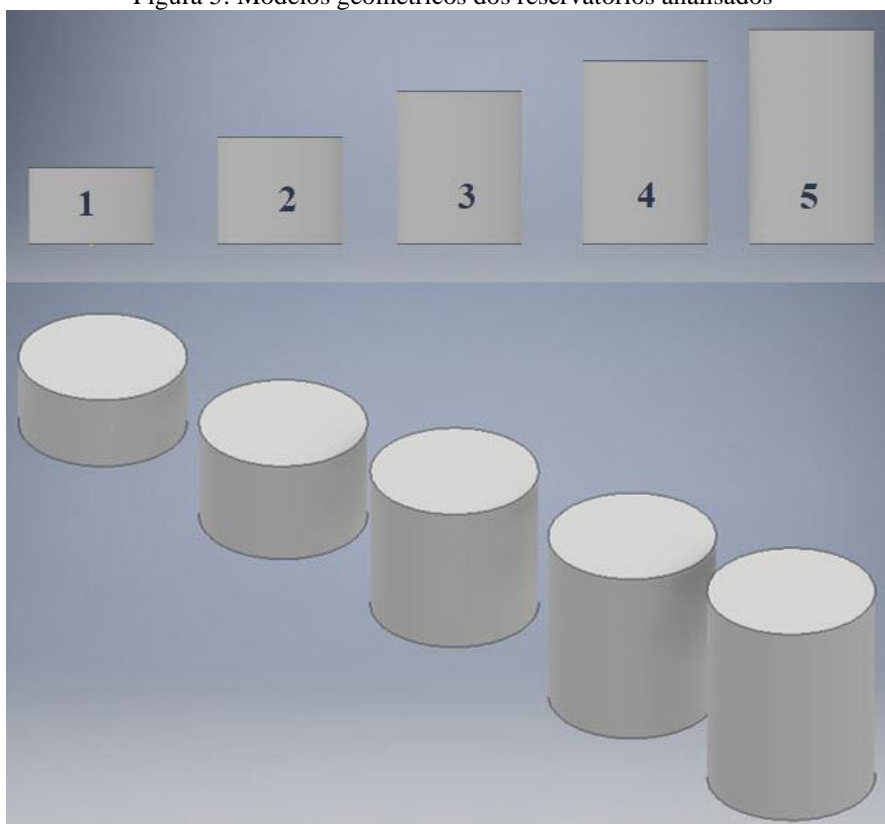
Tabela 1 – Dimensões dos tanques analisados

Tanque nº.	1	2	3	4	5
Volume (m³)	1.000,00	1.500,00	2.250,00	2.500,00	3.000,00
D (m)	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84
H (m)	7,50	10,50	15,00	18,00	21,00
H/D	0,54	0,76	1,08	1,30	1,52

Fonte: Os autores

Os modelos geométricos dos 5 reservatórios descritos na Tabela 1 são mostradas na Figura 5.

Figura 5: Modelos geométricos dos reservatórios analisados



Fonte: Os autores

Os tanques metálicos verticais deste trabalho, sem teto, circular e fundo plano, foram projetados de acordo com a norma API 650 – Método de um pé (1FM).

- Cilindro vertical de aço carbono, soldado, consistindo de várias virolas de diferentes espessuras. A variação de espessura reflete a variação imposta pelo carregamento hidrostático o qual o máximo carregamento está na base do tanque e reduz a zero na cota do topo da superfície do líquido
- Anel de contraventamento superior de enrijecimento localizado no topo do costado
- As espessuras das virolas (t) do costado são determinadas a partir de API 650, pelo método de um pé (1FM), de baixo para cima, assumindo uma tensão admissível do aço de 136,00 MPa (Aço ASTM A36, aplicado eficiência de soldagem de 85%), e densidade do líquido $\gamma = 10,0 \text{ kN/m}^3$ e sobre espessura de corrosão admitida de zero.

A espessuras das virolas dos tanques analisados é a espessura recomendada pela API 650, adotada a espessura comercial imediatamente superior à espessura determinada

pela norma. As dimensões dos tanques e espessura inicial das virolas que compõem o casco são mostradas na Tabela 2 e na Figura 6.

