



PROJETO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO API 650

ESTUDO DE CASO: DIESEL S500

João Rafael Lima Amaral

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Fabio da Costa Figueiredo, D.Sc.

Rio de Janeiro

Julho de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



Departamento de Engenharia Mecânica



DEM/POLI/UFRJ

PROJETO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO API 650

ESTUDO DE CASO: DIESEL S500

João Rafael Lima Amaral

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Fábio da Costa Figueiredo, D. Sc (Orientador)

Prof. Fernando Pereira Duda, D. Sc.

Prof. Sylvio José Ribeiro de Oliveira, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2021

Amaral, João Rafael Lima

Projeto de Tanque de Armazenamento API 650, Estudo de Caso: Diesel S500 / João Rafael Lima Amaral. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2021.

XIV, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fabio da Costa Figueiredo

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 56.

1. Palavras-chave: Tanques de Armazenamento, API 650, Projeto Mecânico, Método dos Elementos Finitos.

I. Fabio Da Costa Figueiredo; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Projeto e Análise de Tensões Devido à Corrosão em um Tanque de Armazenamento API 650 para o Diesel S500,

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre me apoiaram incondicionalmente durante minha trajetória na vida e me ensinaram o valor do trabalho.

Aos meus amigos Rubem Carvalho, João Pedro Pintado e Lucas Pretti por terem tornado minha jornada na graduação mais agradável, assim como os que fiz durante minha participação na Icarus UFRJ Formula SAE. Levarei vocês para a vida toda.

Agradeço também a toda a equipe da UFRJ que contribuiu para minha formação. Encontrar pessoas que se empenham tanto mesmo com todas as dificuldades diárias do ensino público me traz esperança de que dias melhores virão.

Por fim, agradeço ao professor Fábio Figueiredo por aceitar me orientar neste projeto inédito dentro da universidade que foi de enorme contribuição para o meu aprendizado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

PROJETO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO API 650

ESTUDO DE CASO: DIESEL S500

João Rafael Lima Amaral

Julho/2021

Orientador: Fabio da Costa Figueiredo

Curso: Engenharia Mecânica

O presente estudo tem como objetivo inicial projetar um tanque de armazenamento de óleo diesel S500 sob o ponto de vista mecânico seguindo as recomendações de API 650 – “*Welded Tanks for Oil Storage*”. Para isso, foram estabelecidas condições de projeto bem definidas a fim de tornar possível o dimensionamento dos componentes do tanque, assim como os desenhos necessários. Após realização do projeto, a integridade estrutural do tanque será verificada utilizando o Método dos Elementos Finitos, tanto na condição novo quanto na condição corroído e serão verificadas as influências dos parâmetros geométricos dos defeitos de corrosão no estado de tensões do tanque.

Palavras-chave: Tanques de Armazenamento, API 650, Projeto Mecânico, Método dos Elementos Finitos

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

DESIGN OF OIL STORAGE TANK ACCORDING TO API 650

CASE OF STUDY: S500 DIESEL FUEL

João Rafael Lima Amaral

JULY/2021

Advisor: Fabio da Costa Figueiredo

Course: Mechanical Engineering

This study has as its initial objective to design a storage tank for S500 diesel oil following the mechanical recommendations of API 650 - "*Welded Tanks for Oil Storage*". For this, well defined design conditions were established in order to make possible the dimensioning of the tank components, as well as the necessary drawings. After design completion, the structural integrity of the tank will be verified using the Finite Element Method, both in the new and corroded condition, and the influences of the geometric parameters of the corrosion defects on the stress state of the tank will be verified as well.

Keywords: Oil Storage Tanks, API 650, Mechanical Design, Finite Element Method

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Organização do Trabalho.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Normas aplicáveis.....	4
2.2. Componentes de tanques de armazenamento	5
2.3. Classificação dos tanques de armazenamento	10
2.3.1. Teto fixo	10
2.3.2. Teto móvel.....	11
2.3.3. Teto flutuante	12
2.4. Classificação dos fluidos armazenados	14
3. ESTUDO DE CASO	15
3.1. Dados de processo	15
3.2. Seleção do tipo de tanque de armazenamento	16
3.3. Determinação das dimensões do tanque.....	17
3.4. Seleção de material.....	20
3.5. Corrosão	22
4. PROJETO MECÂNICO	24
4.1. Fundo.....	25
4.1.1. Bocal de drenagem.....	25
4.2. Costado.....	26
4.2.1. Bocais de movimentação de carga	28
4.2.2. Boca de visita	29
4.2.3. Porta de limpeza.....	30

4.3.	Teto.....	31
4.3.1.	Bocais.....	31
4.3.2.	Ligação de baixa resistência mecânica.....	32
4.3.3.	Verificação da necessidade de ancoragem do tanque	35
4.3.4.	Pressões críticas.....	36
5.	ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	38
5.1.	Tanque novo	38
5.2.	Tanque corroído.....	47
5.2.1.	Corrosão uniforme.....	47
5.2.2.	Corrosão local	50
6.	CONCLUSÕES.....	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
8.	ANEXOS.....	59

Lista de Figuras

Figura 1: Base de distribuição de combustível.....	1
Figura 2: Tanque com teto cônico	5
Figura 3: Tanque com teto flutuante.....	5
Figura 4: Trator realizando limpeza dentro de tanque.....	6
Figura 5: Fundação com anel de concreto	7
Figura 6: Medidor de nível tipo radar.....	7
Figura 7: Transmissor de temperatura	8
Figura 8: Respiro aberto do tipo pescoço de ganso (goose neck vent).....	8
Figura 9: Válvula de alívio contra pressão e vácuo.....	9
Figura 10: Tanque com teto fixo cônico.....	10
Figura 11: Tanque com teto em formato de domo	10
Figura 12: Tanque com teto fixo em gomos.....	11
Figura 13: Tanque de teto fixo com diafragma flexível	11
Figura 14: Tanque com teto móvel (Lifting Roof).....	12
Figura 15: Tanque com selo flutuante externo (External Floating Roof Tank)	13
Figura 16: Tanque de teto fixo com selo flutuante interno.....	13
Figura 17: Disposição das chapas do fundo	18
Figura 18: Disposição das chapas do teto.....	18
Figura 19: Flange sobreposto ASME 2” B16.5 150# RF	25
Figura 20: Alinhamento das chapas do costado	26
Figura 21: Flange sobreposto 6” ASME B16.5 150# RF.....	29
Figura 22: Porta de limpeza.....	30
Figura 23: Ruptura da junta entre o fundo e costado.....	32
Figura 24: Ruptura da junta entre o teto e costado (ligação de baixa resistência mecânica)	33

Figura 25: Detalhe construtivo C.....	33
Figura 26: Cantoneiras de abas iguais	34
Figura 27: Momentos atuantes em um tanque de armazenamento.....	35
Figura 28: Modelo 3D do tanque de armazenamento.....	38
Figura 29: Geometria simplificada do tanque	39
Figura 30: Simulação do caso 3: Pontos de máxima tensão de Mises (simulação do tanque inteiro)	39
Figura 31: Teto simplificado para simulação do caso 1	40
Figura 32: Malha utilizada na simulação do caso 1.....	40
Figura 33: Resultados obtidos para o caso 1	41
Figura 34: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 1).....	41
Figura 35: Primeiro anel do costado para simulação.....	42
Figura 36: Carregamentos para simulação dos casos 2 e 3	42
Figura 37: Malha na região da boca de visita (20mm)	43
Figura 38: Malha utilizada para os casos 2 e 3.....	43
Figura 39: Resultados obtidos para o caso 2	44
Figura 40: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 2).....	44
Figura 41: Resultados obtidos para o caso 3	45
Figura 42: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 3).....	45
Figura 43: Tanque de armazenamento com corrosão aparente no costado	48
Figura 44: Resultados obtidos com a simulação do tanque corroído	49
Figura 45: Pontos de máxima tensão de Mises (tanque corroído).....	49
Figura 46: Região analisada, presença de corrosão local	50
Figura 47: Representação da corrosão por placas	51
Figura 48: Pressão hidrostática (tanque em operação)	52
Figura 49: Influência do diâmetro da cratera no gradiente de tensões	52

Figura 50: Influência da profundidade da cratera no gradiente de tensões 53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedade óleo diesel S500	14
Tabela 2: Dados de processo	15
Tabela 3: Recomendações de tipos usuais de tanques.....	16
Tabela 4: Chapas grossas padronizadas	17
Tabela 5: Área das chapas não aproveitada para construção do tanque	18
Tabela 6: Quantidade de chapas necessárias	19
Tabela 7: Materiais permitidos	20
Tabela 8: Materiais permitidos (continuação).....	21
Tabela 9: Taxas anuais de corrosão para o aço-carbono [mm/ano]	23
Tabela 10: Sobre espessuras de corrosão adotadas	23
Tabela 11: Densidades de projeto.....	27
Tabela 12: Cálculo dos anéis do costado.....	28
Tabela 13: Esforços atuantes no tanque	35
Tabela 14: Momentos atuantes no tanque	36
Tabela 15: Resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos	46
Tabela 16: Espessuras mínimas permitidas para o costado (corroído).....	48

Lista de Siglas

Sigla	Definição
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas

Lista de Símbolos

$A_{Cantoneira}$: Área disponível para cantoneira [mm^2];

$A_{Permitida}$: Área permitida para junta frágil entre teto e costado [mm^2];

$A_{Preenchida}$: Área ocupada pelo teto e costado do tanque [mm^2];

β : Fator de conversão (equivale a $\frac{8}{1000\pi}$);

