Estudo de caso de vasos de armazenamento: projeto de um tanque para estocagem de gasolina

Storage Vessels Case Study: Design of a Tank for Stocking Gasoline

Armando Kenzo Sato¹, Antonio R. Faria Neto¹, Everton C. Medeiros¹, Sofia Glyniadakis¹,
Marcelo S. Martins*¹

RESUMO

Tanques de armazenamento são equipamentos estáticos de caldeiraria pesada, sujeitos a pressões próximas à atmosférica e, na maioria das vezes, destinados ao armazenamento de óleo e seus derivados. Quanto maior for o volume armazenado, menor será o custo de armazenamento por barril. Isso torna comum o interesse em construir tanques cada vez maiores. No entanto, há um limite para o projeto de um tanque de armazenamento. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um tanque de armazenamento atmosférico, com teto flutuante para armazenamento de gasolina, baseado nos requisitos API 650 e Petrobras. A primeira etapa diz respeito à escolha do tipo de tanque de armazenamento a ser projetado de acordo com o produto a ser armazenado. Em seguida, a determinação da capacidade de armazenamento, as dimensões do tanque de armazenamento e os materiais de construção. A segunda etapa contempla o desenho do fundo, em sequência, da lateral e do teto. A terceira e última etapa, modelagem em software de simulação e análise. Além disso, os resultados do projeto deverão ser baseados em dimensões comerciais, para sua viabilidade.

Palavras-chave: Tanque de Armazenamento; Projeto; Simulação.

ABSTRACT

Storage tanks are static equipment of heavy boilers, subject to pressure close to atmospheric pressure and, in most cases, intended for the storage of oil and its derivatives. The greater the volume stored, the lower the storage cost per barrel. This makes the interest in building ever bigger tanks common. However, there is a limit to the design of a storage tank. In this context, this work aims to show the design of an atmospheric storage tank, with a floating ceiling for gasoline storage, based on API 650 and Petrobras requirements. The first stage concerns the choice of the type of storage tank to be designed according to the product to be stored. Then, the determination of the storage capacity, the dimensions of the storage tank and the construction materials. The second stage contemplates the design of the bottom, in sequence, of the side and the ceiling. The third and final stage, modeling in software for simulation and analysis. Also, the project results will have to be based on commercial dimensions, for its viability.

Keywords: Storage Tank; Project; Design; Simulation

---

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP - Campus de Guaratinguetá

*sampaio.martins@unesp.br

INTRODUÇÃO

Tanques de armazenamento são equipamentos estáticos de caldeiraria pesada, sujeitos à pressão próxima à atmosférica e, na maioria das vezes, destinados ao armazenamento de petróleo e seus derivados. Eles são uma divisão de vasos de armazenamento (não pressurizados). Os vasos de armazenamento com pressões baixas são denominados tanques de baixa pressão, e os de alta pressão são denominados vasos de pressão (BARROS, 2014). No Brasil, é usual projetar tanques de armazenamento com capacidades que vão de 100 barris (16m^3) até 700.000 barris (112.000m^3). Quanto maior o volume armazenado, menor é o custo de armazenamento por barril. Isso faz com que o interesse pela construção de tanques cada vez maiores seja cada vez mais comum. Porém, há um limite para dimensionamento de um tanque de armazenamento devido à pressão hidrostática que o fluido armazenado exerce na parede do tanque. Quanto maior a pressão, maior a espessura de costado requerida no projeto, e estas espessuras têm medidas padronizadas pelos fabricantes de chapas de aço-carbono. Assim, tem-se um limite para o dimensionamento do tanque (BARROS, 2014). A motivação para este trabalho encontra-se em um acidente ocorrido em 02 de abril de 2015 na empresa Ultracargo na cidade de Santos, onde seis tanques de combustível foram atingidos por um grande incêndio (**Figura 1 (a)**): dois de etanol e quatro de gasolina. Ao todo, eles tinham capacidade para armazenar 34 milhões de litros de combustível fazendo com que o incêndio provocasse grandes impactos ambientais (**Figura 1(b)**) e econômicos (G1, 2015).

Neste contexto, este trabalho apresentará o projeto de um tanque de armazenamento atmosférico (não pressurizado), cilíndrico, vertical, não enterrado, construído com chapas de aço-carbono posteriormente soldadas, para armazenamento de gasolina.

Figura 1 – (a) Incêndio que atingiu tanques do terminal da Ultracargo em Santos (b) Peixes mortos devido à contaminação causada pelo incêndio.

Fonte: EXAME (2021); AMBIENTE LEGAL (2021)

METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

De acordo com Barros (2014), há 6 elementos principais que formam um tanque de armazenamento: a base; fundação; fundo; anéis e o teto. O projeto estrutural do tanque desenvolvido neste trabalho não contemplará o projeto da base e fundação, visto que se trata de matéria mais ligada a engenharia civil e que esses itens não foram afetados pelo incêndio. Ainda, segundo Barros (2014), os tanques de armazenamento podem ser classificados em função da natureza do seu teto:

- Tanques de Teto Fixo;
- Tanques de Teto Móvel;
- Tanques de Teto com Diafragma Flexível;
- Tanques de Teto Flutuante.

