

ALTERNATIVAS ESTRUTURAIS EM FUNDOS SUSPENSOS DE TANQUES METÁLICOS TUBULARES COM DUAS CÉLULAS PARA RESERVAÇÃO DE ÁGUA

José Roberto Rasi ⁽¹⁾

Engenheiro Op. Mecânico – FEI, Engenheiro Civil – UNESP, Especialista em Saneamento Ambiental – UGF, Mestre em Estruturas e Construção Civil – UFSCAR, Gerente de Projetos DIPAWA Ltda.

Jorge Augusto Serafim ⁽²⁾

Engenheiro Civil – UFPR, Especialista em Geotecnia – UNICID, Mestre em Estruturas e Construção Civil – UFSCAR., Diretor da Solver Engenharia, Projetos e Consultoria Ltda.

Wellington Mazer ⁽³⁾

Engenheiro Civil – UFPR, Especialista em Estruturas – UFPR, Mestre em Engenharia Hidráulica – UFPR., Doutor em Ciência – ITA, Professor da UTFPR – Curitiba.

Donizete Caunetto ⁽⁴⁾

Engenheiro Civil – UNIMAR, Especialista em Engenharia de Estruturas – UNILINS, Diretor da Supporte Engenharia Ltda.

Jonathan Figueiredo Broetto ⁽⁵⁾

Engenheiro Civil – UNIMAR, Engenheiro projetista da DIPAWA Ltda.

Endereço⁽¹⁾: Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros – Trevo Principal, s/nº, CEP:17604-770 – Tupã / SP/ Brasil – Tel.: 14 3404 3844 – e-mail: jroberto.rasi@gmail.com

RESUMO

Com a crescente demanda por reservação de água devido a implantação de novos loteamentos e condomínios horizontais, que atendessem a necessidade da pressão dinâmica mínima de 100 kPa, os tanques passaram a ter divisões físicas internas (células verticais) cujo célula superior tenha a cota do fundo suspenso em uma altura que garantisse pressão manométrica necessária para atender a referida norma. Devido à falta de normas técnicas brasileiras específicas para armazenamento de água em reservatório metálico, tem se utilizado como parâmetro de dimensionamento para reservatórios metálicos com várias células verticais de armazenamento de água, a AWWA D100 na sua integralidade ou apenas parcialmente, principalmente em função dos esforços axiais nos costados (virolas) para determinação de tensões admissíveis à flambagem (*FL*). Este artigo aborda o problema da escolha do tipo mais adequado de fundo suspenso de tanques metálicos vertical e compara os resultados de cinco tipos diferentes de fundos, dimensionados de acordo com a norma AWWA D100-05. Dentro da tipologia dos 5 fundos analisados, o fundo mais econômico foi o esférico segmentado.

PALAVRAS-CHAVE: Tanque metálico vertical, Fundo suspenso, Norma AWWA D100.

INTRODUÇÃO

Este artigo aborda o problema da escolha do tipo mais adequado de fundo suspenso de tanques metálicos vertical e compara os resultados de cinco tipos diferentes de fundos, dimensionados de acordo com a norma AWWA D100-05.

Com a implantação de novos loteamentos e condomínios horizontais em razão dos incentivos da política habitacional governamental, principalmente pelo programa habitacional do Ministério das Cidades, Programa Minha Casa Minha Vida (Pereira, 2017), que provocou um grande aumento de demanda de tanques de armazenamento de água potável, na sua grande maioria aéreos (*above ground*), cilíndricos e com diâmetro e alturas variáveis, denominado de castelo d'água.

Devido a necessidade de pressão dinâmica mínima em rede de abastecimento público, que de acordo com a NBR 12.218/1994, deve ser de 100 kPa (10,20 m.c.a.), os tanques passaram a ter divisões físicas internas (células verticais) cujo célula superior tenha a cota do fundo suspenso em uma altura que garantisse pressão manométrica necessária para atender a referida norma, uma vez que normalmente as cotas dos terrenos não oferecem condições para que o tanque seja apoiado.

De acordo com TREES (1911), os fundos dos tanques metálicos suspensos podem ser de vários tipos, como plano, cônico e esférico ou esférico segmentado.

VISAL (2017) afirma que os tanques de armazenamento operam sem pressão (ou muito pouca), denominados tanques atmosféricos, diferenciando-os dos vasos de pressão. São geralmente de forma cilíndrica, perpendicular ao solo com fundo plano e um teto fixo ou flutuante.

NUNES (2013) afirma:

O projeto e a construção de tanques cilíndricos atmosféricos envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas técnicas específicas, materiais e mão de obra adequados para cada tipo de aplicação, pois falhas nesses equipamentos podem acarretar em grandes prejuízos financeiros ou, até mesmo, perdas de vidas.

Segundo GOMES (2017), as normas comumente utilizadas no Brasil para projetos e construções de tanques metálicos são a NBR 7821, a API 650 e a AWWA D100.

A NBR 7821/1983 – Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a norma regulamentadora americana API 650 – 2013 – *Welded Steel Tanks for Oil Storage* – da *American Petroleum Institute* (API), são específicas à reservação de petróleo e derivados (Rasi et al, 2020).

Já a norma AWWA D100-05 – *Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage*, da *American Water Works Associations*, tem como objetivo fornecer requisitos mínimos para o projeto, construção, inspeção e teste de novos tanques de aço carbono soldados para o armazenamento de água à pressão atmosférica.

Dentro dos requisitos de dimensionamentos, a AWWA D100 apresenta três métodos para determinação da tensão admissível de flambagem (*FL*) para seções cilíndricas, que permite a verificação da tensão máxima de compressão devido à carga axial e carga axial devido ao carregamento do vento aplicados nos costados.

Em razão de falta de normas técnicas brasileiras específicas para armazenamento de água em reservatório metálico, tem se utilizado como parâmetro de dimensionamento para reservatórios metálicos com várias células verticais de armazenamento de água, a AWWA D100 na sua integralidade ou apenas parcialmente, principalmente em função dos esforços axiais nos costados (virolas) para determinação de tensões admissíveis à flambagem (*FL*).

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste artigo é o dimensionamento de diversas tipologias de fundos suspensos da célula superior de tanque metálico vertical composto de duas células, dentro das recomendações da AWWA D100-05, utilizando o *software Autodesk Simulation Mechanical 2018*.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Determinar as tensões axiais nos costados da célula inferior do tanque metálico, resultante dos carregamentos axiais e laterais e compara-las à tensão admissível à flambagem de acordo com o que prescreve a *Sec. 3.4 – Column, Strut, and Shell Stability Formulas* da AWWA D100 - 05.
- Determinar os deslocamentos verticais dos fundos suspensos.
- Determinar do peso total dos fundos suspensos propostos, através da quantificação da área e espessuras das chapas dimensionadas e das estruturas de suporte.

METODOLOGIA

O tanque apresentado neste artigo é um reservatório metálico, para reservação de água, composto de duas células, com capacidade de 150,00 m³ cada (total de 300,00 m³), com cobertura metálica tipo cone (Figura 1), com cinco tipologias de fundos suspensos (Figuras 2A; 2B; 2C; 2D e 2E).

