



OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E ECONÔMICA DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO CONSTRUÍDOS EM AÇO¹

Leonardo Roncetti²

Resumo

Com a crescente demanda por estocagem de granéis líquidos na área petrolífera, química, siderúrgica, celulose, controle ambiental, alimentos e outras, as estruturas de armazenamento aumentam sua influência no custo global das instalações. Neste trabalho, estudam-se os fatores estruturais, físicos, geométricos e econômicos que afetam a otimização visando o menor custo de tanques atmosféricos soldados, fabricados em aço carbono, para armazenamento de líquidos. Através de um software determina-se, para vários volumes armazenados, como se dá a otimização que conduz ao menor peso do tanque considerando as relações diâmetro / altura, variação das espessuras das chapas ao longo da altura, estrutura de suporte do teto, resistência dos aços, fabricação, montagem e outros fatores. Analisa-se o suporte de decisão sobre a quantidade ótima de tanques para um determinado volume, indicando se para dada situação, é preferível maior quantidade de tanques menores ou menor quantidade de tanques maiores. Os tanques analisados são projetados de acordo com a norma API 650, 11^a edição.

Palavras-chave: Tanques de aço; Otimização; Reservatórios; Armazenamento.

STRUCTURAL AND ECONOMICAL OPTIMIZATION OF WELDED STEEL STORAGE TANKS

Abstract

With the growing demand for storage of bulk liquids in the industries of oil and gas, petrochemical, chemical, steel, cellulose, environmental control, food and others, the storage facilities increase its influence in the overall cost of projects. Assessment is made for factors such as structural, physical, geometrical and economical that affects the optimization for lower weight of atmospheric above ground welded steel tanks, made from carbon steel, for the storage of liquids. Through a software, it is determined, for several volumes stored, how the optimization leads to lower cost of tanks considering the diameter, height, thicknesses of shell plates along the height, structure for roof support, strength of steel, fabrication, erection and other factors. It is also analyzed the support for the decision on the optimal quantity of tanks for a given volume, specifying if it is preferable more tanks with less volumes or less tanks with higher volumes. The analyzed tanks are designed according to API 650 Standard 11th Edition.

Key words: Steel tanks; Optimization; Storage tanks.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Civil. Diretor da TechCon Engenharia e Consultoria Ltda., Vitória, ES, Brasil.
E-mail: leonardo@techcon.eng.br



1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o crescimento econômico mundial, seguiu-se o aumento da demanda por estocagem de granéis líquidos nas mais variadas atividades econômicas: petróleo, biocombustíveis, química, siderurgia, alimentação e outras. Houve também o aumento de demanda de tanques para atividades intermediárias: saneamento, tratamento de rejeitos, refrigeração e demais processos fabris onde é necessário estocar ou processar granéis líquidos.

Com o crescimento da importância estratégica da estocagem, o custo dos equipamentos utilizados afeta direta e significativamente o custo final dos empreendimentos.

Os meios mais utilizados para a estocagem são os tanques de armazenamento, destacando-se os fabricados em aço através de soldagem, na sua maioria aéreos (aboveground) e cilíndricos, com diâmetros e alturas os mais variados.

Portanto, é necessário estudar a otimização desses tanques de armazenamento, definindo relações geométricas que conduzem a equipamentos mais econômicos para um mesmo volume total armazenado.

Tal otimização é feita determinando-se qual a relação do diâmetro e altura que conduz ao menor consumo de aço, que direta ou indiretamente conduz a um tanque mais econômico.

Mesmo obtendo-se as relações ótimas, devem ser considerados outros requisitos técnicos e econômicos, por exemplo, a área disponível para instalação da tancagem, que pode restringir o diâmetro dos tanques, exigências do processo industrial que podem requerer tanques com grandes alturas, divisão do volume total em várias áreas da planta, entre outros.

Todos os tanques considerados neste trabalho são atmosféricos, aéreos, cilíndricos, com teto cônico fixo ou sem teto. A eficiência das juntas é 1,00, a densidade específica do líquido é 1,00 e não foi considerada nenhuma sobresspesura de corrosão.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Otimização Geral de Cilindros

No caso teórico, cujo objetivo é determinar qual geometria conduz ao menor peso, e considerando todas as chapas de mesma espessura, na aplicação de tanques temos basicamente a situação de tanque com teto e tanque sem teto.

Em ambas, o objetivo é determinar qual a relação D/H que conduz a menor área de chapa. As duas soluções são bem definidas e explícitas, desde que o teto, quando for o caso, não tenha inclinação maior que 9 graus.

Estes dois casos, na prática, envolvem os tanques de menor volume, que podem ser produzidos em fábrica, onde a exigência construtiva governa as espessuras das chapas, superando os critérios de resistência.