Para a seleção de um tipo de tanque em função do produto a ser armazenado, pode-se recorrer à Norma Petrobras N-270 (2013). Esta Norma tem o objetivo de apresentar os requisitos necessários para o projeto mecânico de tanques, destinados ao armazenamento atmosférico de petróleo, seus derivados líquidos além de outros produtos como álcool, biodiesel, etc. De acordo com esta Norma, para o armazenamento de gasolina ou álcool, recomenda-se a construção de um tanque com teto flutuante interno, ou externo. Porém, os tanques incendiados eram de teto fixo o que deve ter contribuído com o incêndio comentado na Introdução deste trabalho, principalmente devido ao acúmulo de combustível em forma de vapor entre o líquido e o teto, conforme ilustração mostrada na **Figura 2**. Neste sentido, a melhor escolha seria um tanque com teto flutuante, pois como o teto irá movimentar-se de acordo com o nível de combustível não haverá acúmulo de vapor de combustível, amenizando as perdas de combustível e os riscos de incêndio.

Figura 2 – Vapor de combustível acumulado em um tanque de teto fixo

Fonte: G1 (2021)

Para o projeto, que armazenará gasolina, escolheu-se um tanque de teto flutuante externo, que também pode ser utilizado para o armazenamento de etanol.

Tanques de Teto Flutuante (Floating-Roof)

Este tipo de teto é apoiado diretamente no líquido armazenado pelo tanque. Eles flutuam, acompanhando o nível de líquido do tanque, não deixando espaço físico para o vapor do combustível. Por se mover internamente ao costado do tanque, este tipo de teto necessita de um sistema de vedação.

Os tetos flutuantes podem ser do tipo externo ou interno. Os tetos flutuantes externos, de acordo com Barros (2014), podem apresentar os seguintes tipos construtivos:

- Teto Flutuante Simples (Single Deck Pan-Type Floating-Roof);
- Teto Flutuante com Flutuador na Periferia - Pontão Convencional (Pontoon Floating-Roof);
- Teto Flutuante Duplo (Double-Deck Floating-Roof).

A escolha para o projeto foi o tanque de armazenamento com teto flutuante com flutuador na periferia - Pontão Convencional (*Pontoon Floating-Roof*), **Figura 3**, pois este tipo apresenta maior flutuabilidade, menor perda por evaporação e custo intermediário em relação aos três apresentados aqui.

Figura 3 – Tanque de teto flutuante tipo Pontão Convencional

Fonte: (N-1742, 2010)

Capacidade de Armazenamento, Dimensões e Materiais

Tomando como base os tanques danificados no acidente da Ultracargo, onde a capacidade de volume de gasolina armazenada era por volta de 22,7 milhões de litros, o que equivale a aproximadamente 143 mil barris. Adotou-se, então, 150 mil barris como volume de armazenamento, cerca de 24 milhões de litros.

Antes do projeto de um tanque de armazenamento, é necessário determinar sua proporção de diâmetro / altura. Usualmente os diâmetros de tanques de armazenamento variam de 3 m a 67 m e sua altura, de 2 m a 20 m. Para tanques de pequena e média capacidade, a proporção deve ser de aproximadamente: $D = H_t$ (Diâmetro igual a altura).

Para tanques de grande capacidade, a proporção deverá ser de acordo com a **Equação (1)** (BROWNELL & YOUNG, 1959):

$$D = \frac{8}{3} \times H \quad \text{Equação (1)}$$

De acordo com Barros (2014), as dimensões comerciais de chapas de aço carbono no Brasil, adotadas para o projeto são:

- a) espessura até 4,75[mm] (chapas finas laminadas à quente): 1500[mm] x 6000[mm] ou 1800[mm] x 6000[mm] com bordas aparadas;
- b) espessura 6,35[mm], 8,00[mm], 9,50[mm], 12,50[mm], 16,00[mm], 19,00[mm], 22,40[mm] ou acima (chapas grossas laminadas a quente): 2440mm x 12000mm, com bordas aparadas.

Projeto do Fundo

Declividade

Os tanques de armazenamento devem ter o fundo cônico, com um caimento mínimo de 1:120 do centro para a periferia no caso de grandes diâmetros, pois o bocal de saída do produto se encontra no costado do equipamento. Os tanques com até 6 m de diâmetro podem ter o fundo plano (BARROS, 2014).

Disposição, Material e Dimensões das Chapas

O contorno do fundo de um tanque de armazenamento pode ser feito através de dois tipos de disposição de chapas, de acordo com Barros (2014):

- chapas anulares (*anular plates*);
- chapas recortadas (*sketch plates*).

Para tanques com diâmetro maior que 15 m, é obrigatório adotar a disposição das chapas anulares. A espessura das chapas deve obedecer a tabela da N-270 (**Tabela 1**) que limita as espessuras mínimas em função do diâmetro. A largura não pode ser menor que 750 mm (N-270, 2010).

Tabela 1 – Espessura mínima das chapas anulares

Espessura das chapas (e) do 1º anel do costado (mm)	Espessura mínima das chapas anulares (mm)	
	Declividade para a Periferia	Declividade para o Centro
$e \leq 12,50$	6,30	8,00
$12,50 < e \leq 22,40$	8,00	9,50
$31,50 < e$	9,50	12,50
$12,50 < e \leq 22,40$	12,50	16,00

Fonte: (N-270, 2010)

As chapas centrais do fundo geralmente são de espessuras menores do que as do costado do tanque. Isso se deve à posição em que são construídas. São apoiadas diretamente em uma base de concreto e está apoiada no solo. Desta forma, a única tensão que as chapas do fundo sofrem, é a tensão de compressão no sentido transversal. Porém, para melhor soldabilidade, recomenda-se que se usem chapas de no mínimo ¼ polegadas (6,35 mm) de espessura. (BROWNELL & YOUNG, 1959)

Reforços no Fundo

Os reforços no fundo são empregados nas regiões de apoio da estrutura de sustentação do teto fixo suportado (19 mm de espessura), nas regiões de apoio das pernas de sustentação do teto flutuante (9,5 mm de espessura) e nas regiões afetadas pela presença de acessórios mecânicos. Onde existe a ação de misturadores mecânicos, é necessário um acréscimo de 2 mm na espessura da chapa devido ao desgaste abrasivo causado pelo atrito (BARROS, 2014).