Tabela 2 – Dimensões e espessuras do costado dos tanques

Descrição dos tanques															
Cap. (m³)	D (m)	H (m)	D/H	Espessura das virolas (mm)		Cap. (m³)	D (m)	H (m)	D/H	Espessura das virolas (mm)					
1.000	13,84	7,50	0,54	Virola 1	4,75	2.500	13,84	18,00	1,30	Virola 1	9,53				
				Virola 2	4,75					Virola 2	7,95				
				Virola 3	4,75					Virola 3	7,95				
				Virola 4	4,75					Virola 4	6,35				
				Virola 5	4,75					Virola 5	6,35				
1.500	13,84	10,50	0,76	Virola 1	6,35					Virola 6	4,75				
				Virola 2	4,75					Virola 7	4,75				
				Virola 3	4,75					Virola 8	4,75				
				Virola 4	4,75					Virola 9	4,75				
				Virola 5	4,75					Virola 10	4,75				
				Virola 6	4,75					Virola 11	4,75				
				Virola 7	4,75					Virola 12	4,75				
2.250	13,84	15,00	1,08	Virola 1	7,95					3.000	13,84	21,00	1,52	Virola 1	12,70
				Virola 2	7,95									Virola 2	9,53
				Virola 3	6,35									Virola 3	9,53
				Virola 4	6,35	Virola 4	7,95								
				Virola 5	4,75	Virola 5	7,95								
				Virola 6	4,75	Virola 6	6,35								
				Virola 7	4,75	Virola 7	6,35								
				Virola 8	4,75	Virola 8	4,75								
				Virola 9	4,75	Virola 9	4,75								
				Virola 10	4,75	Virola 10	4,75								
														Virola 11	4,75
														Virola 12	4,75
														Virola 13	4,75
														Virola 14	4,75

Fonte: Os autores

Figura 6: Dimensões dos tanques e espessuras das virolas.



Fonte: Os autores

A Tabela 3 apresenta uma comparação de critérios permitidos para a falta de prumo máxima entre o topo e o fundo do costado (Verticalidade) de diferentes normas de tanques verticais soldados.

Tabela 3 – Critério permitidos para falta de prumo

Inclinação costado máximo	VERTICALIDADE			
	NORMA			
	API 653	AWWA D100	BS 2654	NBR 7821
	1/100	1/200	1/200	1/200

Fonte: Os autores

Foram analisados os cinco modelos de reservatórios considerando os seguintes critérios de verticalidade:

- Reservatório no prumo;
- Reservatório com 1/50 de falta de prumo entre o topo e o fundo do costado;
- Reservatório com 1/100 de falta de prumo entre o topo e o fundo do costado, e
- Reservatório com 1/200 de falta de prumo entre o topo e o fundo do costado.

De acordo com Palmer (1992) o limite arbitrário de 1/200 da inclinação máxima do costado de tanques atmosféricos estabelecido por várias normas técnicas, foram estimadas com base em considerações estéticas e sobre os efeitos nas conexões de tubulação e outras conexões. Afirma ainda que para tanques ancorados, os efeitos da inclinação nos chumbadores podem ser significativos, enquanto para tanques não ancorados, existe a possibilidade de levantamento das bordas do fundo junto ao costado.

A modelagem e análise numérica foram feitas usando um software comercial de análise e projeto estrutural Autocad Simulation Mechanical 2018. Cada virola do tanque foi modelado como elemento shell com as espessuras de projeto constante, com propriedades isotrópicas e com um plano médio posicionado centralmente. Na parte superior do tanque, há um anel vertical circular modelado com perfil L, rigidamente ligados aos elementos do costado. As dimensões dos elementos finitos são de 0,20 x 0,20 m (discretização). Para cada tipo de tanque foi criado um modelo de elemento finito em 3D.

As figuras abaixo mostram o reservatório inclinado, discretizado, e aplicação do carregamento de água e carregamento do vento (Figuras 7 e 8).