CA : Sobresspessura de corrosão [mm];

D : Diâmetro nominal do tanque [m ou $ft.$];

D_L : Peso dos componentes do tanque [kgf];

D_{LB} : Peso do fundo do tanque [kgf];

D_{LR} : Peso do teto do tanque [kgf];

D_{LS} : Peso do costado do tanque [kgf];

E : Cargas sísmicas [kPa];

F_a : 60% do limite de escoamento do material do tanque [$adm.$];

F_p : Fator de pressão combinada [$adm.$];

F_y : Limite de escoamento na junção teto – costado [MPa];

G : Densidade relativa do fluido armazenado [$adm.$];

H : Nível de fluido [m ou $ft.$];

H_t : Nível de fluido durante teste hidrostático [m];

L_r : Carga viva no teto [$\frac{kgf}{m^2}$];

M_{DL} : Momento causado pelo peso dos componentes do tanque [$kgf.m$];

M_{DLR} : Momento causado pelo peso do teto do tanque [$kgf.m$];

M_f : Momento causado pelo peso do fluido armazenado no tanque [$kgf.m$];

M_{Pi} : Momento causado pela pressão interna do tanque [$kgf.m$];

M_W : Momento causado pela carga de vento no teto [$kgf.m$];

M_{WS} : Momento causado pela carga de vento no costado [$kgf.m$];

P_e : Pressão externa de projeto [kPa];

P_i : Pressão interna de projeto [kPa];

P_{max} : Pressão máxima limitada pela falta de ancoragem do tanque [kPa];

P_f : Pressão de falha da junção entre teto e costado [kPa];

P_t : Pressão de teste hidrostático [kPa];

P_{WR} : Carga de vento no teto [kPa];

P_{WS} : Carga de vento no costado [kPa];

S : Carga de neve [kPa];

S_{corr} : Máxima tensão admissível com o tanque corroído [MPa ou psi];

S_d : Máxima tensão admissível durante operação [MPa];

S_t : Máxima tensão admissível durante teste hidrostático [MPa];

t_d : Espessura mínima de projeto [mm];

t_t : Espessura mínima de teste hidrostático [mm];

$t_{min,anel}$: Esp. mín. adm. para determinado anel do costado (corroído) [mm];

1. INTRODUÇÃO

1.1.Motivação

O segmento de distribuição de combustíveis líquidos automotivos (gasolina, álcool hidratado e óleo diesel) possui empresas que atuam na atividade de comercialização por atacado, abastecendo não apenas a rede varejista de postos revendedores (que contempla aproximadamente 40.000 postos revendedores, [1]) como também consumidores finais e Transportadores-Revendedores-Retalhistas (TRR's) [2].

De modo geral, os produtos são provenientes das refinarias, centrais petroquímicas e dos terminais marítimos nos casos de cabotagem e de importação e, posteriormente, são transportados para bases primárias e secundárias. As bases de distribuição de combustíveis possuem a infraestrutura adequada para o recebimento, armazenamento, mistura e distribuição de combustíveis e biocombustíveis. A distinção entre bases primárias e secundárias se dá no ponto de origem do produto. Caso o fornecimento de combustível foi realizado por uma refinaria ou terminal, a base é classificada como primária. Caso o fornecimento seja realizado por uma base primária, ela é classificada como secundária. Bases primárias localizam-se geralmente em regiões próximas às refinarias e terminais. Já as bases secundárias localizam-se em regiões mais distantes, tendo como função atender a demanda de combustível em regiões que não possuem refinarias próximas.

As bases secundárias são muitas vezes localizadas em regiões urbanas devido às vantagens logísticas que tais regiões oferecem. Logo, devido ao maior custo do terreno ocupado pela base, geralmente elas apresentam bacias de tanques menores quando comparadas às bases primárias e, portanto, tanques com capacidades de armazenamento menores.



Figura 1: Base de distribuição de combustível

Fonte: [3]

1.2.Objetivo

Tanques de armazenamento são equipamentos de caldearia pesada, sujeito à pressão aproximadamente atmosférica e destinados, principalmente, ao armazenamento de petróleo e seus derivados [4]. Diferentemente de diversos equipamentos, os tanques de armazenamento são projetados e construídos sob encomenda para atender determinadas condições de processo e capacidade de armazenamento. É um projeto complexo que exige profissionais competentes das mais diversas áreas da engenharia, como por exemplo civil, mecânica, instrumentação, elétrica e tubulação. Cabe a disciplina de civil o projeto da fundação, dos diques de contenção da bacia de tanques e do sistema de combate a incêndio. À disciplina de mecânica cabe o projeto do fundo, costado, teto e acessórios. O grupo de elétrica é responsável pelo sistema de proteção contra descargas elétricas (SPDA). O grupo de instrumentação é responsável pela seleção dos instrumentos (medidores de nível, temperatura, entre outros) e a disciplina de tubulação a correta ligação do tanque com o restante da planta.

O presente trabalho tem como objetivo projetar um tanque de armazenamento atmosférico sob o ponto de vista mecânico, para estocagem de diesel S500 com base na norma API 650 e, posteriormente, será analisado seu estado de tensões tanto na condição novo quanto na condição corroído através do Método dos Elementos Finitos.

1.3.Organização do Trabalho

Este texto está dividido em oito capítulos, sendo o primeiro utilizado para abordagem da motivação e os objetivos deste trabalho. No Capítulo 2 são apresentados os diferentes tipos de tanques de armazenamento, assim como a classificação do líquido armazenado.

No Capítulo 3 o estudo de caso é apresentado, assim como a determinação das dimensões do tanque a ser projetado. No próximo capítulo, é dado início ao projeto mecânico do tanque, subdividido em fundo, costado, teto e bocais.

No Capítulo 5 é utilizado o Método dos Elementos Finitos para simulação estática do tanque projeto utilizando um *software* comercial. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas.

No Capítulo 7 estão as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, no Capítulo 8 estão em anexo os desenhos 2D do tanque.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Normas aplicáveis

Existem várias normas para construção de tanques. Algumas são citadas abaixo:

- NBR 7821 – Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados;
- NBR 15461 – Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Construção e Instalação de tanque aéreo de aço-carbono;
- Petrobrás N-270: Projeto de tanque de armazenamento atmosférico;
- API 620 – *Design and Construction of Large, Welded, Low Pressure Storage Tanks*;
- API 650 – *Welded Tanks for Oil Storage*;

No presente estudo será utilizada a norma API 650 – *Welded Tanks for Oil Storage* cuja aceitação é de caráter internacional. Caso o autor julgue necessário, poderão ser utilizadas normas auxiliares para elaboração do projeto.

2.2. Componentes de tanques de armazenamento

Nesta seção serão apresentados de forma resumida os principais componentes necessários para o funcionamento dos tanques de armazenamento. As figuras abaixo representam dois tipos de tanques comumente encontrados em refinarias e bases de distribuição de combustíveis:

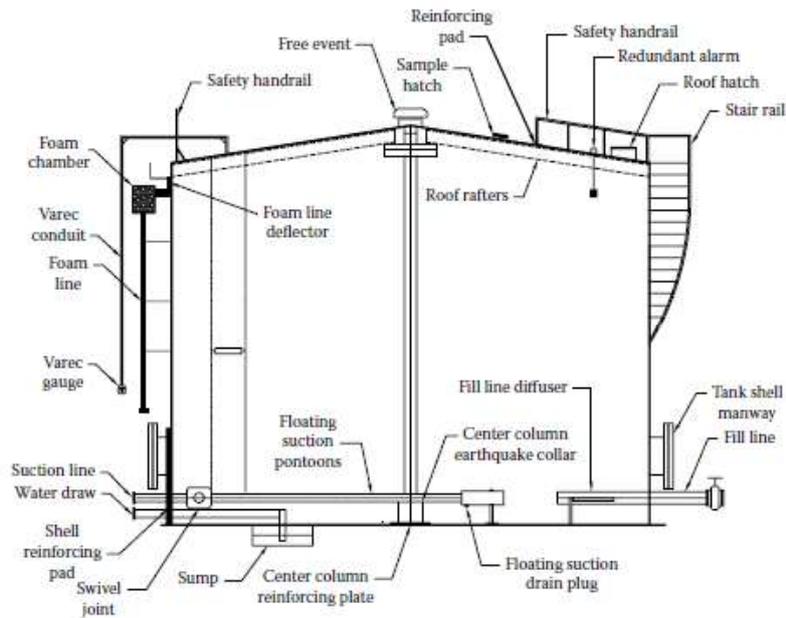


Figura 2: Tanque com teto côncavo

Fonte: [5]

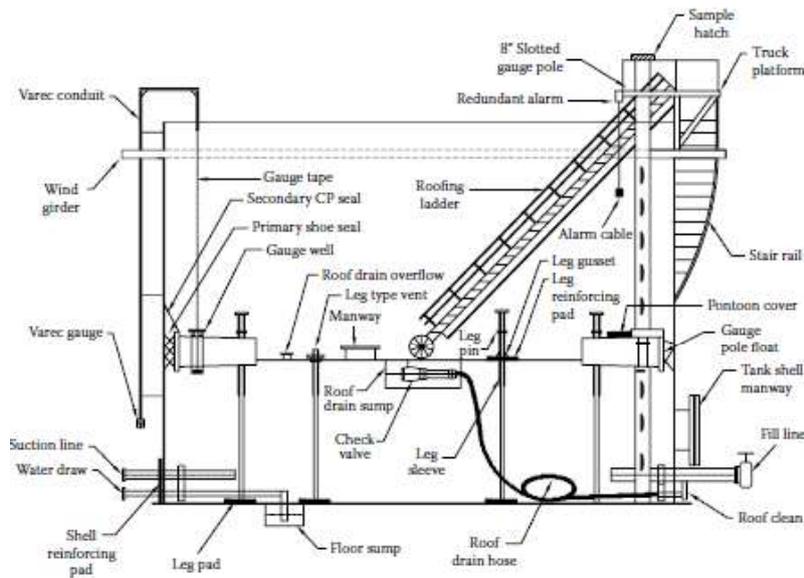


Figura 3: Tanque com teto flutuante

Fonte: [5]