Projeto do Costado

O dimensionamento do costado depende da norma de projeto adotada. A norma mais utilizada é a Norma API 650 (2013). A pressão hidrostática nos vasos cilíndricos verticais, variam do mínimo no plano da superfície superior do vaso, para o máximo na superfície inferior do vaso. Portanto, se dimensionar o costado em toda a sua extensão com a espessura calculada em função da pressão no fundo, estarão superdimensionando o projeto gerando um custo desnecessário. Se dimensionar o costado em toda a sua extensão com a espessura calculada em função da pressão na superfície, estarão subdimensionando o projeto, de modo que não haverá confiabilidade (BROWNELL & YOUNG, 1959). Em vista disso, tem-se três alternativas para o dimensionamento do costado de um tanque de armazenamento:

API 650 corpo de norma e método básico (*One-Foot Method*);

API 650 corpo de norma e método do ponto variável de projeto;

API 650 Anexo A (método básico).

Optou-se por utilizar o método API 650 corpo de norma e método do ponto variável de projeto, pois este método é mais preciso, resultando na diminuição do peso global do costado que tem como consequência uma diminuição nos custos. Além disso, este método permite a construção de tanques de grandes diâmetros, com a máxima espessura permitida (API 650, 2013).

Método do Ponto Variável

Este método pode ser usado se a seguinte proporção for verdadeira, **Equação (2)** e **(3)**:

$$\frac{L}{H} \leq \frac{1000}{6} \quad \text{Equação (2)}$$

$$L = (500 Dt)^{0,5} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde: H = máximo nível de líquido de projeto [m];

L = relação empírica em função do diâmetro e espessura [mm];

D = diâmetro do tanque [m];

t = espessura do primeiro anel [mm] (menor valor entre t_d e t_t).

O cálculo de cada anel, deve ser feita de maneira independente para as condições de projeto e condições de teste hidrostático. A espessura que deverá ser utilizada, será a maior encontrada entre o cálculo sob condições de projeto mais a sobre-espessura de corrosão e o cálculo sob condições de teste hidrostático.

Para os cálculos preliminares do primeiro anel utiliza-se a **Equação (4)** para condições de projeto e a Equação (5) para condições de teste hidrostático:

$$t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d} + CA \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: t_d = espessura de projeto preliminar [mm];

G = peso específico do produto a ser armazenado [g/cm³];

S_d = tensão admissível para condições de projeto [MPa];

CA = corrosão [mm].

$$t_t = \frac{4,9D(H-0,3)}{S_t} \quad \text{Equação (5)}$$

para condições de teste hidrostático.

Onde: t_t = espessura de teste hidrostático preliminar [mm];

S_t = tensão admissível para condições de teste hidrostático [MPa];

Para os cálculos do primeiro anel utilizam-se as **Equações (6) e (7)**:

$$t_{1d} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}}\right) \left(\frac{4,9HDG}{S_d}\right) + CA \quad \text{Equação (6)}$$

para condições de projeto.

Onde: t_{1d} = espessura de projeto do primeiro anel [mm].

$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{H}{S_t}}\right) \left(\frac{4,9HD}{S_t}\right) \quad \text{Equação (7)}$$

para condições de teste hidrostático.

Onde: t_{1t} = espessura de teste hidrostático do primeiro anel [mm].

Para calcular a espessura do segundo anel para ambas as condições, projeto e teste hidrostático, a seguinte relação, **Equação (8)**, tem que ser calculada.

$$\frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde: h_1 = altura do primeiro anel [mm];

r = raio do tanque [mm];

t_1 = espessura calculada do primeiro anel [mm];

Se o valor encontrado na **Equação (8)** for menor ou igual a 1,375, utiliza-se a **Equação (9)**:

$$t_2 = t_1 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde: t_2 = espessura calculada do segundo anel [mm].

Se o valor encontrado na **Equação (8)** for maior ou igual a 2,625, utiliza-se a **Equação (10)**:

$$t_2 = t_{2a} \text{ [mm]} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde: t_{2a} = espessura do segundo anel corroído [mm].

Se o valor encontrado na **Equação (8)** for maior que 1,375 e menor que 2,625, utiliza-se a **Equação (11)**:

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25(r t_1)^{0,5}}\right] \quad \text{Equação (11)}$$

Para o cálculo de t_{2a} , utiliza-se o método dos anéis superiores, como segue abaixo, **Equações (12) – (16)**. Para obter t_u preliminar, utilizam-se a **Equação (4)** e (5) para condições de projeto e de teste hidrostático respectivamente.

$$x_1 = 0,61 (r t_u)^{0,5} + 320 CH \quad \text{Equação (12)}$$

$$x_2 = 1000 CH \quad \text{Equação (13)}$$

$$x_3 = 1,22 (r t_u)^{0,5} \quad \text{Equação (14)}$$

$$C = \frac{[K^{0,5}(K-1)]}{(1+K^{1,5})} \quad \text{Equação (15)}$$

$$K = \frac{t_L}{t_u} \quad \text{Equação (16)}$$

Onde: t_u = espessura do anel superior corroído na circunferência de junta [mm];

t_L = espessura do anel inferior corroído na circunferência de junta [mm];

C = variável empírica em função de K;

K = variável empírica em função de t_L e t_u .