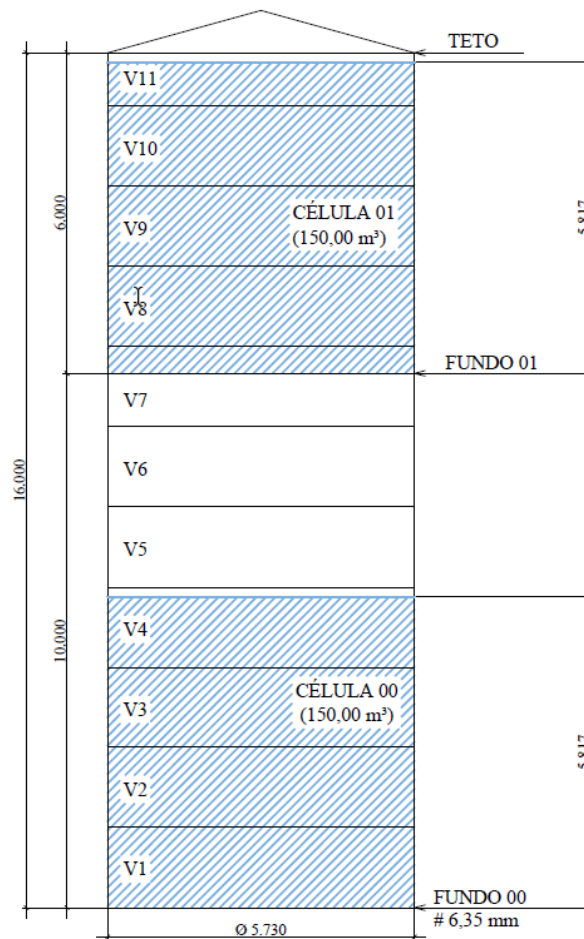


Figura 1: Tanque metálico de duas células com capacidade de 300,00 m³.

Tipologia dos 5 fundos suspensos propostos:

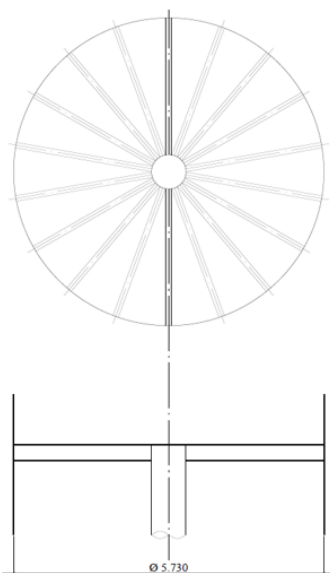


Fig.: 2A – Fundo plano vigas radiais e mastro

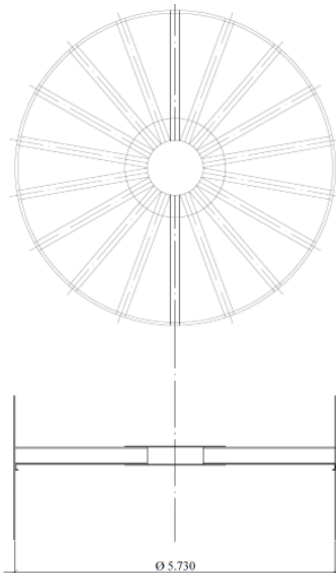


Fig.: 2B – Fundo plano vigas radiais sem mastro

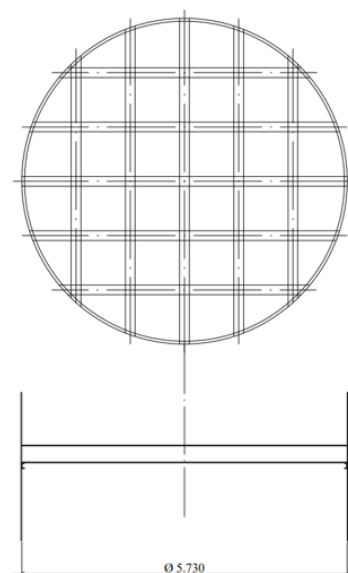


Fig.: 2C – Fundo plano vigas ortogonais sem mastro

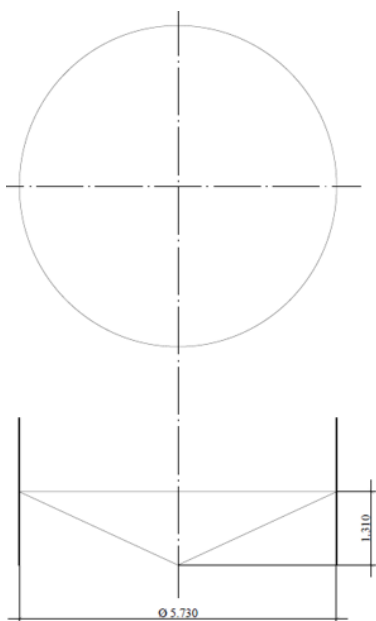


Fig.: 2D – Fundo cônico

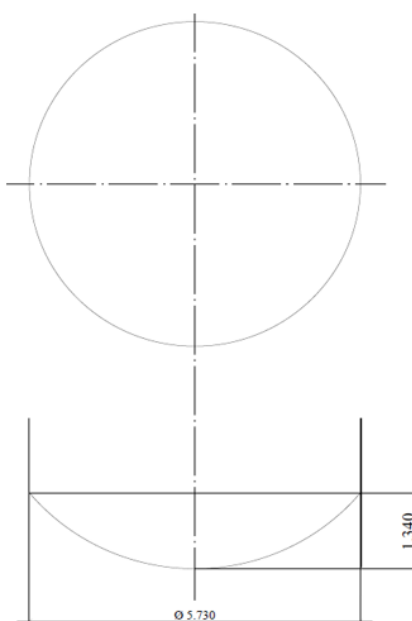


Fig.: 2E – Fundo esférico segmentado

As ações consideradas são as do vento, da água armazenada (ação hidrostática), da sobrecarga no teto e do peso próprio da estrutura (Figura 3A), lançadas no *software Autodesk Simulation Mechanical*.

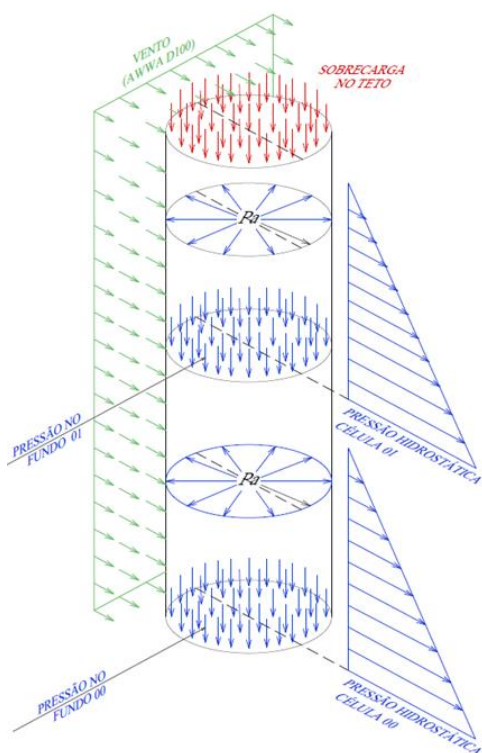


Figura 3A – Carregamentos

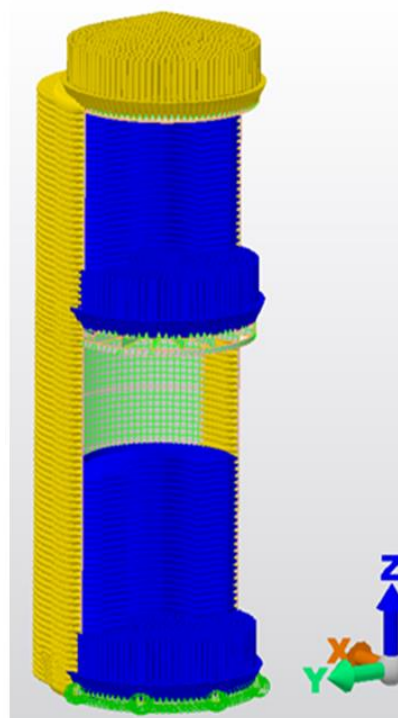


Figura 3B – Lançamento dos carregamentos no software

Segundo ANDRADE JUNIOR (1998), a ação do vento está calculada de acordo com a NBR 6123 – Forças devido ao Vento em Edificações (1987) e, como regra geral, assume-se que o vento pode atuar em qualquer

direção horizontal. Como a estrutura do tanque é assimétrica em relação ao eixo Z, perpendicular à direção do vento, considera-se que o vento pode incidir perpendicularmente a qualquer geratriz do tanque.