Para um tanque com teto cônico, de determinado volume V, este é expresso pela Equação 1, onde D é o diâmetro do tanque:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (1)$$

A altura total do costado, H, em função do volume e diâmetro é:

$$H = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2)$$

A área externa total de chapas do tanque com teto, A₁, em função do diâmetro pode ser definida pela Equação 3, com as parcelas referentes ao fundo, costado e teto respectivamente e θ é o ângulo de inclinação do teto em relação à horizontal.

$$A_1(D) = \frac{\pi D^2}{4} + \frac{4V}{D} + \frac{\pi D^2}{4 \cos(\theta)} \quad (3)$$

Tomando-se $\cos(\theta) = 1$, válido para inclinações menores que 9°, derivando-se A₁ em relação a D, pode-se determinar um diâmetro ótimo (D₁) que conduz a um valor de área lateral A₁ mínimo.

$$A'_1(D) = \pi D - \frac{4V}{D^2} = 0 \quad (4)$$

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}} \quad (5)$$

Portanto, para um volume V, o diâmetro D₁ conduz ao tanque (com teto) mais leve. Substituindo a Equação 5 na Equação 2 obtemos a relação ótima D/H:

$$\frac{D_1}{H} = 1 \quad (6)$$

Conclui-se que para um dado volume V, tanques com espessuras homogêneas possuem menor peso de chapa quando a relação diâmetro / altura for igual a 1.

Para tanques sem teto, eliminando a última parcela da Equação 3 e adotando-se o mesmo procedimento de diferenciação, tem-se para o diâmetro ótimo (D₂):

$$D_2 = 2 \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \quad (7)$$

A relação ótima D/H para tanque sem teto é:

$$\frac{D_2}{H} = 2 \quad (8)$$

As relações da Equação 6 e Equação 8 foram confirmadas pelo Autor para tanques reais com elementos de mesma espessura de chapa, bem como por estudos feitos por Brownell e Young.⁽¹⁾

Pela Figura 1, conclui-se que a adoção de relações D/H menores que as ótimas, conduzirá mais rapidamente a tanques mais pesados.

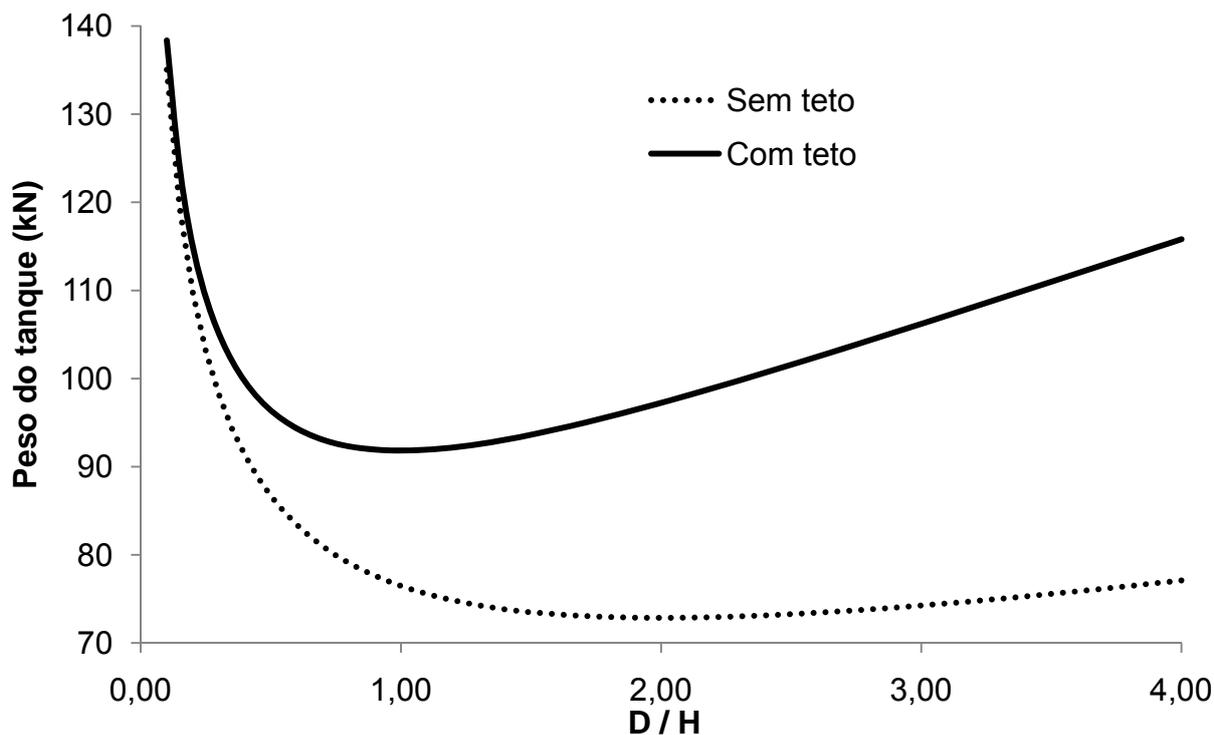


Figura 1. Peso do tanque em função da relação D/H para volume constante, com teto e sem teto, para fundo, costado e teto com chapas de mesma espessura.

2.2 Metodologia para Determinação do Peso dos Tanques

Tanques com todas as chapas de mesma espessura correspondem a uma pequena parcela do universo de dimensões adotadas na prática dos projetos. Portanto, é necessária a análise e determinação das relações D/H ótimas para os casos onde ocorre variação das espessuras do fundo, podendo ter até duas espessuras diferentes no caso de chapas anulares, espessuras variando ao longo da altura do costado bem como o efeito do teto e sua estrutura de suporte.