A espessura mínima $t_x = t_{2a}$ para o anel deve ser calculada tanto para condições de projeto (t_{dx}), **Equação (17)**, quanto para condições de teste hidrostático (t_{tx}), usando o menor valor de x encontrado dentre os calculados nas **Equações (12), (13) e (14)**.

$$t_{dx} = \frac{4,9 D \left(H - \frac{x}{1000} \right) G}{S_d} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde: t_{dx} = espessura mínima de projeto calculada pelo método do anel superior [mm].

x = o menor valor encontrado entre x_1 , x_2 e x_3 . Então calcula-se t_{tx} , conforme **Equação (18)**:

$$t_{tx} = \frac{4,9 D \left(H - \frac{x}{1000} \right)}{S_t} \quad \text{Equação (18)}$$

Onde: t_{tx} = espessura mínima de teste hidrostático calculada pelo método do anel superior [mm].

Para o cálculo do terceiro anel em diante, utiliza-se o mesmo método do segundo anel (API 650, 2013).

Espessura Mínima

A espessura mínima das chapas do costado não deve ser inferior a um valor mínimo estrutural fixado por norma, (Tabela 2). Essa espessura mínima é baseada em requisitos de montagem. Portanto, não é necessário acrescentar uma sobre-espessura de corrosão a este valor mínimo (BARROS, 2014).

Espessura Máxima

Os tanques de armazenamento são equipamentos soldados e não são usualmente tratados termicamente, para alívio de tensões. Por este motivo, é necessário estabelecer uma espessura máxima da chapa do costado para que não haja risco de fratura frágil. No caso da Norma API, a espessura máxima é dada em função do material adotado para o projeto do tanque (BARROS, 2014).

Disposição das Chapas do Costado

O costado deve ser projetado de modo que todos seus anéis estejam em posição vertical, respeitando as tolerâncias definidas por Norma. É usual, e altamente recomendável para tetos flutuantes que o alinhamento das chapas seja pelo lado interno do tanque.

As juntas entre os anéis do costado devem estar defasadas de pelo menos 1/3 do comprimento L da chapa, admitindo-se um mínimo para chapas de fechamento de anel de 5 vezes a espessura nominal do anel mais espesso dos considerados. Não deve haver acúmulo de juntas verticais em uma mesma região do costado do tanque. (BARROS, 2014)

Projeto do Teto

O teto flutuante externo e seus diversos acessórios devem ser projetados conforme o API 650 (2013) Anexo C e construídos de tal forma a permitir o extravasamento do produto armazenado, sem danificar qualquer componente do equipamento no caso de um enchimento excessivo do tanque.

Todo tanque de teto flutuante externo deve utilizar o selo PW (Anexo B), padronizado pela Norma Petrobras N-1742 (2010). O espaçamento entre o costado do tanque e o costado do teto flutuante deve ser de 200 [mm] com tolerância de ± 12 [mm], na posição em que o teto é montado (N-270, 2010). A área de cobertura do pontão deve ser maior que 30% da área total do teto do tanque.

Declividade e Material das Chapas do Teto

Os tetos tipo pontão devem ter declividade para a parte central de modo a permitir a drenagem eficiente das águas pluviais. O lençol superior do flutuador periférico deve apresentar uma declividade mínima de 1:64.

As chapas do teto devem ser de aço-carbono ASTM A 1011 Gr 33 ou ASTM A 283 Gr C, com espessura mínima de 4,75 [mm] (3/16 polegadas) e largura mínima de 1500 [mm]. Para chapas com espessura igual ou superior a 6,3 [mm] deve ser usada a especificação ASTM A 283 Gr C, com largura mínima de 2440 [mm].

Os perfis a serem utilizados na estrutura de sustentação do teto devem apresentar uma espessura mínima de 4,3 mm segundo API 650, ou 6,3 mm segundo N-270. Ambos devem ser de material ASTM A 36. Caso necessário utilizar tubos, este deve ser de API 5L Gr A ou B.

As chapas do teto devem ser soldadas por sobreposição, de maneira que a drenagem de águas pluviais seja facilitada. A sobreposição deve ter um transpasse de no mínimo cinco vezes a espessura da chapa e no máximo 25 [mm].

Todas as chapas divisórias dos compartimentos do teto flutuante devem ser soldadas de maneira que o compartimento seja estanque. (BARROS, 2014)

Flutuabilidade

O projeto de tetos flutuantes externos deve atender aos requisitos de flutuabilidade para as seguintes condições analisadas separadamente:

Teto com carga de água equivalente a uma altura pluviométrica de 250 [mm] sobre toda a área do tanque, estando o teto flutuando em produto com densidade 0,7 ou a do próprio produto na temperatura máxima de armazenamento, considerando-se a menor densidade (**Figura 4**, operadores testando a flutuabilidade do teto);

- Para o teto tipo pontão: dois compartimentos contíguos mais críticos e lençol central inundados, como se estivessem furados, flutuando em produto de densidade 0,7 ou a do próprio produto na temperatura máxima de armazenamento, levando-se em consideração a menor densidade.

O nível máximo de flutuação não deve ultrapassar a altura correspondente a 80 % do volume do compartimento mais externo para ambos os tipos de teto flutuante.