- Costado: É a estrutura lateral do tanque, composto por anéis de chapas soldadas. Possui formato cilíndrico;
- Fundo: É a estrutura inferior do tanque, composto por chapas dispostas de forma plana (em tanques com pequeno diâmetro) ou com decaimento para facilitar a retirada de líquido;
- Teto: É a estrutura superior do tanque. Deve possuir rigidez suficiente para circulação de trabalhadores e instalação de instrumentos;
- Bocais: São aberturas no tanque que permitem sua operação (enchimento e esvaziamento), assim como a instalação de instrumentos. Podem ser flangeados ou rosqueados;
- Boca de visita: É um bocal com dimensões normalizadas que permite a inspeção visual do interior do tanque, como também a entrada de pessoal autorizado em caso de necessidade;
- Porta de limpeza: É uma abertura no costado com dimensões normalizadas destinada à limpeza interna do tanque (retirada de borra). Comumente presente em tanques de grandes dimensões destinado ao armazenamento de produtos viscosos (óleo cru e asfalto, por exemplo);



Figura 4: Trator realizando limpeza dentro de tanque

Fonte: [4]

- Fundação: É o local sobre o qual o tanque será construído. De acordo com [4], pode ser feita de diferentes maneiras: a mais simples é o aterro compactado

(apenas em tanques de pequenas dimensões). Em tanques de maiores diâmetros, fundações de concreto podem ser feitas (porém necessitam de proteção com pintura betuminosa a fim de evitar o contato entre concreto e as chapas do fundo do tanque) como também fundações consistindo em um anel de concreto estaqueado. O tipo de fundação a ser feito depende de um estudo prévio do solo onde o tanque será construído;



Figura 5: Fundação com anel de concreto

Fonte: [4]

- Medidor de nível: Permite a avaliação do estoque de líquido armazenado;



Figura 6: Medidor de nível tipo radar

Fonte: [6]

- Medidor de temperatura: Torna possível a medição de temperatura do líquido armazenado;



Figura 7: Transmissor de temperatura

Fonte: [6]

- Respiro (*vent*): É um dispositivo que equaliza a pressão no interior do tanque com a atmosférica, protegendo o tanque contra sobre-pressão ou vácuo;

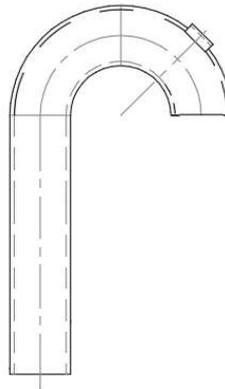


Figura 8: Respiro aberto do tipo pescoço de ganso (*goose neck vent*)

Fonte: Autor

- Válvula de alívio de pressão e vácuo: É uma válvula de segurança que protege o tanque contra sobre-pressão e vácuo. Diferentemente do respiro mostrado na Figura 8, a válvula de alívio de pressão e vácuo consiste em um mecanismo que, nos casos mais simples é uma mola calibrada de forma a só permitir a saída de

vapor de combustível ou a entrada de ar atmosférico no tanque quando a pressão atingir os valores de referência;



Figura 9: Válvula de alívio contra pressão e vácuo

Fonte: [7]

2.3. Classificação dos tanques de armazenamento

Embora existam outras classificações de tanque (de acordo com o fundo, pressão interna, etc.), a classificação mais utilizada é de acordo com o teto. Nos tanques de teto fixo, o teto está diretamente ligado à parte superior de seus costados. Podem ser autoportantes (*self-supporting*) ou sustentados por colunas internas de perfis metálicos. A depender da forma do teto fixo, podem-se atingir as seguintes configurações:

2.3.1. Teto fixo

- Teto cônico: apresenta a forma de um cone.



Figura 10: Tanque com teto fixo cônico

Fonte: [4]

- Teto geodésico ou em formato de domo: Apresenta a forma de uma calota esférica. Normalmente é autoportante.

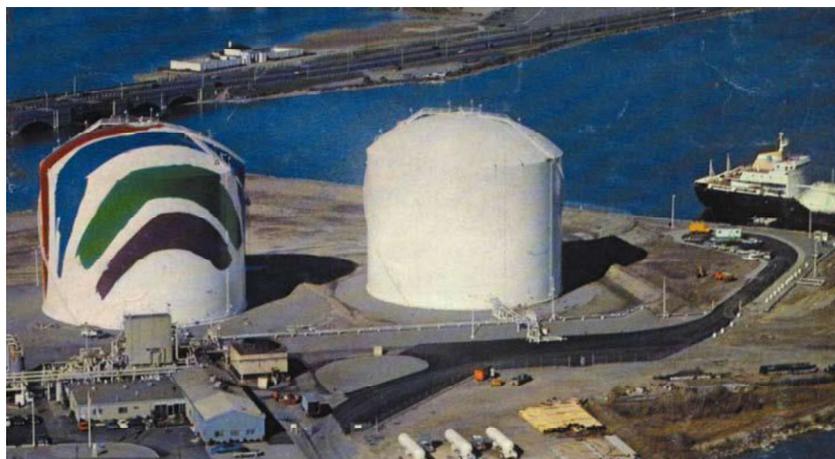


Figura 11: Tanque com teto em formato de domo

Fonte: [4]

- Teto em gomos: É uma variação do tipo anterior, no qual qualquer seção horizontal será a forma de um polígono regular com número de lados igual ao número de chapas utilizadas nesta região do teto.



Figura 12: Tanque com teto fixo em gomos

Fonte: [4]

- Diafragma flexível: São tanques em que os tetos são fixos ao costado, mas apresentam a possibilidade de variar o volume no espaço vapor em consequência da deformação de um revestimento que age como uma membrana flexível, minimizando as perdas por vaporização do fluido armazenado.

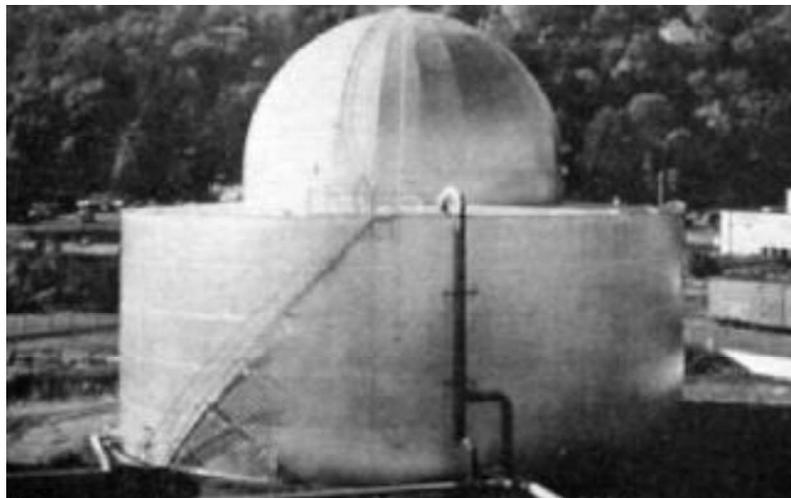


Figura 13: Tanque de teto fixo com diafragma flexível

Fonte: [4]

2.3.2. Teto móvel

Nos tanques com teto móvel, o teto pode se movimentar externamente ao costado (Figura 14), em função da pressão de serviço de seu espaço vapor. Neste tipo de tanque, as perdas por evaporação são minimizadas devido ao sistema de selagem entre costado e teto.

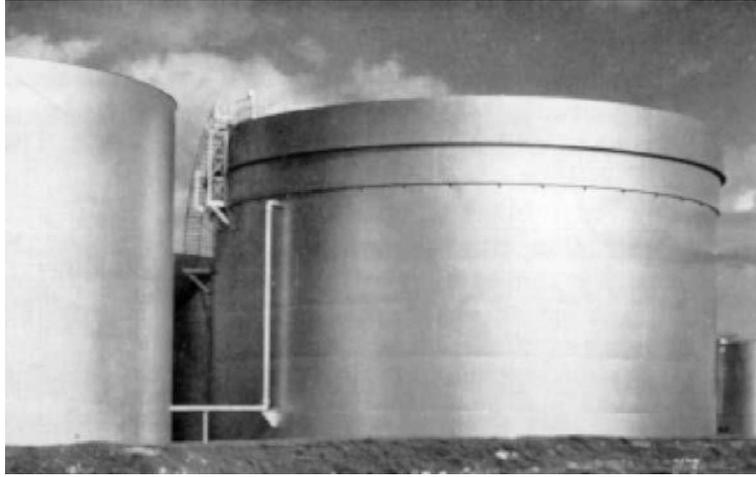


Figura 14: Tanque com teto móvel (*Lifting Roof*)

Fonte: [4]

2.3.3. Teto flutuante

São tanques cujos tetos flutuam sobre o fluido armazenado, acompanhando sua movimentação durante operação do tanque (enchimento e esvaziamento). Para que as perdas por vaporização sejam mínimas, neste tipo de tanque é necessário o projeto de um sistema de selagem. A maior desvantagem deste tipo de tanque é o acúmulo de águas pluviais no teto, logo, tanques dessa natureza necessitam de sistemas de drenagem do teto. A alternativa para evitar o acúmulo de água sobre o selo é a utilização de tetos fixos com selo flutuante interno (Figura 16). No Brasil, este é o tipo de tanque predominante no armazenamento de gasolina.



