

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

João Felipe Orso

Projeto de um tanque de armazenagem segundo a Norma API 650

Erechim
2023

João Felipe Orso

Projeto de um tanque de armazenagem segundo a Norma API 650

Trabalho Conclusão de Curso realizado no Campus Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Me. Enildo de Matos de Oliveira.

Erechim

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais *Waldir* e *Roselaine* e meu irmão *Bruno*, pelo incentivo e apoio em seguir os meus sonhos, e a minha namorada *Liandra* por sempre me ajudar e me apoiar nesse período da graduação.

Ao meu orientador Prof. Me. Enildo Matos de Oliveira, pelo incentivo e orientação para o desenvolvimento desse projeto.

Aos demais professores da área da engenharia mecânica do IFRS Erechim, pelos ensinamentos.

A empresa Fay Engenharia, pela disponibilidade de tempo, confiança e dedicação em repassar seus conhecimentos e por me auxiliarem em diversas questões da faculdade.

“Quando algo é importante o suficiente,
você faz, mesmo que as chances não
estejam a seu favor”

(Elon Musk)

RESUMO

Com o aumento da porcentagem do Biodiesel no diesel comercial, a necessidade por armazenamento cresce juntamente. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo projetar um tanque de armazenamento atmosférico para Biodiesel sob o ponto de vista mecânico segundo as orientações apresentadas pela Norma API 650. Para isso foi realizado um estudo perante a Norma API 650 para determinar e compreender as condições de projeto e operação do equipamento. Apresentou-se um roteiro para dimensionamento por completo do tanque, analisando tanto as cargas existentes como as espessuras mínimas de chapas que irão compor o equipamento. O modelo definido foi o tanque com teto cônico, a sua fabricação em aço carbono ASTM A-36 com diâmetro de 12 metros e 15 metros de altura. Com todos os esforços atuantes definidos, foram determinadas as diferentes espessuras para cada segmento do equipamento, para o cálculo do costado foi utilizado o método base de cálculo para tanques pequenos. Por fim, os resultados do trabalho evidenciam a relevância da Norma API 650 para o projeto e fabricação de tanques de armazenamento atmosféricos, pois como apresentado no projeto, o seu dimensionamento é realizado segmento por segmento, analisando a espessura para cada necessidade. As normas são essências para a padronização e segurança construtivos dos equipamentos, fazendo desse trabalho um guia para cálculo das principais estruturas do tanque de armazenamento atmosféricos seguindo a Norma API 650.

Palavras-chave: Norma API 650. Tanque de armazenamento. Projeto mecânico.

ABSTRACT

With the increase in the percentage of biodiesel in commercial diesel, the need for storage also grows. In view of this, the present work aims to design an atmospheric storage tank for Biodiesel from a mechanical point of view, according to the presented by the API 650 Standard equipment design and operation. A script for the complete dimensioning of the tank was presented, analyzing both the existing loads and the minimum thickness of the plates that will compose the equipment. The defined model was the tank with a conical roof, its manufacture in ASTM A-36 carbon steel with a diameter of 12 meters and a height of 15 meters. With all the active efforts defined, different thicknesses were determined for each segment of the equipment, for the side calculator the base method calculated for small tanks was used. Finally, the results of the work show the conversion of the API 650 Standard for the design and manufacture of atmospheric storage tanks, because, as presented in the project, its sizing is carried out segment by segment, analyzing the thickness for each need. The norms are essential for the standardization and constructive safety of the equipment, making this work a guide for the main structures of the atmospheric storage tank following the API 650 Norm.

Keywords: API 650 Standar. Storage tank. Mechanic project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais componentes de um tanque de armazenamento.....	16
Figura 2 – Modelo de tanque com teto fixo	17
Figura 3 – Modelo de tanque com teto de diafragma flexível	17
Figura 4 – Modelo de tanque com teto flutuante	18
Figura 5 – Estrutura de suporte do teto.....	23
Figura 6 – Disposição das chapas no costado, em (a) a disposição simétrica, em (b) a disposição com alinhamento pela face externa e em (c) a disposição com alinhamento pela face interna.....	27
Figura 7 – Chapas anulares circunferencial, na figura (a) com a chapa anular e figura (b) sem a chapa anular.....	37
Figura 8 – União chapas do fundo com sobreposição de chapas	38
Figura 9 – União de chapas do fundo com a utilização de barra chata.....	38
Figura 10 – Fundação tipo Aterro Compactado.....	39
Figura 11 – Fundação tipo Anel de Concreto.....	40
Figura 12 – Fundação Profunda.....	41
Figura 13 – Porta de inspeção no costado	44
Figura 14 – Porta de inspeção no teto	44
Figura 15 – Bocal no costado.....	45
Figura 16 – Montagem com o auxílio de macacos hidráulicos.....	46
Figura 17 – Solda com utilização de <i>Backing</i> Cerâmico.....	47
Figura 18 – Demonstrativo das espessuras por segmento do tanque	60
Figura 19 – Detalhamento do Costado.....	61
Figura 20 - Detalhamento de chanfro, em (a) é indicado o chanfro e solda da união vertical das chapas, em (b) é indicado o chanfro e solda da união horizontal das chapas, em (c) é indicado a solda de união do costado com o fundo e em (d) é indicado a união do costado com o teto	62
Figura 21 – Detalhamento porta de inspeção no costado, na figura (a) a vista frontal e na figura (b) a vista superior.....	63
Figura 22 – Detalhamento do teto	64

Figura 23 – Planificação das chapas do teto.....	64
Figura 24– Detalhe das uniões das chapas do teto, em (a) é indicado as uniões verticais das chapas e em (b) é indicado as uniões das chapas horizontais.....	65
Figura 25 – Detalhamento da porta de inspeção no teto, na figura (a) a vista superior e na figura (b) a vista lateral.....	66
Figura 26 – Detalhamento das chapas do fundo.....	66
Figura 27 – Detalhe da união entre chapas do fundo do tanque.....	67
Figura 28 – Detalhamento instalação do chumbador	67
Figura 29 – Detalhamento das casinhas de união do costado com os chumbadores, na figura (a)apresenta a vista frontal e na figura (b) apresenta a vista lateral	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessura nominal das chapas	27
Tabela 2 – Espessura das chapas anulares do fundo.....	34
Tabela 3 – Espessuras mínima para chapas anulares.....	34
Tabela 4 – Espessuras de chapas em relação a tensão.....	35
Tabela 5 – Dados do projeto	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 NORMA API 650.....	15
3.1.1 <i>Definição do modelo de tanque</i>	16
3.1.2 <i>Parâmetros de Projeto</i>	18
3.1.3 <i>Materiais Construtivos</i>	20
3.1.4 <i>Dimensionamento do Teto</i>	21
3.1.5 <i>Dimensionamento do Costado</i>	26
3.1.6 <i>Dimensionamento do Fundo</i>	34
3.1.7 <i>Fundação</i>	39
3.1.8 <i>Verificação da necessidade de chumbadores</i>	41
3.1.9 <i>Acessórios</i>	43
3.1.10 <i>Montagem do tanque</i>	45
3.1.11 <i>Solda no fundo</i>	47
3.1.12 <i>Solda no costado</i>	48
3.1.13 <i>Solda no teto</i>	48
3.1.14 <i>Procedimento de Pintura</i>	48
3.1.15 <i>Teste Hidrostático</i>	49
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1 DADOS DO PROJETO	51
5.2 DIMENSIONAMENTO DO COSTADO.....	51
5.2.1 <i>Quantidade de anéis</i>	52

5.2.2 Dimensionamento das espessuras das chapas de cada anel do costado	52
5.3 DIMENSIONAMENTO DO FUNDO.....	55
5.3.1 Verificação da necessidade de chumbador	55
5.4 DIMENSIONAMENTO DO TETO	58
5.4.1 Cargas Atuantes	58
5.5 PROJETO DETALHADO DO COSTADO DO TANQUE.....	61
5.6 PROJETO DETALHADO DO TETO.....	63
5.7 PROJETO DETALHADO DO FUNDO	66
6 CONCLUSÃO	69
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXO A – PROPRIEDADES DO AÇO ASTM A-36	73
ANEXO B – TABELA DE ESPESSURAS DE CHAPAS COMERCIAIS	74
ANEXO C – TABELA DE ESPESSURAS DE VIGAS COMERCIAIS	75
ANEXO D – DETALHAMENTO DE REFORÇO PARA PORTA DE INSPEÇÃO	76

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de combustíveis fósseis tem levado à sérias consequências ambientais e sociais em todo o mundo. Segundo Kumar e Sharma, 2021, a queima desses combustíveis é responsável por cerca de 75% das emissões globais de gases de efeito estufa, que são responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas. Por isso, há um crescente interesse na utilização de fontes de energias renováveis como, por exemplo, o biodiesel (KUMAR e SHARMA, 2021). Segundo a ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2021), o Brasil teve uma produção de 6,5 bilhões de litros de biodiesel em 2020, um aumento de 7,8% comparado ao ano anterior. Além disso, o biodiesel é uma fonte de energia renovável que pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diversificar a matriz energética.

A importância dos tanques de armazenamento na produção de biodiesel é amplamente reconhecida na indústria. De acordo com um estudo publicado na revista *“Renewable and Sustainable Energy Reviews”* (2017), a escolha de um sistema de armazenamento adequado é fundamental para garantir a qualidade do produto final e a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente. Com o aumento da produção, tanques de armazenamento tornaram-se cruciais para a produção, onde são utilizados para o armazenamento das matérias-primas, como o óleo vegetal e gordura animal, bem como o biodiesel final produzido. O mesmo estudo aponta que os tanques de armazenamento também são responsáveis por garantir a segurança e a qualidade dos produtos, sendo essencial para evitar a contaminação e a oxidação dos materiais, afim de manter suas propriedades químicas e físicas intactas. Dessa forma, os tanques de armazenamento devem ser construídos de acordo com as normas e regulamentações em vigor no país e nas empresas.

A engenharia tem um papel importante na fabricação de tanques de armazenamento, especialmente para atender as exigências de qualidade e segurança. Sendo responsável pelo projeto, fabricação e instalação desses tanques, a engenharia pode garantir que os mesmos sejam capazes de suportar cargas externas, como ventos e pequenos terremotos, e cargas internas, como a pressão exercida pelo líquido que é armazenado (BARROS, 2017). A engenharia também se

responsabiliza pela certificação da qualidade dos materiais que serão utilizados na fabricação.

O tanque de armazenamento atmosférico pode ser construído de diferentes formas e modelos, sendo especificados para atender as necessidades de seus clientes. As normas mais utilizadas nos projetos são a NBR 7821/1983 no âmbito nacional e, no âmbito internacional, comumente utilizada no Brasil, a norma API 650 (*American Petroleum Institute*). Segundo Rossini (2013), a norma americana se apresenta como um exímio guia técnico, com excelente confiabilidade e constantes atualizações. A adesão aos requisitos da norma API 650 também ajuda a garantir a conformidade com as leis e regulamentações locais e internacionais relacionados à segurança e proteção ambiental (ROSSINI, 2013).

Portanto, este trabalho se propõe a realizar um projeto para fabricação de um tanque de armazenamento de biodiesel segundo a norma API 650. Para fundamentar este trabalho se faz necessário um estudo detalhado sobre a norma API 650, para que sejam aplicados os requisitos da mesma. Além disso, será realizado uma análise de elementos finitos para determinar o comportamento do tanque sob diferentes condições de carga e restrições, garantindo a elaboração de um projeto para a fabricação de um tanque de armazenamento de biodiesel ideal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Elaboração de um projeto para fabricação de um tanque de armazenamento de biodiesel segundo a norma API 650.

2.2 Objetivos Específicos

a- Realizar os cálculos para determinação da espessura das chapas do fundo, teto e costado do tanque de armazenamento de biodiesel, segundo a norma API 650.

b- Fazer um desenho detalhado do equipamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando o estudo sobre projeto de tanques de armazenamento atmosféricos, nesta etapa, será detalhado a Norma API 650, descrevendo o que ela contempla, em quais casos pode ser aplicada e os parâmetros para um projeto mecânico de tanques, com especificação de teto, costado e fundo.

3.1 Norma API 650

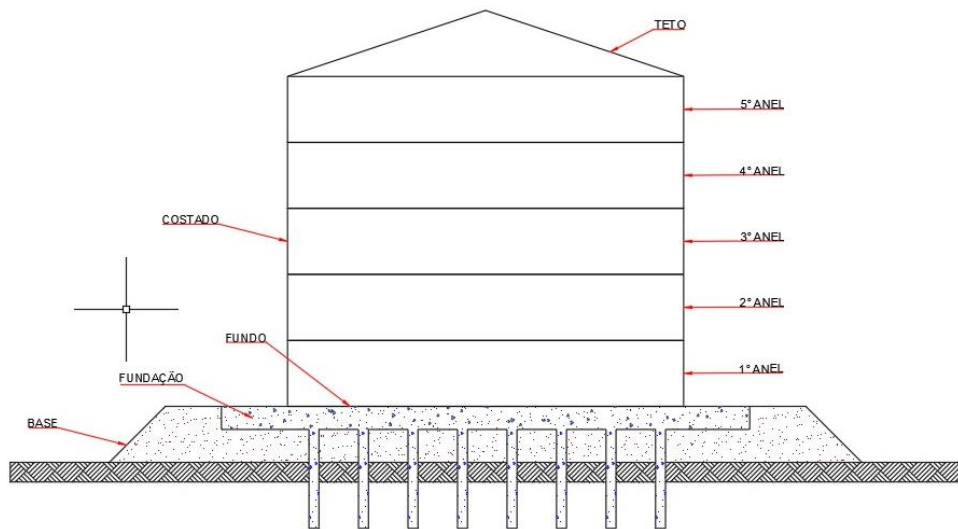
A norma API 650 é um padrão normativo técnico desenvolvido pelo *American Petroleum Institute* (API) que fornece diretrizes para o projeto, fabricação, instalação, inspeção e manutenção de tanques de armazenamento de grande porte para uso na indústria de petróleo e gás (API 650, 2020).

A norma serve como um guia para garantir que os tanques de armazenamento sejam construídos de forma segura e confiável, levando em consideração as necessidades de armazenamento de petróleo bruto e outros líquidos em grande escala (BARROS, 2017). Ela estabelece requisitos específicos para a construção de tanques de aço soldados, incluindo detalhes sobre materiais, design, fabricação, teste e manutenção. A norma também é importante para garantir a conformidade com as regulamentações governamentais e padrões internacionais para tanques de armazenamento de petróleo e outros líquidos.

A norma API 650 é aplicada principalmente nas indústrias de petróleo e gás, para o projeto e construção de tanques de armazenamento de petróleo bruto e produtos refinados (BARROS, 2017). Também é destinada a empresas que fabricam, instalam ou mantêm grande quantidade de produtos armazenados.

Para o desenvolvimento desses projetos, a Norma API 650 estabelece os principais componentes que compõem tanques de armazenamento. Esses componentes estão indicados na Figura 1.

Figura 1 – Principais componentes de um tanque de armazenamento



Fonte: Adaptado de Barros (2017).

3.1.1 Definição do modelo de tanque

Segundo a norma API 650 (2020), o projeto mecânico dos tanques de armazenamento é dividido em pontos, começando pelo projeto do teto do tanque, seguido do costado e fundo, levando em consideração parâmetros de operação, onde são analisados volume, produto a ser armazenado e condições do ambiente a ser instalado.

