

TANQUES METÁLICOS APOIADOS PARA RESERVAÇÃO DE ÁGUA NO BRASIL: UM ESTUDO DA APLICAÇÃO PARCIAL DA API 650

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 de Projetos 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 e pela falta de normas técnicas para reservatórios metálicos no Brasil, vários fabricantes de reservatórios têm utilizado parcialmente a norma API 650 para dimensionamento e verificação desses reservatórios. Neste trabalho, é realizado estudos para a verificação da aplicação parcial e integral da norma API 650, método 1 pé, através de dimensionamento de 7 tanques metálicos com o mesmo volume em função de diferentes relações altura / diâmetro (H/D). Analisa - se as tensões circunferenciais nos dois casos e dimensionamento previsto na API 650 e determina as relações altura / diâmetro mais econômicas para o armazenamento de água. A relação H/D mais econômica foi a de 1,00.

PALAVRAS-CHAVE: Tanque metálico, Norma API 650, Dimensionamento, Otimização

INTRODUÇÃO

Tanques cilíndricos são estruturas normalmente utilizadas para o armazenamento de água, de resíduos industriais, de resíduos da indústria petroquímica, de óleos, de grãos e etc. (HECKE, 2010).

Roncetti (2011) afirma que houve aumento da demanda por estocagem de graneis líquidos nas mais variadas atividades econômicas e também o aumento de demanda para atividades intermediarias como o saneamento, tratamento de rejeitos, refrigeração e demais processos fabris, onde é necessário estocar graneis líquidos. A Figura 1 ilustra os vários tipos de tanque de armazenamento que são comumente utilizados pelas indústrias (KUAN, 2009).

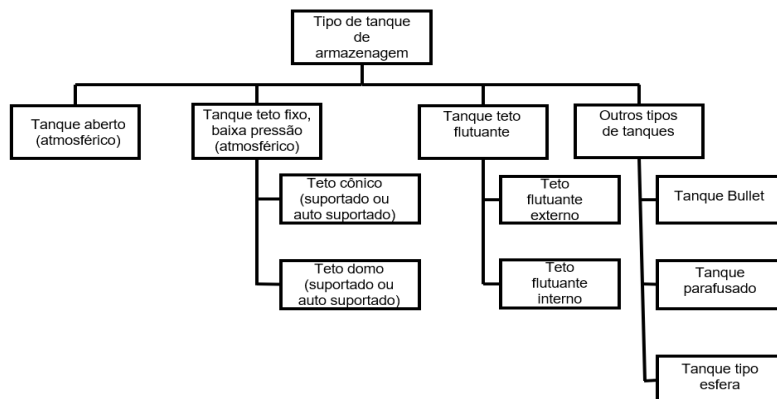


Figura 1: Tipos de tanque de armazenamento.

Segundo Barros (2010), são equipamentos de caldeiraria pesada, sujeitos à pressão aproximadamente atmosférica, normalmente na faixa de 0 a 0,5 psi e destinados principalmente, ao armazenamento de petróleo e seus derivados. O projeto e a construção de tanques cilíndricos atmosféricos envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas técnicas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois falhas nesses equipamentos podem acarretar em grandes prejuízos financeiros ou, até mesmo, perdas de vidas (NUNES, 2013).

No Brasil, existe norma para a construção destes equipamentos. A norma NBR 7821 – Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados – publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Porém, a norma mais utilizada nas indústrias em geral é a norma regulamentadora americana API 650 – *Welded Steel Tanks for Oil Storage – do American Petroleum Institute* (API), ambas destinadas à reservação de petróleo e derivados (SATO, 2015).

De acordo com Barros (2010), a API 650 Abrange especificações sobre material, projeto, fabricação, montagem e testes de tanques de armazenamento verticais, cilíndricos, não enterrados, com o topo fechado ou aberto, de construção soldada, com várias dimensões e capacidades, para serviço não refrigerado, com temperatura de projeto máxima de 260° C e pressão interna aproximadamente atmosférica (inferior a 2,5 psig). Segundo Azzumi & Guzey (2015), em conformidade com a norma API 650, os três métodos para determinar a espessura do reservatório dos tanques de armazenamento cilíndricos de aço projetados em conformidade com a norma API 650, são:

O método de um pé (1FM – *one foot method*), o método de ponto de projeto variável (VDM) e a análise linear. Comparamos os projetos de casca com base nesses três métodos para diferentes propriedades do tanque: diâmetro, altura e tensão permitida.

O método de um pé (1FM), que é baseado na "teoria da membrana". A espessura necessária da placa de casca para cada curso de casca é calculado usando a tensão circunferencial em um ponto de 0,3 m (1 pé) acima da costura horizontal de solda inferior da virola da carcaça, devido à pressão hidrostática do líquido armazenado. O 1FM é usado com sucesso para a maioria dos tanques. No entanto, o projetos baseados no 1FM podem se tornar conservadores e proibitivos de custos para tanques de maior diâmetro. Portanto, a API 650 limita o aplicabilidade deste método a tanques de até 61 m (200 pés) em diâmetro.

O segundo método para calcular a espessura necessária da placa de casca é o método do ponto de design variável (VDM) que também é baseado na "teoria da membrana". O VDM foi proposto por Zick e McGrath em 1968 e posteriormente adotado pela API 650 como um refinado método para calcular a espessura necessária da placa de casca, especialmente para tanques com mais de 61 m (200 pés) de diâmetro. O VDM leva em consideração a restrição fornecida pelas placas do fundo do tanque para o primeiro percurso da virola e a restrição fornecida por cada virola inferior para o percurso da virola superiora. O VDM usa uma distância variável em vez de distância fixa de 0,3 m (1 pé), como usado em 1FM, acima da solda (costura) circunferencial para cada percurso da virola, para calcular a máximo tensão circunferencial devido à pressão hidrostática.

O terceiro método fornecido na API 650 é o cálculo da espessura da casca usando análise linear. Nesta abordagem, as condições de contorno para a análise deve ser um momento plástico relacionado ao rendimento de placa sob a virola e movimento radial totalmente restrito o fundo da virola. A API 650 não descreve um específico método de análise linear. Neste estudo, foi desenvolvido um novo método usando teoria da casca fina para realizar uma análise linear da espessura da casca. Neste método, foi usado rigidez exata – flexibilidade relações e funções exatas da forma originárias do chamado Solução "casca curta " das equações que governam a partir da fina teoria da casca elástica.

Constatou-se a pouca informação literária para dimensionamento de reservatório metálico destinado a reservação de água e a falta de normas técnicas específicas para tanques soldados para armazenamento de água no Brasil.

Devido à falta de norma técnica específica, tem se utilizado como parâmetros de cálculo para reservatórios metálicos destinados a reservação de água, a API 650 na sua integralidade ou apenas parcialmente, especificamente no que se refere a determinação de espessuras dos costados dos tanques e tensões admissíveis, uma vez que os critérios de segurança quanto à incêndios e explosões do material armazenado não se aplicariam para a reservação de água.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar o dimensionamento de tanques metálicos aberto, sem teto, com o mesmo volume e diferentes H/D, de acordo com a norma API 650, pelo método de um pé (1FM), em duas etapas, sendo a primeira considerando apenas as espessuras calculadas pela equação descrita no item 5.6.3.2 da

referida norma e na segunda etapa, além da verificação da espessura calculada pela Equação 1, adotam-se também as espessuras mínimas, conforme descrito no item 5.6.1.1 da norma API 650. Como objetivo complementar é determinar a faixa de relação altura / diâmetro (H/D) mais economicamente viável, com menor peso de construção do tanque soldado.

METODOLOGIA

Foram utilizados 7 tanques metálicos verticais apoiados, com capacidade de 660,00 m³ e diâmetro máximo menor que 15,00 m, de acordo com o item 5.6.1.1, mostrado na Tabela 1. Em decorrência, para o volume constante (V₀) e assumida relações de altura / diâmetro (H/D) entre 0,25 a 4,0.