A componente estática de pressão do vento, Δ_p , que atua perpendicularmente sobre um elemento de área, é dado por:

$$\Delta_p = C_{pe} \cdot q \quad \text{equação (1)}$$

Os coeficientes de pressão externa C_{pe} são expressos para o tipo de corpo da estrutura, assumindo para a aplicação da AWWA D100-05 que $C_{pe} = C_f$ (Tabela 1).

Onde q é a pressão do vento em um ponto onde ocorre a estagnação do ar, obtida da expressão 2:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2, \quad \text{equação (2)}$$

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0, \quad \text{equação (3)}$$

V_k em m/s e q em N/m².

A Velocidade V_0 é chamada de velocidade básica, corresponde a uma rajada de 3 segundos, exercida em média uma vez em 50 anos, medida a 10 m acima do terreno, em local plano e aberto. A NBR 6123 (1987) apresenta as isoplethas básicas, em m/s. Para os nossos exemplos, adotou-se $V_0 = 40$ m/s.

O fator topográfico S_1 é utilizado para avaliação do relevo do terreno no entorno da edificação e adotado igual a 1,0 para os nossos exemplos.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação. O fator S_2 é obtida por intermédio da expressão 4:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{Z}{10}\right)^p \quad \text{equação (4)}$$

Em que: Z = altura acima do terreno, F_r = Fator de rajada do vento, b = parâmetro meteorológico, p = função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo. Para a altura do tanque de 16,0 m, rugosidade II, classe A, tem-se $S_2 = 1,05$.

O fator S_3 é um fator estatístico que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura, consideradas as instalações de reservatórios com baixo fator de ocupação humana (ANDADRE JUNIOR, 1998), foi utilizado o valor de 0,95.

De acordo com HAFFEZ *et al* (2011), assume-se que os tanques estão submetidos à pressão uniforme do vento (q), atuando ao longo do eixo Z, como mostrado nas figuras 3ª e 3B. A AWWA D100-05 recomenda a utilização de coeficiente de arrasto (C_f), de acordo com a forma da estrutura, conforme Tabela 1. Para tanque tubular com o formato cilíndrico, o C_f adotado é de 0,6.

Tabela 1 – Coeficiente de arrasto C_f

TIPO DE SUPERFICIE	C_f
Plana	1,00
Cilíndrica ou conica com ângulo < 15°	0,60
Curvado dupla ou conica com ângulo ≥ 15°	0,50

Temos:

$$V_k = 40 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 0,95 = 39,90 \text{ m/s}$$

$$q = 0,613 \cdot 39,90^2 = 975,90 \text{ N/m}^2 \text{ ou } 99,51 \text{ kgf/m}^2$$

$$\Delta_p = 0,6 \cdot 975,90 = 585,54 \text{ N/m}^2 \text{ ou } 58,71 \text{ kgf/m}^2.$$

A ação hidrostática gera efeitos que atuam nas direções radial e vertical e resultam em pressão lateral no costado e pressão no fundo do reservatório.

$$\text{Pressão lateral: } p = \gamma \cdot z \quad \text{equação (5)}$$

$$\text{Pressão no fundo: } q_f = \gamma \cdot H \quad \text{equação (6)}$$

A sobrecarga de projeto aplicada no teto, de acordo com o item 3.1.3.2 da AWWA D100-05, deverá ser 750 N/m² (15 lb/ft²).

O peso próprio da estrutura é lançado automaticamente pelo software Autodesk Simulation Mechanical 2018, considerado o peso específico dos aços utilizados no dimensionamento do tanque.

A espessuras das virolas sob pressão circunferencial devido a pressão hidráulico do tanque deve ser calculado de acordo com a equação 3-40 da Sec. 3.7 da AWWA D100-05 – *Cylindrical Shell Plates* (equação 7):

$$t = \frac{4,9 \cdot h_p \cdot D \cdot G}{s \cdot E} \quad \text{equação (7)}$$

Onde:

- t = espessura de projeto do casco (virola), em mm
- h_p = altura de líquido, em m
- D = diâmetro do tanque, em m
- S = Tensão admissível do aço, em Mpa
- E = Eficiência de soldagem
- G = Peso específico do líquido (para água = 1)

A espessura mínima do costado cilíndrico em contato com a água deverá estar em consonante com a Tabela 2 de acordo com a Sec. 3.2 da AWWA D100-05. Para o tanque de diâmetro nominal de 5,73 m, a espessura mínima prescrita é 4,76 mm.

Tabela 2 – Espessura mínima de costado cilíndrico em contato com água

DIMENSÕES DO TANQUE				ESPESSURA MÍNIMA DO COSTADO			
Diâmetro nominal D		Altura nominal H		Apoiado no solo Fundo plano		Outros tanque	
<i>ft</i>	m	<i>ft</i>	m	<i>in</i>	mm	<i>in</i>	mm
D ≤ 20	D ≤ 6,1	todas	todas	3/16"	4,75	1/4"	6,35
20 < D ≤ 50	6,1 < D ≤ 15,2	H ≤ 48	H ≤ 14,6	3/16"	4,75	1/4"	6,35
20 < D ≤ 50	6,1 < D ≤ 15,2	H > 48	H > 14,6	1/4"	6,35	1/4"	6,35
50 < D ≤ 120	15,2 < D ≤ 36,6	todas	todas	1/4"	6,35	1/4"	6,35
120 < D ≤ 200	36,6 < D ≤ 61,0	todas	todas	5/16"	7,94	5/16"	7,94
D > 200	D > 61,0	todas	todas	3/8"	9,52	3/8"	9,52

A AWWA D100-05 classifica os materiais estruturais a serem utilizados nos tanques em 3 classes, em função do limite de escoamento (F_y). A Tabela 3 mostra essa classificação.

Tabela 3 – Classe de material em função do F_y

Classe	F_y	
	<i>psi</i>	Mpa
0	$F_y < 27.000$	$F_y < 186,2$
1	$27.000 \leq F_y \leq 34.000$	$186,2 \leq F_y \leq 234,4$
2	$F_y > 34.000$	$F_y > 234,4$

O material empregado nos costados, fundos e teto é o ASTM A36, caracterizado por um módulo de elasticidade (E) igual a 205.000 Mpa, coeficiente de Poisson (μ) igual a 0,30, densidade (γ) de 77.000 N/mm³, tensão de escoamento $f_y = 250,00$ Mpa e tensão última $f_u = 400,00$ Mpa. O material empregado nas estruturas de sustentação dos fundos suspensos (vigas W e C) é o ASTM A572 (grau 50) com tensão de escoamento $f_y = 345,00$ Mpa e tensão última $f_u = 450,00$ Mpa. São classificados como material Classe 2.

A Tabela 4 mostra as principais tensões admissíveis prescrita pela AWWA D100-05, em função da classe dos materiais e aplicações nos reservatórios.