A norma separa o projeto de tanques pelo tipo de teto que será construído, sendo eles:

a) Tanque de teto fixo – o teto é definido como um teto fixado à parede do tanque e não se move durante a operação normal do mesmo. Pode ter uma variedade de configurações como, por exemplo, o cônico (apresentam o formato de cone reto), que é recomendado para os tanques de teto fixo, curvo ou domo, remetendo a uma esfera e teto de gomos, onde é uma versão modificada do teto cônico, em que toda seção horizontal terá a forma de um polígono regular (BARROS, 2017).

Esse modelo de teto é uma boa alternativa para tanques que operam em condições de pressão atmosférica e que não estão sujeitos a variações significativas de temperatura (BARROS, 2017). A Figura 2 mostra o modelo de tanque com teto fixo.

Figura 2 – Modelo de tanque com teto fixo



Fonte: PETROBLOG (2015)

b) Tanque de teto com diafragma flexível – esse modelo é projetado para se expandir e contrair com as mudanças na pressão do vapor contido no tanque. Na sua construção existe uma membrana composta por um material flexível, como borracha ou plástico, o qual é fixado no topo do último anel do tanque (BARROS, 2017).

Barros (2017) também recomenda esse estilo construtivo para tanques que armazenam líquidos que produzem vapores, o qual permitem a “respiração” do tanque que auxiliam a manutenção da pressão interna. A Figura 3 mostra o modelo de tanque com teto de diafragma flexível.

Figura 3 – Modelo de tanque com teto de diafragma flexível



Fonte: Barros (2017)

c) Tanque de teto flutuante – no projeto do teto flutuante é necessário a instalação de uma estrutura metálica, a qual irá flutuar sobre a superfície do líquido armazenado. Ou seja, o teto subirá e descera conforme a variação do nível do produto armazenado, conseguindo dessa maneira uma vedação completa (BARROS, 2017).

Os tetos flutuantes são considerados uma opção segura e eficiente para o armazenamento de líquidos que geram vapores, pois minimizam a quantidade de ar dentro do tanque, reduzindo a quantidade de vapores liberados para a atmosfera. Eles são recomendados para o armazenamento de líquidos inflamáveis (BARROS, 2017). A Figura 4 mostra o modelo de tanque com teto flutuante.

Figura 4 – Modelo de tanque com teto flutuante



Fonte: EMROD Engenharia Limitada (2013)

3.1.2 Parâmetros de Projeto

Para a realização do projeto do tanque, se faz necessário a definição de alguns parâmetros importante, como, por exemplo, a definição do tipo de tanque a ser utilizado. Essa definição se baseia pelo produto a ser armazenado levando em consideração as condições ambientais, de segurança da operação, viabilidade econômica e qualidade exigida (BARROS, 2017). Também deve ser analisado as dimensões que o tanque deverá ter para suprir as necessidades estabelecidas pelo processo, de forma segura, determinando a altura e diâmetro do mesmo. Brownell e

Young (1959), definem algumas relações a serem seguidas, sendo indicado a proporcionalidade das dimensões, conforme indicado nas equações 1 e 2.

Para tanques de pequena e média capacidade utiliza-se a equação 1.

$$D \sim H_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

Para tanques de grande capacidade utiliza-se a equação 2.

$$D \sim \frac{8}{3} H_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

Onde:

D = diâmetro nominal do tanque de armazenamento, [m];

$H_{m\acute{a}x}$ = altura nominal do tanque de armazenamento, [m].

Outros fatores que também são imprescindíveis para o projeto é a temperatura de projeto, analisando suas máximas e mínimas, bem como a pressão de projeto.

Segundo Barros (2017), a temperatura mínima de projeto é a menor temperatura entre a temperatura mínima do produto que será armazenada e a temperatura média do local aonde será instalado o tanque, acrescida de 8°C. Já a máxima temperatura de projeto é determinada pela máxima temperatura que o produto armazenado terá no processo. Para a determinação da pressão para o projeto é considerado basicamente a pressão atmosférica.

A sobre espessura de corrosão é o aumento da espessura de uma superfície metálica, como uma chapa de aço, devido a corrosão (ASTM G1-03, 2003). A corrosão é um processo natural de deterioração que ocorre quando um material metálico reage com o ambiente em que está inserido, resultando em perda de material e diminuição da espessura da superfície metálica (SHREIR, 2010).

Segundo a norma API 650 (2020), é responsabilidade do cliente indicar qual é a sobre espessura mínima de corrosão a ser adicionada no projeto do tanque.

3.1.3 Materiais Construtivos

3.1.3.1 Chapas

A norma API 650 (2020), estabelece requisitos específicos para as chapas de aço que são utilizadas na construção dos tanques, como o material, espessura e qualidade.

Referente aos materiais, a mesma norma divide em chapas finas e grossas, sendo que as chapas finas de aço carbono, devem estar de acordo com as especificações da ASTM A 1011 Gr 33, já as chapas grossas, as principais especificações requeridas são da ASTM A36, ASTM A283 e ASTM A516.

A espessura das chapas de aço deverá ser escolhida conforme resultados obtidos nos dimensionamentos do tanque, com exceção de chapas com espessura superior a 40 mm, que é recomendado passar por tratamentos térmicos para normalização (API 650, 2020).

3.1.3.2 Perfis Estruturais

Segundo a norma API 650 (2020), os perfis estruturais são utilizados tanto para a formação do anel inferior e o anel superior, quanto para o suporte do fundo do tanque. Devido isso, alguns requisitos devem ser adotados para a maior segurança e qualidade do projeto.

Os perfis estruturais devem ser fabricados conforme o material especificado para o corpo do tanque. No caso de aço carbono deverá seguir as especificações da ASTM A36, já para os aços inoxidáveis deverá seguir a especificações da AISI (BARROS, 2017).

Os principais modelos utilizados para a construção das estruturas são os perfis “I” e “U”, barra cantoneiras e barras chatas.

Para o cálculo dos perfis estruturais, deve-se levar em consideração as condições de projeto, a carga que será suportada e também as distâncias entre os suportes (BARROS, 2017).

3.1.4 Dimensionamento do Teto

Para o dimensionamento do teto de um tanque, seja ele de qualquer modelo dos citados anteriormente, tanto o teto, quanto a estrutura de sustentação deverá ser capaz de suportar o seu próprio peso, bem como uma carga extra de no mínimo 100 kgf/m², conforme Norma API 650 (2020).

A Norma também indica chapas de 5 mm como valor mínimo para a fabricação do teto dos tanques, podendo ser maior conforme necessidades específicas, como por exemplo, sobre espessura de corrosão.

A solda determinada para as chapas do teto deve seguir o padrão de sobreposição simples, comumente utilizado o valor de 25 mm, e também deverá ser externa ao teto (BARROS, 2017).

3.1.4.1 Cargas Atuantes

Segundo Barros (2017), para o dimensionamento do teto fixo e a sua estrutura para sustentação, as cargas atuantes são calculadas pelas equações 3,4 e 5:

$$Q_1 = D_L + L_T + F_{pe}P_e \quad (3)$$

$$Q_2 = D_L + 0,4L_T + P_e \quad (4)$$

$$Q = \text{máximo}(Q_1; Q_2) \quad (5)$$

Onde:

Q = maior valor da carga total uniformemente distribuída sobre o teto, [Kgf/m²];

Q1 = forma 1 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [Kgf/m²];

Q2 = forma 2 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [Kgf/m²];

D_L = carga morta, peso do próprio do teto, aonde é considerado o peso das próprias chapas e da estrutura de sustentação, [Kgf/m²];

L_T = carga viva, sobrecarga determinada pela norma;

P_e = pressão externa de projeto determinada pela norma de 0,25 KPa;

F_{pe} = fator de combinação de pressão externa, definido como a razão da pressão de operação normal externa para a pressão externa de projeto, com valor mínimo de 0,4.

3.1.4.2 Espessura da chapa do Teto

A espessura do teto de um tanque API 650 pode ser calculada usando a equação 6, estabelecida pela norma.

$$e = \left[\frac{D}{(4,8 * \text{sen}(\theta))} - \left(\sqrt{\frac{Q}{2,2}} \right) \right] \quad (6)$$

Onde:

e = espessura requerida [mm];

D = diâmetro interno [m];

θ = ângulo de inclinação do teto, podendo ser utilizado de 10° a 20°.

3.1.4.3 Estrutura de suporte do teto

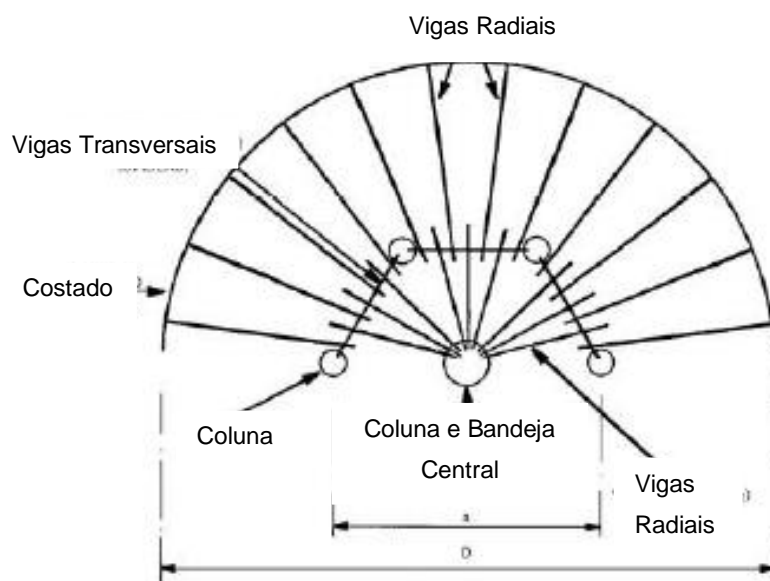
A norma API 650 (2020) indica a necessidade de usar estrutura de sustentação de teto em tanques que tenham um diâmetro superior a 18 metros, no entanto também é exigido para suportar peso do teto, cargas externas e equipamentos que possam ser instalados no topo. Porém a norma tem uma ressalva, em que as chapas não devem ser fixadas nos componentes de sustentação devendo ser montadas com uma declividade do centro para as periferias.

Segundo a norma API 650 (2020), todos os elementos da estrutura devem ter uma espessura nominal mínima de 4,3 mm e corroída mínima de 2,4 mm, excluído

apenas para colunas, aonde a espessura mínima não pode ser menor que 6 mm. As colunas devem ser apoiadas em chapas de reforços com espessura de 19 mm.

No projeto de tanques de armazenamento com teto fixo, as chapas do teto serão montadas sobre a estrutura do teto, a qual é composta por vigas radiais, vigas transversais e colunas (API 650, 2020). A Figura 5 representa a estrutura de suporte do teto.

Figura 5 – Estrutura de suporte do teto



Fonte: Barros (2017)

Segundo Barros (2017), para o dimensionamento das vigas radiais e transversais deve ser realizado a análise de flexão e cisalhamento das mesmas. Primeiramente deve ser analisado a quantidade mínima de vigas que o equipamento irá precisar, determinando o espaçamento máximo permitido entre vigas, pela equação 7.

$$b = t_r * \sqrt{\frac{1,5 * F_{yr}}{q}} \leq 21000 \text{mm} \quad (7)$$

Onde:

b = espaçamento máximo admissível entre as vigas radiais [mm];

F_{yr} = limite de escoamento mínimo da chapa do teto [kgf/m²];

t_r = espessura do teto [mm];

a) Flexão das vigas

No projeto do teto e da estrutura é adotado que a estrutura no geral será submetida a um carregamento uniformemente distribuído e também não é considerado a inclinação adotada no teto (BARROS, 2017).

Segundo Barros (2017), a quantidade de vigas radiais deve ser obtida pela equação 8, porém, para manter uma simetria do projeto, é comumente utilizado valores múltiplos do número de lados do polígono de sustentação, onde N_1 é a quantidade de vigas necessárias.

$$N_1 \leq \frac{\pi * D}{b} \quad (8)$$

Após determinada a quantidade de vigas, deve ser calculado a carga por unidade de comprimento da viga a qual estará submetida, sendo possível determinar qual será o momento fletor máximo imposto na viga. Pelas equações 9 e 10 é possível pré-determinar se as vigas serão bi apoiadas e se o momento máximo será encontrado no meio da viga (API 650, 2020).

$$q_{vr1} = \frac{q \left(\frac{\pi}{4} \right) * (D^2 - a^2)}{N_1 * L_{vr}} \quad (9)$$

$$M = \frac{q * L^2}{8} \quad (10)$$

Onde:

q_{vr1} = carga por unidade de comprimento [kgf/m];

a = diâmetro do círculo formado pelas colunas intermediárias;

L_{vr} = comprimento da viga radial [mm]

M = momento fletor máximo [kgf.m].

Com as informações obtidas acima, determina-se o módulo de resistência, o qual permitirá a seleção adequada de um perfil que suporta as cargas necessárias.

$$W = \frac{100 * M}{\sigma_a} \quad (11)$$

Onde:

W = módulo de resistência [cm^3];

σ_a = tensão admissível do material [kgf/cm^2].

O cálculo para as vigas intermediárias é similar aos cálculos para as vigas radiais, tendo pequenas alterações. Para as vigas intermediárias utiliza-se as seguintes equações:

$$N_2 = \frac{\pi * a}{1,7} \quad (12)$$

$$W = \frac{100 * M}{\sigma_a} \quad (13)$$

Onde:

N_2 = quantidade de vigas radiais intermediárias;

q_{vr2} = carga por unidade de comprimento [kgf/m].

Para calcular as vigas transversais, utiliza-se a Equação 14.

$$q_{vt} = \frac{R_i}{L_t} \quad (14)$$

Onde:

R_i = reação i de cada viga radial que se apoia na viga transversal [kgf];

L_t = comprimento da viga transversal [m];

q_{vt} = carga por unidade de comprimento [kgf/m].

b) Cisalhamento

Segundo Barros (2017), as vigas radiais e transversais são consideradas com um carregamento uniformemente distribuídos e sendo apoiada dos dois lados de suas extremidades. Dessa maneira se faz necessário a análise perante ao cisalhamento de todos os elementos da estrutura de suportaçãõ do teto, conforme estabelecido pelas equações 15 e 16.

$$F_c = \frac{q * L}{2} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{F_c}{A_{alma}} \leq \tau_a \quad (16)$$

Onde:

q = carga por unidade de comprimento [kgf/m];

F_c = força cortante máxima, que nesse caso vai ser igual a reação de apoio, [kgf];

τ = tensão cisalhante [kgf/cm²];

A_{alma} = área da alma perfil selecionada, [cm²];

τ_a = tensão admissível ao cisalhamento do material.

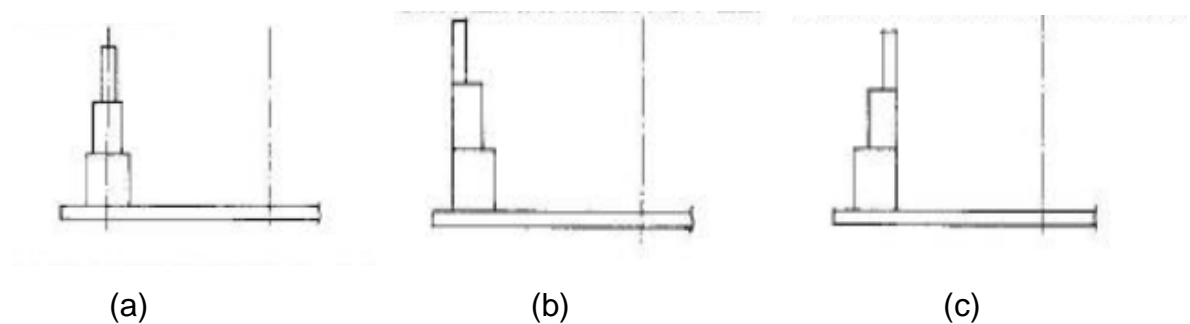
3.1.5 Dimensionamento do Costado

O projeto do costado de tanques de armazenamentos deve seguir requisitos e critérios para determinação das espessuras das chapas, aonde a espessura máxima das chapas irá depender das especificações do material utilizado, não sendo superior a 1.3/4" (44,45 mm) e as chapas que tiverem espessura acima de 1.1/2" (38.1 mm) deverão passar por tratamentos para normalização ou tempera para que seja possível suportar os impactos pré-determinados (API 650, 2020).