Tabela 1 – Variação das espessuras das chapas

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	³ / ₁₆
15 to < 36	50 to < 120	6	¹ / ₄
36 to 60	120 to 200	8	⁵ / ₁₆
> 60	> 200	10	³ / ₈

dimensionamento de tanques metálicos aberto, sem teto, com o mesmo volume e diferentes H/D, de acordo com a norma API 650, pelo método de um pé (1FM), em duas etapas, sendo a primeira considerando apenas as espessuras calculadas pela equação descrita no item 5.6.3.2 da referida norma (Equação 1);

$$t_d = \frac{4.9D(H-0.3)G}{S_d} + CA \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

- t_d = espessura de projeto, em mm;
- D = diâmetro nominal do tanque, em m;
- H = nível de projeto do líquido, em m;
- G = peso específico do líquido, no caso de água: 1;
- CA = sobresspessura de corrosão, especificada pelo comprador, em mm;
- S_d = tensão admissível (tabela 5-2 API 650 – Tabela 3 deste trabalho), em Mpa.

E na segunda etapa, além da verificação da espessura calculada pela Equação 1, adotam-se também as espessuras mínimas, conforme descrito no item 5.6.1.1 e mostrados na tabela 1. Definidos H = altura do cilindro, D = diâmetro e V = volume = 660,00 m³, temos as dimensões dos diâmetros, das alturas e as proporções entre elas (H/D), descrita na tabela 2.

Tabela 2 – Relações Altura / Diâmetro (H/D) para volume de 660,00 m³

	H / D						
	4,00	3,00	2,00	1,50	1,00	0,50	0,25
D (m)	14,98	13,61	11,89	10,80	9,43	7,49	5,94
H (m)	3,75	4,54	5,94	7,20	9,43	14,98	23,77

Os modelos geométricos dos 7 reservatórios descritos na Tabela 2 são mostradas na Figura 1.

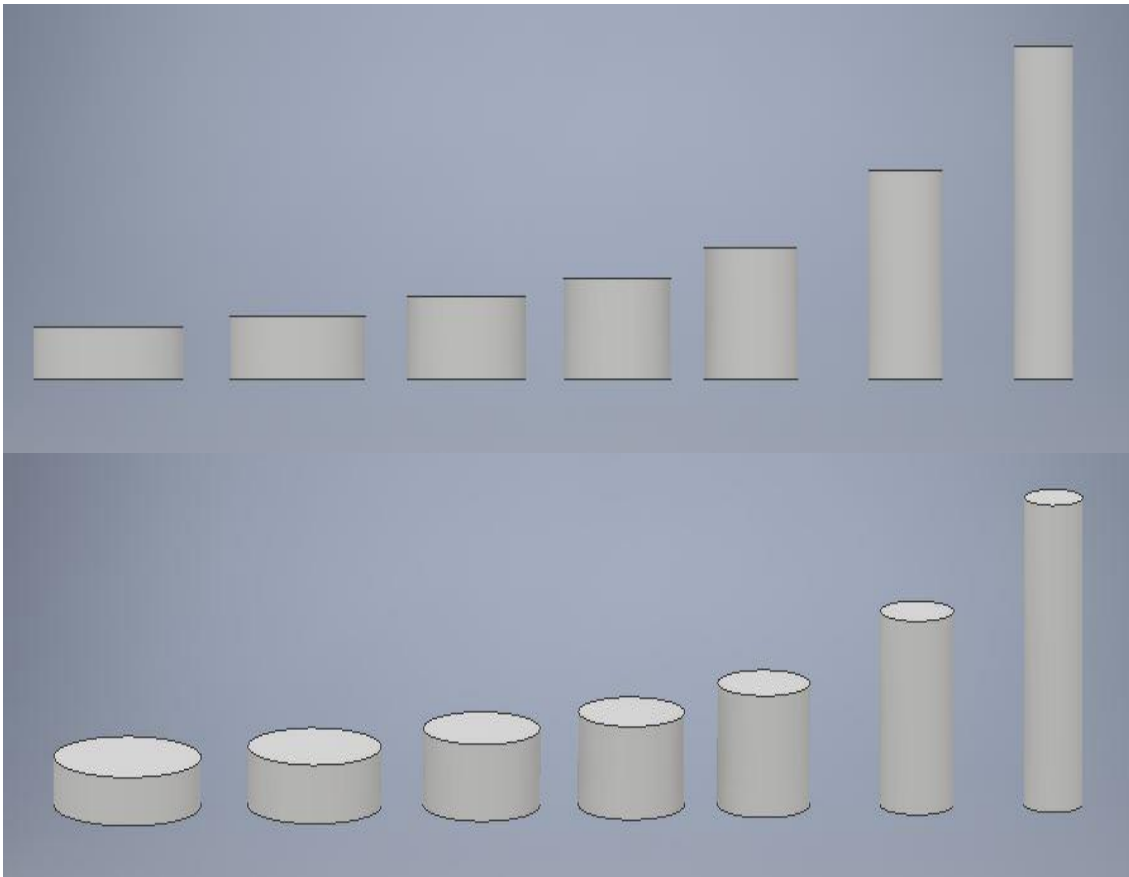


Figura 1: Modelos geométricos dos reservatórios estudados com capacidade de 660,00 m³.

O aço empregado 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. De acordo com a tabela 5-2 *Permissible Plate Materials and Allowable Stresses* da API 650, a tensão admissível para o aço ASTM A36 é de 160,00 Mpa (Tabela 3).

Tabela 3 – Chapas permitidas de utilização e tensões admissíveis

Chapa		Mínima	Mínima	Tensão	Tensão
Especificação	Grau	f_y	f_u	admissível - Sd	teste Hidrog.
		Mpa (psi)	Mpa (psi)	Mpa (psi)	Mpa (psi)
A 283	C	205 (30.000)	380 (55.000)	137 (20.000)	154 (22.500)
A 285	C	205 (30.000)	380 (55.000)	137 (20.000)	154 (22.500)
A 131	A, B, CS	235 (34.000)	400 (58.000)	157 (22.700)	171 (24.900)
A 36		250 (36.000)	400 (58.000)	160 (23.200)	171 (24.900)
A 131	EH 36	360 (51.000)	490 (71.000)	196 (28.400)	210 (30.400)
A 573	400 (58)	220 (32.000)	400 (58.000)	147 (21.300)	165 (24.000)
A 516	380 (55)	205 (30.000)	380 (55.000)	137 (20.000)	154 (22.500)

As espessuras das chapas do corpo de reservatório são consideradas variáveis ao longo da altura do reservatório (Figura 2).

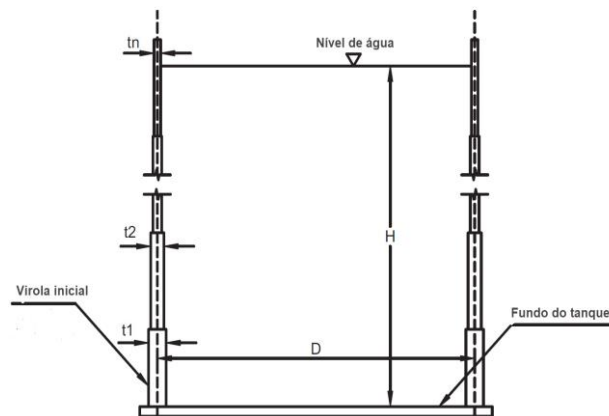


Figura 2: Variação das chapas ao longo da altura do tanque

Considerando a não existência de atrito devido ao material armazenado (água), a condição do reservatório estar completamente cheio, a não aplicação de vento e as condições das espessuras das chapas dos corpos dos reservatórios (virolas), resulta apenas 1(um) caso de análise (Figura 3):

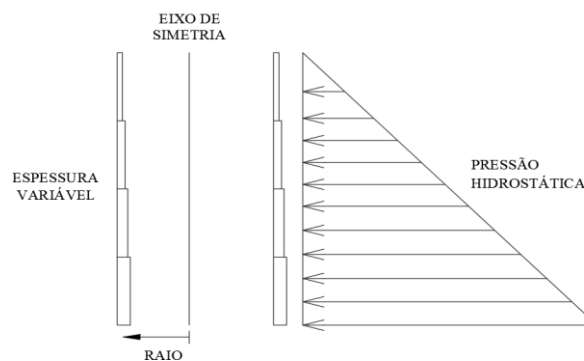


Figura 3: Tanque com líquido e espessura de parede variável ao longo da altura

O fluxo de cálculo das espessuras das virolas dos tanques soldados sega o diagrama mostrado na figura 4.