Tabela 4 – Tensões admissíveis em aplicações

TENSÃO DE TRAÇÃO ADMISSÍVEL			
Item	Classe	Máxima tensão admissível	
		psi	Mpa
Virolas de tanques	1 e 2	15.000	103,4
Aço estrutural, elementos de elevação, detalhes estruturais	0	12000	82,7
	1	15000	103,4
	2	18000	124,1
Aneis de tensão	1 e 2	15000	103,4
TENSÃO DE COMPRESSÃO ADMISSÍVEL			
Item	Classe	Máxima tensão admissível	
		psi	Mpa
Itens não estrutural	0	12.000	82,7
Virolas de tanques, aço estrutural, placas em aplicações estruturais	1	15.000	103,4
Virolas de tanques, aço estrutural, placas em aplicações estruturais	2	18.000	124,1

Para a verificação da estabilidade em função da flambagem do costado do tanque, a AWWA D100-05 prescreve 3 métodos de análise. Para este trabalho, utilizou-se o Método 1, que é um procedimento simplificado baseado nas técnicas de análise de membranas. Para materiais da Classe 2, a relação espessura / raio do reservatório a qual a flambagem muda do regime elástico para inelástico $(t/R)_c$ é 0,0025372. A tensão admissível para flambagem para material Classe 2 é dada pelas fórmulas seguintes:

Quando $0 \leq t/R \leq (t/R)_c$ significa que a flambagem ocorre no regime elástico e a tensão admissível para flambagem é dado pela equação 8:

$$F_L = 12.066 \cdot \left(\frac{t}{R}\right) \cdot \left[1 + 50.000 \cdot \left(\frac{t}{R}\right)^2\right] \quad \text{equação (8)}$$

Quando $(t/R)_c \leq t/R \leq 0,0125$ significa que a flambagem ocorre no regime inelástico e a tensão admissível para flambagem é dado pela equação 9:

$$F_L = 47,75 + 6109 \cdot \left(\frac{t}{R}\right) \quad \text{equação (9)}$$

Quando $t/R > 0,0125$, significa que a flambagem ocorre em regime plástico e a tensão admissível para flambagem é constante e vale:

$$F_L = 124,10 \text{ MPa (18.000 psi)}$$

A Tabela 5 – Valores de eficiência de soldagem é apresentada parcialmente da *Table 15 Weld design values – tank plate joints*, onde foram apresentados apenas os valores de soldagem continua. Para o trabalho em tela, foram considerado solda de duplo chanfro frontal com completo preenchimento.

Tabela 5 – Valores de eficiência de soldagem em %

Tipo de junção	EFICIÊNCIA DE SOLDAGEM [%]		
	Tensão		Compressão
Duplo chanfro frontal com completo preenchimento de solda	85		100
Duplo chanfro frontal com parcial preenchimento de solda e com porção sem solda localizada substancialmente no meio da parte fina da placa	$85 \cdot \frac{Z}{T}$		$85 \cdot \frac{Z}{T}$
Chanfro simples frontal com faixa de apoio adequado ou equivalente para assegurar penetração completa da solda	85		100
Junção de volta transversal com solda de filete em cada borda de junção	70		70

RESULTADOS

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 elemnetos. As dimensões dos elementos finitos são de 0,20 x 0,20 m (discretização). Para cada tipo de tanque, de acordo com a tipologia de cada fundo suspenso, foi criado um modelo de elemento finito em 3D (Figura 4).

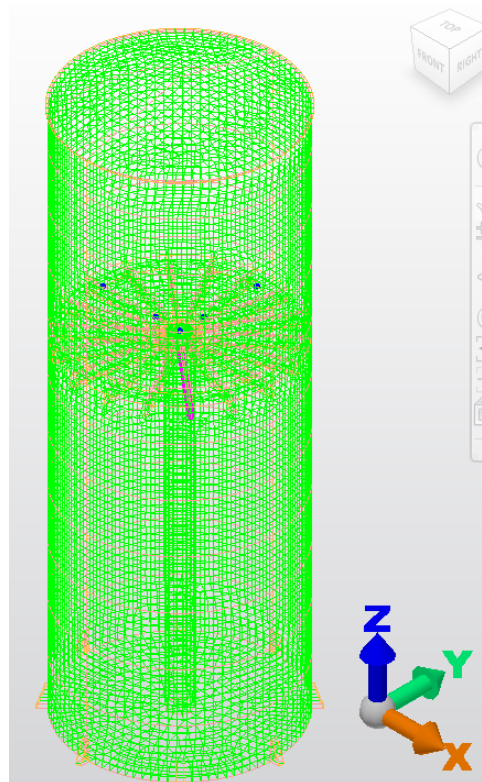


Figura 4: Tanque metálico discretizado

Partindo da espessura mínima de acordo com a Tabela 2, para o dimensionamento do costado foi verificado também a espessura devido à pressão circunferencial, com utilização da equação (7) e a espessura devido à flambagem, com a determinação da tensão admissível (FL), utilizando as equações (8) e (9) e as tensões axiais dos costados determinadas pelo *software Simulation Mechanical* e comparadas com as tensões admissíveis calculadas (FL). A espessura requerida de cada virola é a maior espessura dentro dos 3 critérios.

A Tabela 6 mostra detalhadamente as tensões Van Misse, Tensão circunferencial e tensão axial em cada virola dos 5 tanques estudados com diferentes tipologias de fundos suspensos.

Tabela 6 – Dimensionamento dos costados de acordo com a AWWA D100 - 05

	Chapa do costado	Virola (mm)	FL (Mpa)	VIGAS RADIAIS COM MASTRO			VIGAS RADIAIS SEM MASTRO			VIGAS ORTOGONAIS			FUNDO CÔNICO			FUNDO ESFÉRICO SEGMENTADO		
				Tensões (Mpa)			Tensões (Mpa)			Tensões (Mpa)			Tensões (Mpa)			Tensões (Mpa)		
				Van Misse	Circunf.	Axial	Van Misse	Circunf.	Axial	Van Misse	Circunf.	Axial	Van Misse	Circunf.	Axial	Van Misse	Circunf.	Axial
célula 2	11	4,75	21,8	3,7	3,5	0,6	3,7	3,6	0,6	3,9	3,5	0,7	4,2	3,8	0,6	3,8	3,5	0,7
	10	4,75	21,8	12,9	12,7	0,3	12,9	12,6	0,3	13,3	13,0	0,8	13,7	12,6	0,8	13,2	12,7	0,8
	9	4,75	21,8	21,9	21,8	0,4	21,9	22,1	0,4	22,5	22,0	0,9	23,4	22,9	1,4	22,4	21,8	1,1
	8	4,75	21,8	31,9	33,1	2,1	33,8	32,9	1,9	32,0	33,2	3,1	31,5	30,7	4,0	30,9	30,3	3,4
	7	6,35	33,0	8,8	0,8	8,3	14,4	0,7	14,2	14,9	0,8	14,6	15,9	0,7	16,4	15,7	0,7	16,1
célula 1	6	4,75	21,8	11,2	0,0	11,1	17,6	0,1	17,5	17,0	0,2	17,0	21,5	0,2	19,9	22,1	0,1	19,8
	5	4,75	21,8	11,5	0,1	11,2	17,7	0,3	17,6	17,4	0,4	17,3	22,2	0,4	21,2	22,8	0,3	21,1
	4	4,75	21,8	16,4	7,1	11,7	27,4	7,2	17,9	21,9	7,3	17,7	26,8	7,1	21,4	27,7	7,1	21,3
	3	6,35	21,8	18,1	12,5	8,6	32,5	17,1	14,0	30,6	16,4	14,1	35,8	16,7	18,3	36,7	16,6	18,2
	2	6,35	33,0	25,3	20,2	8,9	33,4	20,3	14,3	29,4	20,4	14,2	32,8	19,5	18,5	33,8	20,4	18,4
1	6,35	33,0	34,9	29,7	20,9	39,1	29,8	22,7	38,8	28,1	22,9	39,5	29,7	27,6	39,2	32,7	24,6	

As figuras 5A, 5B, 5C e 5D mostram os resultados das análises com as tensões Van Misse, tensões circunferenciais e tensões axiais em cada virola para o tanque com fundo da célula 2, com vigas W radiais e mastro central. Os valores obtidos alimentaram a tabela 6. Análise igual foram feitas nos outros 4 tanques que completam este trabalho.