Segue-se a metodologia e os materiais utilizados para o cálculo das espessuras e pesos dos tanques, seguindo os critérios da API 650.⁽²⁾

2.2.1 Fundos sem chapas anulares

Para a determinação do peso do fundo sem chapas anulares, consideraram-se as chapas recortadas conforme a Figura 2, sobrepostas entre si em cinco vezes a espessura da chapa.

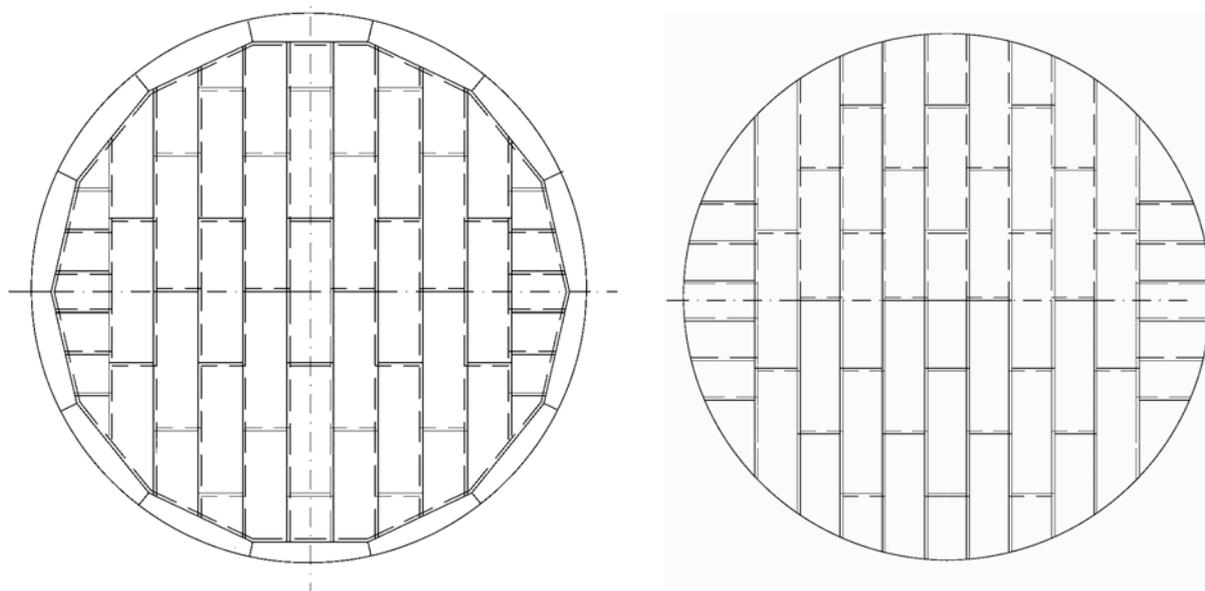
Para considerar o sobrepeso devido à sobreposição das chapas, foram simuladas as situações para as espessuras comerciais de chapas geralmente utilizadas em fundos, determinando-se a porcentagem da área sobreposta em relação à área total do fundo (fsc%). Os resultados estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Porcentagem da área sobreposta em relação à área total do fundo do tanque (fsc%)

Espessura da chapa de fundo (mm)	Sobreposição (mm)	fsc% para chapas com largura de 1800mm (%)	fsc% para chapas com largura de 2400mm (%)
4,75	25	1,71	1,36
6,3	35	2,26	1,90
8,0	40	2,76	2,18
9,5	50	3,47	2,73
12,5	65	4,56	3,59

Neste trabalho, foram consideradas chapas com largura de 2400 mm para todos os elementos dos tanques.

Os valores da Tabela 1 também podem ser utilizados para cálculo do peso do teto, levando-se em conta a sobreposição de chapas.


Figura 2. Disposição típica de chapas de fundo com chapas anulares (esquerda) e para fundos sem chapas anulares ou tetos (direita).⁽³⁾

2.2.2 Fundo com chapas anulares

Para a determinação do peso do fundo com chapas anulares, consideraram-se estas em forma circular na parte externa ao costado e forma poligonal na região interna ao costado, conforme a Figura 2. Para a região central, consideraram-se as chapas sobrepostas entre si, conforme a Tabela 1, e também a sobreposição com a chapa anular. A largura mínima da chapa anular é de 750 mm.

As dimensões e conseqüentemente, a quantidade de chapas anulares componentes do fundo, foram determinadas de modo a permitir que seja possível o recorte de duas chapas anulares utilizando uma única chapa de largura de 2400 mm, além de considerar uma quantidade sempre par. Isso visa diminuir a sobra de material, proporcionar uma quantidade limitada de juntas de topo entre as chapas anulares e conduzir sempre à simetria entre os quadrantes, conforme a Figura 2.

Foi utilizado um software de detalhamento automático de fundos de tanques, desenvolvido pelo Autor, sendo detalhados nas condições acima, fundos de tanques

com diâmetros de 15 a 50 m. Determinou-se que a fração das chapas anulares em relação à área total do fundo (fca) pode ser expressa pela Equação 9:

$$fca = 3,2 D^{-0,93} \quad (9)$$

Onde D é o diâmetro interno do tanque, na região do primeiro anel do costado. A Equação 9 pode ser usada para tanques com diâmetros entre 10 m e 80 m, sendo que superestima o fca para diâmetros menores que 10 m.