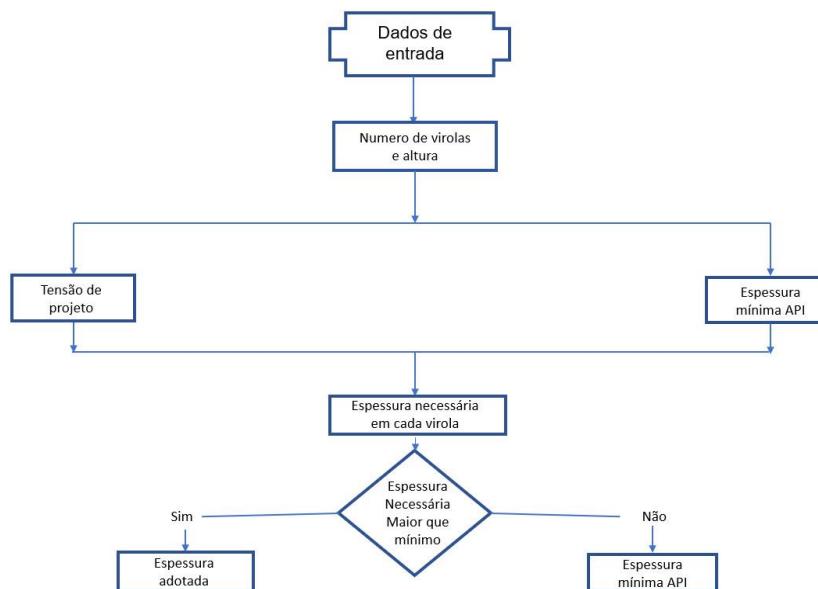


Figura 4: Diagrama de fluxo do cálculo das espessuras das virolas dos tanques

Os pesos dos 7 tanques propostos neste trabalho foram apurados em duas etapas. A primeira etapa foi calculada o peso dos fundos dos reservatórios, considerando fundos com chapas anulares (Figura 5), de acordo com o item 5.4.1 da API 650 (*Bottom Plates*), que prescreve a espessura mínima de 6,00 mm (1/4"). Foi considerado no peso dos fundos dos reservatórios a sobreposição de chapas em torno de 2,26%.

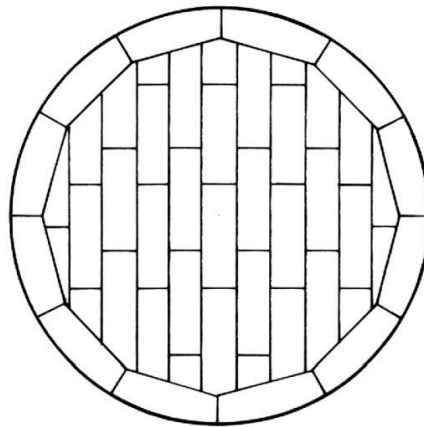


Figura 5: Disposição típica de chapas de fundo com chapas anulares (NBR 7821 (1983)).

Foram também considerados os pesos dos perfis tipo cantoneiras do reforço de borda superior, conforme especificado na Tabela 4 prescrita no item 5.1.5.9 – *Roof and Top-Angle Joints*” da API 650, sobreposta ao último anel (virola) do costado, com aba horizontal voltada para o lado externo do tanque.

Tabela 4 – Reforço de borda superior do costado.

DIÂMETRO DO TANQUE (D)	TAMANHO MÍNIMO DA CANTONEIRA	
	(in)	(mm)
$D \leq 11 \text{ m}, (D \leq 35 \text{ ft})$	2 x 2 x 3/16	51 x 51 x 4,8
$11 \text{ m} < D \leq 18 \text{ m}, (35 \text{ ft} \leq D \leq 60 \text{ ft})$	2 x 2 x 1/4	51 x 51 x 6,4
$D > 18 \text{ m}, (D > 60 \text{ ft})$	2 x 2 x 3/8	51 x 51 x 9,5

O peso dos costados foi apurado após a determinação da espessura de cada chapa que compõe as virolas dos tanques para cada relação de H/D, considerando-se as espessuras calculadas apenas com a equação 1 e também as espessuras considerando as espessuras mínimas prescritas pela API 650 (Tabela 5). Utilizou-se o método de um pé (1FM), com eficiência de soldagem de 1,00 (100%) e sem consideração de sobresspessura de corrosão e não foi aplicado as forças decorrentes da ação de ventos. As espessuras utilizadas para os dimensionamentos das virolas foram (em milímetros): 2,00; 2,25; 2,65; 3,00; 3,35; 3,75; 4,25; 4,75 e 6,35, todas com largura de 1.500,00 mm.

Tabela 5 – Espessuras das chapas dos costados e pesos dos tanques estudados.

Chapas dos costados H/D	Espessuras	Virolas																Peso (kg)			Peso/m ³			
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	Casco	Fundo	Total				
4,00	Cálculo	1,86	1,05	0,24														2.770,74	8.984,72	11.755,46	17,81			
	adotado	2,00	2,00	2,00														6.580,95				15.565,67	23,58	
	Esp. Mínima	4,75	4,75	4,75																		3.682,22	11.098,79	16,82
3,00	Cálculo	2,08	1,34	0,61														7.238,63	7.416,57	14.655,20	22,20			
	adotado	2,25	2,00	2,00														3.769,27				5.660,31	9.429,58	16,82
	Esp. Mínima	4,75	4,75	4,75																		8.273,91	13.934,22	21,11
2,00	Cálculo	2,42	1,77	1,13	0,49													4.334,43	4.670,28	9.004,71	13,64			
	adotado	2,65	2,00	2,00	2,00													9.109,58				13.779,86	20,88	
	Esp. Mínima	4,75	4,75	4,75	4,75																	4.891,92	3.575,74	8.467,66
1,00	Cálculo	3,10	2,59	2,08	1,57	1,06	0,55	0,04										10.417,55	10.417,55	13.993,29	21,20			
	adotado	3,35	2,65	2,25	2,00	2,00	2,00	2,00										7.475,74				2.246,18	9.721,92	14,73
	Esp. Mínima	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75									13.144,25				15.390,43	23,32	
0,50	Cálculo	3,96	3,56	3,15	2,75	2,34	1,94	1,53	1,13	0,72	0,32							12.572,65	1.412,66	13.985,31	21,19			
	adotado	4,25	3,75	3,35	3,00	2,65	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00							17.240,36				18.653,02	28,26	
	Esp. Mínima	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75													
0,25	Cálculo	5,03	4,70	4,38	4,06	3,74	3,42	3,10	2,78	2,46	2,13	1,81	1,49	1,17	0,85	0,53	0,21	12.572,65	1.412,66	13.985,31	21,19			
	adotado	6,35	4,75	4,75	4,25	3,75	3,75	3,35	3,00	2,65	2,25	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	17.240,36				18.653,02	28,26	
	Esp. Mínima	6,35	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75							

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 elementos. As dimensões dos elementos finitos são de 0,20 x 0,20 m (discretização). Para cada tipo de tanque, de acordo com a relação de H/D, foi criado um modelo de elemento finito em 3D (Figura 6).