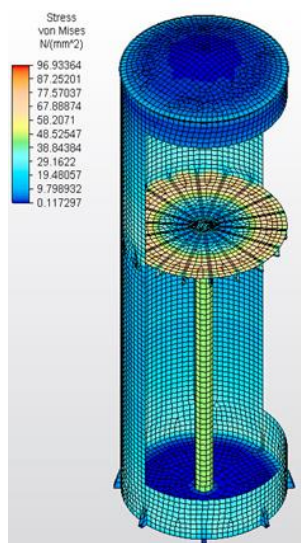


Fig. 5A: Tensões Van Misse em corte 3D

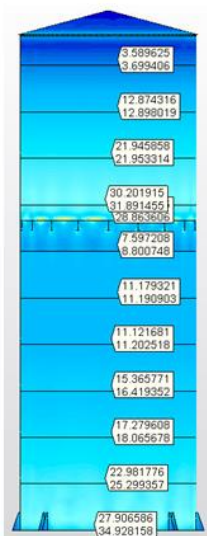


Fig. 5B: Tensões Van Misse

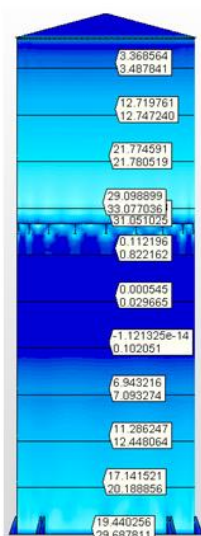


Fig. 5C: Tensões circunferenciais

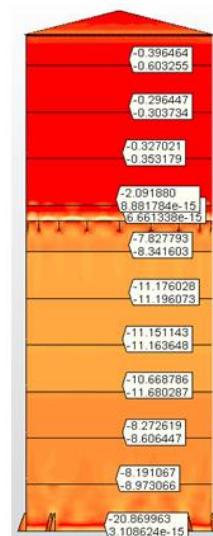


Fig. 5D: Tensões axiais

A Figura 6 mostra o tanque com as espessuras requeridas para cada virola do costado.

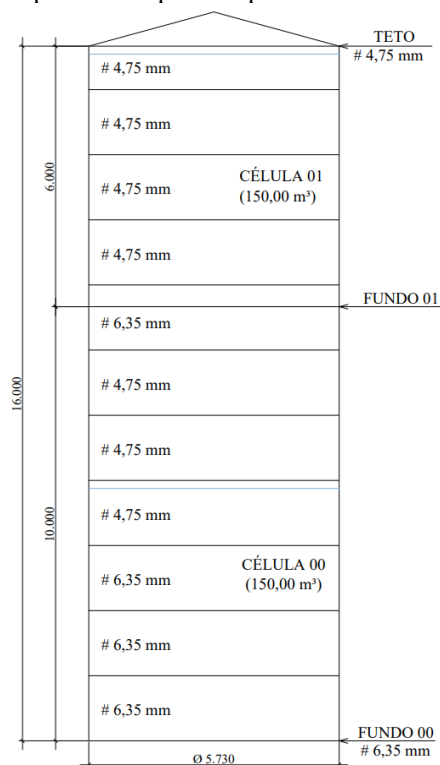


Figura 6: Tanque com as espessuras finais de costado

Os fundos suspensos analisados neste trabalho, com exceção do fundo com vigas radiais e mastro central (Figura 2A), foram projetados como auto suportado e apoiados apenas nos costados dos tanques. Os resultados das análises são apresentados a seguir.

O fundo suspenso com vigas radiais tipo W e mastro central, cuja geometria é mostrada na Figura 7, onde possui diâmetro nominal o mesmo do tanque, $D = 5.730,00$ mm, número de vigas de suporte = 18 peças, perfil da viga W = 310 x 28,3, material da viga W = ASTM A572 – grau 50, diâmetro do mastro central = 640,00 mm, espessura do mastro central = 6,35 mm, material da chapa do mastro central = ASTM A36, espessura da chapa do fundo = 7,95 mm (5/16”), material da chapa do fundo = ASTM A36. Carregamento do fundo = pressão hidrostática $h = 5,80$ m.c.a.

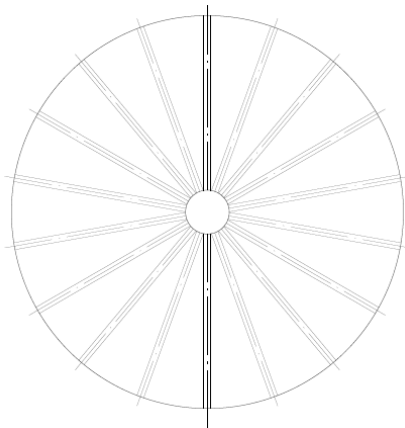


Figura 7: Esquema do fundo com vigas radiais e mastro central

As tensões na chapa do fundo e das vigas de apoio são mostradas nas Figuras 8A e 8B.

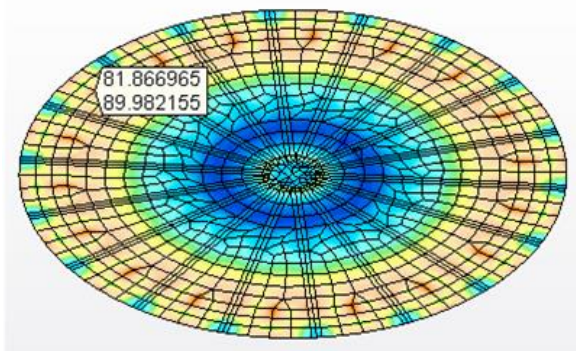


Figura 8A – Tensões no fundo suspenso
Tensão máxima = 90,0 Mpa

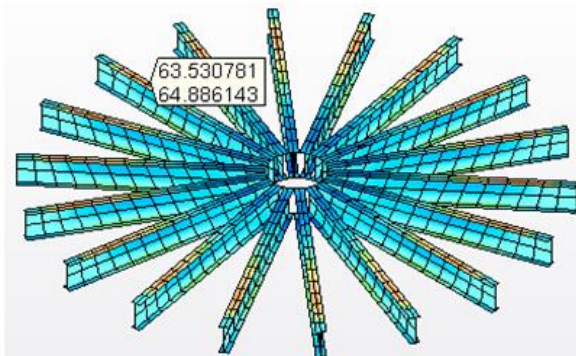


Figura 8B – Tensões nas vigas de apoio
Tensão máxima = 64,9 MPa

Deslocamentos verticais (eixo Z) nas chapas do fundo na Figura 8C e tensões no mastro central n Figura 8D.