Segundo Barros (2017), o costado deve seguir um padrão de alinhamento, podendo ser distribuído de três maneiras, sendo elas, disposição simétrica, disposição com alinhamento pela face externa e disposição com alinhamento pela face interna.

A disposição simétrica caracteriza-se por chapas alinhadas pelo seu centro, sendo o modo mais recomendado, mas também de difícil fabricação. A disposição com alinhamento pela face externa é quando as chapas são alinhadas pela sua face externa, sendo mais fácil a montagem e acabamento. Já a disposição com alinhamento pela face interna se dá pelas chapas alinhadas pela sua face interna, sendo a disposição comumente utilizada pois apresenta uma fácil montagem e um acabamento externo regular. (BARROS,2017). A Figura 6 representa os três tipos de disposição.

Figura 6 – Disposição das chapas no costado, em (a) a disposição simétrica, em (b) a disposição com alinhamento pela face externa e em (c) a disposição com alinhamento pela face interna.



Fonte: Barros (2017)

A espessura requerida para o costado deve ser o maior valor entre a espessura determinada no projeto preliminar e a espessura da análise do teste hidrostático, mas necessariamente deve ser igual ou superior aos valores especificados na Tabela 1 (API 650, 2020).

Tabela 1 – Espessura nominal das chapas do costado

Diâmetro nominal do Tanque		Espessura nominal da chapa	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	3/16
15 a <36	50 a < 120	6	1/4
36 a 60	120 a 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Fonte: API 650 (2020)

Segundo a API 650 (2020), a Tabela 1 utiliza o diâmetro nominal do tanque, que é definido como o diâmetro da linha de centro do primeiro anel do costado. As juntas verticais e horizontais do costado, são formadas de chapas esquadrejadas, onde devem ser soldadas de topo com penetração e fusão completas, também sendo soldada pelos dois lados. As juntas verticais nos anéis de costado adjacentes não devem estar alinhadas, mas sim afastadas uma das outras, de no mínimo 5 vezes a espessura da chapa mais grossa entre os anéis considerados (API 650, 2020).

A norma API 650 (2020) possui 2 métodos para o dimensionamento do costado de tanques de armazenamento, sendo eles o projeto base para tanques pequenos (método básico), recomendado para projeto de tanques que possuem o seu diâmetro igual ou inferior a 16 metros e o método do ponto variável de projeto, recomendado para projeto de tanques que possuem o seu diâmetro superior a 16 metros.

Segundo Barros (2017), todos os tanques devem ter uma barra cantoneira ou uma viga “U” como reforço no topo da última chapa superior do costado, a solda da mesma deve ser de fusão completa e penetração total. Também é indicado que a aba da barra cantoneira ou a alma, para o caso da viga “U”, seja voltada para o lado interno dos tanques.

3.1.5.1 Tensões Admissíveis

A máxima tensão admissível para a condição de projeto (S_d) deve estar em conformidade com a norma. A tensão admissível para a condição de projeto deve ser

dois terços do limite de escoamento ou dois quintos do limite de resistência, usando o menor valor (API 650, 2020).

Já para a máxima tensão admissível para condição de teste hidrostático (S_t) também deve estar em conformidade com a norma, na qual para a condição de teste hidrostático deve ser três quartos do limite de escoamento ou três sétimos do limite de resistência, usando qual for menor (API 650, 2020).

3.1.5.2 Projeto base para tanques pequenos

O anexo A da norma API 650 (2020) apresenta orientações adicionais sobre os requisitos estabelecidos na norma para os projetos, com foco nos cálculos do equipamento.

O mesmo viabiliza a realização do costado com uma tensão admissível fixada no valor de 145 Mpa e um fator para eficiência de solda de 0,85 ou 0,7. Por isso, as espessuras nominais das chapas do costado não devem ser menores que os valores calculados pela equação 17:

$$t_n = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{145 * E_j} + CA \quad (17)$$

Onde:

t_n = espessura nominal, [mm];

H = altura do fundo do anel a ser calculado, [mm];

G = densidade específica, não podendo ser menor que 1;

E = fator de eficiência de solda;

CA = sobre espessura de corrosão.

Para o cálculo dos anéis seguintes deve ser descontado o valor da altura da chapa da altura total do tanque.

3.1.5.3 Método do ponto variável de projeto

Esse método realiza o cálculo para cada anel do costado, um ponto variável de projeto, o qual apresenta resultados de tensão mais próximos dos reais do equipamento, proporcionando redução das espessuras das chapas utilizadas no costado do tanque (API 650, 2020).

Primeiramente deve ser realizado para o cálculo uma espessura preliminar, tanto para condições de projeto como para teste hidrostático, garantindo que a estrutura do tanque tenha rigidez e resistência suficientes para suportar as cargas de serviço (API 650, 2020).

Para o cálculo da espessura de projeto e espessura de teste hidrostático, utiliza-se as equações 18 e 19, respectivamente.

$$t_{pd} = \frac{4,9 * D(H-0,3) * G}{S_d * E} + CA \quad (18)$$

$$t_{pt} = \frac{4,9 * D(H-0,3)}{S_t * E} \quad (19)$$

Onde:

t_{pd} = espessura preliminar do 1° anel para condições do projeto, [mm];

t_{pt} = espessura preliminar do 1° anel para condições de teste hidrostático, [mm].

E = eficiência de solda, podendo variar de 0,7, 0,85 e 1, onde 1 representa cordões de solda que serão submetidos a testes de raio x por completo, 0,85 para cordões que terão alguns pontos submetidos a teste de raio x e 0,7 para os que serão submetidos apenas a teste hidrostático.

Para que seja possível a utilização desse modelo de cálculo é necessária que a proporção abaixo seja verdadeira.

$$\frac{L}{H_{m\acute{a}x}} \leq \frac{1000}{6} \quad (20)$$

$$L = \sqrt{500 * D * t} \quad (21)$$

Onde:

L = parâmetro instituído para cálculo, [mm];

t = espessura corroída do 1º anel do costado, [mm].

O cálculo para determinar as espessuras que são utilizadas no projeto são as seguintes equações:

$$t_{1d} = \left(1,06 - \frac{0,06969 * D}{H} * \sqrt{\frac{H * G}{S_d * E}} \right) * \left(\frac{4,9 * H * D * G}{S_d * E} \right) + CA \quad (22)$$

$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,06969 * D}{H} * \sqrt{\frac{H}{S_t * E}} \right) * \left(\frac{4,9 * H * D}{S_t * E} \right) \quad (23)$$

As espessuras que forem calculadas não serão, necessariamente, os valores encontrados nos cálculos preliminares, sendo a espessura nominal mínima requerida para o primeiro anel o maior valor entre os valores de t1d e t1t (BARROS, 2017).

Para que seja possível calcular a espessura para o segundo anel do costado, a relação abaixo deve ser calculada:

$$\frac{h_1}{(h' * t_1)^{0,5}} \quad (24)$$

Onde:

h_1 = altura do 1º anel do costado, [mm];

h' = altura restante do tanque após o primeiro anel, [mm];

t_1 = espessura do 1º anel do costado, [mm];

Antes de realizar o cálculo do segundo anel, deve ser analisado se o valor da espessura do primeiro anel é igual ou inferior a 1,375.

$$t_2 = t_1 \quad (25)$$

Onde:

t_2 = espessura mínima para o 2º anel do costado, [mm];

Caso o valor do primeiro anel for igual ou superior a 2,625:

$$t_2 = t_{2a} \quad (26)$$

Onde:

t_{2a} = espessura corroída no 2º anel do costado, [mm];

Para realizar o cálculo t_{2a} , deve-se utilizar o método dos anéis superiores descritos nas equações abaixo:

$$t_{ud} = \frac{4,9 * D * (Hr - 0,3) * G}{S_d * E} \quad (27)$$

$$t_{ut} = \frac{4,9 * D * (Hr - 0,3)}{S_t * E} \quad (28)$$

Onde:

t_{ud} = espessura preliminar da condição de projeto para anéis superiores, [mm];

t_{ut} = espessura preliminar da condição teste hidrostático para anéis superiores, [mm];

Hr = altura do tanque menos a altura do primeiro anel, [m].

Em seguida, deve ser calculado as distâncias x_1 do ponto variável de projeto a partir do fundo anel em análise.

$$K = \frac{St_L}{t_u} \quad (29)$$

$$C = \frac{[K^{0,5}(K-1)]}{(1+K^{1,5})} \quad (30)$$

$$X_1 = 0,61 * (r * t_u)^{0,5} + 320 * C * H \quad (31)$$

$$X_2 = 1000 * C * H \quad (32)$$

$$x_3 = 1,22 * (r * t_u)^{0,5} \quad (33)$$

Onde:

K = parâmetro adimensional simbolizado na Equação;

C = parâmetro adimensional simbolizado na Equação;

t_u = espessura corroída do anel superior que está em análise, [mm];

t_L = espessura corroída do anel superior que está em análise, [mm];

Para valores do primeiro anel for maior que 1,375 e menor que 2,625:

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) * \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 * (r * t_1)^{0,5}} \right] \quad (34)$$

A espessura mínima para os anéis superiores deve ser calculada para ambas as condições, usando o menor valor de x encontrado.

$$t_{dx} = \frac{4,9 * D \left(H - \frac{x}{1000} \right) * G}{S_d * E} + CA \quad (35)$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 * D \left(H - \frac{x}{1000} \right)}{S_t * E} \quad (36)$$

Onde:

t_{dx} = espessura mínima de projeto calculada pelo método do anel superior, [mm];

t_{tx} = espessura mínima de teste hidrostático calculada pelo método do anel superior, [mm];

$X =$ menor valor determinado entre x_1 , x_2 e x_3 .

3.1.6 Dimensionamento do Fundo

O projeto do fundo de tanques de armazenamento pode seguir dois modelos para fabricação, sendo o com fundo inclinado, aonde possuem um caimento mínimo de 1:120 do centro para a periferia e outro modelo para o fundo plano (BARROS, 2017).

Segundo Barros (2017), o projeto de fundo plano é indicado para tanques que não precisam ser esvaziados completamente ou quando o produto a ser armazenado é mais denso e menos propenso a formar sedimentos ou resíduos. Esse modelo de fundo é mais simples e econômico para a fabricação, além de poder ser instalado diretamente na sua base. No entanto, os fundos planos podem vir a apresentar problemas de corrosão devido ao acúmulo de resíduos no fundo do tanque (BARROS, 2017).

Já os fundos inclinados são recomendados para tanques que necessitam ser esvaziados por completo, indicado para armazenamento de produtos altamente viscosos ou com grande risco de explosão. Outra aplicação para os fundos inclinados é para tanques que operam em altas temperaturas para facilitar a expansão térmica e o acúmulo de pressão interna (BARROS, 2017).

Tanques de armazenamento que possuam grandes diâmetros e serem projetados com o fundo plano, devem seguir os valores recomendados pela Tabela 2, pois transmitem cargas de apoio para a base civil (BARROS, 2017).

Tabela 2 – Espessura das chapas anulares do fundo

Diâmetro nominal do tanque D (mm)	Espessura das chapas anulares (mm)
$D \leq 25$	6,3
$25 < D \leq 35$	8,0
$35 < D \leq 55$	9,0
$55 < D$	11,2

Fonte: Norma NBR 7821 (1983)

Segundo Barros (2017), o contorno do fundo dos tanques de armazenamento pode ser de dois modelos em relação ao tipo de disposição de chapas, anel de chapas anulares e chapas recortadas.

3.1.6.1 Chapas Anulares

As normas API 650 (2020) e N-270 (2014) estabelecem uma largura mínima de 750 mm para as chapas anulares, não importando o diâmetro do tanque e a sua espessura mínima. Leva em consideração a espessura do primeiro anel do costado do equipamento, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Espessura mínima para chapas anulares

Espessura das chapas (e) do 1° anel do costado [mm]	Espessura mínima das chapas anulares [mm]	
	Declividade para a periferia	Declividade para o centro
$e \leq 12,50$	6,3	8
$12,5 \leq e \leq 22,40$	8	9,5
$22,40 \leq e \leq 31,50$	9,5	12,5
$31,50 < e$	12,5	16

Fonte: Norma N-270 (2014) tradução nossa.

A largura radial das chapas anulares deve ser calculada pela equação 37:

$$W_b = 2 * t_b * \sqrt{\frac{F_{yb}}{2 * \gamma * G * H_{m\acute{a}x}}} \quad (37)$$

Onde:

W_b = largura mínima para a chapa anular medida a partir da borda interna do costado até a borda da chapa no restante do fundo, [mm];

F_{yb} = limite de escoamento da chapa anular na temperatura ambiente, [Mpa];

T_b = espessura nominal da chapa anular, [mm];

G = densidade relativa para o líquido armazenado.;

γ = fator de densidade da água = 0,00981 [Mpa/m].

A largura mínima das chapas anulares, segundo a norma API 650 (2020), é de 600 mm entre a parte interna do costado e a junta sobreposta do restante das chapas do fundo.

A espessura de chapas a serem utilizadas para a construção do tanque são determinadas pela Tabela 4, no entanto, a mesma só pode ser utilizada para equipamentos que possuam uma altura máxima igual ou inferior a 23 metros.

Tabela 4 – Espessura de chapas em relação a tensão

Espessuras das chapas (t) do 1° anel do costado [mm]	Tensão no 1° anel do costado [MPa]			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
t ≤ 19	6	6	7	9
19 < t ≤ 25	6	7	10	11
25 < t ≤ 32	6	9	12	14
31 < t ≤ 40	8	11	14	17
40 < t ≤ 45	9	13	16	19

Fonte: API 650 (2020) tradução nossa.

Segundo a API 650 (2020), a tensão máxima do primeiro anel do costado é utilizada como a tensão para determinação da espessura do fundo, analisando a maior entre a tensão de projeto e de teste hidrostático, determinados pelas equações 38 e 39.

$$Tensão\ de\ projeto = \frac{(t_{1d} - CA)}{(t_{com} - CA)} * S_d \quad (38)$$

Onde:

t_{1d} = espessura do 1° anel do costado calculada para condições de projeto [mm];

CA = sobre espessura de corrosão [mm];

S_d = tensão admissível para a condição de projeto, [Mpa];

T_{com} = espessura nominal comercial do 1° anel do costado [mm]

$$\text{Tensão de teste hidrostático} = \frac{t_t}{t} * S_t \quad (39)$$

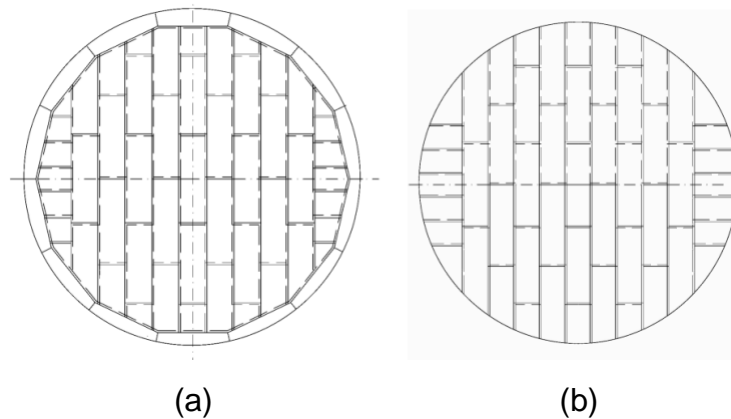
Onde:

t_t = espessura do 1° anel do costado calculada para condição de teste hidrostático [mm];

S_t = tensão admissível para a condição de teste hidrostático, [Mpa].