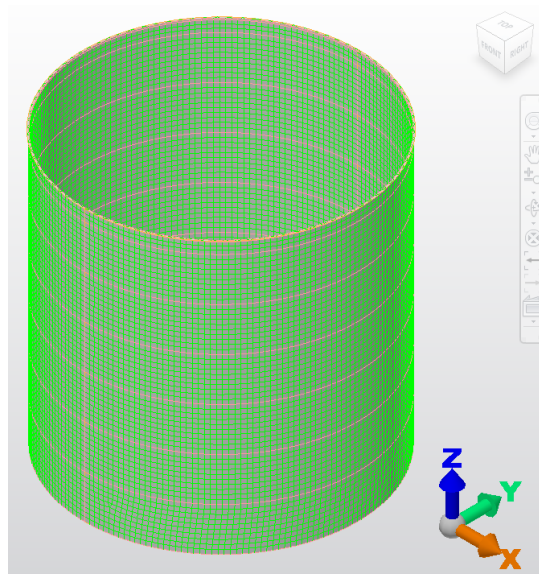


Figura 6: Discretização do tanque H/D 1,00 – diâmetro e altura 9,43m

A Figura mostra o tanque com a relação H/D = 1,00 com diâmetro e altura de 9,43 m, com o carregamento de água, internamente.

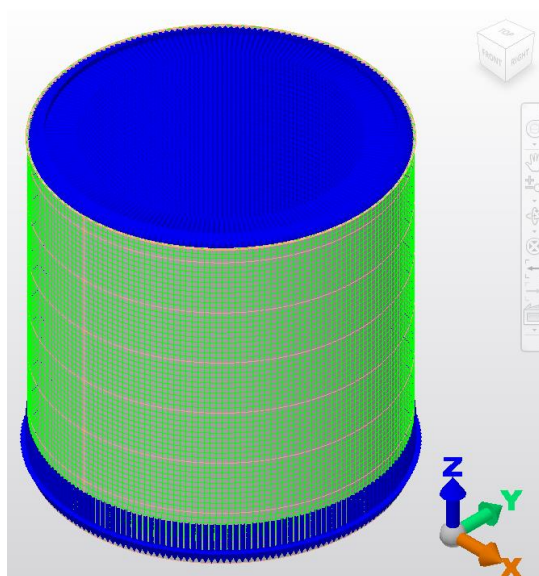


Figura 7: Aplicação do carregamento de água reservatório H/D 1,00

Segue os resultados da análise através dos métodos dos elementos finitos – MEF, dos 7 tanques propostos, com a utilização do *software Autodesk Simulation Mechanical 2018*

- Tanque H/D = 4,00 – diâmetro 14,98 m e altura 3,75 m

A figura 8 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 147,81 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

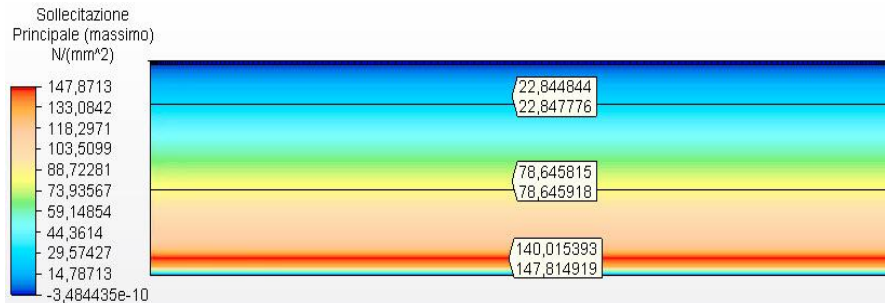


Figura 8: Tensões circunferenciais H/D =4,00 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 9 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 4,75 mm. Tensão máxima foi de 60,27 MPa.

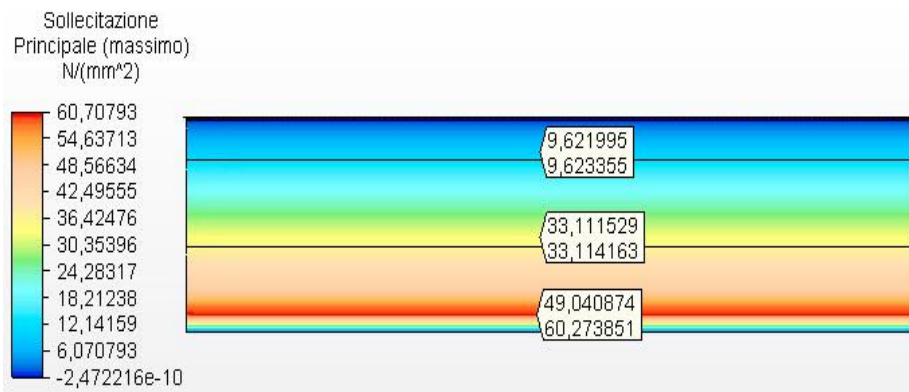


Figura 9: Tensões circunferenciais H/D = 4,00 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

A figura 10 mostra as curvas de tensões circunferenciais, em função das espessuras das virolas e altura de carregamento de água.

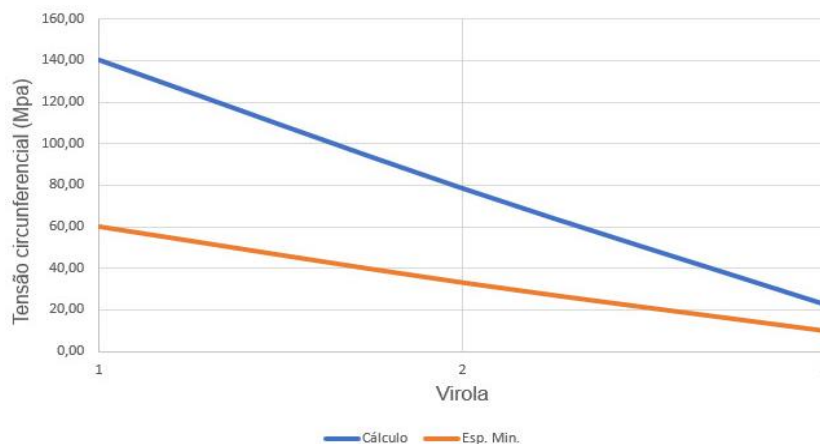


Figura 10: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 4,00

- Tanque H/D = 3,00 – diâmetro 13,61 m e altura 4,54 m

A figura 11 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como a virola 1 com 2,25 mm e as demais com 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 146,67 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

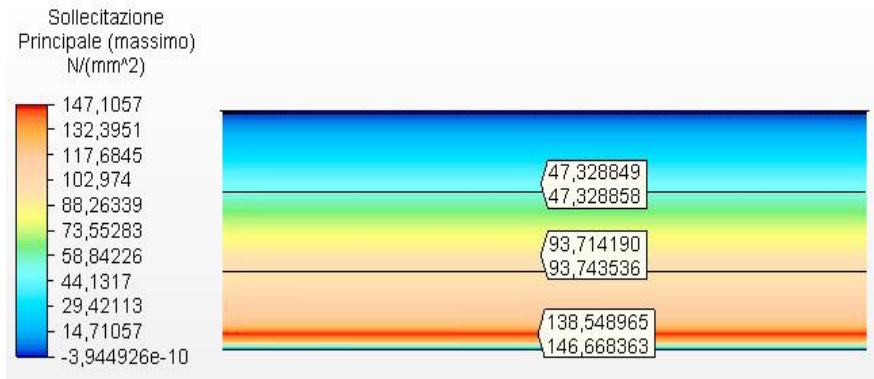


Figura 11: Tensões circunferenciais H/D = 3,00 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 12 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 4,75 mm. Tensão máxima foi de 68,17 MPa.

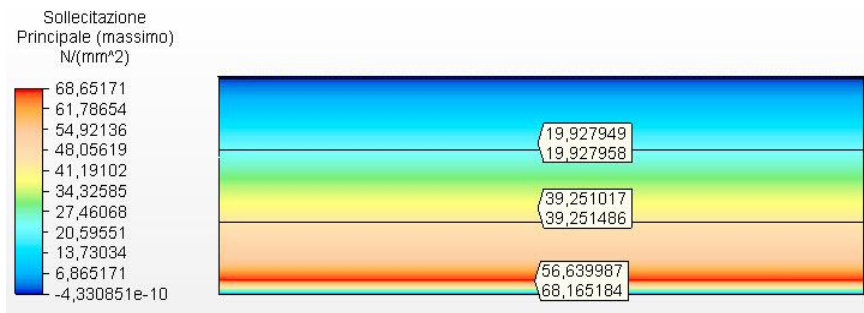


Figura 12: Tensões circunferenciais H/D = 3,00 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

A figura 13 mostra as curvas de tensões circunferenciais, em função das espessuras das virolas e altura de carregamento de água.