Por exemplo, para um tanque de 30 m de diâmetro, temos fca igual a 0,135, isto é, 13,5% da área do fundo do tanque é composta de chapas anulares.

As espessuras das chapas anulares foram determinadas conforme a API 650⁽²⁾, em função das tensões atuantes no primeiro anel do costado, conforme seu item 5.5.3.

Para tanques com diâmetro de até 6 m, adota-se fundo plano e nos demais casos, fundo com inclinação de 1/120.

2.2.3 Teto

Para diâmetros até 4,50 m, adota-se teto cônico autoportante com chapa de 4,75 mm de espessura e para diâmetros até 6 m adota-se teto autoportante com chapa de 6,3 mm de espessura. Para diâmetros maiores adota-se teto cônico suportado, com chapa de 4,75 mm de espessura. Em todos os casos utiliza-se para a chapa de teto, aço com tensão de escoamento de 205 MPa sem sobresspesura de corrosão.

As inclinações do teto são sempre as mínimas permitidas pela API 650⁽²⁾ para cada tipo: 9,5° (1/6) para teto cônico autoportante e 3,6° (1/16) para teto cônico suportado.

Em qualquer caso adota-se sobrecarga de 1,0 kN/m² sobre o teto.

O peso da chapa do teto é calculado em função da espessura e aplicando-se o fator devido à sobreposição conforme a Tabela 1.

Os tetos suportados utilizam colunas de tubo circular cuja bitola varia em função da altura da coluna. Geralmente a esbeltez máxima estabelecida pela API 650⁽²⁾ governa o dimensionamento, isto é, $L / r \leq 180$, onde L é o comprimento da coluna e r é o raio de giração mínimo da seção. A Tabela 2 apresenta colunas que podem ser utilizadas para pré-dimensionamento, em função de suas alturas. As seções apresentadas são classificadas como compactas segundo os critérios do AISC.⁽⁴⁾

Tabela 2. Tubos circulares para colunas de estruturas de suporte dos tetos estruturados

Altura da coluna (h)	Tubo a ser utilizado
$h \leq 10,0\text{m}$	Ø8" SCH 40
$10,0\text{m} < h \leq 13,5\text{m}$	Ø8" SCH 20
$13,5\text{m} < h \leq 16,5\text{m}$	Ø10" SCH 20
$16,5\text{m} < h \leq 20,0\text{m}$	Ø12" STD
$20,0\text{m} < h \leq 25,0\text{m}$	Ø16" SCH 20

A estrutura de suporte do teto é composta de vigas secundárias que apóiam as chapas do teto, vigas principais que apóiam as vigas secundárias e colunas que apóiam as vigas principais. Uma disposição típica destes perfis é vista na Figura 3.

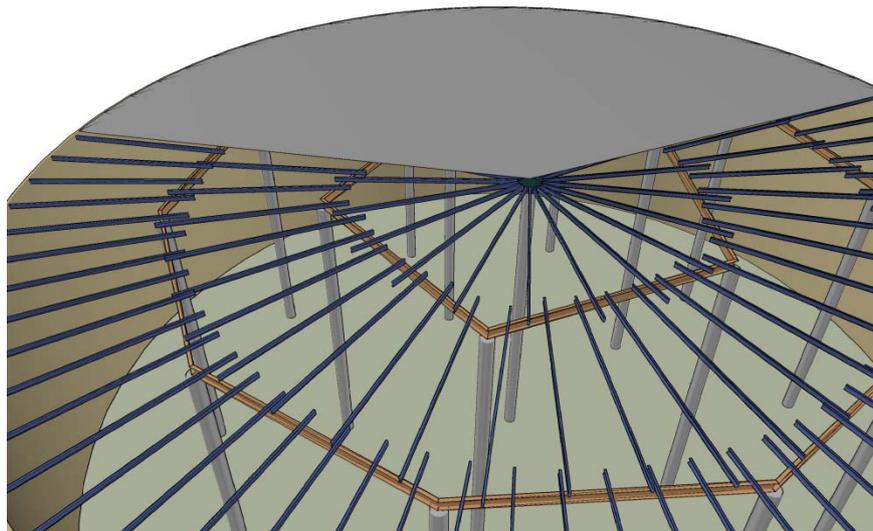


Figura 3. Esquema da estrutura de suporte de teto cônico fixo do tanque.^(1,5)

Para o cálculo do peso da estrutura do teto, realizou-se o dimensionamento destas estruturas para tanques com diâmetro entre 7 m e 50 m, sem incluir o peso das colunas, que são escolhidas conforme a Tabela 2. Verifica-se que o peso da estrutura de suporte do teto pesa entre 0,14 kN/m² e 0,15 kN/m², considerando a área projetada do tanque, isto é, a equivalente à área do fundo, sendo os valores maiores para os tanques de menor diâmetro.

2.2.4 Costado

Através do mesmo software desenvolvido pelo Autor, determinou-se a espessura de cada chapa que compõe os anéis do tanque para cada relação D/H, considerando todos os aspectos normativos e construtivos exigidos pela API 650.⁽²⁾ O software também é responsável pelo cálculo do fundo, teto e sua estrutura, quando for o caso, fazendo o somatório para determinação do peso total.