Figura 7 – Discretização

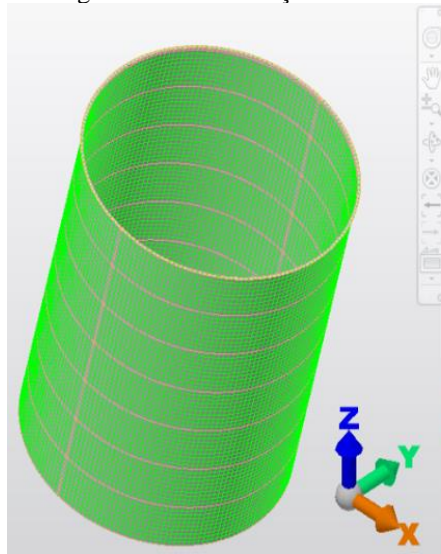
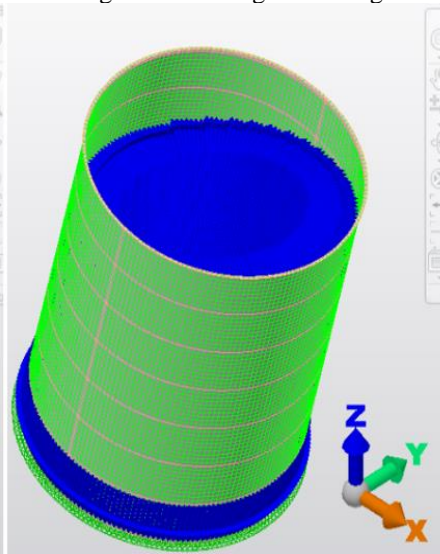


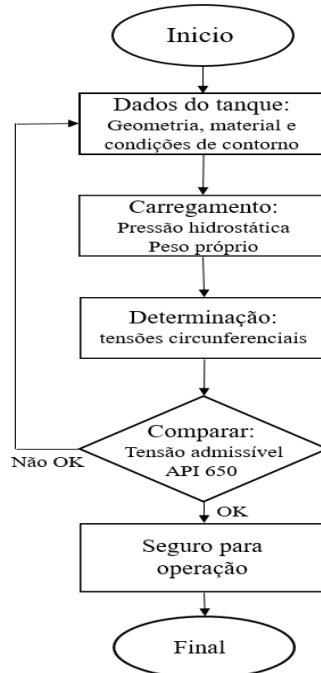
Figura 8 – Carregamento Água



Fonte: Os autores

O fluxograma das simulações via software Autodesk Simulation Mechanical 2018 é mostrado na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma da simulação dos tanques



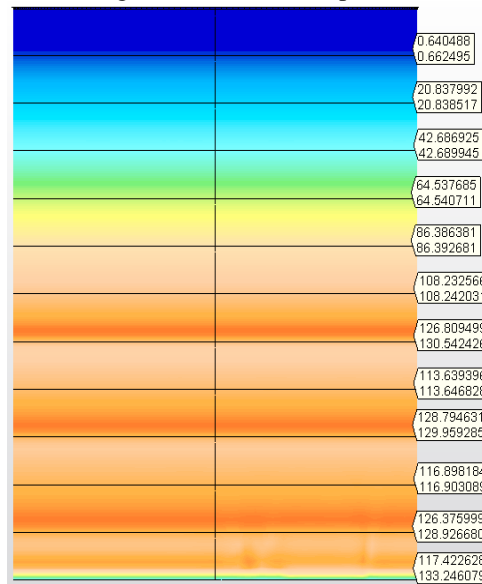
Fonte: Os autores

4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o dimensionamento da espessura do costado, inicialmente foi adotado a espessura devido à tensão circunferencial, calculada de acordo com a norma API 650, pelo método de um pé (1FM). Com as espessuras calculadas (3), foi feita análise numérica com a utilização do software Autodesk Simulation Mechanical 2018, para determinar as

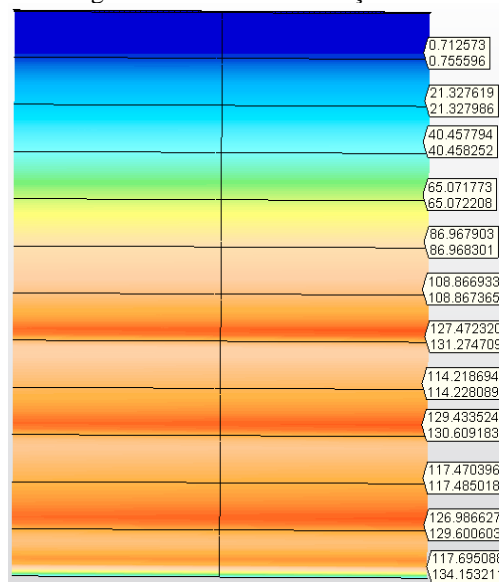
tensões exercidas nas virolas dos tanques analisados. Nas Figuras 10 a 13, a seguir, mostram os resultados das tensões para o tanque de 2.500,00 m³, nas condições de sem inclinação do costado, inclinação 1/200, inclinação 1/100 e inclinação 1/50.