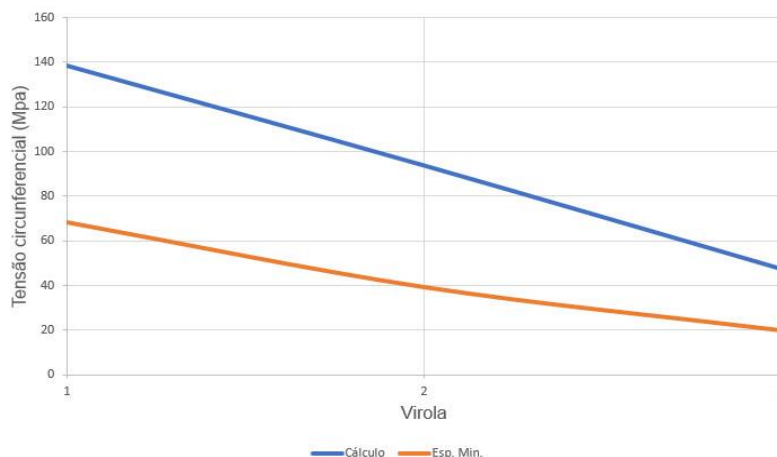


Figura 13: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 3,00

- Tanque H/D = 2,00 – diâmetro 12,89 m e altura 5,94 m

A figura 14 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como a virola 1 com 2,65 mm e as demais com 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 144,65 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

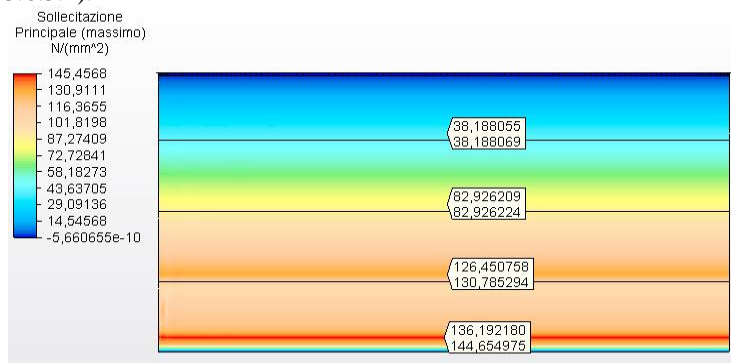


Figura 14: Tensões circunferenciais H/D = 2,00 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 15 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 4,75 mm. Tensão máxima foi de 80,26 MPa.

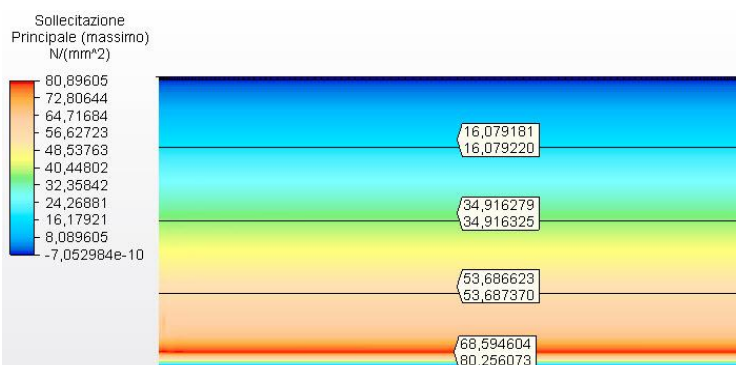


Figura 15: Tensões circunferenciais H/D = 2,00 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

A figura 16 mostra as curvas de tensões circunferenciais, em função das espessuras das virolas e altura de carregamento de água.

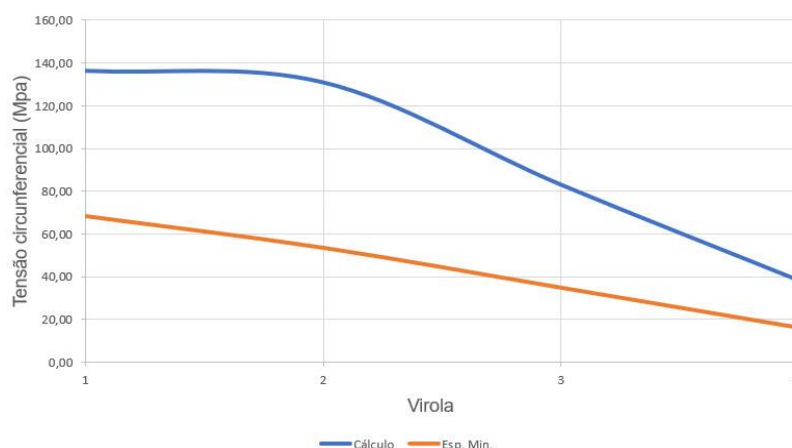


Figura 16: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 2,00

- Tanque H/D = 1,00 – diâmetro 9,43 m e altura 9,43 m

A figura 17 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como a virola 1 com 3,35 mm, virola 2 com 2,65 mm, virola 3 com 2,25 mm e as demais com 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 146,39 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

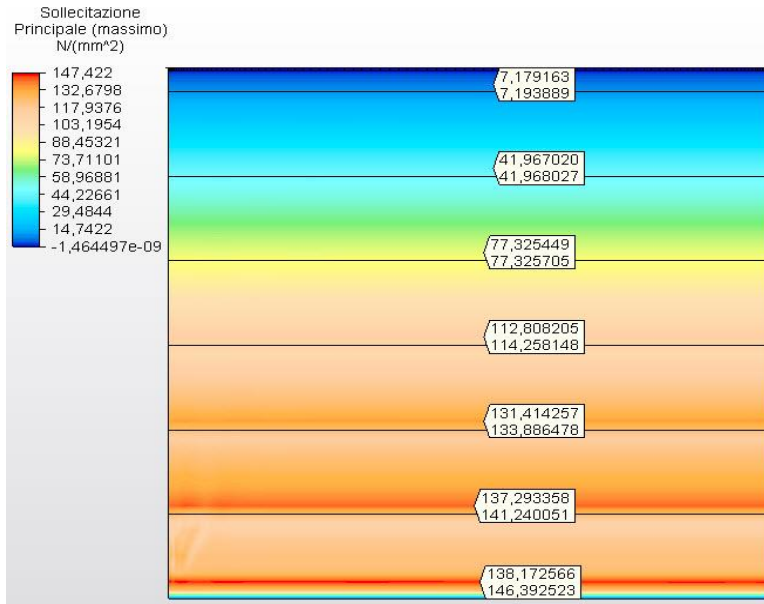


Figura 17: Tensões circunferenciais H/D = 1,00 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 18 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 4,75 mm. Tensão máxima foi de 104,02 MPa.