Utilizou-se o método “1-foot” para o cálculo das espessuras, sem consideração de sobresspesura de corrosão e eficiência de junta de 1,0.

As espessuras das chapas de aço utilizadas para todas as simulações foram, em milímetros: 4,75; 6,30; 8,00; 9,50; 12,50; 16,00; 19,00; 22,40; 25,00; 31,50; 37,50, todas com largura de 2400 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segue-se para as situações indicadas os resultados da otimização para determinação da relação D/H que conduz ao menor peso.

As tabelas podem ser utilizadas para prever qual seria o peso mínimo para determinados tanques, uma vez que os valores indicados são os pesos mínimos possíveis para tanques tecnicamente viáveis.

Tabela 3. Otimização de tanques com teto, aço com $f_y = 250$ MPa, sem sobresspesura de corrosão, densidade relativa do líquido = 1,00, eficiência da solda do costado = 1,0

Volume (m ³)	D/H ótimo	D (m)	H (m)	Peso total ótimo (kN)	Costado (kN)	Chapa de fundo (kN)	Chapa do teto (kN)	Estrutura de teto (kN)	Faixa ótima de D/H ⁽¹⁾
50	0,70	3,55	5,06	32,4	23,8	4,9	3,7	0,0	0,35 a 1,35
75	0,75	4,15	5,54	41,9	30,1	6,7	5,1	0,0	0,40 a 0,95
100	0,70	4,47	6,38	50,4	36,7	7,7	5,9	0,0	0,40 a 0,85
125	0,55	4,44	8,07	58,6	45,1	7,7	5,8	0,0	0,35 a 0,95
150	0,45	4,41	9,81	66,9	53,6	7,6	5,7	0,0	0,35 a 1,10
160	0,40	4,34	10,84	70,7	57,8	7,3	5,5	0,0	0,30 a 1,05
200	0,65	5,49	8,45	81,7	58,2	11,7	11,9	0,0	0,30 a 1,00
250	0,65	5,91	9,10	94,5	67,1	13,6	13,8	0,0	0,35 a 1,00
300	0,55	5,94	10,81	106,7	79,1	13,7	13,9	0,0	0,35 a 1,10
400	0,40	5,88	14,71	131,7	104,6	13,4	13,6	0,0	0,30 a 1,35
500	0,85	8,15	9,59	152,8	97,0	25,8	19,4	10,6	0,40 a 1,35
600	0,70	8,12	11,60	171,8	115,3	25,6	19,2	11,7	0,45 a 1,35
750	0,70	8,74	12,49	198,5	133,2	29,7	22,3	13,3	0,50 a 1,35
1.000	0,75	9,85	13,13	239,1	157,3	37,6	28,3	15,9	0,50 a 1,35
1.250	0,85	11,06	13,01	277,1	175,1	47,5	35,7	18,9	0,50 a 1,40
1.500	0,75	11,27	15,03	312,4	204,6	49,3	37,1	21,4	0,60 a 1,45
2.000	0,95	13,42	14,13	379,7	229,8	70,0	52,6	27,3	0,75 a 1,30
2.500	0,90	14,20	15,78	462,9	296,8	78,3	58,8	29,0	0,75 a 1,05
3.000	0,80	14,51	18,14	550,0	369,9	81,8	61,4	36,9	0,70 a 0,85
4.000	1,55	19,91	12,85	743,6	409,0	153,4	115,7	65,6	1,15 a 1,80
4.500	1,20	19,02	15,85	831,7	512,8	139,8	105,5	73,6	1,20 a 1,35
5.000	2,10	23,73	11,30	918,9	431,8	218,0	164,3	104,8	1,30 a 2,70
6.000	1,95	24,61	12,62	1.067,9	542,6	234,3	176,6	114,3	1,75 a 2,55
7.500	1,70	25,32	14,89	1.313,3	737,2	248,2	187,0	140,9	1,60 a 2,90
8.000	1,90	26,85	14,13	1.386,2	750,6	279,1	210,3	146,3	1,65 a 2,65
10.000	2,60	32,11	12,35	1.726,9	810,5	399,3	300,8	216,3	2,25 a 3,45
12.500	2,30	33,20	14,44	2.150,5	1.130,5	427,0	321,6	271,3	2,10 a 3,00
15.000	2,90	38,12	13,14	2.562,9	1.278,3	563,0	423,9	297,7	2,30 a 3,80
20.000	4,25	47,66	11,21	3.344,6	1.420,3	880,3	662,5	381,4	4,00 a 5,20
30.000	3,55	51,38	14,47	4.874,5	2.567,5	1.023,2	770,0	513,8	3,40 a 5,40
40.000 ⁽²⁾	4,50	61,20	13,60	6.517,7	3.257,0	1.452,1	1.092,6	716,1	4,05 a 6,80

⁽¹⁾ : A faixa ótima indica a relação D/H onde a variação do peso total é de no máximo 5% para mais ou para menos em relação ao peso total ótimo do tanque; ⁽²⁾ : O diâmetro do tanque excede o limite de aplicação do método "1-foot".