Figura 10: Costado no prumo



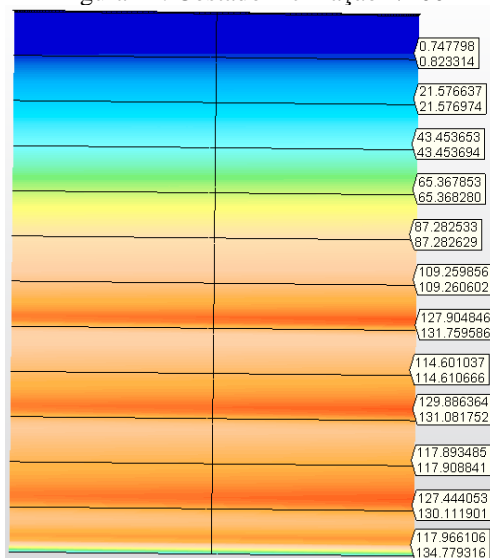
Fonte: Os autores

Figura 11: Costado inclinação 1/200



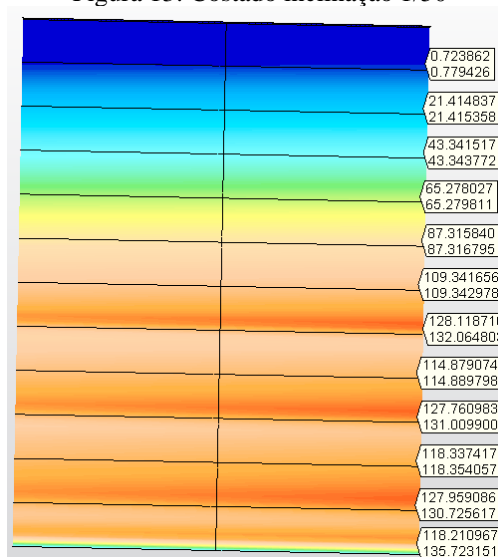
Fonte: Os autores

Figura 12: Costado inclinação 1/100



Fonte: Os autores

Figura 13: Costado inclinação 1/50



Fonte: Os autores

A Tabela 4 mostra o resumo das tensões Von Mises, em cada virola dos cinco tanques estudados dimensionados com diferentes inclinações do costado. A tensão admissível de acordo com a API 650 foi de $0,85 \times 160 \text{ MPa} = 136,00 \text{ MPa}$, considerando 85% de eficiência de solda.

Tabela 4 – Resultado da análise das tensões em cada tanque (MPa)