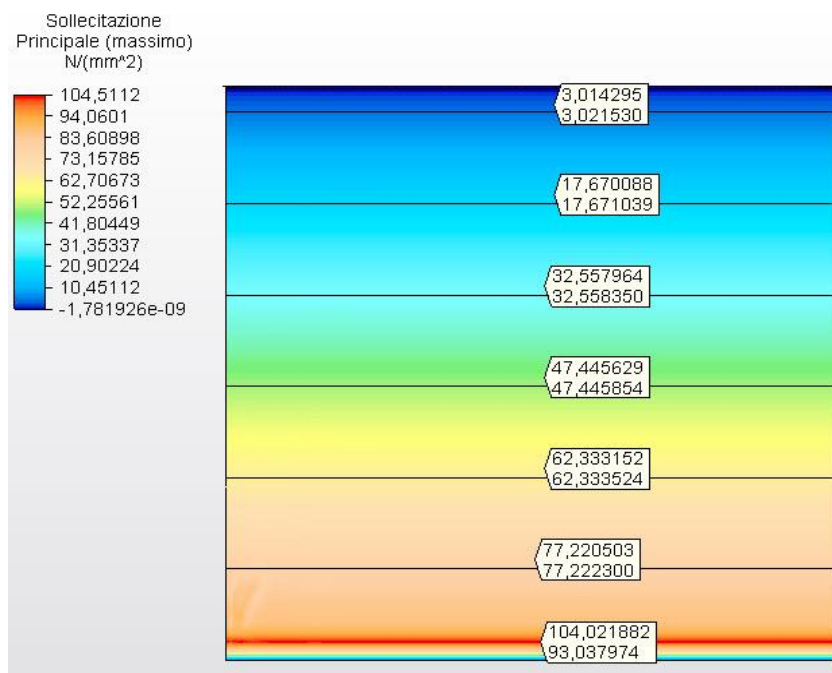


Figura 18: Tensões circunferenciais H/D = 1,00 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

A figura 19 mostra as curvas de tensões circunferenciais, em função das espessuras das virolas e altura de carregamento de água.

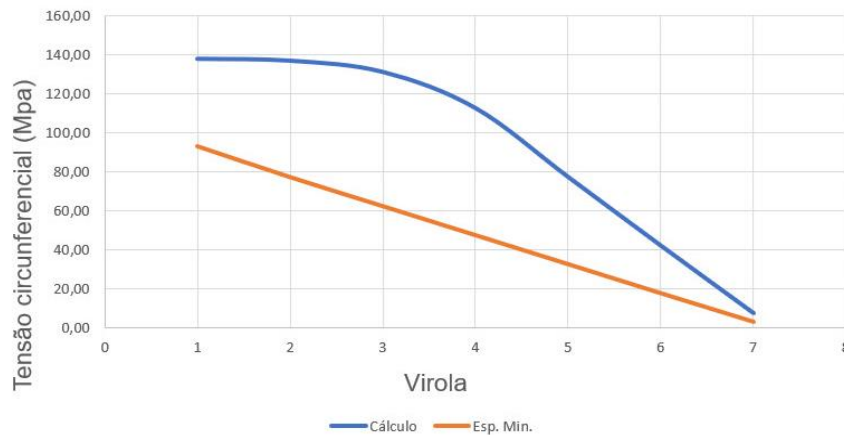


Figura 16: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 1,00

- Tanque H/D = 0,50 – diâmetro 7,49 m e altura 14,98 m

A figura 20 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como a virola 1 com 4,25 mm, virola 2 com 3,75 mm, virola 3 com 3,35 mm, virola 4 com 3,00, virola 5 com 2,65 mm e as demais com 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 146,86 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

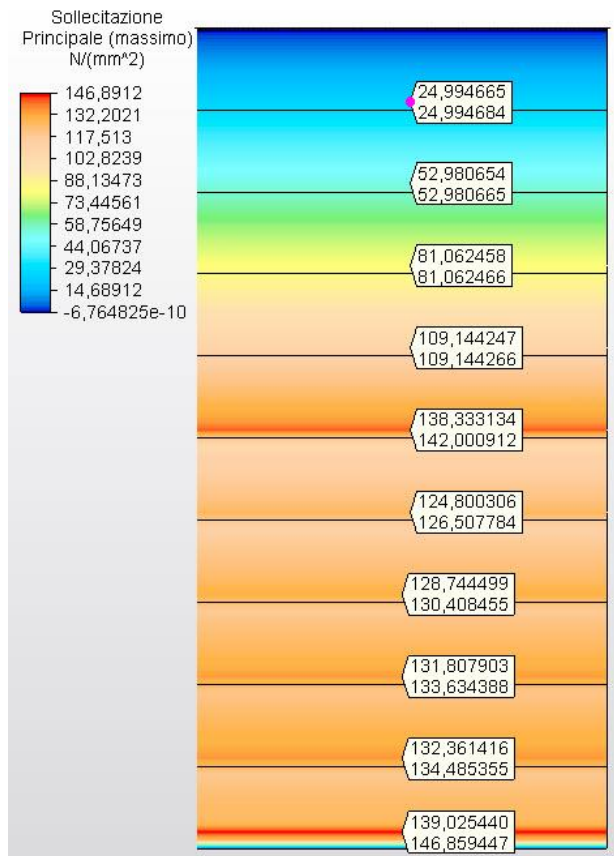


Figura 20: Tensões circunferenciais H/D = 0,50 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 21 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 4,75 mm. Tensão máxima foi de 132,09 MPa.

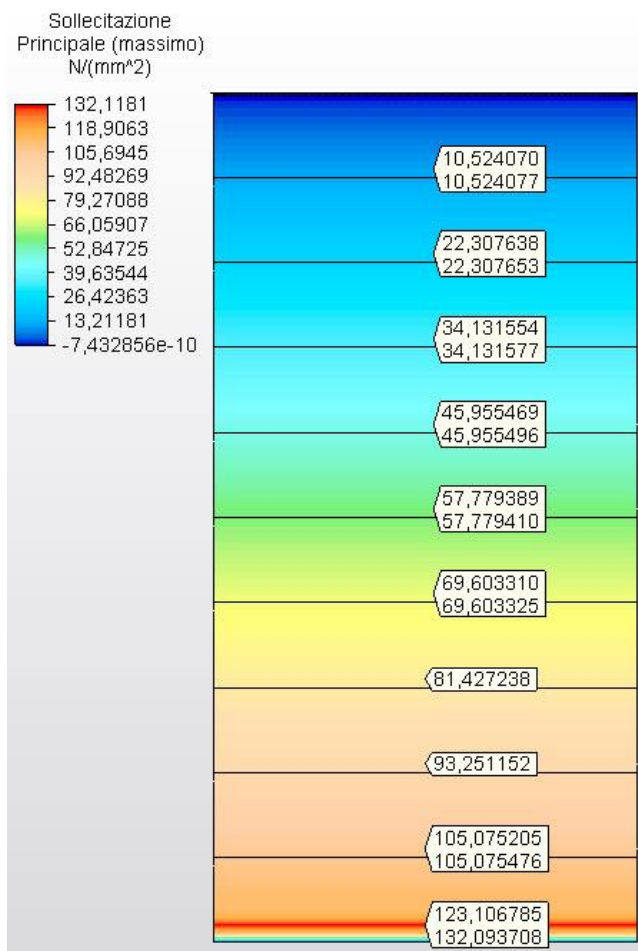


Figura 21: Tensões circunferenciais H/D = 0,50 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

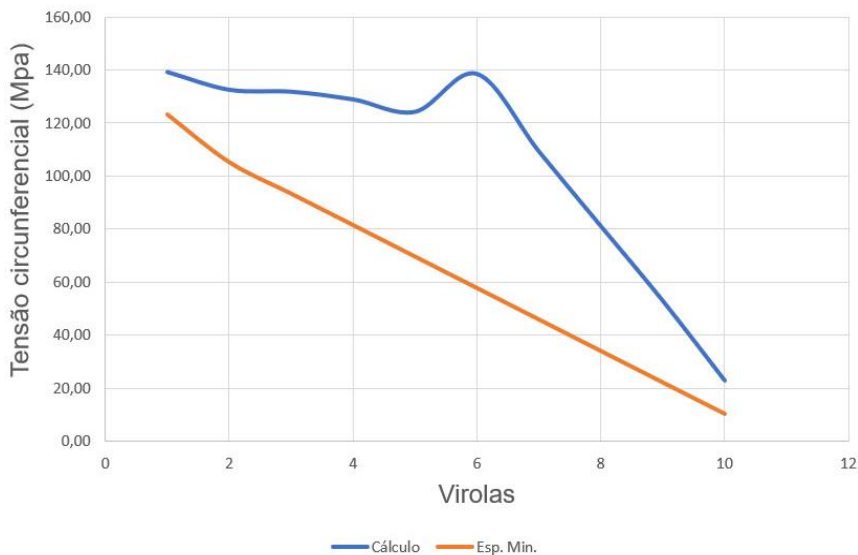


Figura 22: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 0,50

- Tanque H/D = 0,25 – diâmetro 5,84 m e altura 23,77 m

A figura 23 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com a Equação 1 e assumidas como a virola 1 com 6,35 mm, virola 2 com 4,75 mm, virola 3 com 4,25 mm, virola 4 com 4,25, virola 5 com 3,75 mm, virola 6 com 3,75 mm, virola 7 com 3,35 mm, virola 8 com 3,00 mm, virola 9 com 2,65 mm, virola 10 com 2,25 mm e as demais com 2,00 mm. A máxima tensão da virola 1 foi de 129,72 Mpa, menor que a tensão admissível do aço ASTM A36, de 160,00 Mpa, de acordo com a Equação 1 (fórmula 5.6.3.2).