Figura 4 – Teto flutuante tipo Pontão em teste com membrana alagada

Fonte: (EMROD, 2009)

O teste de flutuabilidade deve ser executado na ocasião do teste hidrostático, considerando-se o devido fator de correção em função da densidade da água (1,0) ser maior que a densidade a ser considerada por norma (0,7) (N-270, 2010).

Suportes do Teto

Os tetos flutuantes devem ter duas posições de repouso, suportadas por suportes ajustáveis, pela parte superior do teto: uma de manutenção, que garanta uma altura livre pé-direito de, no mínimo, 2000 [mm] em qualquer região do fundo; e outra de operação, a mais baixa possível, compatível com os acessórios do teto, do costado e do fundo, para maximizar o volume útil do tanque e permitir a drenagem adequada do teto.

As pernas de sustentação e camisas devem suportar o peso próprio do teto e uma sobrecarga distribuída sobre todo o teto de 981 [N/m²] (100 [kgf/m²]). Os suportes devem ser em número suficiente para evitar deformações nas chapas do teto.

Na região dos compartimentos estanques, as camisas das pernas de sustentação devem ser fixadas nas chapas divisórias, sempre que possível, e nas chapas superiores e inferiores do teto. As chapas superiores e inferiores devem ser reforçadas para evitar trincas por fadiga (N-270, 2010).

Para o cálculo dos suportes do teto, utilizou-se o cálculo de flambagem pelo Método da Tensão Admissível, de acordo com Beer (2006), **Equações 19, 20 e 21**. Considerou-se o suporte bi-articulado, onde:

$$\text{Índice de Esbeltez} = \frac{L_t}{r_g} \quad \text{Equação (19)}$$

Onde: L_t = comprimento do tubo [mm];

r_g = raio de giração do tubo [mm].

$$C_c^2 = \frac{2\pi^2 \times E_t}{\sigma_e} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde: C_c = relação entre módulo de elasticidade, π e tensão de escoamento do tubo;

E_t = módulo de elasticidade do tubo [GPa];

σ_e = tensão de escoamento do tubo [MPa].

Se $L/r_g < C_c$, então:

$$\sigma_a = \frac{\pi^2 \times E_t}{1,92 \times \left(\frac{L_t}{r_g}\right)^2} \quad \text{Equação (21)}$$

Onde: σ_a = tensão admissível do tubo [MPa];

PROJETO

Dados de Projeto

Norma	API-650 Edição 11 / N-270 rev. E
Produto Armazenado	Gasolina
Peso Específico do Produto (G)	0,76
Pressão de Projeto	37 [mm H ₂ O]
Temperatura de Projeto	25 [°C] (mín.) / 70 [°C] (máx.)
Corrosão Admissível (CA)	2 [mm] (Costado) / 0 [mm] (Fundo / Teto)

Cálculos do Volume do Tanque

Seguindo a proporção de tanques de grande capacidade, calculou-se as dimensões do tanque, de acordo com as **Equações 22 e 23**.

$$V = 24.000 \text{ [m}^3\text{]} \quad \text{Equação (22)}$$

$$V = (\Pi \times D^2/4) \times H \quad \text{Equação (23)}$$

Utilizando-se a **Equação 1** e a **Equação 23**, obtém-se a **Equação 24**:

$$D = 43,35 \text{ [m]} \quad \text{Equação (24)}$$

Arredondou-se D para 44,0 [m]. Sendo assim, H é obtido em função do diâmetro adotado, de acordo com a **Equação 25**.

$$H = 15,80 \text{ [m]} \text{ (máximo nível de líquido)} \quad \text{Equação (25)}$$

A altura H_t do tanque é definida como 19,596 [m] ou 19596 [mm], **Equação 26**. Dimensão em função das larguras comerciais das chapas a serem utilizadas para a fabricação do costado e da cantoneira de 3" soldada acima do último anel para dar maior rigidez ao tanque.

$$H_t = 19,596 \text{ [m]} \quad \text{Equação (26)}$$

Cálculos do Fundo do Tanque

Dimensionamento da Chapa do Fundo

Obtém-se a espessura da chapa do fundo com base no item Reforços do Fundo. As chapas devem suportar as pernas do teto flutuante, então de acordo com a **Equação 27**:

$$t_f = 9,5 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (27)}$$

Dimensionamento da Chapa Anular

Obtém-se a espessura da chapa anular pela **Tabela 1** - a espessura mínima da chapa anular com declividade para periferia é de 8 [mm]. Porém, como foi utilizado 9,5 [mm] para as chapas do fundo, adotou-se, também, esta espessura para as chapas anulares, que não são usualmente menos espessas que as chapas do fundo, de acordo com a **Equação 28**.

$$t_b = 9,5 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (28)}$$

Cálculos do Costado do Tanque

Cálculo do Primeiro Anel

Nesta etapa, foi selecionado o material ASTM A-36. De acordo com a Norma API 50 (2013), para o material ASTM A-36, a tensão admissível de projeto (S_d) = 160 [MPa] e a tensão admissível de Teste Hidrostático (S_t) = 171 [MPa]. Também será adotado um tanque com 8 anéis, sendo então, a altura de cada anel igual a 2,44 [m].