Tabela 4. Otimização de tanques com teto, aço com $f_y = 205$ MPa, sem sobresspesura de corrosão, densidade relativa do líquido = 1,00, eficiência da solda do costado = 1,0

Volume (m ³)	D/H ótimo	D (m)	H (m)	Peso total ótimo (kN)	Costado (kN)	Chapa de fundo (kN)	Chapa do teto (kN)	Estrutura de teto (kN)	Faixa ótima de D/H ⁽¹⁾
50	0,70	3,55	5,06	32,4	23,8	4,9	3,7	0,0	0,35 a 1,35
75	0,75	4,15	5,54	41,9	30,1	6,7	5,1	0,0	0,40 a 0,95
100	0,70	4,47	6,38	50,4	36,7	7,7	5,9	0,0	0,40 a 0,85
125	0,55	4,44	8,07	58,6	45,1	7,7	5,8	0,0	0,35 a 0,95
150	0,45	4,41	9,81	66,9	53,6	7,6	5,7	0,0	0,35 a 1,10
160	0,40	4,34	10,84	70,7	57,8	7,3	5,5	0,0	0,30 a 1,05
200	0,65	5,49	8,45	81,7	58,2	11,7	11,9	0,0	0,30 a 1,00
250	0,65	5,91	9,10	94,5	67,1	13,6	13,8	0,0	0,35 a 1,00
300	0,55	5,94	10,81	106,7	79,1	13,7	13,9	0,0	0,35 a 1,10
400	0,40	5,88	14,71	131,7	104,6	13,4	13,6	0,0	0,30 a 1,35
500	0,85	8,15	9,59	152,8	97,0	25,8	19,4	10,6	0,40 a 1,35
600	0,70	8,12	11,60	171,8	115,3	25,6	19,2	11,7	0,45 a 1,35
750	0,70	8,74	12,49	198,5	133,2	29,7	22,3	13,3	0,50 a 1,35
1.000	0,75	9,85	13,13	239,1	157,3	37,6	28,3	15,9	0,50 a 1,35
1.250	0,85	11,06	13,01	277,1	175,1	47,5	35,7	18,9	0,65 a 1,40
1.500	0,85	11,75	13,83	313,2	197,1	53,6	40,3	22,2	0,65 a 1,45
2.000	1,30	14,90	11,46	389,0	209,5	86,2	64,8	28,4	1,10 a 1,30
2.500	1,05	14,95	14,24	482,2	299,5	86,8	65,2	30,7	0,90 a 1,05
3.000	0,85	14,81	17,42	592,5	406,1	85,1	64,0	37,3	0,75 a 1,05
4.000	1,30	18,78	14,44	775,1	466,2	136,4	102,9	69,7	1,30 a 1,65
4.500	1,65	21,14	12,81	873,5	472,6	173,0	130,4	97,4	1,65 a 2,30
5.000	2,05	23,54	11,48	959,4	478,6	214,5	161,7	104,5	1,70 a 2,65
6.000	2,30	26,00	11,30	1.142,8	566,6	261,6	197,2	117,4	1,45 a 3,40
7.500	2,30	28,00	12,18	1.364,6	699,5	303,7	228,8	132,6	2,00 a 2,80
8.000	2,55	29,62	11,61	1.450,8	714,5	339,6	255,9	140,8	2,30 a 2,70
10.000	3,55	35,62	10,03	1.824,6	738,5	491,6	370,2	224,4	3,50 a 3,65
12.500	2,90	35,87	12,37	2.192,0	1.073,1	498,5	375,4	245,0	2,90 a 3,10
15.000	3,80	41,71	10,98	2.725,4	1.224,1	674,3	507,6	319,4	3,75 a 4,75
20.000	4,05	46,90	11,58	3.561,0	1.689,6	852,4	641,6	377,4	3,45 a 5,15
30.000	4,00	53,46	13,37	5.225,4	2.743,7	1.108,0	833,8	539,9	3,65 a 6,00
40.000	4,15	59,57	14,35	6.981,4	3.880,0	1.375,8	1.035,2	690,5	4,05 a 6,35

⁽¹⁾ : A faixa ótima indica a relação D/H onde a variação do peso total é de no máximo 5% para mais ou para menos em relação ao peso total ótimo do tanque.

Tabela 5. Otimização de tanques sem teto, aço com $f_y = 250$ MPa, sem sobresspesura de corrosão, densidade relativa do líquido = 1,00, eficiência da solda do costado = 1,0