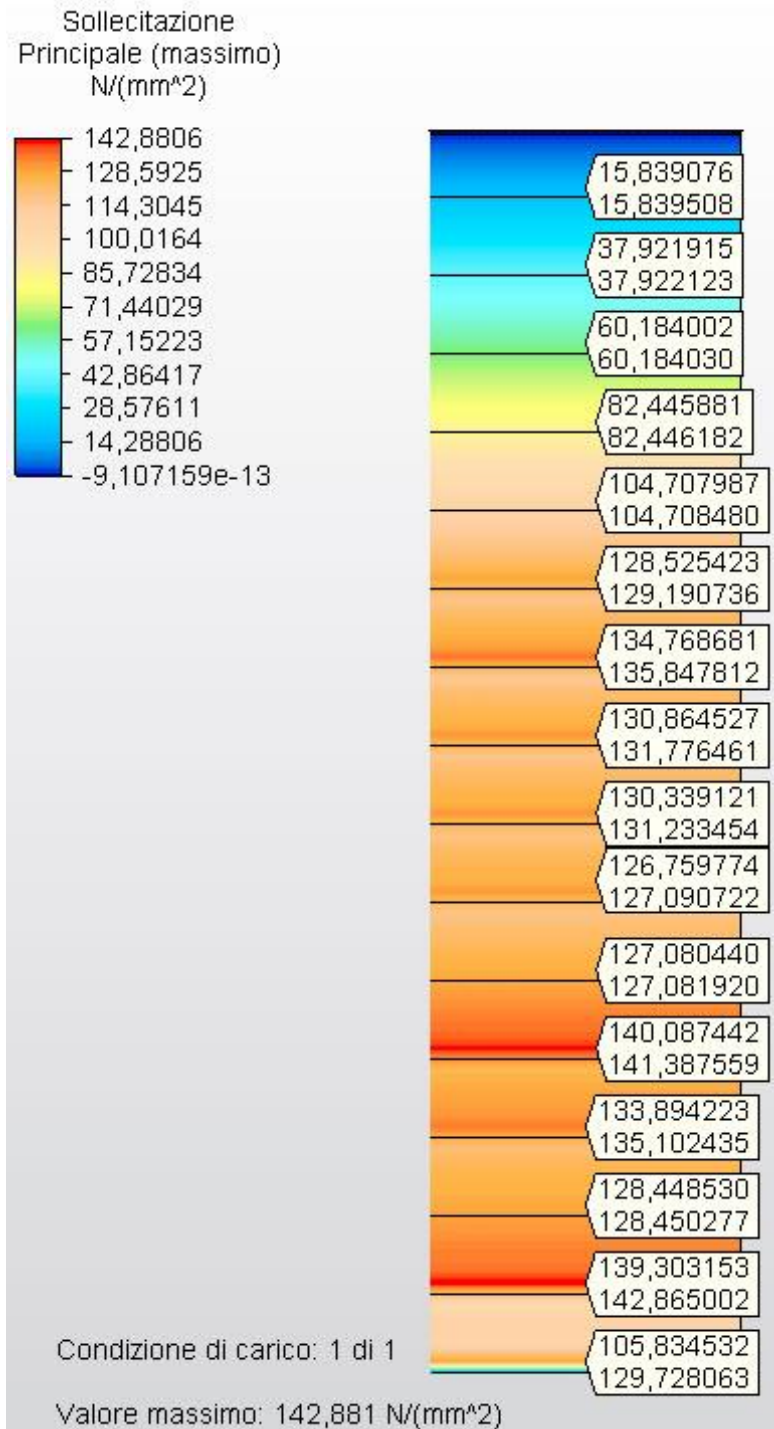


Figura 23: Tensões circunferenciais H/D = 0,50 em 2D – espessuras calculadas - Equação 1.

A figura 24 apresenta as tensões circunferenciais com as espessuras do tanque calculadas de acordo com as espessuras mínimas da API 650 (Tabela 1), no caso 6,35 mm. Tensão máxima foi de 129,72 MPa.

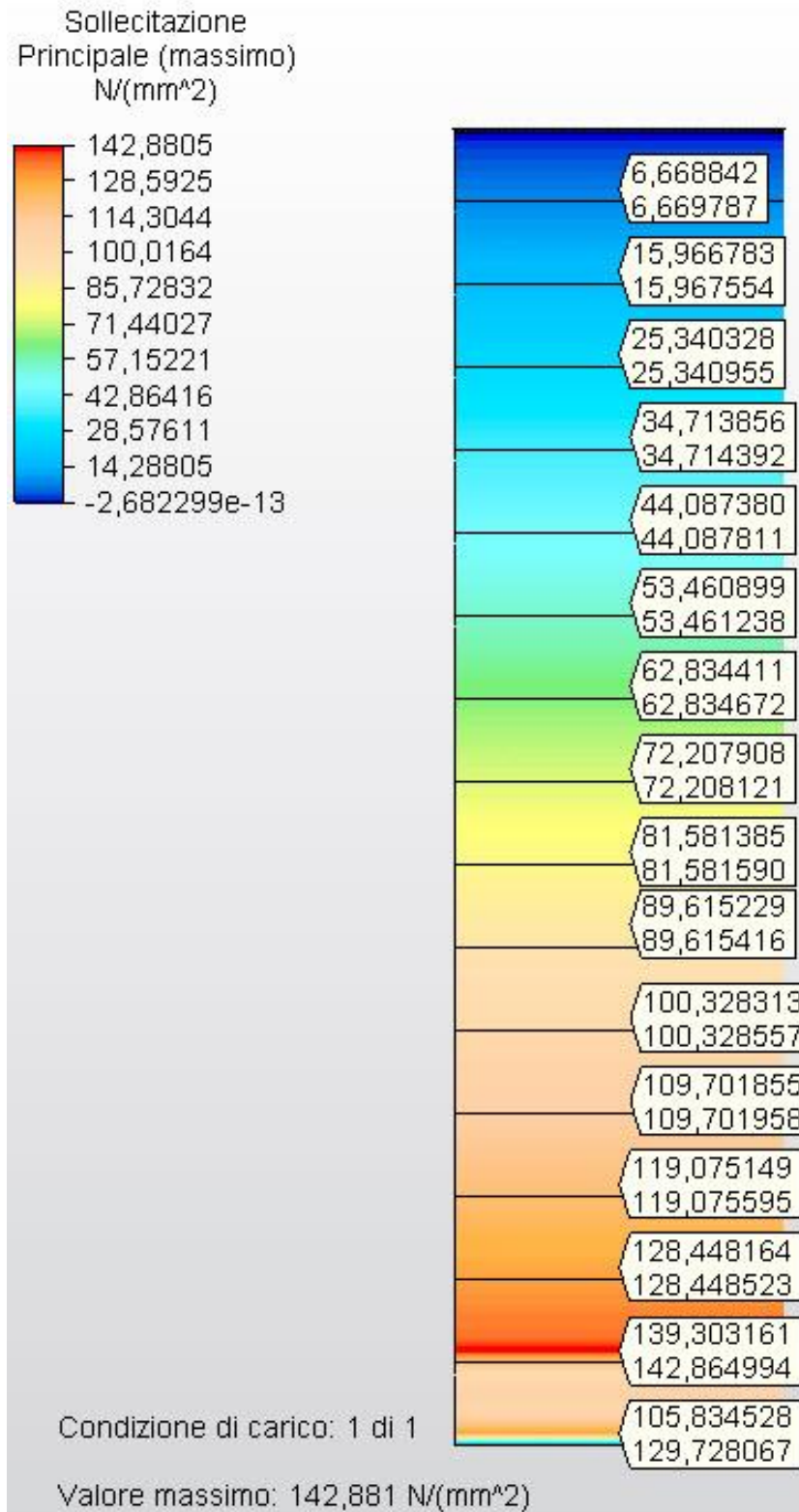


Figura 24: Tensões circunferenciais H/D = 0,25 em 2D– espessuras mínimas da Tabela 1.