Segundo a Norma API 650 (2020), os tanques que possuírem fundo fabricado com chapas anulares devem ter uma forma circunferencial externa e o interno do costado não é necessário seguir o modelo, podendo ser instalado em forma poligonal, conforme pode ser analisado na Figura 7.

Figura 7 – Chapas anulares circunferencial, na figura (a) com a chapa anular e figura (b) sem a chapa anular



Fonte: Barros (2017)

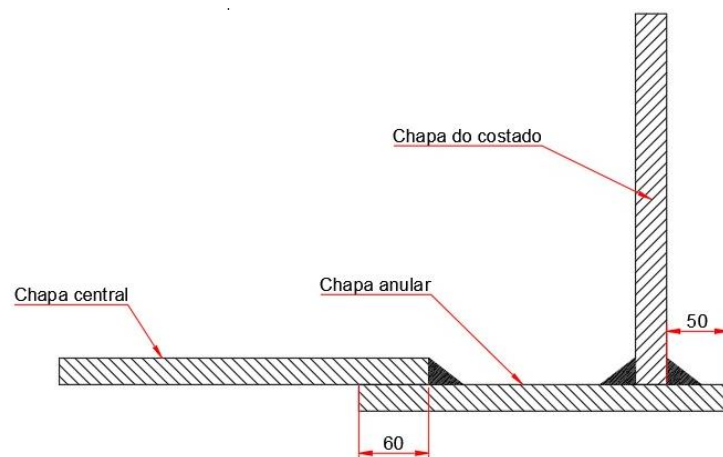
3.1.6.2 Chapas Recortadas

Segundo a norma API 650 (2020), as chapas recortadas podem ser usadas no lugar das chapas anulares, se o material do primeiro anel do costado for do grupo IV, IVA,

V ou VI e, além disso, a tensão máxima na condição de projeto para o primeiro anel do costado ser menor ou igual a 160 MPa, ou a tensão máxima na condição de teste hidrostático para o primeiro anel do costado ser menor ou igual a 171 MPa.

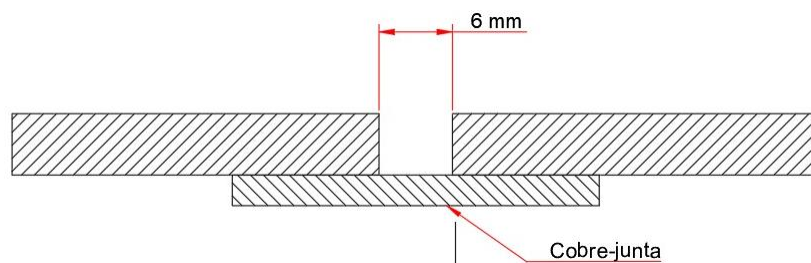
A norma API 650 (2020), também indica que as chapas recortadas devem possuir uma largura mínima de 1800 mm e a espessura de 6 mm. A ligação entre as chapas pode ser realizada de duas maneiras, sendo com a sobreposição das chapas de 25 mm ou com uma barra chata debaixo das chapas do fundo. A Figura 8 e Figura 9 representam as duas maneiras de união de chapas.

Figura 8 – União chapas do fundo com sobreposição de chapas



Fonte: N – 270 (2010)

Figura 9 – União de chapas do fundo com a utilização de barra chata



Fonte: (2010)

3.1.7 Fundação

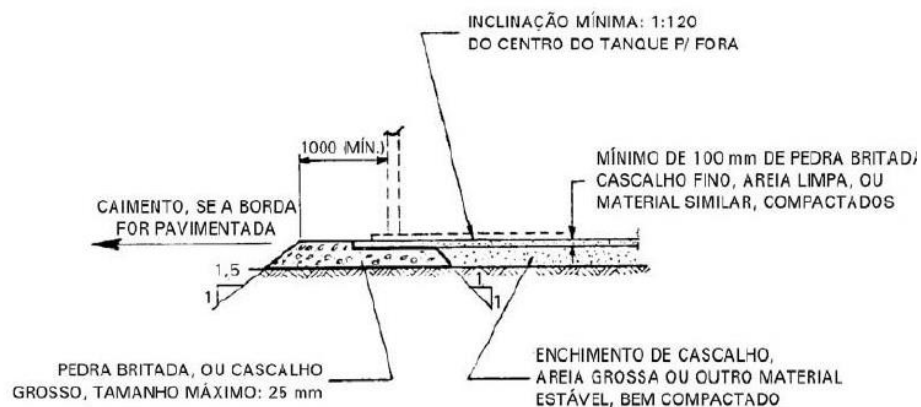
Os tanques de armazenamento que seguem a norma API 650 podem ser fixados ao solo de diferentes maneiras, dependendo do tamanho, peso e finalidade do tanque. A norma API 650 classifica dois tipos de fundação, fundação direta e fundação profunda.

3.1.7.1 Fundação Direta

Esse modelo apresenta dois aspectos construtivos, segundo a Norma API 650 (2020), sendo eles, aterro compactado e anel de concreto.

No aterro compactado é realizado a remoção de uma camada superficial do terreno e substituído por um material adequado, comumente utilizado o cascalho e realizado a sua compactação. Além disso a norma API 650 exige que seja realizada uma verificação de que o aterro suportará o peso do tanque, bem como quaisquer cargas adicionais que possam ser aplicadas. A Figura 10 mostra a fundação tipo aterro compactado.

Figura 10 – Fundação tipo Aterro Compactado

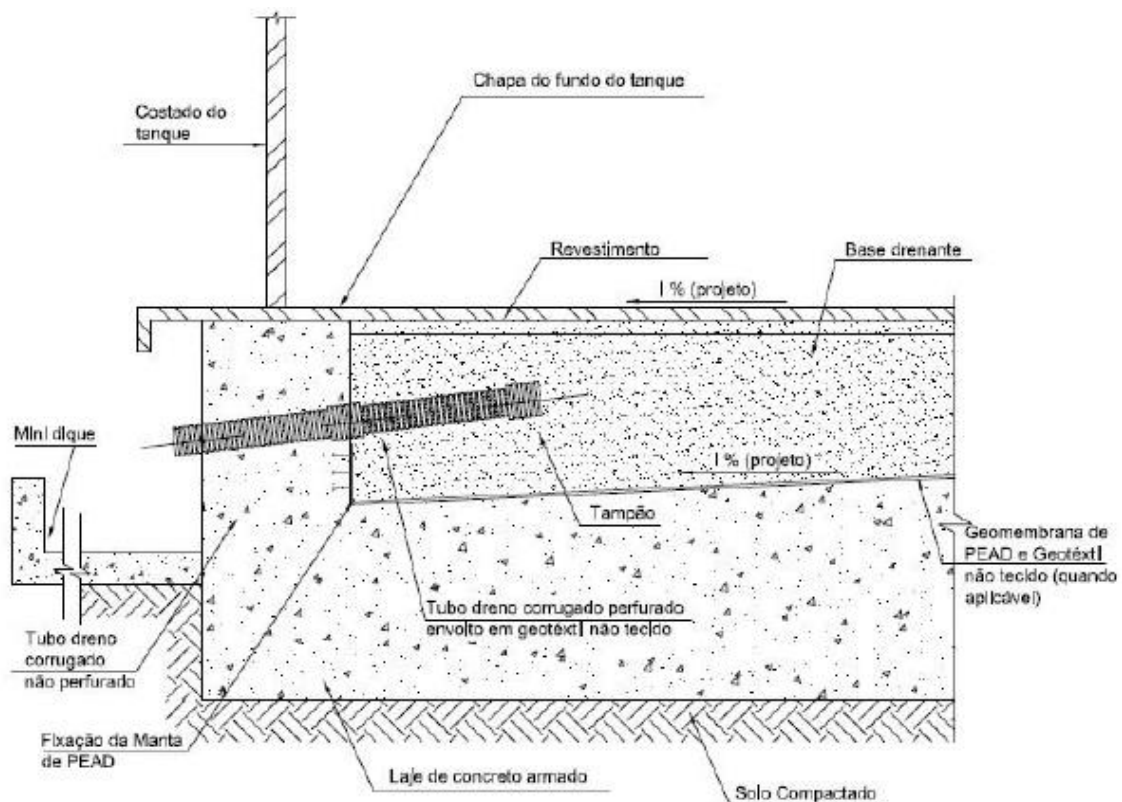


O FUNDO DA ESCAVAÇÃO DEVE SER NIVELADO. É NECESSÁRIO RETIRAR ENTULHO, VEGETAÇÃO E MATERIAIS INSTÁVEIS, ATÉ A PROFUNDIDADE NECESSÁRIA.

Fonte: NBR 7821 (1988)

Outro aspecto construtivo é o anel de concreto, que consiste na construção de um anel de concreto sob o costado do tanque, onde o mesmo será apoiado e o seu interior é completado com terra ou cascalho compactado (API 650, 2020). Segundo a mesma norma, ao construir o anel de concreto para a instalação de um tanque, é importante garantir que ele tenha a espessura, a largura e a capacidade de suporte de carga necessária para suportar o peso do tanque e seu conteúdo. Além disso, se faz necessário uma análise de estabilidade do anel de concreto e do tanque para garantir que a estrutura seja capaz de suportar as cargas impostas no equipamento. A Figura 11 mostra a fundação tipo anel de concreto.

Figura 11 – Fundação tipo Anel de Concreto



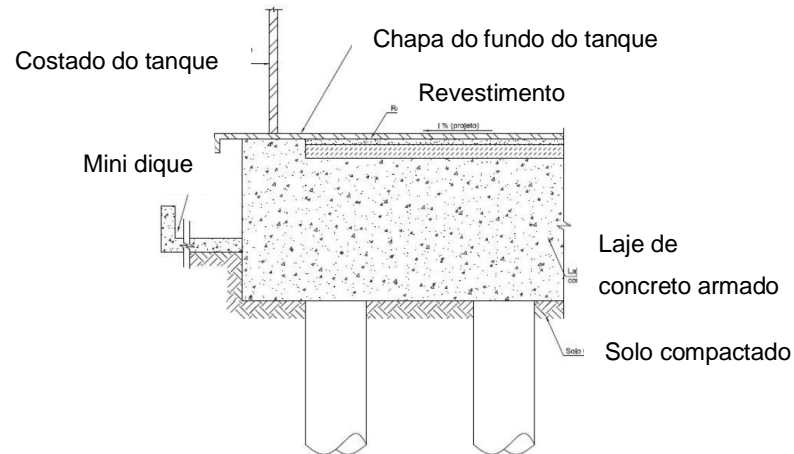
Fonte: N-270 (2013)

3.1.7.2 Fundação Profunda

Modelo utilizado quando as condições do solo impossibilitam o emprego da fundação direta, porém sendo o mais utilizado, devido sua segurança na instalação.

Segundo Barros (2017), a fundação profunda é construída por uma série de estacas sob uma laje de concreto armado, na qual será apoiado o tanque. A Figura 12 ilustra esse tipo de fundação.

Figura 12 – Fundação Profunda



Fonte: N-1822 (2015)

3.1.8 Verificação da necessidade de chumbadores

A ancoragem de um tanque é o processo de fixação e suporte estrutural utilizado para garantir a estabilidade do tanque em sua base, evitando qualquer tipo de deslocamento ou tombamento do equipamento, sendo extremamente recomendando para localidades que apresentam fortes ventos e incidência de abalos sísmicos (BARROS, 2017).

Segundo a Norma API 650 (2020), três condições devem ser obedecidas para que um tanque não precise ser ancorado. Sendo elas:

Condição 1, estabelecida pela equação 40:

$$0,6M_w + M_{pi} < \frac{M_{dl}}{1,5} + M_{dlr} \quad (40)$$

Condição 2, estabelecida pela equação 41:

$$M_w + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{dl} + M_f}{2} + M_{dlr} \quad (41)$$

Condição 3, estabelecido pela equação 42:

$$M_{ws} + F_p F_p(M_{pi}) < \frac{M_{dl}}{1,5} + M_{dlr} \quad (42)$$

Onde:

F_p = fator de combinação de pressão;

M_{pi} = momento sobre a junção costado/ fundo devido a pressão interna de projeto;

M_w = momento sobre a junção costado/ fundo devido às pressões vertical/horizontal do vento;

M_{dl} = momento sobre junção costado/ fundo devido ao peso do costado;

M_f = momento sobre a junção costado/ fundo devido ao peso do líquido;

M_{dlr} = momento sobre a junção costado/ fundo devido ao peso do teto;

M_{ws} = momento sobre a junção costado/ fundo devido à pressão horizontal do vento.

Para esses equipamentos, os efeitos verticais provocados pela pressão do vento devem ser desconsiderados, dessa forma M_w e M_{ws} terão o mesmo valor.

Para obter o valor de M_{pi} , é necessário resolver a seguinte equação:

$$M_{pi} = P_{int} \times \left(\frac{\pi \times D^3}{8} \right) \quad (43)$$

Onde:

P_{int} = pressão interna, [MPa];

D = diâmetro do tanque, [m];

O cálculo do M_w e M_{ws} , leva em consideração a pressão de vento no costado, dada em N/m^2 , conforme Equação 44. Sendo P_{ws} o valor da pressão de vento no costado que tem seu valor determinado de $378,21 N/m^2$.

$$M_w = M_{ws} = P_{ws} \times \left(\frac{D \times H^2}{2} \right) \quad (44)$$

O valor do M_{dl} se encontra a partir do produto do peso do costado (P_{cost}) pelo raio do equipamento (r).

$$M_{dl} = P_{COST} \times r \quad (45)$$

Valor do M_f , obtido pela equação 46.

$$M_f = G \times V \times r \quad (46)$$

Onde:

G = densidade do produto armazenado;

V = volume do equipamento, [m^3];

r = raio do equipamento, [m].

O valor do M_{dlr} é encontrado pelo produto do peso do teto (P_{teto}) e raio do tanque.

$$M_{dlr} = P_{teto} \times r \quad (47)$$

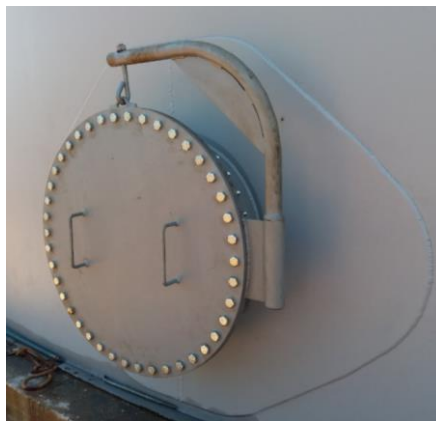
3.1.9 Acessórios

Alguns acessórios que compõem um tanque de armazenamento atmosférico são: porta de inspeção e bocais no costado e teto do tanque.

Tanques de armazenamento atmosférico que são regidos pela norma API 650 necessariamente precisam ter duas postas de inspeção, uma delas disposta no

costado e outro no teto do equipamento. Segundo a norma API 650 (2020), as portas de inspeção devem ter um tamanho mínimo de 24 polegadas, devem também ser projetadas para suportar as pressões internas e externas. As mesmas devem garantir a estanqueidade e a sua resistência a corrosão. A Figura 13 mostra uma porta de inspeção no costado e a Figura 14, uma porta de inspeção no teto.