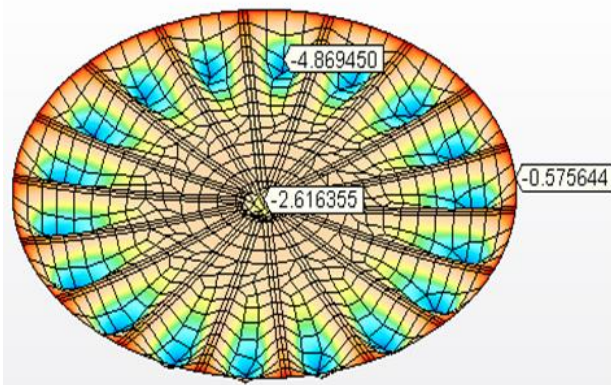


Figura 8C – Deslocamentos verticais

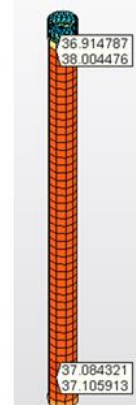


Figura 8D – Tensões no mastro
Tensão máxima = 38,0 MPa

O fundo suspenso com vigas radiais tipo W e sem central, cuja geometria é mostrada na Figura 9, onde possui diâmetro nominal o mesmo do tanque, $D = 5.730,00$ mm, número de vigas de suporte = 18 peças, perfil da viga W = 310 x 44,5, material da viga W = ASTM A572 – grau 50, viga de apoio circunferencial U 6” primeira alma, material da viga U = ASTM A572 – grau 50, espessura da chapa do fundo = 7,95 mm (5/16”), material da chapa do fundo = ASTM A36.

Carregamento do fundo = pressão hidrostática $h = 5,80$ m.c.a.

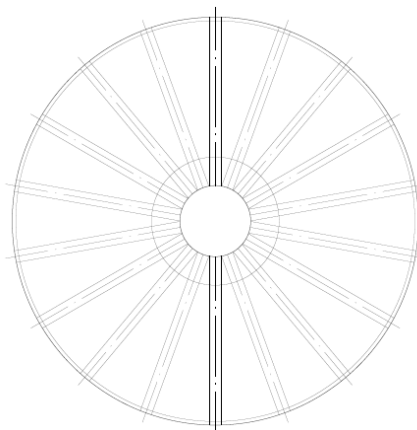


Figura 9: Esquema do fundo com vigas radiais e sem mastro

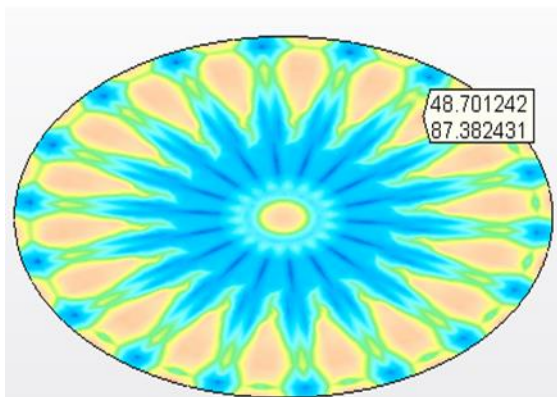


Figura 9A – Tensões no fundo suspenso
Tensão máxima = 87,4 Mpa

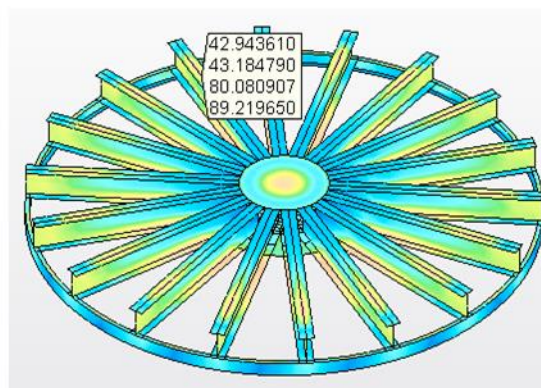


Figura 9B – Tensões nas vigas de apoio
Tensão máxima = 89,2 MPa

Deslocamentos verticais nas chapas do fundo na Fig. 9C e tensões no chapéu de apoio das vigas - Fig. 9D.

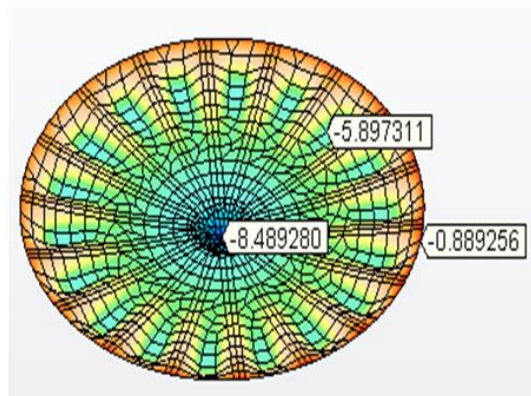


Figura 9C – Deslocamentos verticais

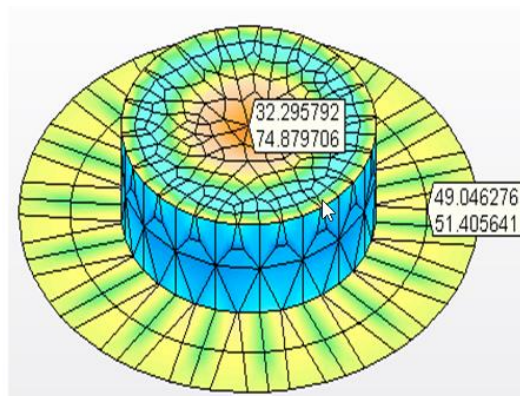


Figura 9D – Tensões no chapéu
Tensão máxima = 74,9 MPa

O fundo suspenso com vigas ortogonais (grelha) tipo W e sem central, cuja geometria é mostrada na Figura 10, onde possui diâmetro nominal o mesmo do tanque, $D = 5.730,00$ mm, número de vigas de suporte = 10 peças, perfil da viga W = 360 x 72, material da viga W = ASTM A572 – grau 50, viga de apoio circunferencial U 6” primeira alma, material da viga U = ASTM A572 – grau 50, espessura da chapa do fundo = 9,53 mm (3/8”), material da chapa do fundo = ASTM A36.

Carregamento do fundo = pressão hidrostática $h = 5,80$ m.c.a.

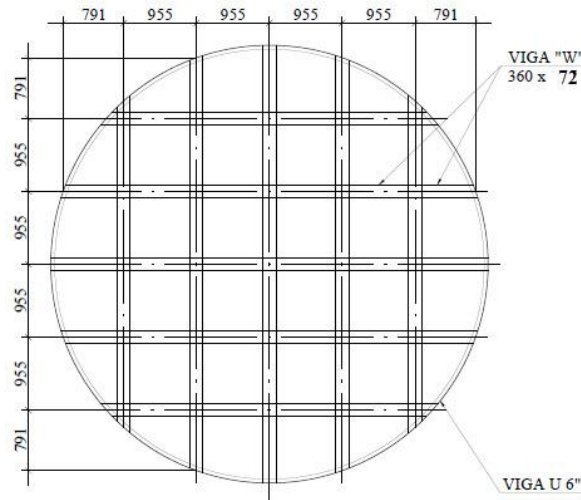


Figura 10: Esquema do fundo com vigas ortogonais (grelha) e sem mastro

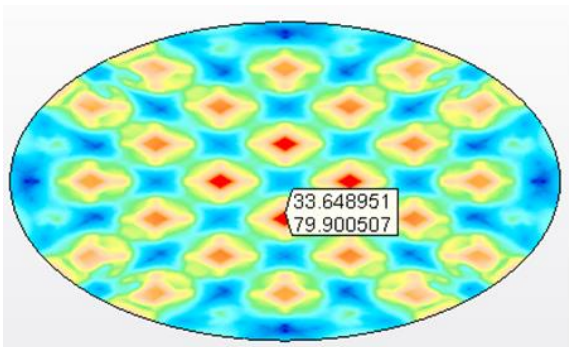


Figura 10A – Tensões no fundo suspenso
Tensão máxima = 79,9 Mpa

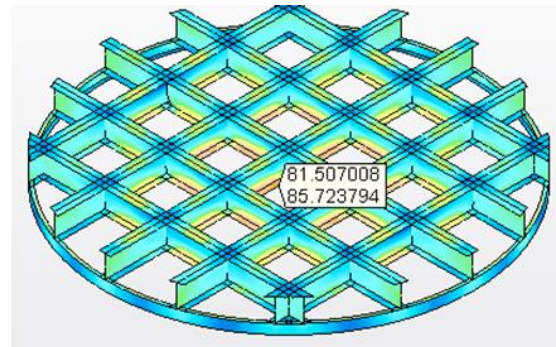


Figura 10B – Tensões nas vigas de apoio
Tensão máxima = 85,7 MPa

Deslocamentos verticais (eixo Z) nas chapas do fundo na Figura 10C.