Volume (m ³)	D/H ótimo	D (m)	H (m)	Peso total ótimo (kN)	Costado (kN)	Chapa de fundo (kN)	Faixa ótima de D/H ⁽¹⁾
50	1,15	4,18	3,64	28,0	21,2	6,8	0,60 a 2,65
75	1,20	4,86	4,05	36,1	26,9	9,2	0,60 a 2,35
100	1,20	5,35	4,46	43,3	32,2	11,1	0,60 a 2,40
125	1,25	5,84	4,67	49,8	36,6	13,2	0,60 a 2,40
150	1,25	6,20	4,96	55,9	40,9	14,9	0,65 a 2,45
160	1,25	6,34	5,07	58,2	42,6	15,6	0,65 a 2,45
200	1,25	6,83	5,46	67,1	49,0	18,1	0,65 a 2,45
250	1,30	7,45	5,73	77,3	55,7	21,6	0,65 a 2,50
300	1,30	7,92	6,09	86,8	62,5	24,3	0,65 a 2,50
400	1,30	8,72	6,70	104,4	74,9	29,5	0,65 a 2,55
500	1,30	9,39	7,22	120,5	86,3	34,2	0,65 a 2,55
600	1,35	10,10	7,48	135,5	95,9	39,6	0,65 a 2,55
750	1,35	10,88	8,06	156,5	110,5	46,0	0,70 a 2,55
1.000	1,35	11,98	8,87	188,5	132,8	55,7	0,70 a 2,60
1.250	1,35	12,90	9,56	217,8	153,2	64,6	0,70 a 2,10
1.500	1,35	13,71	10,16	245,2	172,2	73,0	0,70 a 1,75
2.000	1,30	14,90	11,46	295,8	209,5	86,2	0,95 a 1,30
2.500	1,05	14,95	14,24	372,8	286,0	86,8	0,80 a 1,05
3.000	1,95	19,53	10,02	445,2	297,7	147,5	1,45 a 3,70
4.000	2,70	23,96	8,87	545,8	323,6	222,2	1,50 a 4,00
4.500	3,40	26,91	7,91	604,5	324,1	280,3	1,75 a 4,50
5.000	2,10	23,73	11,30	649,8	431,8	218,0	2,10 a 3,60
6.000	3,00	28,40	9,47	749,9	437,5	312,4	2,70 a 4,15
7.500	3,65	32,67	8,95	919,1	505,8	413,3	2,85 a 4,85
8.000	3,95	34,27	8,67	971,1	516,2	454,9	3,20 a 4,55
10.000	3,05	33,86	11,10	1.201,4	757,2	444,2	2,60 a 3,65
12.500	3,60	38,55	10,71	1.508,2	932,3	575,9	3,45 a 5,65
15.000	4,90	45,40	9,27	1.770,3	971,4	798,9	4,90 a 6,00
20.000	4,25	47,66	11,21	2.300,6	1.420,3	880,3	4,20 a 5,95
30.000	4,75	56,61	11,92	3.431,1	2.188,5	1.242,6	4,45 a 7,25
40.000 ⁽²⁾	6,15	67,91	11,04	4.511,5	2.723,0	1.788,5	5,20 a 8,00

⁽¹⁾: A faixa ótima indica a relação D/H onde a variação do peso total é de no máximo 5% para mais ou para menos em relação ao peso total ótimo do tanque; ⁽²⁾: O diâmetro do tanque excede o limite de aplicação do método "1-foot".

A diferença de peso total dos tanques com costados utilizando aços com tensão de escoamento de 205 MPa ou 250 MPa só se torna notável com volumes acima de 1.500 m³ para tanques com teto e acima de 2.000 m³ para tanques sem teto. Esta diferença, que pode ser notada na Figura 4, varia de 1% a 9% com média de 5%, sendo os tanques com aço de 250 MPa mais leves. A baixa diferença se explica pelo fato de a relação D/H ótima para os tanques serem diferentes, indicando que a resistência do aço do costado influencia tal relação.

Conclui-se pela Figura 4 que o peso de tanques com relações D/H ótimas é diretamente proporcional ao volume.

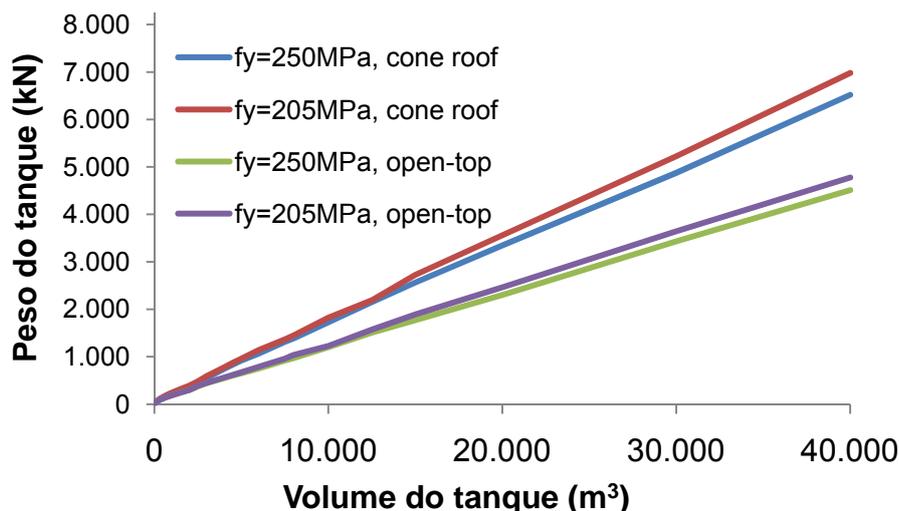


Figura 4. Peso ótimo dos tanques em função do volume.

A otimização serve para indicar, para tanques com outras relações D/H, e um determinado volume, quão distante se está do peso mínimo possível para este volume.

A Figura 5 mostra uma curva típica de peso em função de D/H para tanques com teto e chapas de espessuras variáveis. A descontinuidade da curva é devido à discretização das bitolas das chapas. Por exemplo, até uma determinada altura, o primeiro anel exige chapa de 8,0 mm. Para uma altura imediatamente superior, a chapa exigida é de 9,5 mm. Contudo, o aspecto é semelhante à curva da Figura 1.