Figura 13 – Porta de inspeção no costado



Fonte: Fay Engenharia Aplicada (2018)

Figura 14 – Porta de inspeção no teto



Fonte: FAY Engenharia Aplicada (2018)

A norma API 650 (2020) exige que os bocais instalados, tanto no costado como no teto, sejam projetados e instalados de forma segura e confiável. Diante disso,

os bocais devem ser instalados com flanges do tipo sobreposto ou de pescoço, com a sua classe de pressão de no mínimo 150 libras. Todas aberturas realizadas nos tanques superiores a 2 polegadas devem apresentar uma chapa de reforço para a união do tubo com o costado ou teto, devendo possuir uma espessura igual ou superior do local aonde será instalada (API 650,2020). A Figura 15 mostra bocais no costado.

Figura 15 – Bocal no costado



Fonte: FAY Engenharia Aplicada, 2018

3.1.10 Montagem do tanque

A montagem de um tanque de armazenamento é uma etapa extremamente importante para o perfeito funcionamento e garantia de segurança do equipamento no futuro. O procedimento mais utilizado para a montagem dos tanques de armazenamento atmosféricos é com o auxílio de macacos hidráulicos (FAY, 2023)

Ela se inicia pela montagem do fundo do tanque sobre a base civil, já ficando alocado na posição final e seguindo as orientações indicadas no projeto a respeito da sobreposição de chapas. Para a montagem do fundo é feito uma pré-montagem, onde é apenas ponteadado as chapas para fixação e em seguida é realizado o procedimento de solda total das uniões.

O próximo segmento a ser montado é o teto e de todos os elementos presentes no mesmo, como bocais e porta de inspeção. Previamente à colocação das

chapas é montada a estrutura de sustentação, caso seja aplicável. Com a estrutura montada é colocada as chapas sobre a mesma. A solda realizada entre as chapas é contínua para uma total vedação do equipamento, já entre o teto e a estrutura é apenas realizado cordões de solda (BARROS, 2017)

Com o teto já montado, a sequência da operação é a alocação dos macacos ao redor do teto do tanque e uma parte deles é alinhada em uma das tangentes do equipamento, nessa reta é o local aonde serão dispostas as chapas do costado, as mesmas já são soldadas verticalmente. Em seguida as chapas são impulsionadas para a conformação conforme o diâmetro do tanque e realizado a última união vertical. A sua montagem começa do último anel superior até o primeiro inferior. A figura 16 demonstra o funcionamento da montagem do costado, onde os macacos elevam o anel já montado e uma máquina impulsionadora aloca as chapas para a construção do próximo anel. (FAY, 2023).

Figura 16 – Montagem com o auxílio de macacos hidráulicos

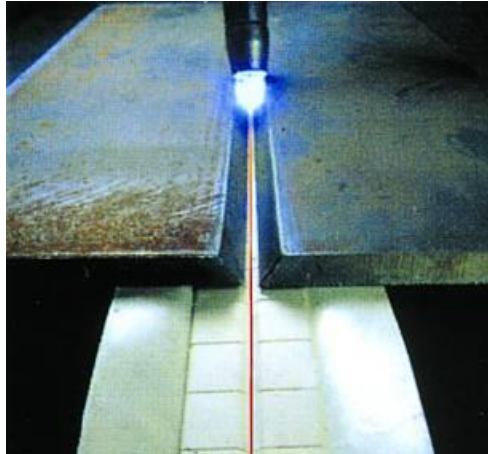


Fonte: Fay Engenharia Industrial Aplicada, 2015

Após o funcionamento dos macacos hidráulicos é realizado o processo de solda do costado, o mesmo é realizado internamente com o auxílio de um *Backing* de cerâmica, o qual fornece um suporte e estabilidade durante a execução da solda conforme mostrado pela figura 17, com a utilização desse dispositivo não se faz necessário a realização da solda externa do equipamento, pois o mesmo garante

resistência e acabamento. Após a montagem do primeiro anel do costado já se inicia a montagem do corrimão, escada e guarda-corpo do tanque (FAY, 2023).

Figura 17 – Solda com utilização de *Backing* Cerâmico



Fonte: Solda Brasil, 2008

Após finalizar a montagem de todos os anéis do costado do equipamento é realizado a união do costado com o fundo já instalado na base civil, o mesmo é soldado internamente e externamente. Com a união realizada o próximo passo a ser seguido é a instalação, se aplicável, dos chumbadores na base civil do equipamento. (FAY, 2023).

3.1.11 Solda no fundo

A solda realizada no fundo do tanque irá depender da forma como as chapas serão instaladas, se serão com sobreposição ou anulares, no caso da sobreposição, a solda será realizada somente na face superior, com a solda de ângulo integral, ou seja, a dimensão da solda será a mesma da chapa. Para as chapas anulares o método utilizado é a solda de topo, podendo ser realizada em ambos os lados ou apenas no lado interno do tanque (BARROS, 2017).

3.1.12 Solda no costado

Para as soldas realizadas no costado do tanque o método utilizado é a solda de topo com penetração total e fusão completa, sendo necessário a solda pelos dois lados, exceto quando utilizado procedimentos especiais como por exemplo o *Backing Cerâmico* (BARROS, 2017).

Outro detalhe importante para as uniões do costado é o não alinhamento das chapas de um anel para o outro, as mesmas devem apresentar um desalinhamento de no mínimo 1/3 do comprimento das chapas utilizadas na montagem do equipamento (API 650, 2020).

3.1.13 Solda no teto

A solda realizada no teto deve ser realizada apenas na parte superior, ou seja, parte externa do equipamento, a mesma deve ser com cordão de solda contínuo e com dimensão igual a espessura das chapas do teto. Haverá soldas internas no caso da presença de estrutura de sustentação, onde serão realizadas soldas intermitentes, com comprimento mínimo de 50 mm e espaçamento de 250 mm de centro a centro (BARROS, 2017).

3.1.14 Procedimento de Pintura

Segundo Barros (2017), o procedimento de pintura das chapas tem suma importância para garantir a proteção contra os efeitos corrosivos do ambiente, a mesma só deve ser realizada após a finalização e validação do teste hidrostático.

O primeiro passo a ser realizado é a limpeza das chapas, aonde é utilizado decapante para a remoção de ferrugem e graxas presentes na superfície da chapa e em seguida removido o decapante com o auxílio de solventes. Em casos específicos ou por solicitação do cliente é realizado o jateamento com areia, a qual deixa as

superfícies com um acabamento superior ao que é realizado apenas a limpeza com decapante (BARROS, 2017).

Na sequência é realizado a pintura com a tinta do fundo, sendo aplicado duas de mão da Tinta de Fundo Epoxi Zarcão-Óxido de Ferro, em seguida é aplicada a tinta de acabamento que também deve ser aplicada duas de mão, a tinta de acabamento é determinada pelas especificações do cliente (BARROS, 2017).

A maneira para aplicação da tinta pode ser realizada por meio dos rolos de pintura ou com as pistolas pneumáticas próprias para pintura.

3.1.15 Teste Hidrostático

Segundo Barros (2017), o teste hidrostático tem por finalidade a validação da estanqueidade das soldas e também se faz possível a verificação da qualidade estrutural da fundação. O mesmo consiste basicamente em encher o tanque em teste com água, a duração do teste deve ser de no mínimo de 60 minutos.

Para tanques que possuem o teto fixo, a altura da água deve ser de aproximadamente 50 mm acima da viga de união do costado com o teto, para tanques de teto flutuante o enchimento não deve causar riscos a movimentação e nem a flutuabilidade do teto (BARROS, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho visa por objetivo projetar um tanque de armazenamento seguindo a norma API 650.

A metodologia empregada no dimensionamento do tanque, foi de acordo com a norma, seguindo o roteiro de cálculo determinado pela norma API 650, edição 2020.

As informações sobre o projeto de tanque de armazenamento e análise pelo método de elementos finitos foram coletadas através dos seguintes meios:

- Para o detalhamento mecânico do equipamento foram utilizados os softwares de modelagem *Autodesk® AutoCad Mechanical 2015* e *Autodesk® Inventor Professional 2015*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados do projeto

Para este estudo se optou por um tanque de armazenamento com dimensões genéricas, ou seja, não sendo necessariamente as dimensões de um tanque real. As informações construtivas básicas para a projeção do tanque foram definidas com base nos meios descritos anteriormente. Os dados do projeto utilizados para os cálculos dos segmentos do tanque estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados do projeto

Dados do projeto	Valor
Diâmetro Interno (mm)	12.000
Altura Total (mm)	15.000
Material de Fabricação	ASTM A-36
Tensão Projeto: Sd (Mpa)	145
Produto	Biodiesel
Densidade do Produto: G (Ton/m ³)	0,9
Sobreexp. De Corrosão (mm)	0
Eficiência de Solda: E	0,7
Volume do Tanque (m ³)	1696
Ângulo do teto	20°
Temperatura de Projeto (°C)	20

Fonte: O autor (2023)

Como nesse caso será para o armazenamento de biodiesel, o tanque pode ser fabricado em aço de baixo carbono A-36 devidos as propriedades químicas e físicas, aonde o aço apresenta uma boa resistência a corrosão e a capacidade de suportar pressões e temperaturas de operação.

5.2 Dimensionamento do costado

Conforme informado na Tabela 5, o tanque terá um diâmetro de 12 metros, desta maneira possibilita que o cálculo para as espessuras das chapas do costado

seja realizado pelo método de projeto base para tanques pequenos, da norma API 650.

5.2.1 Quantidade de anéis

Como o tanque possui uma altura total de 15 metros de costado e as chapas escolhidas possuem uma altura de 1,5 metros, realizando a divisão da altura total pela altura das chapas, assim chegando no valor de 10 anéis.

5.2.2 Dimensionamento das espessuras das chapas de cada anel do costado

Para o cálculo das espessuras das chapas do costado do tanque de armazenamento foi utilizado o Método de Projeto base para tanques pequenos, pois para as dimensões determinadas é o que melhor se adequa as especificações do cálculo. Para esse projeto é utilizado a equação 17. Outro detalhe que deve ser informado é a utilização da densidade da água para o cálculo, pois segundo a Norma API 650, 2020, o menor valor de densidade para cálculo de espessuras de costado é 1 (um). Por isso, mesmo a densidade do biodiesel sendo 0,90, será adotado o valor de 1. Para esse projeto também foi considerado um valor de zero para sobre espessura de corrosão (CA) e uma eficiência de solda de 0,7

5.2.2.1 Dimensionamento 1º anel do costado do tanque

Para o dimensionamento da espessura do 1º anel do costado do equipamento foi utilizado a equação 17, na qual foi utilizado o diâmetro do equipamento, a altura do equipamento, densidade determinada do produto a ser armazenado, como no caso do biodiesel ser inferior ao mínimo determinado pela norma de 1, será utilizado o valor mínimo. Também é considerado para o cálculo a eficiência de solda e sobre espessura de corrosão.

$$t_{n1} = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{145 * E_j} + CA$$

$$t_{n1} = \frac{4,9 * 12 * (15 - 0,3) * 1}{145 * 0,7} + 0$$

$$t_{n1} = 8,52 \text{ mm}$$

Com o resultado obtido anteriormente deve ser analisado os valores de chapas comercializados conforme anexo B. Caso o valor não esteja presente na tabela de chapas, deverá ser adotado o valor superior mais próximo ao encontrado. Nesse caso o valor de 8,52 mm não é um valor comercial, sendo adotado o valor de 9,53 mm (3/8") para a espessura do primeiro anel.

5.2.2.2 Dimensionamento 2° anel do costado do tanque

Para o cálculo do segundo anel do tanque deve ser realizado um cálculo preliminar para determinar a nova altura de cálculo, na qual é subtraído a altura total do equipamento da altura já calculada.

$$h_2 = h_{total} - h_{calculada}$$

$$h_2 = 15.000 - 1.500$$

$$h_2 = 13.500 \text{ mm}$$

Com a nova altura definida o próximo passo é a aplicação dos valores na Equação 17.

$$t_{n2} = \frac{4,9 * 12 * (13,5 - 0,3) * 1}{145 * 0,7} + 0$$

$$t_{n2} = 7,56 \text{ mm}$$

$$t_{n2 \text{ comercial}} = 7,94 \text{ mm (5/16")}$$

5.2.2.3 Dimensionamento 3° anel do costado do tanque

$$h_3 = h_{total} - h_{calculada}$$

$$h_3 = 12.000 \text{ mm}$$

$$t_{n3} = \frac{4,9*12*(12-0,3)*1}{145*0,7} + 0$$

$$t_{n3} = 6,78 \text{ mm}$$

$$t_{n3} \text{ comercial} = 7,94 \text{ mm (5/16")}$$

5.2.2.4 Dimensionamento 4° anel do costado do tanque

$$h_4 = h_{total} - h_{calculada}$$

$$h_4 = 10.500 \text{ mm}$$

$$t_{n4} = \frac{4,9*12*(10,5-0,3)*1}{145*0,7} + 0$$

$$t_{n4} = 5,91 \text{ mm}$$

$$t_{n4} \text{ comercial} = 6,35 \text{ mm (1/4")}$$

5.2.2.5 Dimensionamento 5° anel do costado do tanque

$$h_5 = h_{total} - h_{calculada}$$

$$h_5 = 9.000 \text{ mm}$$

$$t_{n5} = \frac{4,9*12*(9-0,3)*1}{145*0,7} + 0$$

$$t_{n5} = 5,04 \text{ mm}$$

$$t_{n5} \text{ comercial} = 6,35 \text{ mm (1/4")}$$

5.2.2.6 Dimensionamento 6° anel do costado do tanque

$$h_6 = h_{total} - h_{calculada}$$

$$h_6 = 7.500 \text{ mm}$$

$$t_{n6} = \frac{4,9 \cdot 12 \cdot (7,5 - 0,3) \cdot 1}{145 \cdot 0,7} + 0$$

$$t_{n6} = 4,17 \text{ mm}$$

Outro ponto importante que deve ser seguido da Norma API 650 é a espessura mínima de chapas do costado de 4,76 mm, ou seja, qualquer cálculo que apresentar uma espessura inferior a mínima permitida deverá ser alterada para 4,76 mm. Como no sexto anel já foi constatado a espessura de chapa inferior a mínima determinada, todos os anéis seguintes terão o valor de 4,76 mm.

Com todos os anéis dimensionados é possível calcular o peso total do costado do tanque, obtendo o valor de 30.247 quilos.

5.3 Dimensionamento do fundo

Como o tanque terá fundo plano e será instalado sobre uma base civil, o dimensionamento da espessura da chapa anular deverá seguir o valor determinado pela Tabela 3. Desta forma, para as dimensões adotadas do tanque, a espessura para as chapas do fundo deverá ser de 6,3 mm (1/4").