A espessura do projeto preliminar é calculada de acordo com a **Equação 4**, fornecendo a **Equação 29**; a espessura para teste hidrostático é calculada de acordo com a **Equação 5**, resultando na **Equação 30**, e relação empírica em função do diâmetro e espessura é calculada de acordo com a **Equação 3**, fornecendo a **Equação 31**.

$$t_d = 17,86 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (29)}$$

$$t_t = 19,52 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (30)}$$

$$L = 655,36 \quad \text{Equação (31)}$$

Como a condição da **Equação 2** é satisfeita, pode-se utilizar o método do ponto variável. Portanto, utilizando-se as **Equações 6 e 7**, calcula-se as espessuras para condição de projeto (**Equação 32**) e para condição de teste hidrostático (**Equação 33**).

$$t_{1d} = 18,28 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (32)}$$

$$t_{1t} = 19,92 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (33)}$$

De acordo com a Norma API 50 (2013), a dimensão da espessura mínima para um projeto de um tanque com as características de volume apresentadas acima é de 8 mm. Portanto, utiliza-se a espessura encontrada na **Equação 33**, por ser a maior espessura. Com isso, adota-se a **Equação 34**, utilizando a espessura comercial para o projeto.

$$t_{1comercial} = 22,4 \text{ [mm]} \quad \text{Equação (34)}$$

Cálculo do Segundo Anel

Primeiramente, calcula-se a condição da **Equação 8**, onde se obtém o valor de 3,686. Portanto, a espessura do segundo anel (t_2) será igual a espessura do segundo anel corroído (t_{2a}).

Para o cálculo de t_{2a} , utiliza-se o método dos anéis superiores. Para obter t_u preliminar – e obter um valor K de partida, utiliza-se a **Equações (4)** para condição de projeto. Com isso obtém-se as **Equações 35 e 36**, e aplicando as Equações **16, 15, 12 – 14**, chega-se nos valores obtidos na **Equações 37 – 41**. Aqui, vale pontuar que a diferença nas **Equações 35 e 36** é o valor da altura de líquido armazenado utilizada, onde na **Equação 35** utiliza-se para cálculo a altura de líquido superior e na **Equação 36** a inferior, em relação a altura total do tanque.

Condição de Projeto:

$$t_u = 13,70 [mm] \quad \text{Equação (35)}$$

$$t_L = 16,28 [mm] \quad \text{Equação (36)}$$

$$K = 1,188 \quad \text{Equação (37)}$$

$$C = 0,089 \quad \text{Equação (38)}$$

$$x_1 = 716,78 \quad \text{Equação (39)}$$

$$x_2 = 1193,57 \quad \text{Equação (40)}$$

$$x_3 = 669,68 \quad \text{Equação (41)}$$

Com isso, o valor de x escolhido é o encontrado na **Equação 41**. Obtido o valor de x calcula-se a espessura mínima do anel para condições de projeto (t_{dx}) utilizando a **Equação 17**, onde obtém-se a **Equação 42**:

$$t_{dx} = 12,98 [mm] \quad \text{Equação (42)}$$

Repete-se o mesmo procedimento, porém utilizando as Equações para Teste Hidrostático. Após as soluções das respectivas equações, obtém-se como espessura mínima do anel para condições de teste hidrostático (t_{tx}) o valor obtido na **Equação 43**.

$$t_{tx} = 15,89 [mm] \quad \text{Equação (43)}$$

Como o maior valor entre as espessuras é o obtido na **Equação 42**, lembrando que o projeto pede um valor mínimo de 8 mm, o valor de 15,89 é escolhido e é adotado um valor de t_2 comercial de 16 [mm], conforme **Equação 44**.

$$t_{2comercial} = 16,00 [mm] \quad \text{Equação (44)}$$

Os procedimentos para cálculo dos anéis restantes é similar ao realizado para o segundo anel.

Cálculos do Teto do Tanque

Dimensionamento do Pontão

Dimensionou-se um teto pontão com 16 compartimentos, cujas dimensões são representadas na **Figura 5**.

Figura 5 – Dimensões do Pontão [mm]

Fonte: (Autor, 2021)

As chapas a serem utilizadas no teto, serão de ASTM A-283 Gr C. Para o cálculo da espessura do teto, utiliza-se a teoria de membrana e cascas. Adotou-se a espessura mínima permitida de $4,75$ [mm]. A escolha desta espessura é baseada em projetos similares. O teto nestas dimensões, tem uma massa (W) de 91.593 [kg]. Com base nas dimensões da **Figura 5**, obteve-se uma área de teto total de 1493 [m^2] e uma área de pontão de $628,32$ [m^2].

Cálculo dos Suportes

Conforme a Norma Petrobras N-270 (2010), calculou-se os 53 suportes de tubos de 3", SCH 80, de material ASTM A-53 Gr B. As propriedades dos suportes e os cálculos são apresentados na **Tabela 2**:

Tabela 2 – Resultado cálculos e propriedades do suporte.

Tensão de Escoamento σ_e	241 [MPa]
Diâmetro Externo	88,9 [mm]
Espessura de Parede	7,62 [mm]
Área A_t	1946 [mm ²]
Momento de Inércia	1621000 [mm ⁴]
Raio de Giração r_g	28,863 [mm]
Comprimento Adotado L	4000 [mm]
Módulo de Elasticidade E	200 [GPa]
Índice de esbeltez:	138,59
Relação C_c	127,99
Tensão Admissível no Tubo (σ_a)	53,53 [MPa]
W_g	244053 kg
σ_c	23,32 [MPa]

Fonte: Autor (2021)

Onde W_g é a Massa global do teto, com sobrecarga prevista por norma adicionada à massa do teto W, e é calculada de acordo com a **Equação 45**. Já σ_c corresponde a Tensão de Compressão por suporte, e é calculada conforme a **Equação 46**.