Figura 15: Tanque com selo flutuante externo (*External Floating Roof Tank*)

Fonte: [8]

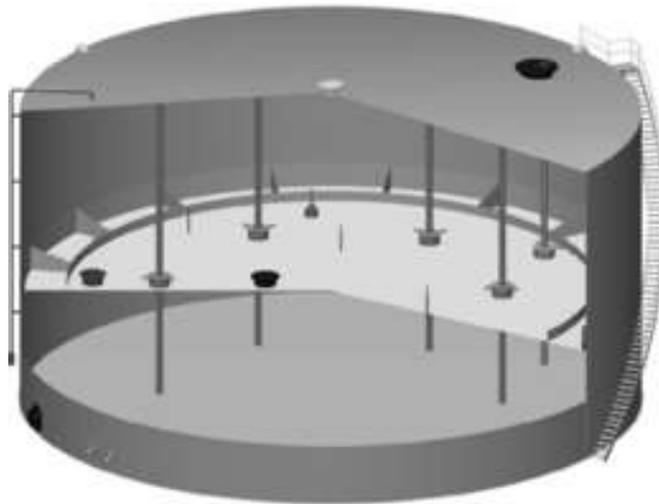


Figura 16: Tanque de teto fixo com selo flutuante interno

Fonte: [9]

2.4. Classificação dos fluidos armazenados

Segundo a N-270, para que o tipo de tanque de armazenamento seja selecionado em função do produto armazenado, deve-se levar em consideração condições e requisitos ambientais, segurança operacional, custo do tanque, perdas operacionais e qualidade exigida no produto armazenado.

A inflamabilidade de um líquido é definida como a facilidade que um líquido produz vapores capazes de sustentar a combustão. Segundo [5], as propriedades que influenciam na inflamabilidade de um líquido são:

- Pressão de vapor e temperatura de ebulição;
- Ponto de fulgor: É a menor temperatura na qual um líquido evapora o suficiente para formar uma mistura ar + vapor inflamável, próxima à superfície de líquido;
- Ponto de combustão: é a temperatura em que a combustão é mantida de forma contínua. É pouco acima do ponto de fulgor;
- Temperatura de auto-ignição;
- Densidade do vapor;
- Densidade do líquido;
- Miscibilidade em água: Líquidos inflamáveis imiscíveis são um desafio durante combate ao incêndio;

As propriedades do diesel S500 são exibidas na Tabela 1:

Tabela 1: Propriedade óleo diesel S500

Propriedade	Descrição
Ponto de ebulição	150°C
Ponto de fulgor	38°C
Inflamabilidade	Produto inflamável
Pressão de vapor	0,4 kPa a 40°C
Densidade relativa	0,815-0,865 kg/m ³ @ 20°C
Solubilidade	Insolúvel em água
Temperatura de auto-ignição	≥ 225°C
Viscosidade	2,0-5,0 cSt a 40°C

Fonte: [10]

De acordo com [10] o óleo diesel S500 é classificado como líquido inflamável categoria III.

3. ESTUDO DE CASO

3.1.Dados de processo

O estudo de caso tem como objetivo projetar um tanque com capacidade de armazenamento de cerca de 120 m³ de óleo diesel S500 em uma base de distribuição de combustível fictícia localizada no sudeste brasileiro. Para tanques de armazenamento atmosféricos, a pressão externa de projeto deve ser de, no mínimo, 0,25 kPa (API 650 5.2.1b). A pressão interna de projeto é limitada pelo peso das chapas do teto por unidade de área. Segundo API 650 5.10.2.2, a espessura mínima permitida para chapas do teto é de 3/16". Logo, o valor mínimo da pressão interna de projeto considerando chapas de aço com a menor espessura permitida é de 0,363 kPa. A Tabela 2 apresenta os dados de processo:

Tabela 2: Dados de processo

Dados de Processo	Descrição
Volume armazenado	120 m ³
Pressão interna de projeto	0,363 kPa
Pressão externa de projeto	0,25 kPa
Temperatura de projeto	40°C
Líquido armazenado	Diesel S500

Fonte: Autor

3.2. Seleção do tipo de tanque de armazenamento

A Tabela 3, retirada da Petrobras N-270 exibe o tipo de tanque de armazenamento em função do produto a ser armazenado:

Tabela 3: Recomendações de tipos usuais de tanques

Produto armazenado	Tipo de tanque (selecionado conforme o projeto)
Produtos leves da faixa de gasolina e nafta. Petróleo cru.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F; — tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Gasolina de Aviação (GAV).	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F; — tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Álcool etílico hidratado. Metanol.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Biodiesel.	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F.
Álcool etílico anidro.	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classes I e II.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Querosene de Aviação (QAV).	— tanque atmosférico de teto fixo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Produtos da faixa de querosene ou mais pesados, tais como: a) querosene; b) óleo diesel classe III; c) resíduo de vácuo; d) diesel do FCC ("cycle-oil"); e) óleo combustível; f) resíduos ("slop"); g) óleo lubrificante; h) "flushing-oil"; i) asfalto e cimento asfáltico; j) lastro de navio.	— tanque atmosférico de teto fixo.
Água bruta.	— tanque sem teto.
NOTA 1 A seleção de um tanque atmosférico de teto flutuante (interno ou externo) está condicionada à pressão de vapor do produto (evitar deformação do teto). Tanque de teto flutuante não deve ser utilizado para armazenamento de produtos com Pressão de Vapor Verdadeira (PVV) acima de 76,5 kPa (11,1 psi) na temperatura máxima de projeto (ver 7.1.2). Neste caso, deve-se utilizar tanque: de teto fixo conforme API STD 650 "Annex" F, de teto fixo conforme API STD 620 ou de teto fixo com sistema de recuperação de vapor.	

Fonte: [11]

Tendo em vista que o diesel S500 é um líquido inflamável de classe III, o tanque a ser projetado é de teto fixo.

3.3.Determinação das dimensões do tanque

Segundo [12], a relação diâmetro/altura ótima para tanques de pequena capacidade é de 1:1. Logo, para a capacidade de 120 m³, o diâmetro e altura do tanque seriam de 5,35m. Estas dimensões estão sujeitas à alteração devido ao comprimento das chapas a serem utilizadas. É desejável a utilização das maiores chapas possíveis no projeto de um tanque de armazenamento, para evitar operações de corte desnecessárias, como também minimizar o número de soldas no tanque. A Tabela 4 apresenta as espessuras padronizadas para chapas grossas laminadas pelas siderúrgicas brasileiras:

Tabela 4: Chapas grossas padronizadas

Espessura (mm)	Massa por m ^{2(A)} (kg)	Espessura (mm)	Massa por m ^{2(A)} (kg)	Espessura (mm)	Massa por m ^{2(A)} (kg)	Espessura (mm)	Massa por m ^{2(A)} (kg)
5,30	41,61	12,00	94,20	26,50	208,03	63,00 ^(B)	510,25
5,60	43,96	12,50 ^(B)	98,13	28,00	219,00	70,00	549,50
6,00	47,10	13,20	103,62	30,00	235,50	75,00 ^(B)	588,75
6,30 ^(B)	49,46	14,00	109,90	31,50 ^(B)	247,28	80,00	628,00
6,70	52,60	15,00	117,75	33,50	262,98	90,00	706,50
7,10	55,74	16,00 ^(D)	125,60	35,00	274,75	100,00 ^(D)	785,00
7,50	58,88	17,00	133,45	37,50 ^(B)	294,38	110,00	863,50
8,00 ^(B)	62,80	18,00	141,30	40,00	314,00	120,00	942,00
8,50	66,73	19,00 ^(B)	149,15	42,50	333,63	130,00	1020,00
9,00	70,65	20,00	157,00	45,00	353,25	140,00	1099,00
9,50 ^(B)	74,58	21,20	166,42	47,50	372,88	150,00	1177,50
10,00	78,50	22,40 ^(B)	175,84	50,00 ^(B)	392,50	—	—
10,60	83,21	23,60	185,26	55,00	431,75	—	—
11,20	87,92	25,00 ^(B)	196,25	60,00	471,00	—	—

Fonte: [13]

Segundo [4], as dimensões comerciais de chapas fabricadas no Brasil são:

- Chapas finas laminadas a quente: 1500mm x 6000mm ou 1800mm x 6000mm com bordas aparadas;
- Chapas grossas laminadas a quente: 2440mm x 12000mm com bordas aparadas.

Visando o aproveitamento máximo das chapas utilizadas, foram escolhidas chapas finas de comprimento 1800mm para o costado do tanque. Para o fundo e teto, foram utilizadas chapas grossas. Assim, para a capacidade de armazenamento desejada (120 m³), é possível a utilização de chapas inteiras na confecção do costado do tanque, evitando

soldas desnecessárias e desperdício de material. A Figura 17 e a Figura 18 representam a disposição das chapas no fundo e teto do tanque, respectivamente. A Tabela 5 apresenta a área de chapas não aproveitadas na construção do tanque, somando um total de 63,6 m² (Tabela 5).