5.3.1 Verificação da necessidade de chumbador

Cálculo do M_{pi} , considerando uma pressão interna de 509,8581 Kgf/m²:

$$M_{pi} = P_{int} \times \left(\frac{\pi \times D^3}{8} \right)$$

$$M_{pi} = 509,8581 \times \pi \times 14$$

$$M_{pi} = 345976,0591 \text{ kgf.m}$$

Cálculo do M_w e M_{ws} :

$$M_w = M_{ws} = P_{ws} \times \left(\frac{D \times H^2}{2} \right)$$

$$M_w = M_{ws} = 378,21 \times \left(\frac{12 \times 15^2}{2} \right)$$

$$M_w = M_{ws} = 510582,71 \text{ N.m}$$

Cálculo do Mdl:

$$M_{dl} = P_{cost} \times r$$

$$M_{dl} = 30247,3 \times 6$$

$$M_{dl} = 181483,8 \text{ kgf.m}$$

Cálculo do Mf:

$$M_f = G \times V \times r$$

$$M_f = 1 \times (\pi \times 6^2 \times 15) \times 6$$

$$M_f = 10178,7602 \text{ kgf.m}$$

Cálculo do Mdlr:

$$M_{dlr} = P_{teto} \times r$$

$$M_{dlr} = 5184,50 \times 6$$

$$M_{dlr} = 4667835$$

Em seguida deve ser realizado a verificação das condições para ancoragem.

Condição 1:

$$0,6M_w + M_{pi} < \frac{M_{dl}}{1,5} + M_{dlr}$$

$$0,6(52510) + 345981,3 < \frac{181483,8}{1,5} + 31107$$

$$377265,3 < 152096,2, \text{ assim não sendo uma verdade a relação exibida}$$

Condição 2:

$$M_w + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{dl} + M_f}{2} + M_{dlr}$$

$$52510 + 0,4(345981,3) < \frac{181483,8+4667835}{2} + 31107$$

190532,5 < 2455767, nessa condição a relação se faz verdadeira.

Condição 3:

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) < \frac{M_{dl}}{1,5} + M_{dtr}$$

$$52510 + 0,4(345981,3) < \frac{181483,8}{1,5} + 31107$$

1905325,5 < 152096,2 nessa condição não se faz verdadeira a relação.

Como foi constatado que 2 relações não são verdadeiras, se faz necessário a utilização de chumbadores para uma melhor fixação do tanque de armazenamento no solo.

Cálculo da quantidade de chumbadores, onde D é o diâmetro do tanque:

$$N^\circ \text{ Chumbadores} = D \times \frac{\pi}{3}$$

$$N^\circ \text{ Chumbadores} = 12 \times \frac{\pi}{3}$$

$$N^\circ \text{ Chumbadores} = 13 \text{ unidades}$$

Força de Tração nos Chumbadores:

$$F_{ch} = \left(4 \times \frac{M_w}{d \times N} \right) - \left(\frac{W}{N} \right)$$

$$F_{ch} = \left(4 \times \frac{181.483,8}{12.1 \times 18} \right) - \left(\frac{42.424}{18} \right)$$

$$F_{ch} = 2642,66 \text{ kgf}$$

Área do Chumbador:

$$\emptyset \text{ chumbador} = \left(\frac{F_{ch}}{\frac{S_{adm}}{2}} \right)$$

$$\emptyset \text{ chumbador} = \left(\frac{2642,66}{\frac{250 \times 10^6}{2}} \right)$$

$$\emptyset \text{ chumbador comercial} = 25,4 \text{ mm (1")}$$

Com isso fica determinado a utilização de 18 chumbadores com um diâmetro de 25,4 mm que devem ser distribuídos uniformemente no costado do tanque de armazenamento.

5.4 Dimensionamento do teto

Para esse estudo foi considerado um teto fixo cônico suportado, o qual terá uma inclinação de 20°.

5.4.1 Cargas Atuantes

$$Q_1 = D_L + L_T + F_{pe} P_e$$

$$Q_1 = 500 + 120 + (0,4 \times 0,25)$$

$$Q_1 = 620,1 \text{ kgf/m}^2$$

$$Q_2 = D_L + 0,4L_T + P_e$$

$$Q_2 = 500 + 0,4 * 120 + 0,25$$

$$Q_2 = 548,25 \text{ kgf/m}^2$$

$$Q = \text{máximo}(Q_1; Q_2)$$

$$Q = 620,1 \text{ kgf/m}^2 \rightarrow 6,201 \text{ KPa}$$

5.4.1.1 Espessura da chapa do Teto

A espessura do teto de um tanque API 650 pode ser calculada usando a equação estabelecida pela norma.

$$e = \left[\frac{D}{(4,8 * \text{sen}(\theta))} - \left(\sqrt{\frac{Q}{2,2}} \right) \right]$$

$$e = \left[\frac{12}{(4,8 * \text{sen}(20))} - \left(\sqrt{\frac{6,201}{2,2}} \right) \right]$$

$$e = 5,63 \text{ mm}$$

$$e \text{ comercial} = 6,35 \text{ mm (1/4")}$$

Desse modo fica estipulado a utilização das chapas com espessura de 6,35mm. Como a espessura determinada ficou inferior a 12,23 mm não se faz necessário a utilização de uma estrutura para suporte. O teto do equipamento terá um peso total de 5.184,50 quilos.

5.4.1.1.1 Cálculo para pequenas pressões segundo a Norma API 650, 2020.

O biodiesel produz a inertização, desse modo se faz necessário o cálculo para pequenas pressões, a qual será dimensionado a viga para união entre costado e o teto. Foi determinado a utilização de uma viga U 3/8" x 160 x 100 (mm), tendo uma área de 3059 mm², pois dos perfis comerciais a viga U é a que apresenta uma maior área de contato e boa resistência, a qual ajudara a manter o formato original do tanque. O cálculo da área de compressão necessária na junção do teto com o costado, onde Fy é o menor limite de escoamento do material proposto, sendo de 160 Mpa.

$$A = \frac{200 \times D^2 \times \left(Pi - \frac{0,00127 P_{teto}}{D^2} \right)}{F_y \times \tan \theta}$$

$$A = \frac{200 \times 12^2 \times \left(5 - \frac{0,00127 \times 5184,50}{12^2} \right)}{160 \times \tan (20)}$$

$$A = 2254,65 \text{ mm}^2$$

Cálculo para viga:

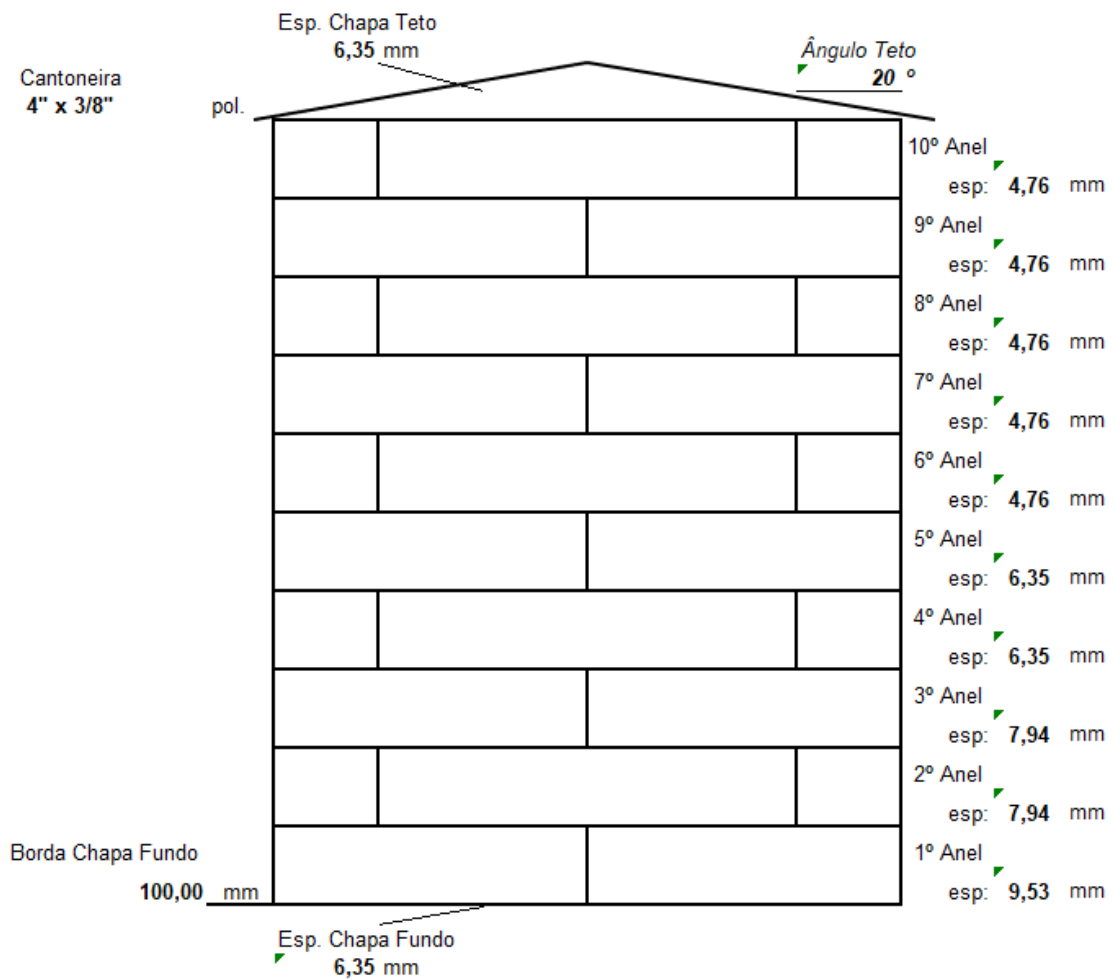
$$P = \frac{A \times F_y \times \tan \theta}{200 \times D^2} + \frac{0,00127 \times D \times r}{D^2}$$

$$P = \frac{3059 \times 160 \times \tan (20)}{200 \times 12000^2} + \frac{0,00127 \times 50000}{12000^2}$$

$$P = 6168,9 \text{ mm}^2$$

Assim fica comprovado que a viga “U” de 3/8” x 160 x 100 (mm) é suficiente para suportar a pressão produzida pelo biodiesel. Desta forma as espessuras ficaram definidas conforme informado na Figura 18.

Figura 18 – Demonstrativo das espessuras por segmento do tanque



Fonte: O autor

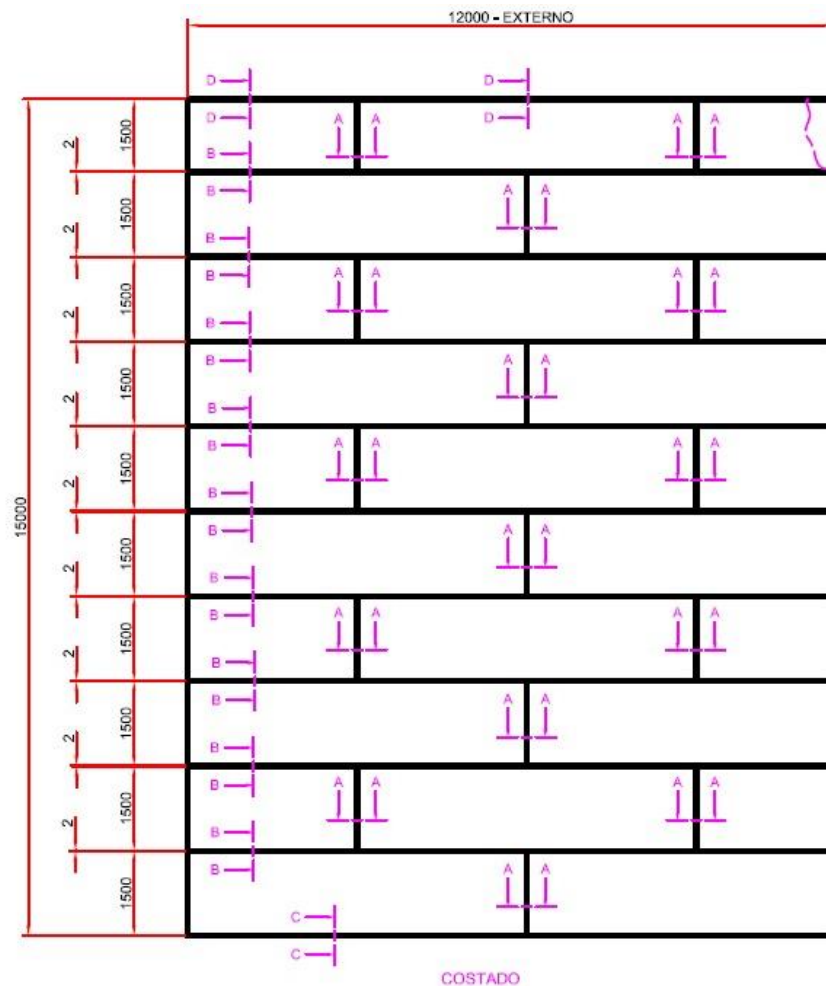
Com as espessuras determinadas foi realizado o projeto detalhado para fabricação do equipamento, buscando transmitir todos os detalhes principais para a compreensão da equipe de montagem. No detalhamento serão informados os espaçamentos necessários entre chapas para a montagem e soldas.

5.5 Projeto detalhado do costado do tanque

No projeto detalhado do costado do tanque alguns pontos devem ser considerados para que seja possível a compreensão dos detalhes para a construção do mesmo.

A Figura 19 demonstra o detalhamento da construção do costado, contemplando as dimensões principais, dimensões das chapas e espaçamentos entre as uniões de anéis. Também é indicado os tipos de soldas a serem realizados.

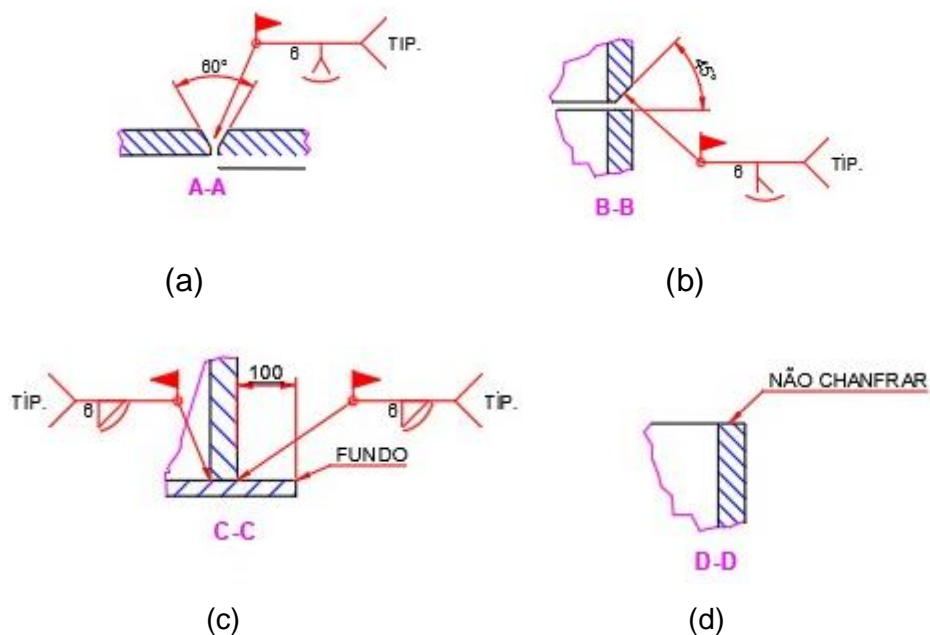
Figura 19 – Detalhamento do Costado



Fonte: O autor

Outro detalhe importante do costado é a especificação das soldas a serem realizadas, desta forma a figura 20 contempla os detalhes de solda para cada setor do tanque. Onde na figura (a) representa a solda específica para a união de chapas verticais no costado a qual é indicado a abertura de um chanfro de 30° por chapa e realizar solda contínua de topo em V convexa, sendo realizada por dentro do tanque e utilizar o *backing* cerâmico por fora, na figura (b) representa a solda específica para união de chapas horizontais no costado a qual é indicado a abertura de um chanfro de 45° na chapa superior e realizar a solda contínua de topo em Meio V convexa, na figura (c) representa a solda específica para a união da chapa do costado com a chapa do fundo onde não se faz necessário a realização de chanfro, sendo indicado a realização da solda em perna convexa por dentro e por fora do tanque e na figura (d) representa a última chapa do costado a qual não se faz necessário o chanfro e a solda será realizada com a viga de reforço.