$$W_g = W + 0,1 \times \left(\frac{\pi \times D^2}{4} \right) \quad \text{Equação (45)}$$

$$\sigma_c = \frac{W_g \times 9,81}{n^{\circ} \text{suportes} \times A_t} \quad \text{Equação (46)}$$

Modelagem 3D e Análise de Tensões

Modelou-se o tanque no *software* de modelagem 3D *Autodesk Inventor*. (**Figura 6(a)**), com operadores representados em escala real para noção de proporção do tanque). Com base no modelo, desenhou-se o conjunto do tanque. Com os componentes modelados, executou-se as simulações de análise de tensões por elementos finitos, ferramenta do próprio *software* utilizado. Colocaram-se as pressões hidrostáticas calculadas de *inputs* no *software* e obteve-se o valor máximo de tensão de 139,7 [MPa]. (**Figura 6(b)** e **6(c)**).

Figura 6 – Modelagem e Análise de Tensões (a) – Modelagem do tanque para visão geral do tanque de armazenamento; (b) e (c) Modelagem por elementos finitos e análise de tensões segundo Von Mises, respectivamente.

Fonte: Autor (2021)

Baseando-se na simulação realizada, a **Tabela 3** apresenta os resultados obtidos em relação a máxima pressão exercida pelo líquido armazenado em cada anel do tanque:

Tabela 3 – Resultado das máximas pressões obtidas por simulação e análise por elementos finitos.

Primeiro Anel	118,0 [kPa]
Segundo Anel	99,5 [kPa]
Terceiro Anel	81,3 [kPa]
Quarto Anel	63,1 [kPa]
Quinto Anel	44,9 [kPa]
Sexto Anel	26,7 [kPa]
Sétimo Anel	8,5 [kPa]
Oitavo Anel	0,0 [kPa]

Fonte: Autor (2021)

É importante salientar que o *software* utilizado para simulação por elementos finitos tem a limitação de atribuir em cada anel, uma pressão hidrostática constante. Porém, sabe-se que em condições reais, esta pressão hidrostática varia de seu ponto máximo na base do anel, para seu ponto mínimo no topo deste.

Colocou-se então a carga do teto por suporte de *input* no *software* e obteve-se o valor máximo de tensão de 27,71 [MPa], conforme **Figura 7**.

Figura 7 – Modelagem e Análise de Tensões por elementos finitos e análise de tensões segundo Von Mises, respectivamente, para máxima tensão.

Fonte: Autor (2021)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dimensões do Tanque

As dimensões do tanque projetado são mostradas na **Tabela 4**.

Tabela 4 – Dimensões do Tanque de Armazenamento obtidos após o projeto.

Volume do Tanque	24.000 [m³]
Diâmetro do Tanque	44,0 [m]
Altura do Tanque	19,596 [m]
Máximo Nível de Líquido	15,8 [m]
Peso Vazio	471.000 [kg]
Peso em Teste Hidrostático	24.471.000 [kg]
Peso em Operação	18.711.000 [kg]

Fonte: Autor (2021)

O volume do tanque atende a requisição de suprir o combustível estocado nos 4 tanques de gasolina incendiados, apresentados na Introdução.

Fundo

As dimensões do fundo tanque de armazenamento e o respectivo material a ser utilizado são mostrados na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Dimensões do Fundo do Tanque de Armazenamento e material adotado após o projeto.

Componente	Espessura Adotada	Material
Chapa Anular	9,5 [mm]	ASTM A-36
Fundo	9,5 [mm]	ASTM A-36

Fonte: Autor (2021)

A chapa anular e o fundo apenas sofrem compressão no sentido transversal. A espessura adotada de 9,5 [mm] atende a necessidade de chapa reforçada para recebimento da carga dos suportes, nos tetos flutuantes.

Costado

A **Tabela 6** mostra um resumo dos cálculos das espessuras e também das tensões máximas obtidas por simulação para cada anel projetado. A espessura do quinto anel, é a mínima permitida pela Norma API 650 (2013) para um tanque com este diâmetro. Com base nisso, e no conceito de que a pressão na elevação do costado diminui diretamente proporcional ao anel analisado, considerou-se a espessura mínima também para o sexto, sétimo e oitavo anel.

Tabela 6 – Dimensões para cada anel do tanque de armazenamento e a respectiva tensão obtida com análise de elementos finitos

Anel	Espessura Calc.	Espessura Adot.	Tensão Máx. FEA	Material
Primeiro	19,92 [mm]	22,40 [mm]	111,7 [MPa]	ASTM A-36
Segundo	15,89 [mm]	16,00 [mm]	139,7 [MPa]	ASTM A-36
Terceiro	12,91 [mm]	16,00 [mm]	100,0 [MPa]	ASTM A-36
Quarto	9,93 [mm]	12,50 [mm]	95,0 [MPa]	ASTM A-36
Quinto	6,98 [mm]	8,00 [mm]	115,0 [MPa]	ASTM A-36
Sexto	4,05 [mm]	8,00 [mm]	55,9 [MPa]	ASTM A-36
Sétimo	1,19 [mm]	8,00 [mm]	15,0 [MPa]	ASTM A-36
Oitavo	0 [mm]	8,00 [mm]	0,0 [MPa]	ASTM A-36
Canton.	0 [mm]	9,5 [mm]	0,0 [MPa]	ASTM A-36

Fonte: Autor (2021)

Pode-se observar que a tensão máxima atingida em cada anel é maior quanto menor a diferença entre espessura adotada e espessura calculada. Isso ocorre porque a espessura calculada prevê a menor espessura possível sem que a tensão admissível do material seja atingida. A análise de elementos finitos obteve 139,7 [MPa] de tensão máxima no costado. Esta tensão se encontra no segundo anel, onde a espessura adotada

tem apenas 0,11 [mm] de diferença da espessura calculada. Esta é a menor diferença de espessura do costado em sua totalidade.