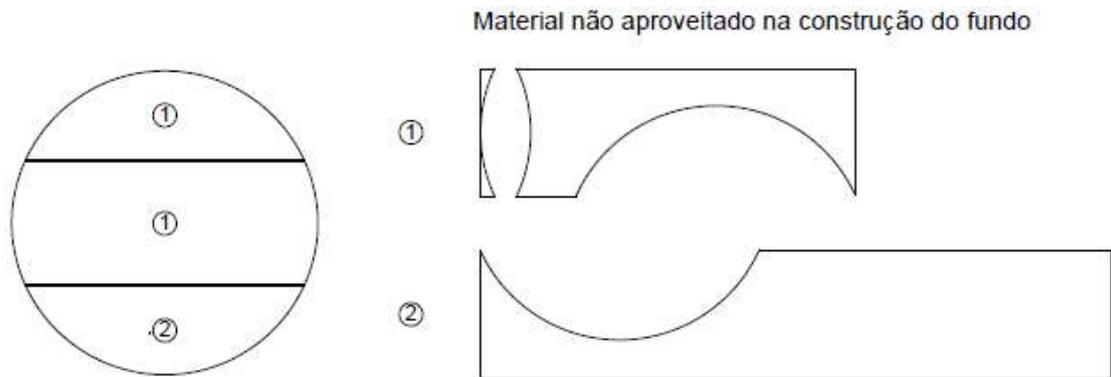


Figura 17: Disposição das chapas do fundo

Fonte: Autor

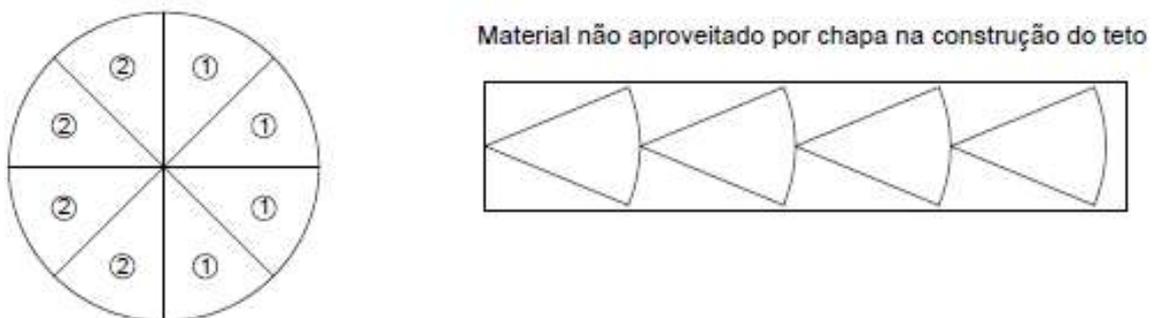


Figura 18: Disposição das chapas do teto

Fonte: Autor

Tabela 5: Área das chapas não aproveitada para construção do tanque

Componente	Área de chapa não aproveitada
Teto	32,05 m ²
Costado	0 m ²
Fundo	31,55 m ²

Fonte: Autor

A Tabela 6 exibe a quantidade de chapas previstas na construção do tanque.

Tabela 6: Quantidade de chapas necessárias

Componente	Quantidade de chapas
Teto	2
Costado	9
Fundo	2

Fonte: Autor

Portanto, na construção do tanque serão utilizadas 4 chapas grossas e 9 chapas finas. As espessuras das chapas serão especificadas no próximo capítulo. Com as dimensões e quantidades de chapas definidas, é possível obtenção dos parâmetros geométricos do tanque. Será um tanque com três anéis em seu costado, totalizando altura de 5,4m e diâmetro interno de 5,73m.

3.4. Seleção de material

A Tabela 7 e a Tabela 8, retiradas da API 650 Tabela 5.2a, apresentam os materiais de chapa permitidos para construção do tanque, assim como suas propriedades mecânicas:

Tabela 7: Materiais permitidos

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_h MPa
ASTM Specifications						
A283M	C		205	380	137	154
A285M	C		205	380	137	154
A131M	A, B		235	400	157	171
A36M	—		250	400	160	171
A131M	EH 36		360	490 ^a	196	210
A573M	400		220	400	147	165
A573M	450		240	450	160	180
A573M	485		290	485 ^a	193	208
A516M	380		205	380	137	154
A516M	415		220	415	147	165
A516M	450		240	450	160	180
A516M	485		260	485	173	195
A662M	B		275	450	180	193
A662M	C		295	485 ^a	194	208
A537M	1	$t \leq 65$	345	485 ^a	194	208
		$65 < t \leq 100$	310	450 ^b	180	193
A537M	2	$t \leq 65$	415	550 ^a	220	236
		$65 < t \leq 100$	380	515 ^b	206	221
A633M	C, D	$t \leq 65$	345	485 ^a	194	208
		$65 < t \leq 100$	315	450 ^b	180	193
A678M	A		345	485 ^a	194	208
A678M	B		415	550 ^a	220	236
A737M	B		345	485 ^a	194	208
A841M	Class 1		345	485 ^a	194	208
A841M	Class 2		415	550 ^a	220	236

Fonte: [14]

Tabela 8: Materiais permitidos (continuação)

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_h MPa
CSA Specifications						
G40.21M	260W		260	410	164	176
G40.21M	260 WT		260	410	164	176
G40.21M	300W		300	440	176	189
G40.21M	300WT		300	440	176	189
G40.21M	350W		350	450	180	193
G40.21M	350WT	$t \leq 65$	350	450 ^a	180	193
		$65 < t \leq 100$	320	450 ^a	180	193
National Standards						
	235		235	365	137	154
	250		250	400	157	171
	275		275	430	167	184
ISO Specifications						
ISO 630	E275C, D	$t \leq 16$	275	410	164	176
		$16 < t \leq 40$	265	410	164	176
	E355C, D	$t \leq 16$	355	490 ^a	196	210
		$16 < t \leq 40$	345	490 ^a	196	210
		$40 < t \leq 50$	335	490 ^a	196	210
EN Specifications						
EN 10025	S 275J0, J2	$t \leq 16$	275	410	164	176
		$16 < t \leq 40$	265	410	164	176
	S 355J0, J2, K2	$t \leq 16$	355	470 ^a	188	201
		$16 < t \leq 40$	345	470 ^a	188	201
		$40 < t \leq 50$	335	470 ^a	188	201
^a By agreement between the Purchaser and the Manufacturer, the tensile strength of ASTM A537M, Class 2, A578M, Grade B, and A841M, Class 2 materials may be increased to 585 MPa minimum and 690 MPa maximum. The tensile strength of the other listed materials may be increased to 515 MPa minimum and 620 MPa maximum. When this is done, the allowable stresses shall be determined as stated in 5.6.2.1 and 5.6.2.2.						
^b By agreement between the Purchaser and the Manufacturer, the tensile strength of ASTM A537M, Class 2 materials may be increased to 550 MPa minimum and 690 MPa maximum. The tensile strength of the other listed materials may be increased to 485 MPa minimum and 620 MPa maximum. When this is done, the allowable stresses shall be determined as stated in 5.6.2.1 and 5.6.2.2.						

Fonte: [14]

A partir das tabelas acima, o material escolhido será o ASTM A283 Gr. C, uma vez que apresenta propriedades mecânicas satisfatórias e disponibilidade comercial nas siderúrgicas brasileiras.

3.5. Corrosão

De acordo com o trecho retirado de [15], “corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para uso.”

A corrosão é um fenômeno dependente de muitas variáveis, tais como umidade, temperatura, chuva, vento, salinidade, entre outros. Quando presente em tanques de armazenamento, originam perfurações em suas chapas (teto, costado e fundo) podendo causar contaminação do líquido armazenado como também vazamento de combustível, possibilitando risco de incêndio. Além disso, combustível vazado pode entrar em contato com lençóis freáticos, contaminando-os.

Devido à natureza complexa da corrosão, cabe aos engenheiros que trabalham na planta estimarem valores aceitáveis para as taxas de corrosão anuais, através de experiências prévias, número de paradas para manutenção nos tanques devido à corrosão, entre outros.

Embora a API 650 5.3.2.1 estipule que as sobre espessuras de corrosão sejam especificadas pelo comprador do tanque, a Petrobras N-270 apresenta recomendações quanto as taxas anuais de corrosão do aço-carbono (Tabela 9) para o costado do tanque.

Tabela 9: Taxas anuais de corrosão para o aço-carbono [mm/ano]

Produto	1º anel	2º anel	3º anel	4º anel	5º anel	6º anel
Petróleo (teto fixo)	0,10	0,10	0,14	0,14	0,12	0,12
Petróleo (teto flutuante)	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06
Gasolina	0,30	0,30	0,30	0,25	0,25	0,25
Querosene	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Nafta pesada	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05
Nafta leve	0,30	0,30	0,30	0,25	0,25	0,25
Óleo diesel	0,10	0,10	0,06	0,04	0,04	0,04
Gasóleo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08
Óleo combustível	0,02	0,02	0,10	0,06	0,05	0,05
Asfalto	0,02	0,02	0,02	0,10	0,10	0,10
Asfalto diluído	0,10	0,10	0,06	0,06	0,04	0,04
Álcool etílico (anidro ou hidratado) Metanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NOTA 1 Esses valores são válidos para tanques que armazenem sempre o mesmo produto. Para tanques que armazenem produtos diferentes adotar a condição mais crítica.

NOTA 2 Para tanques pintados internamente observar requisitos constantes no 6.3 desta Norma (revestimento e sobre-espessura de corrosão).