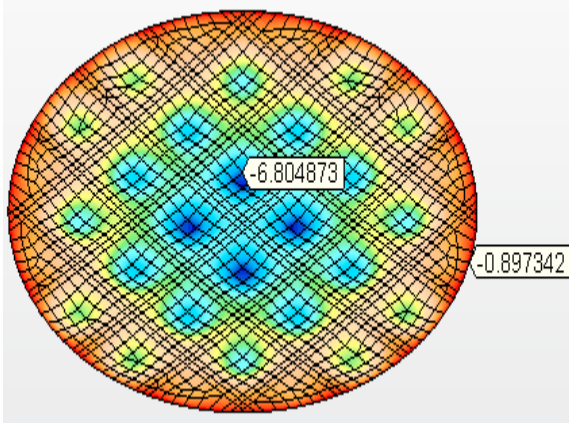


Figura 10C – Deslocamentos verticais

O fundo suspenso em formato de cone, cuja geometria é mostrada na Figura 11 (corte), onde possui diâmetro nominal o mesmo do tanque, $D = 5.730,00$ mm, espessura da chapa do fundo = $9,53$ mm ($3/8''$), material da chapa do fundo = ASTM A36. Carregamento do fundo = pressão hidrostática $h = 5,80$ m.c.a.

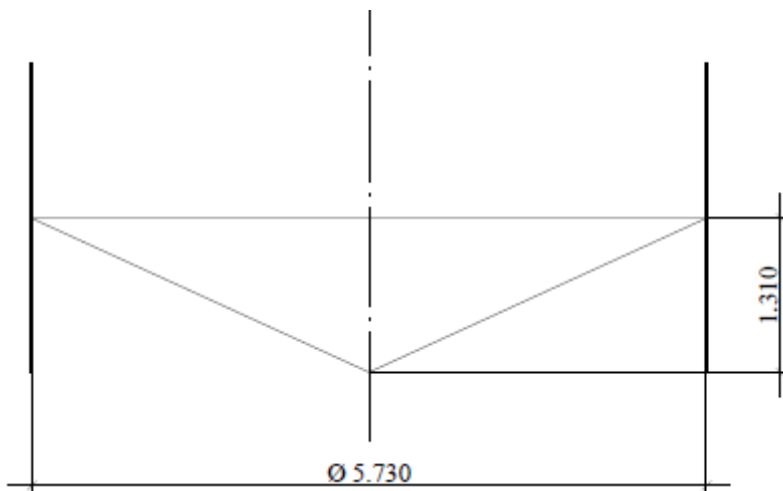


Figura 11: Esquema do fundo cônico

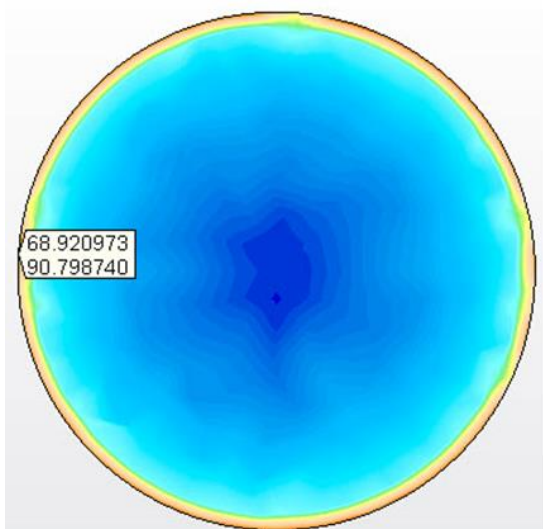


Figura 11A – Tensões no fundo suspenso
Tensão máxima = $90,8$ Mpa

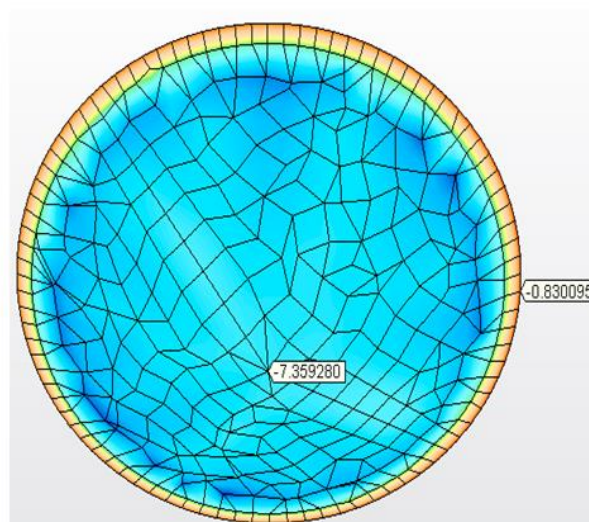


Figura 11B – Deslocamentos verticais

O fundo suspenso em formato de semi esfera ou fundo esférico segmentado cuja geometria é mostrada na Figura 12 (corte), onde possui diâmetro nominal o mesmo do tanque, $D = 5.730,00$ mm, espessura da chapa do fundo = $4,75$ mm ($3/16''$), material da chapa do fundo = ASTM A36. Carregamento do fundo = pressão hidrostática $h = 5,80$ m.c.a.