A tensão máxima obtida pelo FEA, ainda é menor do que a tensão admissível do ASTM A-36 prevista pelo API-650 de 160 [MPa]. Portanto, o costado resistirá à pressão hidrostática.

Teto

As dimensões dos componentes do teto são mostradas na **Tabela 7**.

Tabela 7 – Dimensões dos componentes do teto

Componente	Dimen. Adotada	Material	Tensão Máx. FEA	Tensão Adm.
Pontão	esp. 4,75 [mm]	ASTM A-283 Gr.C	-	-
Membrana	esp. 4,75 [mm]	ASTM A-283 Gr.C	-	-
Suporte	Ø n. 3” SCH 80	ASTM A-53 Gr.B	27,71 [MPa]	53,53 [MPa]

Fonte: Autor (2021)

Pode-se observar que a tensão máxima obtida pelo FEA de 27,71 [MPa] é pouco superior à tensão de compressão calculada no item Cálculo dos Suportes, de 23,32 [MPa]. Porém, é inferior à tensão admissível também calculada neste mesmo item que possui o valor de de 53,53 [MPa]. Portanto o suporte resistirá à carga do teto.

Em operação normal, o teto flutuará e a gasolina ficará acima do *deck* em 20 [mm], pelo lado externo do pontão.

CONCLUSÃO

Com base nas dimensões e resultados obtidos nos cálculos, pode-se concluir que o projeto do tanque de armazenamento atmosférico com teto flutuante foi bem sucedido. Os materiais com as dimensões e especificações obtidas, são facilmente encontrados para compra nas usinas siderúrgicas ou nos estabelecimentos comerciais. Pode-se concluir também, que os resultados obtidos pelos cálculos analíticos são válidos, pois estão coerentes com os resultados obtidos por análise de elementos finitos no *software Autodesk Inventor*. Portanto o tanque projetado resistirá às solicitações de teste hidrostático e operação.

REFERÊNCIAS

AISC. **Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design**. 9th Edition. New York. 1989.

AMBIENTE LEGAL. **Muito Além do Fogo**. Disponível em <<http://www.ambientelegal.com.br/muito-alem-do-fogo/>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2021.

API 650: 2013. **Welded Tanks for Oil Storage**. 12th Edition. March 2013.

ASTM A 36/A 36M – 97a. **Standard Specification for Carbon Structural Steel**. 1997.

ASTM A 53/A 53M – 02. **Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless**. 2002.

ASTM A 283/A 283M – 98. **Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates**. 1998.

BARROS, Stenio Monteiro de. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro. Universidade Petrobras. Julho de 2014.

BEER, Ferdinand P. JOHNSTON, E Russel. DEWOLF, John T. **Resistência dos Materiais**. 4^a Edição. São Paulo. McGraw-Hill Companies. 2006.

BROWNELL, Lloyd E. YOUNG, Edwing H. **Process Equipment Design**. New York. John Willey & Sons Inc. 1968.

BS EN 14015: 2004. **Specification For The Design And Manufacture Of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed, Above Ground, Welded, Steel Tanks For The Storage Of Liquids At Ambient Temperature And Above**. Corrigendum 1. February 2005.

EMROD, Soluções em Engenharia. **Portfólio Mecânica**. Disponível em <<http://emrod.com.br/2013/portfolio-item/tanque-teto-flutuante/>>. Acesso em: 29 de Setembro de 2021.

EXAME. **Incêndio em Santos Atinge Novo Tanque de Combustível**. Disponível em <<http://exame.abril.com.br/brasil/noticias/incendio-em-santos-atinge-novo-tanque-de-combustivel-2>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2021.

G1. **Simulação Mostra Dificuldade para Apagar Chamas em Santos**. Disponível em <<http://g1.globo.com/fantastico/noticia/2015/04/simulacao-mostra-dificuldade-para-apagar-chamas-em-santos.html>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2021.

N-270: 2010. Norma Petrobras - **Projeto de Tanque Atmosférico**. Revisão E. Dezembro de 2010.

N-1742: 2003. Norma Petrobras - **Tanque de Teto Flutuante Selo PW**. Revisão F. Dezembro de 2010.

NBR-7821: **Tanques Soldados Para Armazenamento de Petróleo e Derivados**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABR 1983. 1983.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Refinaria Abreu e Lima já Pode Iniciar a Produção de Diesel.** Disponível em <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,refinaria-abreu-e-lima-ja-pode-iniciar-a-producao-de-diesel-imp-,1602421>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2021.

O GLOBO. **Corpo de Bombeiros Anuncia Fim de Incêndio em Tanques de Combustível em Santos.** Disponível em <<http://oglobo.globo.com/brasil/corpo-de-bombeiros-anuncia-fim-de-incendio-em-tanques-de-combustivel-em-santos-15837461>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2021.

TIMOSHENKO, Stephen. **Theory of Plates and Shells.** 2nd Edition. New York. McGraw-Hill Book Company. 1959.

Recebido em: 01/10/2021

Aprovado em: 30/10/2021

Publicado em: 05/11/2021