Fonte: [11]

O parágrafo 6.3.2 da Petrobras N-270 estipula que a vida útil mínima para tanques de armazenamento deve ser de 20 anos. Porém, no presente trabalho será adotada vida útil de 30 anos. Logo, as sobre espessuras de corrosão adotadas são exibidas na Tabela 10:

Tabela 10: Sobre espessuras de corrosão adotadas

Componente	Sobre espessura de corrosão
Teto	0 mm
Costado 1º anel	3 mm
Costado 2º anel	3 mm
Costado 3º anel	1,8 mm
Fundo	0 mm

Fonte: Autor

Para o teto e fundo do tanque, as normas API 650 e Petrobras N-270 não estipulam valores para as taxas anuais de corrosão, portanto elas foram consideradas nulas. Caso durante inspeções de rotina no tanque indícios de corrosão apareçam nestes componentes os métodos de proteção contra corrosão adequados devem ser implementados.

4. PROJETO MECÂNICO

Neste capítulo serão apresentados os cálculos necessários para projeto dos principais componentes de tanques de armazenamento. Dadas as condições de processo explicitadas na Tabela 2, o tanque será projetado conforme Anexo F – “*Design of Tanks for Small Internal Pressures*” de API 650. Os detalhes construtivos serão apresentados no anexo deste trabalho. Não serão projetados componentes considerados secundários, como por exemplo escadas, sistema de recuperação de vapor (caso aplicável), guarda-corpo, sistema de resfriamento do tanque em caso de incêndio, chapas defletoras de águas pluviais (*drip ring*), entre outros.

4.1.Fundo

De acordo com [4], tanques de pequeno diâmetro (até 6m) permitem construção de fundo plano. Em tanques de fundo plano apoiados sobre o solo, as chapas do fundo estão sujeitas apenas à compressão. Logo, por este motivo as chapas utilizadas para o fundo do tanque terão espessura mínima permitida por norma, ou seja, 6mm (API 650 5.4.1). As chapas do fundo devem ser projetadas 50mm para fora do tanque (API 650 5.4.2). Logo, o diâmetro do fundo do tanque torna-se 5,83m.

4.1.1. Bocal de drenagem

Para o fundo do tanque é previsto apenas um bocal, servindo exclusivamente para drenagem. As dimensões para o bocal de drenagem devem ser conforme Tabela 5.16a da API 650. Será adotado para o projeto um bocal de 2" Sch.80 para drenagem. Para o flange do bocal será utilizado um sobreposto ASME B 16.5 150# RF (Figura 19).

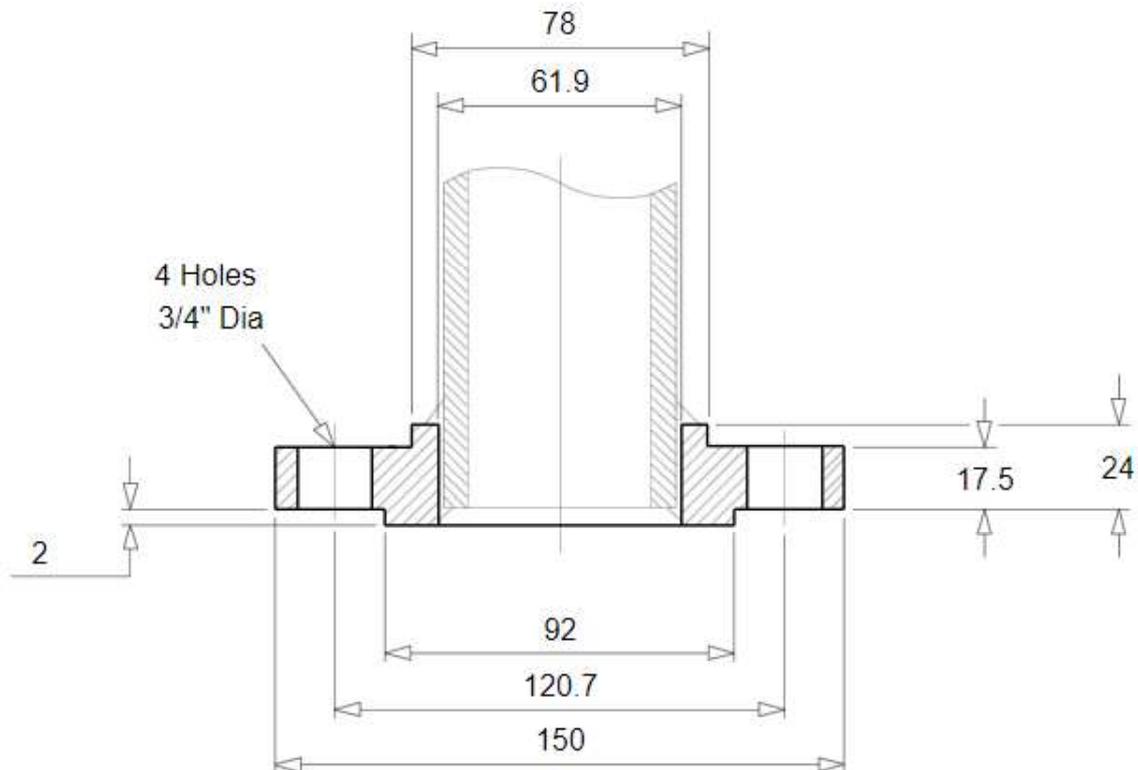


Figura 19: Flange sobreposto ASME 2" B16.5 150# RF

Fonte: [16]

4.2. Costado

Para tanques com diâmetro inferior a 15m, a espessura mínima de chapas para o costado é de 5mm (API 650 5.6.1.1). Os anéis do costado podem ser alinhados pela face interna, externa ou pela linha de centro (Figura 20).

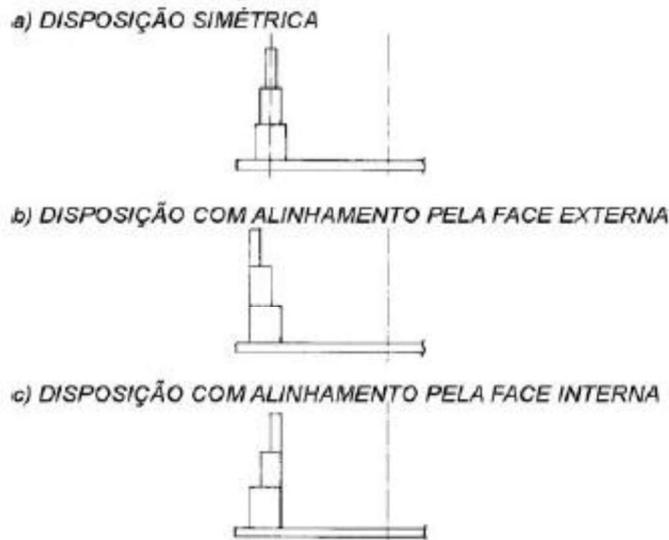


Figura 20: Alinhamento das chapas do costado

Fonte: [4]

Por ser a disposição usual utilizada na indústria, será adotado o alinhamento pela face interna dos anéis do costado, caso necessário.

Tanques de armazenamento estão sujeitos à pressão hidrostática do líquido em seu interior. Logo, a região de maior pressão é no fundo do tanque e a menor no teto. Por este motivo, durante cálculo do costado é comum a adoção de diferentes espessuras para os anéis. A API 650 apresenta dois métodos de cálculo para o costado: *one-foot* e ponto variável (*variable-design-point*). Devido ao fato do método *one-foot* (API 650 5.6.3) ser mais conservador a título de projeto, este será adotado neste trabalho.

O método consiste em calcular a espessura mínima do anel para operação e para teste hidrostático. O valor a ser utilizado para construção do tanque é o maior obtido. As equações de dimensionamento são exibidas abaixo, sendo que a primeira equação determina a espessura mínima do costado para operação do tanque e a segunda determina a espessura mínima do costado para condições de teste hidrostático.

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_d} + CA \quad (4-1)$$

$$t_t = \frac{4,9D(H - 0,3)}{S_t} \quad (4-2)$$

A Tabela 11, retirada de [2], exibe valores de referência para densidade de fluidos presentes na indústria:

Tabela 11: Densidades de projeto

PRODUTO	DENSIDADE
Nafta leve (int.)	0,73
Gasolina A	0,75
Gasolina B	0,75
Nafta Petroquímica	0,75
Nafta Diluente	0,77
Nafta Craqueada	0,77
Nafta Pesada (int.)	0,77
Nafta Pesada para MEROX	0,77
Querosene Diluente	0,81
Querosene Jato	0,82
Álcool	0,82
Querosene Iluminação	0,83
Óleo Diesel	0,86
Óleos Lubrificantes: Spindle	0,86
Neutro Leve	0,87
Neutro Médio	0,88
Neutro Pesado	0,88
Bright Stock	0,90
Cilindro 1	0,92
Cilindro 2	0,94
Petróleo (valor médio)	0,90
Light Cycle Oil	0,94
Resíduo Craqueado	0,94
Gasóleo FCC	0,95
Slop	0,95
Resíduo Destilado	0,98
Resíduo de Vácuo para Desfaltação	0,98
Óleo Combustível	0,98
Resíduo Asfáltico	1,05
Asfalto Diluído (ADP)	1,05
Cimento Asfáltico (CAP)	1,06

Fonte: [4]

Para o tanque em estudo, o nível de líquido em operação (*design liquid level*) será adotado em 95% da altura do costado. Este espaço será preenchido pelos vapores gerados pelo fluido armazenado. A

Tabela 12 exibe os valores obtidos com a utilização do método *one-foot* para o costado:

Tabela 12: Cálculo dos anéis do costado

Anel	Esp. mín. de Projeto [mm]	Esp. mín. de Teste Hidrostático [mm]	Esp. mín. API 650 5.6.1.1 [mm]	Esp. comercial adotada [mm]
1	3,851	0,881	5	5
2	3,534	0,552	5	5
3	2,017	0,224	5	5

Fonte: Autor

4.2.1. Bocais de movimentação de carga

Os bocais previstos para o costado desta natureza são citados abaixo:

- Entrada de líquido;
- Saída de líquido;

Os diâmetros de ambos os bocais de movimentação de carga foram estipulados em 6” Sch. 80 (conforme Tabela 5.6a de API 650). Tal diâmetro foi escolhido levando em consideração enchimento e esvaziamento total do tanque ocorrendo em duas horas, com velocidade de escoamento de 1 m/s (recomendada para o bombeamento de hidrocarbonetos). Bocais deste diâmetro localizados no costado de tanques de armazenamento projetados conforme API 650 necessitam de chapas de reforço. O formato das chapas de reforço pode ser circular ou em forma de diamante. Neste projeto serão adotadas chapas circulares apenas. As dimensões para os reforços dos bocais são exibidas em API 650 Tabela 5.6a. Ambos os bocais serão flangeados. A norma recomenda dimensões de flanges instalados no costado (API 650 Figura 5.10), mas por preferência do autor serão utilizados flanges ASME B16.5 150# RF sobrepostos (Figura 21), devido à sua maior resistência mecânica e padronização. Segundo [4], a distância mínima entre bocais adjacentes instalados no costado de tanques deve ser de uma vez e meia a média dos diâmetros, contados a partir de suas linhas de centro. No presente estudo será adotado a distância mínima de um metro entre bocais.

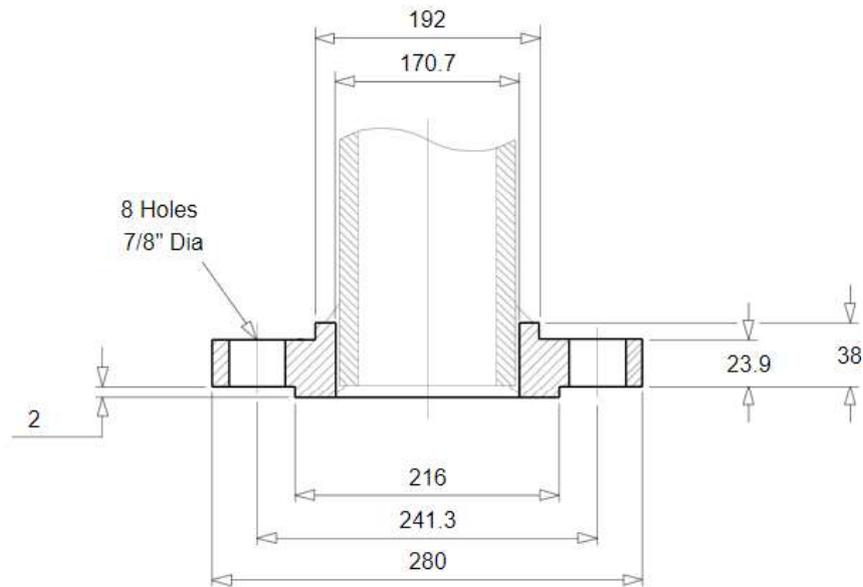


Figura 21: Flange sobreposto 6" ASME B16.5 150# RF

Fonte: [17]

4.2.2. Boca de visita

Para o tanque em estudo, será prevista apenas uma boca de visita no costado com 750 mm de diâmetro. Segundo [4], as bocas de visita devem ser orientadas na direção dos ventos predominantes no local de construção de forma a facilitar o arejamento do equipamento durante paradas de manutenção. Os aspectos construtivos da boca de visita são descritos nas Tabelas 5.3a, 5.4a, 5.5a e 5.7a de API 650. Bocas de visita, por norma, tem como obrigação possuir puxadores para retirada da tampa, que serão previstos em seu projeto. A espessura adotada para a chapa de reforço será a mesma do costado do tanque, 5mm.

4.2.3. Porta de limpeza

Segundo [4], portas de limpeza devem ser de construção soldada e do tipo rente ao fundo (*flush-type*) (Figura 22).



Figura 22: Porta de limpeza

Fonte: [4]

A necessidade de instalação de porta de limpeza no tanque é responsabilidade do contratante do projeto. Devido às pequenas dimensões do tanque em estudo como também o fato de que o óleo diesel possui viscosidade baixa comparados a outros líquidos armazenados em tanques desta natureza (asfalto, óleo cru, óleo combustível...), o que torna a limpeza de um tanque que armazena óleo diesel relativamente fácil, o autor julgou não ser necessário a utilização de portas de limpeza, uma vez que a limpeza do tanque poderá ser realizada pela boca de visita instalada no costado.

4.3. Teto

Para tanques de pequenas dimensões, o teto cônico autoportante (*self-supporting cone roof*) se destaca como alternativa mais atraente do ponto de vista de custo e simplicidade de projeto. Os esforços atuantes em um tanque de armazenamento são descritos em 5.2.1 de API 650. Será projetado um teto inclinação de 9,5° para que a junção teto-costado se enquadre como frágil. O cálculo do teto do tanque será por tentativa e erro, uma vez que para obtenção dos valores limitantes de espessura permitida é necessário ter em mãos o peso do teto do tanque. É recomendado pela norma que a espessura do teto não deve ser menor que os valores abaixo:

$$\frac{D}{4,8 \operatorname{sen}\theta} \sqrt{\frac{B}{2,2}} \text{ ou } 5\text{mm} \quad (4-3)$$

Onde B é calculado da seguinte maneira:

$$B = D_{LR} + L_r + 0,4P_e \quad (4-4)$$

Foram realizados cálculos de espessura partindo do mínimo recomendado pela norma (5mm) e, caso o valor não convergisse, uma espessura de chapa ligeiramente maior seria utilizada. Ao término das iterações, obteve-se como espessura mínima 6,1 mm utilizando o valor mais conservador de projeto. A espessura de chapa comercial a ser utilizada será de 6,3 mm.

4.3.1. Bocais

São previstos no teto a instalação de dois bocais, são eles:

- Bocal para instalação do medidor de nível;
- Bocal para instalação do medidor de temperatura;

Para um tanque projetado segundo API 650, seria necessário a instalação de mais um bocal no teto do tanque com finalidade de ventilação. Porém, seus requisitos técnicos para dimensionamento estão presentes na norma API 2000 – “*Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks (Non-Refrigerated and Refrigerated)*”, além do escopo deste estudo. Recomenda-se para trabalhos futuros seu dimensionamento. Os bocais terão diâmetros de 4” com espessura Sch. 40 e seus flanges serão ASME B16.5 do tipo sobreposto 150# RF sendo suficiente para instalação dos instrumentos.

4.3.2. Ligação de baixa resistência mecânica

Durante condições anormais de projeto (sobrepessão interna, incêndio), o vapor contido acima do nível de líquido no tanque pode entrar em ignição, excedendo a capacidade de operação dos dispositivos de alívio de pressão, causando uma falha catastrófica. Existem dois tipos de falhas principais nesse caso:

- Ruptura da junção fundo-costado (*shell-to-bottom joint*);
- Ruptura da junção teto-costado (*roof-to-shell joint*);

Dentre as falhas citadas anteriormente, a segunda opção é a preferível, uma vez que não ocorre derramamento de líquido. A Figura 23 exhibe o primeiro tipo de falha. Observe que o tanque se comporta como um “fogueto”, podendo cair a vários metros de distância. A Figura 24 exhibe o segundo tipo de falha. Neste caso, pode-se observar que não ocorre derramamento de líquido, assim como o tanque não é deslocado de sua posição original.



Figura 23: Ruptura da junta entre o fundo e costado

Fonte: [18]

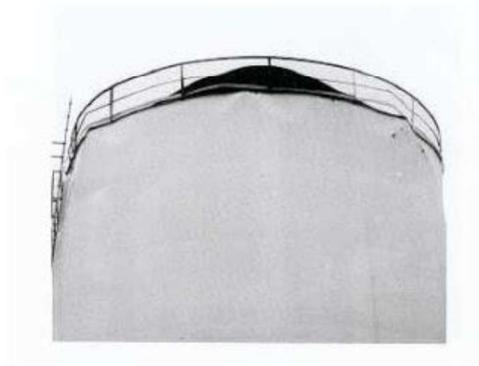


Figura 24: Ruptura da junta entre o teto e costado (ligação de baixa resistência mecânica)

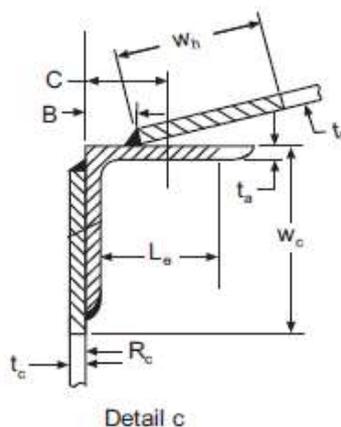
Fonte: [19]

Conforme API 650 5.10.2.6 (5) e API 650 5.10.5.2, para que a junção teto-costado seja considerada frágil, a área de seção de todos os componentes estruturais que se localizam na região da junção deve se encontrar entre os seguintes valores:

$$\frac{BD^2}{8F_a \tan\theta} < A_{Permitida} < \frac{D_{LS}}{2\pi F_y \tan\theta} \quad (4-5)$$

$$315 \text{ mm}^2 < A_{Permitida} < 5725 \text{ mm}^2 \quad (4-6)$$

A área contribuinte para a junta entre o teto e costado depende do arranjo escolhido para construção do tanque. A figura F.2 de API 650 exhibe os arranjos permitidos. Será adotado o arranjo C para o projeto do tanque em questão (Figura 25).