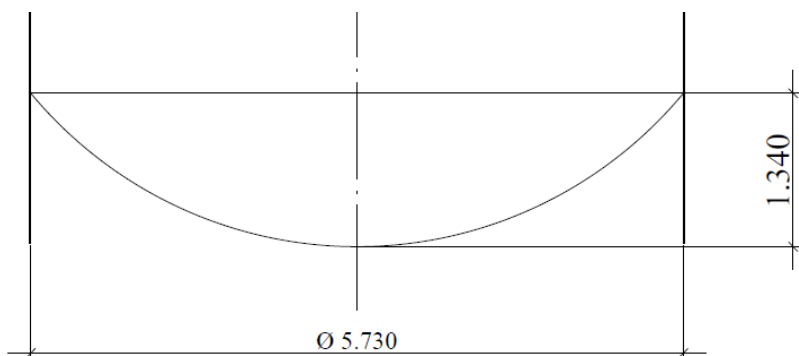


Figura 12: Esquema do fundo esférico segmentado

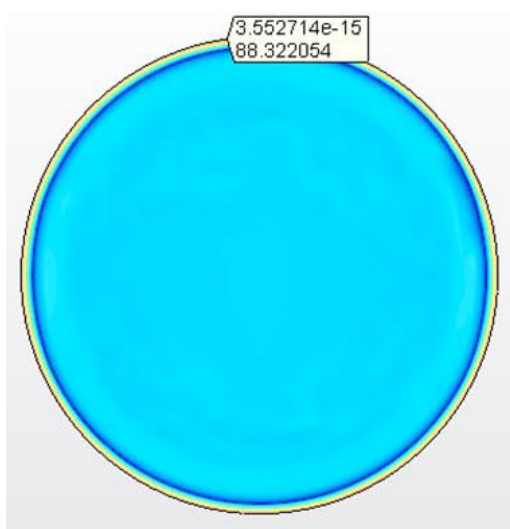


Figura 12A – Tensões no fundo suspenso
Tensão máxima = 88,3 Mpa

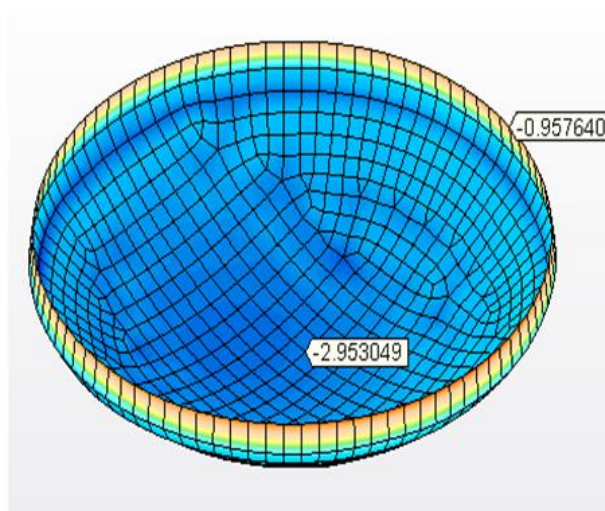


Figura 12B – Deslocamentos verticais

Os pesos dos fundos suspensos foram calculados sem apurar recortes ou aproveitamento de retalhos e sobras, apurando apenas as superfícies de chapas multiplicado pelo peso / m². A Tabela 7 mostra o resumo geral dos pesos dos 5 tipos de fundos suspensos e essas diferenças podem ser vista no gráfico peso total x tipo de fundos, na Figura 13.

Tabela 7 – Pesos dos fundos suspensos

Posição	TIPOS DE FUNDOS SUSPENSOS									
	Vigas radiais com mastro		Vigas radiais sem mastro		Vigas ortogonais sem mastro		Fundo cônico sem vigas		Fundo esférico sem vigas	
	Especificação	Peso	Especificação	Peso	Especificação	Peso	Especificação	Peso	Especificação	Peso
Fundo	7,95 mm	1.619,61	7,95 mm	1.619,61	9,53 mm	1.929,35	9,53 mm	2.331,83	4,75 mm	1.632,56
Mastro	6,35 mm	971,85	nt	0,00	nt	0,00	nt	0,00	nt	0,00
Complementos	nt	0,00	7,95 mm	79,55	nt	0,00	nt	0,00	nt	0,00
Vigas	W 310 x 28,3	1.296,42	W 310 x 44,5	2.038,54	W 360 x 72	3.480,48	nt	0,00	nt	0,00
Cinta	nt	0,00	U 6"	219,62	U 6"	219,62	nt	0,00	nt	0,00
Peso total (kg)		3.887,88		3.957,32		5.629,45		2.331,83		1.632,56

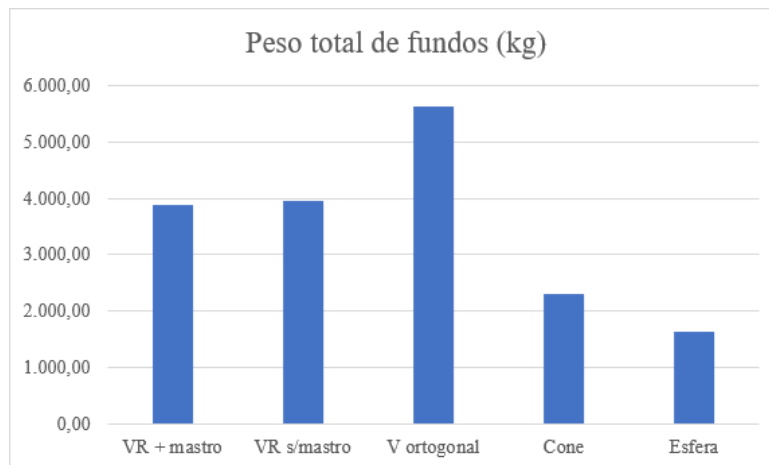


Figura 13: Comparativos dos pesos dos fundos

Os deslocamentos máximos verticais dos fundos suspensos são mostrados comparativamente na Figura 14.

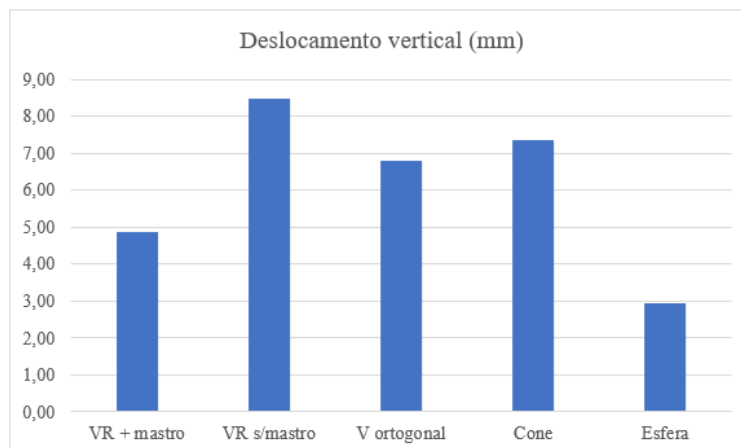


Figura 14: Comparativos dos deslocamentos máximos verticais

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, conclui-se que o fundo suspenso do tipo esférico segmentado é o mais economicamente viável e também o mais tecnicamente recomendável, pois apresenta o menor deslocamento vertical, sob carregamento completo mesmo com a menor espessura entre todos os fundos.

O fundo suspenso tipo cone é também economicamente viável mas apresenta deslocamento vertical sob carregamento um pouco excessivo, devendo ser verificado se interfere com as tubulações. O deslocamento vertical poderia ser diminuído com a utilização de chapas de reforços triangulares, apoiando o fundo nos costados laterais.

O fundo suspenso apoiado em vigas ortogonais é totalmente anti econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWWA – American Water Works Association, AWWA D100-05, *Welded Steel Tanks for Water Storage*. Edição atualizada. Denver, Colorado. Maio 2005.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12.218, Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, RJ. Julho de 1994.
3. TREES, M. J. Design of elevated steel tanks. Thesis. University of Illinois, Urbana-Champaign, 1911.
4. VISAL, B. & SIBIN, B. Design and analysis of storage tanks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 6, Issue 5. Maio 2017.
5. NUNES, C. P. - Uma metodologia de projetos de tanques atmosféricos verticais para armazenamento de petróleo e seus derivados. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.
6. GOMES, E. F. - Soldagem em reservatórios metálicos para armazenamento de água. Trabalho de conclusão de curso. Curso de especialização em Engenharia de soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
7. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7.821, Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, RJ. Abril de 1983.
8. API – American Petroleum Institute, API 650, *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, décima terceira edição, Washington D. C., Março de 2013.
9. RASI, J. R.; CAUNETTO, D.; BROETTO, J. F. Tanque metálico para reservação de água no Brasil: um estudo da aplicação parcial da norma API 650. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Vol. 01, edição 05. Maio 2020.
10. PEREIRA, P. M. F. Análise dos conjuntos habitacionais do programa Minha Casa, Minha Vida na cidade de Monte Alegre de Minas- MG. Dissertação de mestrado. Faculdade de Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
11. ANDRADE JUNIOR, L. J. Análise estrutural das chapas metálicas de silos e reservatórios cilíndricos. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1998.
12. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6.123, Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, RJ. Junho de 1988.
13. HAFEEZ, G., EL ANSARY, A. M. & EL DAMATTY, A. A. *Effects of winds load son the stability of conical tanks*. *Can. J. Civ. Eng.* 38, Published by NCR Research Press, 2011.