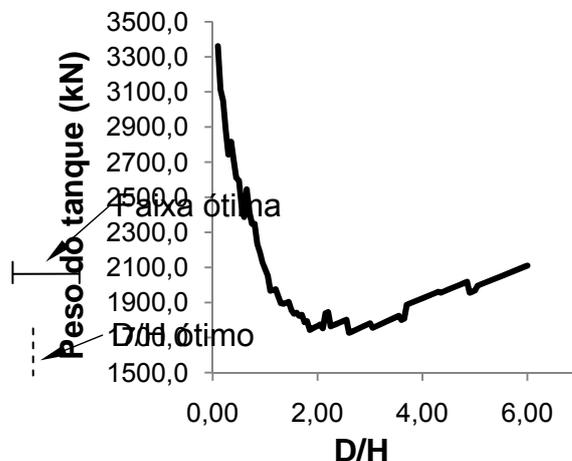


Figura 5. Curva típica do peso de um tanque com teto em função da relação D/H

3.1 Quantidade Ótima de Tanques

Com base nos valores das tabelas anteriores, pode-se estabelecer qual a quantidade de tanques necessária para armazenar um determinado volume, que levaria um consumo total mínimo de aço para a fabricação dos tanques.

A Tabela 6, que utiliza os pesos da Tabela 3, indica que na maioria absoluta dos casos, uma quantidade menor de tanques, conduz a um consumo total de aço menor. Este fato é observado também para os dados das demais tabelas.

Tabela 6. Peso em kN do conjunto de tanques necessários para cada volume, utilizando os valores da Tabela 3

Volume (m ³)	Quantidade de tanques						
	1	2	3	4	5	10	20
100	50	65	-	-	-	-	-
160	71	87	-	-	-	-	-
200	82	101	117	130	-	-	-
300	107	134	151	168	-	-	-
400	132	163	184	202	218	-	-
500	153	189	217	234	252	324	-
1.000	239	306	345	378	409	504	648
2.000	410	478	552	611	658	817	1.008
3.000	643	644	717	794	859	1.067	1.339
4.000	846	820	879	956	1.035	1.317	1.635
5.000	1.031	1.014	1.053	1.115	1.195	1.528	1.889
10.000	1.954	2.063	2.102	2.029	2.051	2.391	3.055
20.000	3.834	3.908	3.927	4.125	4.228	4.101	4.782
30.000	5.741	5.936	5.861	5.924	5.978	6.428	6.445
40.000	7.622	7.667	7.899	7.815	7.762	8.455	8.202

Se por um lado, uma quantidade menor de tanques conduz a pesos totais menores, lembramos que há outros fatores que podem governar esta tomada de decisão, tais como restrições do processo industrial, layout das instalações, necessidades operacionais, entre outros.

Myers⁽⁶⁾ indica outros pontos a serem considerados, como maior flexibilidade na programação de manutenção quando há mais tanques e necessidade de inspeção periódica dos tanques para controle de qualidade. Além disso, uma análise de risco pode indicar que seja melhor o armazenamento do mesmo produto em locais diferentes, por motivo de incêndio, deterioração, contaminação e outros.

4 CONCLUSÃO

Pelos resultados apresentados, conclui-se que é possível estabelecer relações ótimas de D/H que conduzem a um peso mínimo do tanque para um volume fixo, e que estas relações afastam-se mais da solução de tanques com chapas uniformes a medida que o volume aumenta. Tal fato ocorre devido as variações de espessura no fundo e costado além da inclusão da estrutura de suporte do teto.

Conclui-se ainda que a adoção de aços com tensão de escoamento de 250 MPa para o costado diminui o peso total dos tanques em 1% a 9% em relação aos aços com tensão de escoamento de 205 MPa, para volumes acima de 1.500 m³ para tanques com teto e 2000 m³ para tanques sem teto.

Verifica-se que a curva peso do tanque em função de D/H (Figura 5) possui o aspecto semelhante à curva para tanques com teto da Figura 1, sendo a descontinuidade da primeira curva explicada pela discretização das espessuras das chapas do tanque.

Também é possível concluir que na maioria absoluta dos casos, quanto menor o número de tanques para armazenamento de um volume total, menor será o peso total de aço necessário para a fabricação desses tanques.



Em trabalhos futuros, o Autor considerará na otimização dos tanques, a influência do método *variable-design-point* para grandes volumes, uma possível otimização da estrutura de suporte do teto e efeito da densidade do fluido armazenado.

REFERÊNCIAS

- 1 BROWNELL, L.E. ; YOUNG , E.D. **Process equipment design**. Ed. John Wiley & Sons, 1959.
- 2 API AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Standard 650: Welded steel tanks for oil storage**. Washington DC, 2007.
- 3 PETROBRAS. **N-270: Projeto de tanque de armazenamento atmosférico**. Rio de janeiro 2007.
- 4 AISC AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Specification for structural steel buildings – Allowable stress design and plastic design**. Chicago, 1989.
- 5 Long, B., Garner, B., **Guide to storage tanks & equipment**. London, Professional Engineering Publishing, London, 2004.
- 6 Myers, P.E., **Aboveground Storage Tanks**, McGraw-Hill, New York, 1997.