A figura 25 mostra as curvas de tensões circunferenciais, em função das espessuras das virolas e altura de carregamento de água.

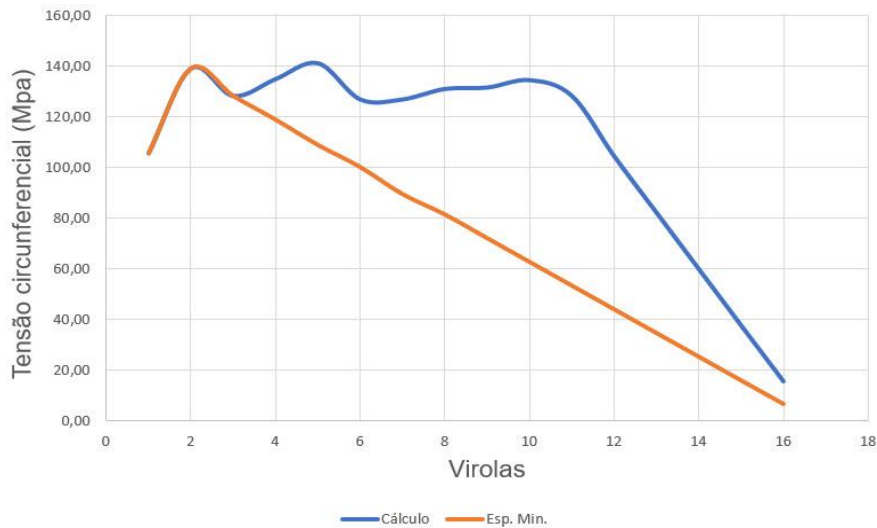


Figura 25: Curvas das tensões circunferenciais do tanque H/D = 0,25

A figura 26 mostra as curvas típicas de peso em função de H/D, para tanques sem teto, de espessuras variáveis, dimensionadas segundo a prescrição da API 650, com aplicação da Equação 1 (curva vermelha) e das espessuras mínimas (curva azul). A faixa ótima, para os dois critérios de dimensionamento, está entre H/D = 0,75 a H/D = 2,25.

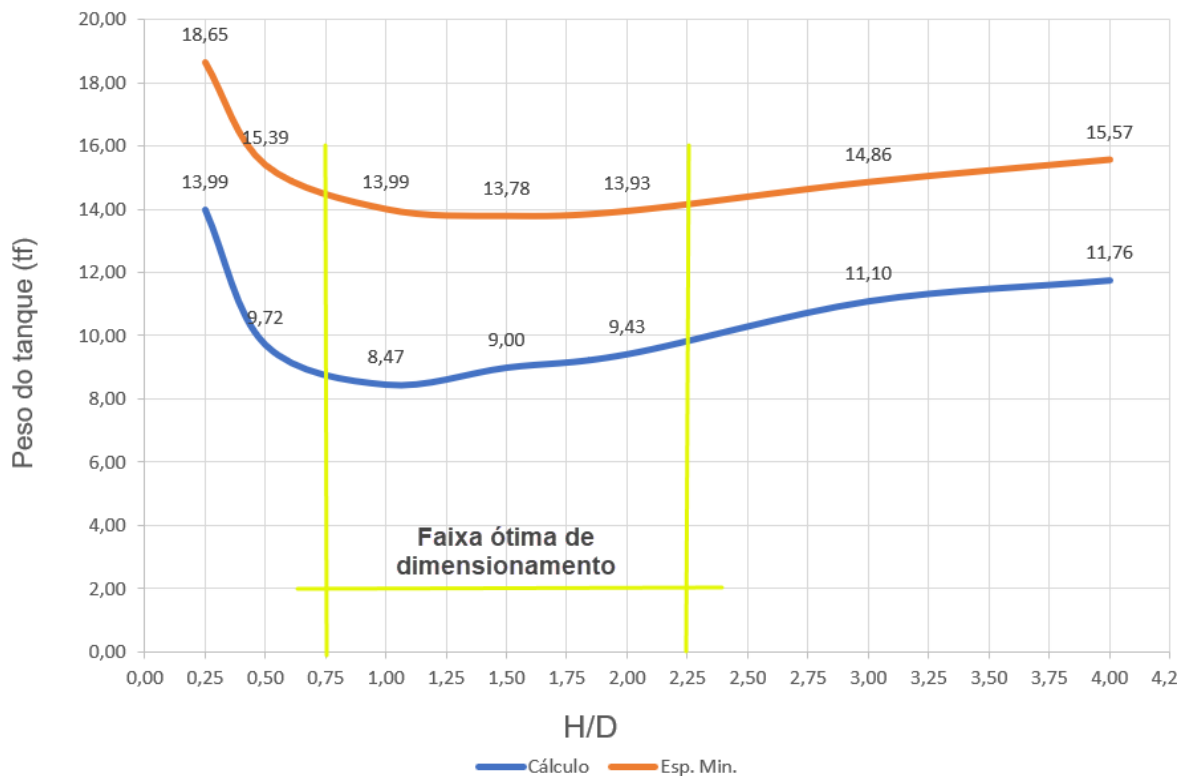


Figura 25: Curvas típicas de peso de tanques sem teto em função da relação H/D.

CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentado, conclui-se que é possível, para reservação de água, estabelecer ótimas relações de H/D que apontam para um peso mínimo do tanque, mesmo considerando os 2 critérios de dimensionamento, ou seja espessuras com apenas a aplicação da Equação 1 e espessuras levando em consideração as espessuras mínimas prescritas pela API 650.

Para dimensionamento de tanques metálicos para reservação de água, onde os critérios de segurança quanto à incêndios, tempo de resistência ao fogo e explosões do material armazenado não se aplicam, o dimensionamento com apenas as espessuras determinadas pela Equação 1 pode ser aceitável, pois as tensões circunferências determinadas pelo MEF foram sempre inferiores à tensão admissível estabelecida na Tabela 5-2 da API 650. A esse dimensionamento poderá ser adicionado sobresspesura para corrosão, de acordo com as normas e exigências do contratante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HECKE, M. B. Elementos finitos aplicados à engenharia de estruturas. Reservatórios cilíndricos e silos metálicos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.
2. RONCETTI, L. Otimização estrutural e econômica de tanques de armazenamento construídos em aço. Anais do 66º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM. São Paulo. 2011.
3. KUAN, S. Y. Design, Construction and Operation of the Floating Roof Tank. University of Southern Queensland. Queensland. 2009.
4. BARROS, S. M. Tanques de armazenamento. Universidade Petrobras. Rio de Janeiro. 2010.
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. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7.821, Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro, RJ. Abril de 1983.
7. API – *American Petroleum Institute*, API 650, *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, décima terceira edição, Washington D. C., Março de 2013.
8. SATO, A. K. Projeto de um tanque de armazenamento atmosférico com teto flutuante para estocagem de gasolina. Trabalho de graduação. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP. Guaratinguetá, 2015.
9. AZZUMI, E., GUZEY, S. Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks. *Engineering Structures* 101. 2015.