Descrição dos tanques					API 650								
					Tensão Von Mises (MPa) - $\sigma_{adm} = 136,00$								
					Primo		1/200		1/100		1/50		
Cap. (m ³)	D (m)	H (m)	D/H	Espessura das virolas (mm)	σ	Status	σ	Status	σ	Status	σ	Status	
1.000	13,84	7,50	0,54	Virola 1	4,75	103,29	OK	103,77	OK	103,99	OK	104,53	OK
				Virola 2	4,75	70,78	OK	71,08	OK	71,21	OK	71,57	OK
				Virola 3	4,75	48,94	OK	49,20	OK	49,31	OK	49,60	OK
				Virola 4	4,75	27,10	OK	27,33	OK	27,41	OK	27,66	OK
				Virola 5	4,75	4,85	OK	5,10	OK	5,17	OK	5,44	OK
1.500	13,84	10,50	0,76	Virola 1	6,35	118,86	OK	119,61	OK	119,91	OK	120,75	OK
				Virola 2	4,75	120,36	OK	121,07	OK	121,30	OK	112,12	OK
				Virola 3	4,75	98,09	OK	98,70	OK	98,88	OK	99,52	OK
				Virola 4	4,75	76,25	OK	76,81	OK	76,93	OK	77,47	OK
				Virola 5	4,75	54,39	OK	54,91	OK	55,01	OK	55,49	OK
				Virola 6	4,75	32,54	OK	33,04	OK	33,11	OK	33,53	OK
				Virola 7	4,75	10,40	OK	10,89	OK	10,96	OK	11,37	OK
2.250	13,84	15,00	1,08	Virola 1	7,95	119,61	OK	120,4	OK	121,08	OK	128,87	OK
				Virola 2	7,95	114,52	OK	115,11	OK	115,69	OK	117,33	OK
				Virola 3	6,35	128,11	OK	128,75	OK	129,38	OK	129,68	OK
				Virola 4	6,35	111,81	OK	112,40	OK	112,97	OK	11,59	OK
				Virola 5	4,75	128,09	OK	128,74	OK	129,55	OK	130,24	OK
				Virola 6	4,75	105,79	OK	106,39	OK	107,05	OK	107,59	OK
				Virola 7	4,75	83,95	OK	84,51	OK	85,10	OK	85,54	OK
				Virola 8	4,75	62,09	OK	62,62	OK	63,17	OK	63,67	OK
				Virola 9	4,75	40,24	OK	40,74	OK	41,26	OK	41,58	OK
				Virola 10	4,75	18,19	OK	18,58	OK	19,10	OK	19,39	OK
2.500	13,84	18,00	1,30	Virola 1	9,53	133,25	OK	134,15	OK	134,78	OK	135,72	OK
				Virola 2	7,95	128,93	OK	139,60	OK	130,11	OK	130,73	OK
				Virola 3	7,95	116,90	OK	117,48	OK	117,91	OK	118,35	OK
				Virola 4	6,35	129,96	OK	130,61	OK	131,08	OK	131,01	OK
				Virola 5	6,35	113,65	OK	114,28	OK	114,61	OK	114,89	OK
				Virola 6	4,75	130,54	OK	131,27	OK	131,76	OK	132,06	OK
				Virola 7	4,75	108,24	OK	108,87	OK	109,26	OK	109,34	OK
				Virola 8	4,75	86,39	OK	86,97	OK	87,28	OK	87,32	OK
				Virola 9	4,75	64,54	OK	65,07	OK	65,37	OK	65,28	OK
				Virola 10	4,75	42,69	OK	40,46	OK	43,45	OK	43,34	OK
				Virola 11	4,75	20,84	OK	21,33	OK	21,58	OK	21,42	OK
				Virola 12	4,75	0,66	OK	0,76	OK	0,82	OK	0,78	OK
3.000	13,84	21,00	1,52	Virola 1	12,70	119,78	OK	120,69	OK	121,22	OK	122,51	OK
				Virola 2	9,53	133,42	OK	134,13	OK	134,48	OK	135,56	OK
				Virola 3	9,53	121,68	OK	122,30	OK	122,59	OK	123,47	OK
				Virola 4	7,95	131,65	OK	132,34	OK	132,64	OK	134,65	OK
				Virola 5	7,95	119,73	OK	120,32	OK	120,53	OK	121,30	OK
				Virola 6	6,35	133,54	OK	134,22	OK	134,41	OK	135,21	OK
				Virola 7	6,35	117,18	OK	117,78	OK	117,91	OK	118,58	OK
				Virola 8	4,75	135,28	OK	136,03	OK	136,14	OK	136,91	OK
				Virola 9	4,75	112,96	OK	113,60	OK	113,65	OK	114,28	OK
				Virola 10	4,75	91,11	OK	91,70	OK	91,68	OK	92,19	OK
				Virola 11	4,75	69,26	OK	69,80	OK	69,74	OK	70,15	OK
				Virola 12	4,75	47,41	OK	47,92	OK	47,82	OK	48,17	OK
				Virola 13	4,75	25,56	OK	26,05	OK	25,94	OK	26,26	OK
				Virola 14	4,75	3,27	OK	3,76	OK	3,64	OK	3,95	OK

Fonte: Os autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo utilizou a abordagem comparativa para avaliar os efeitos de recalque diferencial sobre a base de tanque cilíndrico (formado por chapas de aço carbono) para armazenamento vertical de líquidos, posicionado acima do solo. Para tanto, utilizou-se as normas AWWA D100, BS 2654, API 653 e NBR 7821 e a análise numérica por meio do software Autodesk Simulation Mechanical, utilizando a aplicação dos recalques estabelecidos pelas normas e acrescentando mais um deslocamento de 1/50.

O modelo de comparação utilizado na análise, foi baseado nas tensões Von Mises das virolas que compõem os costados dos modelos, sendo que, mesmo utilizando o deslocamento máximo estabelecido pela norma API 653 (1/100), cujo valor é duas vezes

superior as das normas AWWA D100, BS 2654 e NBR 7821, o resultado obtido das tensões foram menores que as tensões admissíveis do aço ASTM A36, determinado pela API 650, que é muito conservadora e segura. Utilizando a inclinação dos costados no deslocamento de 1/50, as tensões circunferenciais dos costados foram inferiores à tensão admissível.