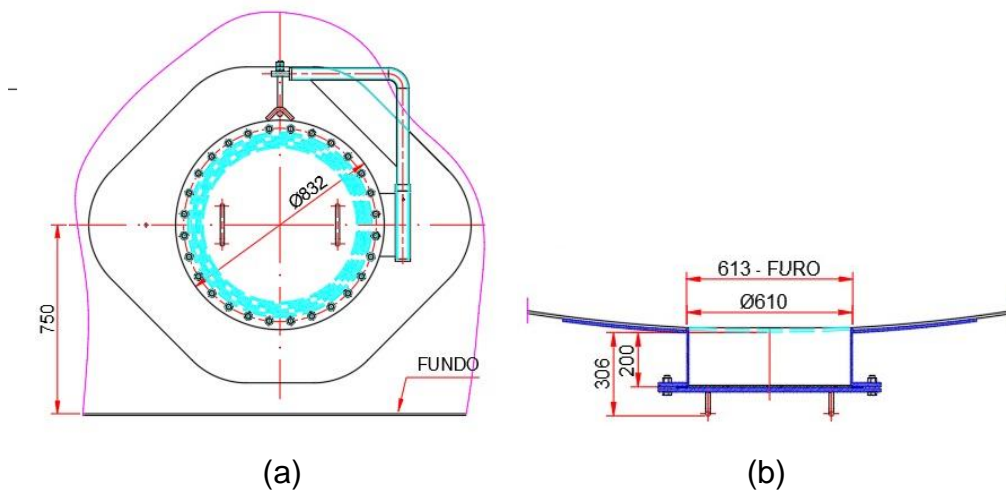
Figura 20 - Detalhamento de chanfro, em (a) é indicado o chanfro e solda da união vertical das chapas, em (b) é indicado o chanfro e solda da união horizontal das chapas, em (c) é indicado a solda de união do costado com o fundo e em (d) é indicado a união do costado com o teto



Fonte: O autor

No projeto do costado também deve ser detalhado a porta de inspeção requerida pela Norma API 650. Nesse caso foi utilizado uma porta de inspeção com 24” de diâmetro conforme indicado pela norma, onde é detalhada na Figura 21. A norma requer a utilização de uma chapa para reforço do bocal aberto, o mesmo deve apresentar a mesma espessura da chapa do costado do ponto aonde a mesma foi instalada. Nesse caso será utilizado uma chapa de 9,53 mm para a confecção do reforço, sendo a mesma espessura da chapa do anel aonde a porta de inspeção será instalada. A quantidade é determinada pela quantidade padrão de parafusos para flanges.

Figura 21 – Detalhamento porta de inspeção no costado, na figura (a) a vista frontal e na figura (b) a vista superior.



Fonte: O autor

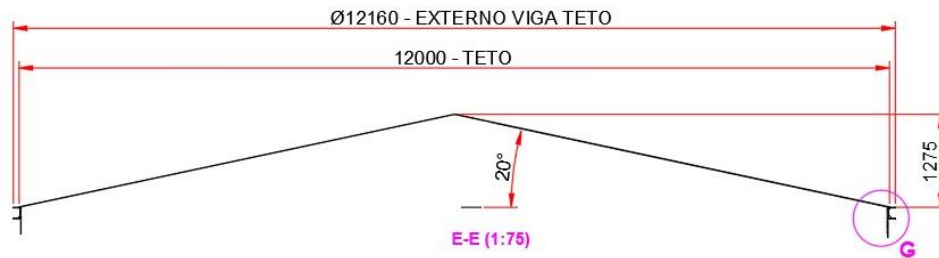
5.6 Projeto detalhado do teto

O projeto do teto do tanque deve contemplar as seguintes informações: ângulo de construção, diâmetro externo, altura do mesmo e detalhe das uniões a serem realizadas.

A Figura 22 mostra as medidas principais do teto para o melhor entendimento da equipe responsável pela montagem, onde será evidenciado o diâmetro do teto,

diâmetro externo considerando a viga de união teto com o costado, altura que o teto terá e a angulação que o teto deve ser fabricado.

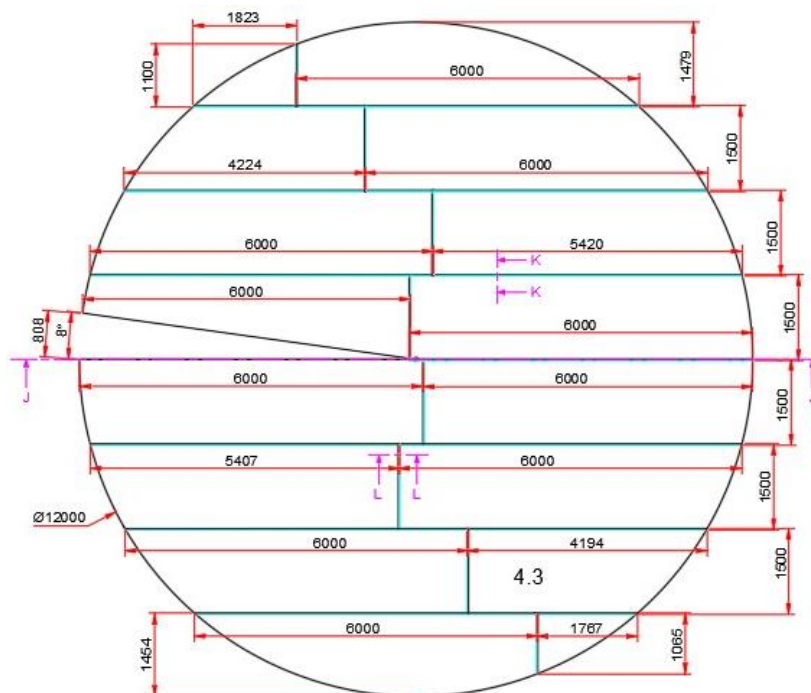
Figura 22 – Detalhamento do teto



Fonte: O autor

Outro detalhe importante é as medidas das chapas que serão utilizadas na montagem do teto, como também deve ser indicado o recorte necessário para a conformação do cone.

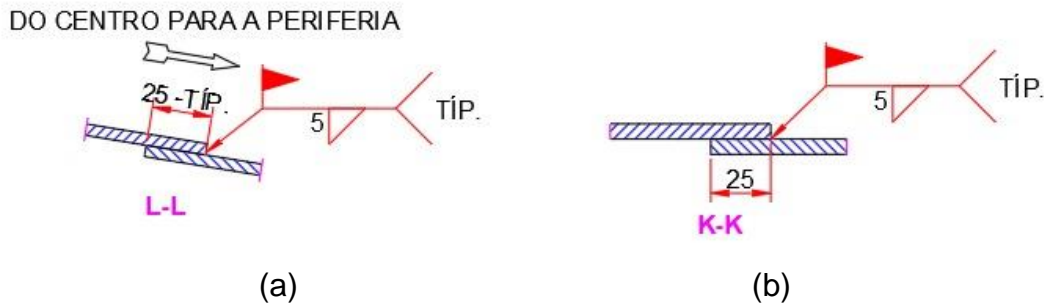
Figura 23 – Planificação das chapas do teto



Fonte: O autor

Na Figura 24 será detalhado as indicações das uniões das chapas apresentadas na Figura 23.

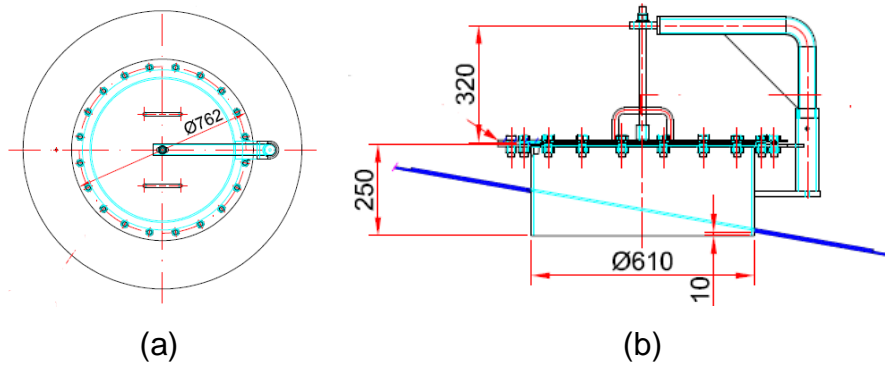
Figura 24– Detalhe das uniões das chapas do teto, em (a) é indicado as uniões verticais das chapas e em (b) é indicado as uniões das chapas horizontais.



Fonte: O autor

Do mesmo modo que se fez necessário o detalhamento de uma porta de inspeção para o costado, deve ser realizado o mesmo para o teto, onde também foi utilizado uma porta de inspeção de 24" conforme detalhado na Figura 25. Os parafusos utilizados para a união do flange cego da porta de inspeção são determinados pela Norma API 650, o qual considera o tamanho do flange para determinar as dimensões, para esse caso serão utilizados os parafusos sextavados ANSI B18.2.2 GE G2 UNC 5/8" X 2" e Porca sextavada ANSI B18.2.2 GE G2 UNC 5/8", aonde ambos são fabricados de aço carbono galvanizados o que permitirá uma maior resistência a corrosão e assim prolongando a vida útil e funcionamento do equipamento. A quantidade é determinada pela quantidade padrão de parafusos para flanges.

Figura 25 – Detalhamento da porta de inspeção no teto, na figura (a) a vista superior e na figura (b) a vista lateral

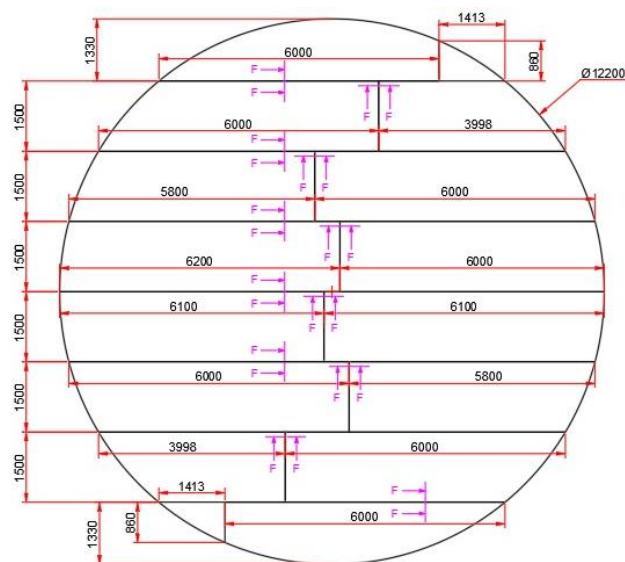


Fonte: O autor

5.7 Projeto detalhado do fundo

No projeto do fundo deve ser estabelecido as dimensões das chapas a serem utilizadas, bem como a própria dimensão do fundo.

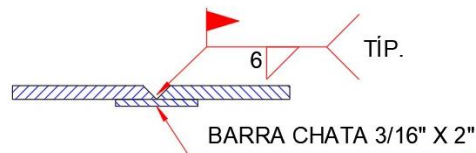
Figura 26 – Detalhamento das chapas do fundo



Fonte: O autor

Também deve ser demonstrado o detalhe para as uniões entre as chapas do fundo do tanque.

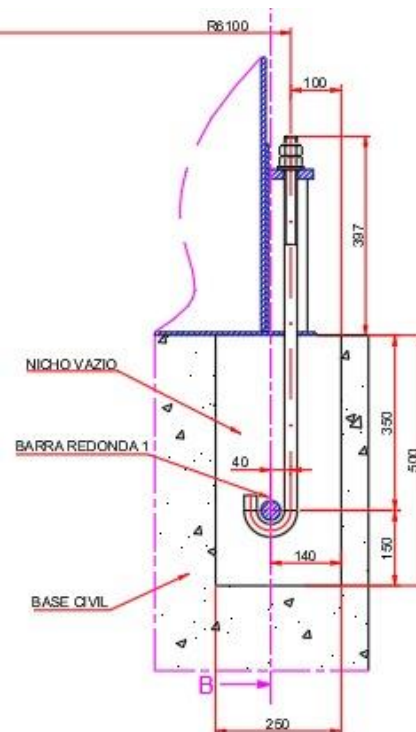
Figura 27 – Detalhe da união entre chapas do fundo do tanque



Fonte: O autor

Como comprovado a necessidade da utilização de chumbadores para fixação do tanque conforme apresentado no item 5.3.1, também deve ser detalhado como serão instalados os mesmos, indicando sua profundidade e espaçamento do tanque.

Figura 28 – Detalhamento instalação do chumbador

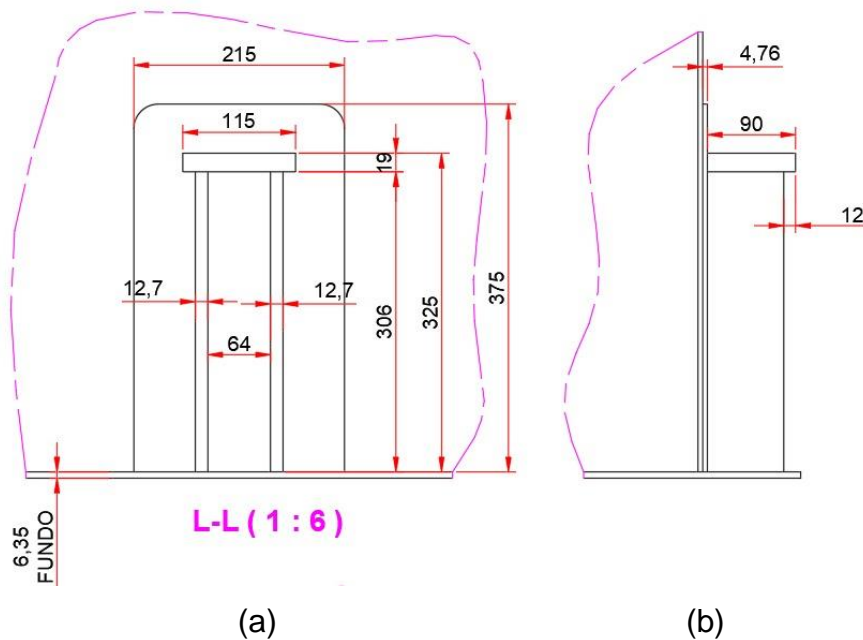


Fonte: O autor

Outro detalhamento para a instalação dos chumbadores é o espaço que deve ser deixado na fabricação da base civil, o nicho vazio informado na Figura 28 é deixado aberto para a instalação do chumbador e em seguida o mesmo é concretado, desta maneira fazendo a fixação completa do tanque no solo.

Também deve ser previsto a fabricação das “casinhas” para os chumbadores, a qual fará a união do chumbador com o costado do equipamento. As mesmas são compostas por uma chapa que será soldada no costado do tanque, essa terá a mesma espessura do primeiro anel do costado, já para as chapas laterais, será utilizado chapas com 12,7 mm de espessura e a chapa superior, que é o local aonde será fixado o chumbador tem a espessura de 19 mm. Todas as chapas deverão ser soldadas entre si e com o costado e fundo do equipamento

Figura 29 – Detalhamento das casinhas de união do costado com os chumbadores, na figura (a) apresenta a vista frontal e na figura (b) apresenta a vista lateral



Fonte: O autor

6 CONCLUSÃO

O presente projeto apresentou o dimensionamento de um tanque para armazenamento de biodiesel conforme recomendações da Norma API 650.