Para as inclinações dos costados superiores á da inclinação do deslocamento de 1/100, apenas a verificação das tensões circunferenciais não foi suficiente, sendo necessário, em estudos futuros, a determinação das tensões axiais comparando-as com as tensões admissíveis à flambagem (fornecida pela AWWA D100) e deslocamentos radiais das virolas.

Os resultados obtidos na análise corroboram com a afirmação de Palmer (1992), de que o limite imposto de 1/200 da inclinação máxima do costado de tanques atmosféricos (com base em várias normas técnicas), foram estimados com base em considerações estéticas e nos efeitos nas conexões de tubulação e outros acessórios, do que por não por exceder as tensões admissíveis dos aços empregados.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 7.821. (1983), Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. RJ.
- American Petroleum Institute, API 650. (2013), Welded Steel Tanks for Oil Storage, decima terceira edição, U.S.A.
- American Petroleum Institute, API 653. (2014), Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Appendix-B, U.S.A.
- American Water Works Association, AWWA D100-05. (2005), Welded Steel Tanks for Water Storage. Edição atualizada. U.S.A.
- Cintra, J. C. A. (1998) Fundações em Solos Colapsíveis. São Carlos: EESC/USP.
- Eltaly, B., Saudi, G., Ali, R., Kandil, K. (2014). Experimental and FE Modal Analysis for Elevated Steel Water Tanks, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume 03, Issue 01. Disponível em:<https://www.ijert.org/experimental-and-fe-modal-analysis-for-elevated-steel-water-tanks>
- Godoy L. A. (2016). Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies, Thin-Walled Structures, Vol. 103. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.026>
- Gutierrez, N. H. M.; Nobrega, M. T.; Vilar, O. M. (2004). Condicionantes estruturais do colapso de um solo argiloso tropical oriundo de basalto no norte do Paraná. In: Simpósio brasileiro de solos não saturados, Ed.5 – v.2, São Carlos. Disponível em:<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/anaisnsat/nsat-edicao5-vol2.pdf>
- Hotala, E. e Ignatowicz, R. (2019). Effect of settlement of foundations on the failure risk of the bottom of cylindrical steel vertical tanks for liquids. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol.41. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0017>
- Milititky, J., Consoli, N. C., Chnaid. (2005). Patologia da Fundações. 1ª Edição. Editora Oficina de Textos, SP.
- Palmer, S. C. (1992). Structural effects of foundation tilt on storage tanks, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1992_206_204_02
- Palmer, S. C. (1994). Stresses in storage tanks caused by differential settlement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1994_208_204_02
- Rasi, J. R.; Aguiar, M. F. P.; Verissimo, S. F.; Mendes, G. C. M.; Prado, S. C. (2019) Análise das causas de colapso do subsolo e soluções adotadas em fundações de edifício industrial. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9. Disponível:

https://www.researchgate.net/publication/344267256_Analise_das_Causas_de_Colapso_do_Subsolo_e_Solucoes_Adotadas_em_Fundacoes_de_Edificio_Industrial

Rasi, J. R., Serafim, J. A., Mazer, W., Caunetto, D., Broetto, J. F. (2021a). Comparativo de blocos de fundação sobre estacas para reservatório metálico vertical com variação de rigidez e considerando a interação solo-estrutura. *Brazilian Journal of Development*, v.7, n.3. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/24685/19718>

Rasi, J. R., Serafim, J. A., Mazer, W., Caunetto, D., Broetto, J. F. (2021b). Comparativo de blocos de fundação sobre estacas para reservatório metálico vertical com variação de rigidez e considerando a interação solo-estrutura. *Brazilian Journal of Development*, v.7, n.2. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/26355/20898>

Shi, L., Wang, X., Shai, J., Xu, K., Li, M. (2017). Oil storage tank settlement assessment based on standard and finite element analyses. *ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*. <https://doi.org/10.1115/PVP2017-65018>

Wisnugroho, J. e Sutono, G. (2018). Numerical Study of Oil Storage Tanks during Planar Settlement. *Applied Mechanics and Materials*, vol 878. <https://www.scientific.net/AMM.878.95>