Foi realizado uma análise aprofundada da norma para compreender quais os parâmetros utilizados para o dimensionamento e análise de materiais para a fabricação dos tanques. Com esse estudo realizado a respeito da norma foi possível evidenciar o seu valor perante o dimensionamento de tanques para armazenamento e perante as normativas brasileiras, que são derivações da própria API 650.

Também foram realizados os cálculos para determinar as espessuras necessárias para que o tanque suporte a pressão interna produzida pelo líquido armazenado. Além disso, foi verificada a necessidade de ancoragem, a análise para pequenas pressões e, posteriormente, os desenhos detalhados para a montagem do equipamento

Portanto, os resultados do trabalho a relevância da Norma API 650 para o projeto e fabricação de tanques de armazenamento atmosféricos. As normas são essenciais para a padronização e segurança construtivos dos equipamentos, fazendo desse trabalho um guia para cálculo das principais estruturas do tanque de armazenamento atmosféricos seguindo a Norma API 650.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere o dimensionamento do tanque contemplado os componentes secundários, como, por exemplo, escadas, guarda-corpo, bocais e ponto de drenagem. Também pode ser analisada a corrosão devido a operação presente no equipamento e quais pontos estão mais propensos a corrosão.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2021. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2021**.

Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-deconteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Welded tanks for oil storage**. 12 ed. Washington: American Petroleum Institute, março 2020. Adendo API STD 650.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7821: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados**. Rio de Janeiro. 1983

ASTM G1-03. **Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

BARROS, S. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro: Universidade PETROBRAS, 2017.

BROWNELL, L.E., YOUNG, E.H. **Process equipment design: vessel design**. New York: J. Wiley, 1959.

EMROD ENGENHARIA LTDA. **Clientes**. Disponível em: <https://emrod.com.br/2013/portfolio-item/tanque-teto-flutuante/>. Acesso em: 01 mai 2023.

FAY ENGENHARIA INDUSTRIAL APLICADA. **Arquivo de projetos Fay Engenharia Industrial Aplicada, 2015**. Erechim, 2023.

KUMAR, A., & SHARMA, S. (2021). Recent advancements in biodiesel production Technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 227, p. 107-120, mar. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356760257_Recent_development_of_advanced_processing_technologies_for_biodiesel_production_A_critical_review. Acesso em: 01 mai. 2023.

ROSSINI, M. 2013. **Serbatoi cilindrici in acciaio saldato com pareti di spessore variabile**. Tese di Laurea, Politecnico di Milano. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329179277_Serbatoi_Cilindrici_in_Acciaio_Saldato_con_Pareti_di_Spessore_Variabile_Analisi_Strutturale_e_Normativa. Acesso em: 20 mar. 2023.

SANTINI, João Bosco. Glossário de tanques de armazenamento conforme Norma API 650. **Petroblog**. 26, Janeiro. 2021. Disponível em: <<https://www.petroblog.com.br/?p=2675>>. Acesso em: 01 de mai. 2023

SHREIR, L. L. **Corrosion**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2010.

ANEXO A – Propriedades do aço ASTM A-36

Aço ASTM A36, chapa			
Categorias:	Metal; Metais Ferrosos; Aço ASTM; Aço Carbono; Aço de baixo carbono		
Observação do material:	Aço para fins estruturais em geral, incluindo pontes e edifícios. Teor mínimo de Cobre quando o aço de cobre é especificado Ensaio realizado no sentido transversal para placas com largura superior a 590 mm.		
Palavras-chave	UNS K02600		
Fornecedores:	Nenhum fornecedor está listado para este material.		
Propriedades físicas	Métrica	Inglês	Comentários
Densidade	7,80 g/cc	0,282 lb/in ³	Típico de aço ASTM
Propriedades mecânicas	Métrica	Inglês	Comentários
Resistência à Tração Máxima	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi	-
Resistência à Tração, Rendimento	250 MPa	36300 psi	-
Alongamento na ruptura	20%	20%	em 200 mm
	23%	23%	em 50 mm
Módulos de elasticidade	200 Gpa	29000 ksi	-
Módulos de massa	160 Gpa	23200 ksi	Típico para aço
Razão de Poisson	0,26	0,26	-
Módulo de Cisalhamento	79,3 Gpa	11500 ksi	-
Propriedades dos Elementos Componentes	Métrica	Inglês	Comentários
Carbono, C	0,25 - 0,29%	0,25 - 0,29%	-
Cobre, Cu	0,20%	0,20%	-
Ferro, Fe	98%	98%	-
Manganês, Mn	1,03%	1,03%	-
Fósforo, P	<=0,040%	<=0,040%	-
Silício, Si	0,28%	0,28%	-
Enxofre, S	<=0,050%	<=0,050%	-

Fonte: MATWEB, Adaptado

ANEXO B – Tabela de espessuras de chapas comerciais



Telefone: (11) 2832-4800

Home A Empresa Localização Contato
Produtos Serviços Atuação Tabelas

Chapa Fina Frio

BITOLA - GSC	ESPESSURA (mm)	PESO Kg/m ²
30	0,30	2,40
28	0,38	3,04
26	0,45	3,60
24	0,60	4,80
22	0,75	6,00
20	0,90	7,20
19	1,06	8,48
18	1,20	9,60
16	1,50	12,00
14	1,90	15,20
13	2,25	18,00
12	2,65	21,20

Chapa Grossa

ESPESSURA			PESO			ESPESSURA			PESO		
Pol.	mm	kg/m ²	Pol.	mm	kg/m ²	Pol.	mm	kg/m ²	Pol.	mm	kg/m ²
7/32	5,56	43.572	2.1/8	53,97	423,23	2.1/4	57,15	448,17	2.3/8	60,32	473,03
1/4	6,35	49.797	2.1/2	63,50	497,97	2.5/8	66,67	522,83	2.3/4	69,85	547,76
9/32	7,14	56.021	2.7/8	73,02	572,62	3	76,20	597,56	3.1/4	82,55	647,36
5/16	7,94	62.246	3	76,20	597,56	3.1/2	88,90	697,15	3.3/4	95,25	746,95
11/32	8,73	68.470	3.1/4	82,55	647,36	4	101,60	796,75	4.1/2	114,30	896,34
3/8	9,53	74.695	3.1/2	88,90	697,15	5	127,00	995,93	5	127,00	995,93
7/16	11,11	87.144	3.3/4	95,25	746,95	6	152,40	1195,12	5.1/2	139,70	1095,53
1/2	12,7	99.593	4	101,60	796,75	7	177,80	1394,31	6	152,40	1195,12
9/16	14,29	112.043	4.1/2	114,30	896,34	7.1/2	190,50	1493,90	6.1/2	165,10	1294,71
5/8	15,88	124.492	5	127,00	995,93	8	203,20	1593,49	7	177,80	1394,31
11/16	17,46	136.941	6	152,40	1195,12	9	228,60	1792,68	7.1/2	190,50	1493,90
3/4	19,05	149.390	7	177,80	1394,31	10	254,00	1991,87	8	203,20	1593,49
13/16	20,64	161.839	8	203,20	1593,49	11	249,40	2191,05	9	228,60	1792,68
7/8	22,23	174.288	9	228,60	1792,68	12	304,80	2390,24	10	254,00	1991,87
15/16	23,81	186.738	10	254,00	1991,87				11	249,40	2191,05
1	25,4	199.187	11	249,40	2191,05				12	304,80	2390,24
1.1/8	28,58	224.085	12	304,80	2390,24						
1.1/4	31,75	248.984									
1.3/8	34,93	273.882									
1.1/2	38,1	298.78									
1.5/8	41,28	323.679									
1.3/4	44,45	348.577									
1.7/8	47,63	373.475									
2	50,8	398.373									

Chapa Fina Quente

BITOLA - GSC	ESPESSURA (mm)	PESO Kg/m ²
18	1,20	9,60
16	1,50	12,00
14	2,00	16,00
13	2,25	18,00
12	2,65	21,20
11	3,00	24,00
10	3,35	26,30
9	3,75	30,00
8	4,25	34,00
7	4,50	36,00
3/16"	4,75	38,00
-	5,00	40,00

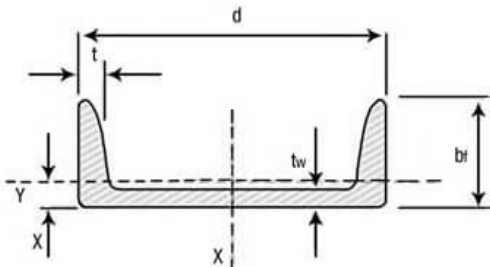
Chapa de Piso

ESPESSURA		PESO Kg/m ²
POL.	MM	-
1/8"	3,00	26,40
3/16"	4,75	41,80
1/4"	6,30	54,33
5/16"	8,00	68,99
3/8"	9,50	81,92

Fonte: Fabrifera

ANEXO C – Tabela de espessuras de vigas comerciais

Viga “U”

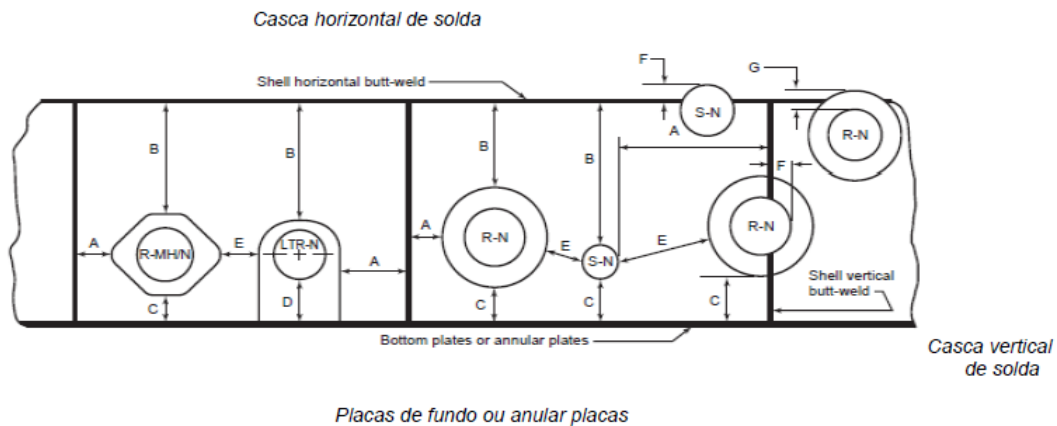


Bitola	Peso Nominal	Alma		Aba		Área	Eixo X			Eixo Y			x
		h	tw	bf	tf		J	W	r	J	W	r	
Pol	Kg/m	mm	mm	mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm
3ª	6.11	76.20	4.32	35.81	6.93	7.78	68.90	18.10	2.98	8.20	3.32	1.03	1.11
	7.44		6.55	38.05	6.93	9.48	77.20	20.30	2.85	10.30	3.82	1.04	1.11
	7.95		4.57	40.23	7.52	10.10	159.50	31.40	3.97	13.10	4.61	1.14	1.16
4ª	9.30	101.60	6.27	41.83	7.52	11.90	174.40	34.30	3.84	15.50	5.10	1.14	1.15
	12.20		5.08	48.77	8.71	15.50	546.00	71.70	5.94	28.80	8.16	1.36	1.30
6ª	15.60	152.40	7.98	51.66	8.71	19.90	632.00	82.90	5.63	36.00	9.24	1.34	1.27
	17.20		5.59	57.40	9.50	21.68	1344.30	132.70	7.87	54.10	12.94	1.42	1.47
	20.50		7.70	59.51	9.50	25.93	1490.00	147.50	7.59	62.40	14.09	1.42	1.42
8ª	22.77	203.20	6.10	66.04	11.10	29.00	2800.00	221.00	9.84	95.00	19.00	1.81	1.61
	29.76		9.63	69.57	11.10	37.90	3290.00	259.00	9.31	117.00	21.60	1.76	1.54

Braganfer
O Shopping Center do Aço

Fonte: BraganFer

ANEXO D – Detalhamento de reforço para porta de inspeção



Nota:

R-MH/N = Abertura Reforçada bueiro (ou bico com forma de diamante reforço da placa, ver figuras 5-7A e 5-8).
LTR-N = baixo-Tipo Abertura Reforçada (bueiro ou bocal com a forma de reforçar a lâpide da placa, veja a Figura 5-8, detalhe A e B).

RN = Abertura Reforçada (bueiro ou bocal circular com placa de reforço ou placa inserir engrossado, ver Figura 5-8).
SN = não-abertura reforçada (bueiro ou bocal inserido no escudo por detalhe o pescoço suplente da Figura 5-7B)

Variables Variáveis	Reference Referência	Minimum Dimension Between Weld Toes or Weld Centerline (1)(3) Mínima dimensão entre dedos de solda ou de centro de Solda (1) (3)							
		Paragraph Number Parágrafo número	A (2)	B (2)	C (2)	D (4)	E (2)	F (5)	G (5)
Shell t Casca t	Condition Condição								
$t \leq 12.5 \text{ mm}$ ($t \leq 1/2 \text{ in.}$)	As welded or PWHT Como soldados ou PWHT	5.7.3.2 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	150 mm (6 in.) (pol)	75 mm (3in.) ou $2^{1/2}t$	75 mm (3 in.) ou $2^{1/2}t$ 75 mm (3 in.) para S-N	Table 5-6 Tabela 5-6	75 mm (3 in.) (pol.) ou $2^{1/2}t$	$8t$ ou $1/2 r$	$8t$
$t > 12.5 \text{ mm}$ ($t > 1/2 \text{ in.}$)	As Welded Como soldado	5.7.3.1.a 5.7.3.1.b 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	$8W$ or 250mm (10 in.) (pol.)	$8W$ or 250 mm (10 in.) (pol.)	$8W$ or 250 mm (10 in.) 75 mm (3 in.) para S-N	Table 5-6 Tabela 5-6	$8W$ ou 150 mm (6 in.) (pol.)	$8t$ ou $1/2 r$	$8t$
$t > 12.5 \text{ mm}$ ($t > 1/2 \text{ in.}$)	PWHT	5.7.3.2 5.7.3.3 5.7.3.3 5.7.3.3 • 5.7.3.4 • 5.7.3.4	150 mm (6 in.) (pol.)	75 mm (3 in.) Ou $2^{1/2}t$	75 mm (3 in.) or $2^{1/2}t$ 75 mm (3 in.) Para S-N	Table 5-6 Tabela 5-6	75 mm (3 in.) (pol.) Ou $2^{1/2}t$	$8t$ or $1/2 r$	$8t$

1f. Se os dois requisitos são dados, o espaçamento mínimo é o maior valor, exceto para a dimensão "F." Ver nota 5.

2. t = espessura da casca. $8W$ = 8 vezes o maior tamanho de solda para reforçar a chapa ou inserir solda periferia prato (filé ou rabo de solda) do dedo do pé da periferia de solda para a linha central da casca soldada.

3. Para as sistemas destinadas ao apêndice A, ver A.5.2. Espaçamento = $2^{1/2} t$ -dedo do pé ao dedo do pé de soldas adjacentes.

4. D = distância de espaçamento estabelecido pela elevação do mínimo para baixo tipo reforçado aberturas da Tabela 5-6, coluna 9.

5. Comprador opção para permitir aberturas de casca a ser localizada na butt casca horizontal ou solda vertical. Veja a Figura 5-9.

t = espessura da casca, r = raio de abertura. Espaçamento mínimo para a dimensão F é o menor de $8t$ ou $1/2 r$.

Fonte: Norma API 650, 2020.