t_a = thickness of angle leg
 t_b = thickness of bar
 t_c = thickness of shell plate
 t_h = thickness of roof plate
 t_s = thickness of thickened plate in shell
 t_r = t_a plus t_c (see note 4)
 w_c = maximum width of participating shell
 = $0.6 (R_c t)^{1/2}$, where $t = t_a, t_c, t_s,$ or t_r as applicable.

w_h = maximum width of participating roof
 = $0.3(R_2 t_h)^{1/2}$ or 300 mm (12 in.) whichever is less.
 R_c = inside radius of tank shell
 R_2 = length of the normal to the roof, measured from the vertical centerline of the tank = $R_c / (\sin \theta)$
 θ = angle between roof and horizontal

Figura 25: Detalhe construtivo C

Fonte: Adaptado de [14]

Será avaliado o caso limite utilizando a maior cantoneira possível para que a junção entre o teto e costado se enquadre como frágil. A área preenchida pelo teto e costado é dada pela equação abaixo:

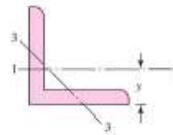
$$A_{Preenchida} = w_h t_h + t_c (w_c - 2t_c) = 1120,94 \text{ mm}^2 \quad (4-7)$$

Logo, a área disponível para a cantoneira é dada por:

$$A_{Cantoneira} = A_{Permitida} - A_{Preenchida} = 5725 - 1121 = 4604 \text{ mm}^2 \quad (4-8)$$

A Figura 26 exibe as propriedades geométricas para cantoneiras de abas iguais. Analisando as áreas de seção, conclui-se que podem ser usadas todas as cantoneiras com exceção da 150 x 140 x 18 para confecção do tanque sem que a junção entre o teto e costado deixe de ser frágil. Por critério do autor, no presente estudo serão utilizadas cantoneiras 50 x 50 x 5 para confecção do tanque de armazenamento.

- m = massa por metro, kg/m
- A = área, cm^2
- I = segundo momento de área, cm^4
- k = raio de giração, cm
- y = distância do centroide, cm
- Z = módulo da seção, cm^3



Medida, mm	m	A	I_{y-y}	k_{y-y}	Z_{y-y}	y	k_{z-z}
25 x 25 x 3	1,11	1,42	0,80	0,75	0,45	0,72	0,48
x 4	1,45	1,85	1,01	0,74	0,58	0,76	0,48
x 5	1,77	2,26	1,20	0,73	0,71	0,80	0,48
40 x 40 x 4	2,42	3,08	4,47	1,21	1,55	1,12	0,78
x 5	2,97	3,79	5,43	1,20	1,91	1,16	0,77
x 6	3,52	4,48	6,31	1,19	2,26	1,20	0,77
50 x 50 x 5	3,77	4,80	11,0	1,51	3,05	1,40	0,97
x 6	4,47	5,59	12,8	1,50	3,61	1,45	0,97
x 8	5,82	7,41	16,3	1,48	4,68	1,52	0,96
60 x 60 x 5	4,57	5,82	19,4	1,82	4,45	1,64	1,17
x 6	5,42	6,91	22,8	1,82	5,29	1,69	1,17
x 8	7,09	9,03	29,2	1,80	6,89	1,77	1,16
x 10	8,69	11,1	34,9	1,78	8,41	1,85	1,16
80 x 80 x 6	7,34	9,35	55,8	2,44	9,57	2,17	1,57
x 8	9,63	12,3	72,2	2,43	12,6	2,26	1,56
x 10	11,9	15,1	87,5	2,41	15,4	2,34	1,55
100 x 100 x 8	12,2	15,5	145	3,06	19,9	2,74	1,96
x 12	17,8	22,7	207	3,02	29,1	2,90	1,94
x 15	21,9	27,9	249	2,98	35,6	3,02	1,93
150 x 150 x 10	23,0	29,3	624	4,62	56,9	4,03	2,97
x 12	27,3	34,8	737	4,60	67,7	4,12	2,95
x 15	33,8	43,0	898	4,57	83,5	4,25	2,93
x 18	40,1	51,0	1050	4,54	98,7	4,37	2,92

* Medidas métricas estão também disponíveis em tamanhos de 45, 70, 90, 120, e 200 mm.

† Estas medidas estão também disponíveis em liga de alumínio.

Figura 26: Cantoneiras de abas iguais

Fonte: [20]

4.3.3. Verificação da necessidade de ancoragem do tanque

Nesta seção serão calculados os carregamentos e momentos atuantes no tanque de armazenamento, a fim de verificar a necessidade de ancoragem do tanque. Os carregamentos presentes são exibidos em API 650 5.2.1. A Tabela 13 exibe os carregamentos atuantes no tanque:

Tabela 13: Esforços atuantes no tanque

Símbolo	Valor	Unidade
D_L	6.410,00	kgf
D_{LR}	1.310,00	kgf
D_{LS}	3.830,00	kgf
D_{LB}	1.270,00	kgf
P_e	0,25	kPa
P_i	0,36	kPa
H_t	139.250,00	kgf
L_r	1,00	kPa
E	0,00	kPa
S	0,00	kPa
F	111.800,00	kgf
P_t	0,36	kPa
P_{WS}	0,77	kPa
P_{WR}	1,44	kPa

Fonte: Autor

A necessidade de ancoragem do tanque é verificada segundo os critérios de API 650 5.11.2.1 para tanques com teto cônico autoportantes. A Figura 27 representa os momentos atuantes no tanque:

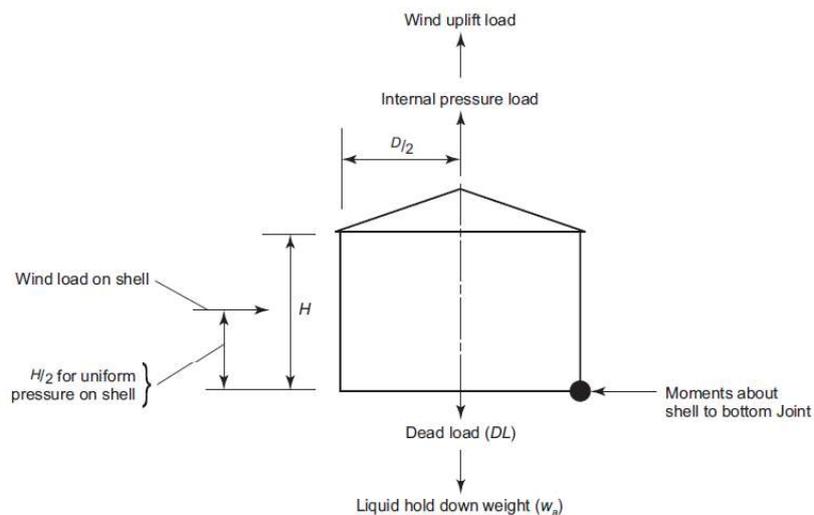


Figura 27: Momentos atuantes em um tanque de armazenamento

Fonte: [14]

Para que o tanque não necessite de ancoragem, todos os critérios abaixo devem ser satisfeitos:

$$0,6M_w + M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1,5} + M_{DLR} \quad (4-9)$$

$$M_w + F_p(M_{Pi}) < \frac{M_{DL} + M_F}{2} + M_{DLR} \quad (4-10)$$

$$M_{ws} + F_p(M_{Pi}) < \frac{M_{DL}}{1,5} + M_{DLR} \quad (4-11)$$

Os valores dos momentos atuantes no tanque em estudo estão apresentados abaixo:

Tabela 14: Momentos atuantes no tanque

Símbolo	Valor	Unidade
M_w	13.034,12	kgf.m
M_{Pi}	2.733,77	kgf.m
M_{DL}	10.972,95	kgf.m
M_{DLR}	3.753,15	kgf.m
M_F	320.307,00	kgf.m
M_{ws}	6.557,43	kgf.m
F_p	0,40	adm.

Fonte: Autor

Como todos os três critérios foram atendidos (equações 4-9 a 4-11), o tanque não necessita de ancoragem.

4.3.4. Pressões críticas

A pressão máxima que o tanque pode ser submetido sem ancoragem (P_{max}) é dada pelo menor valor entre as três equações abaixo (API 650 F.4.2):

$$\frac{\beta}{D^3} \left(\frac{M_{DL}}{1,5} + M_{DLR} - 0,6M_w \right) \quad (4-12)$$

$$\frac{\beta}{F_p \cdot D^3} \left(\frac{M_{DL} + M_F}{2} + M_{DLR} - M_w \right) \quad (4-13)$$

$$\frac{\beta}{F_p \cdot D^3} \left(\frac{M_{DL}}{1,5} + M_{DLR} - M_{ws} \right) \quad (4-14)$$

Resolvidas as equações acima, obteve-se o valor mínimo de 1,39 kPa para a pressão máxima interna do tanque, valor acima do projetado (0,363 kPa).

A pressão de falha do tanque (ruptura da junção entre teto e costado) é calculada aplicando a recomendação de API 650 F.4.3 na equação apresentada em API 650 F.7 (repetidas abaixo):

$$P_{max} \leq 0,8P_f \quad (4-15)$$

$$P_f = 1,6P_{max} - \frac{0,000746D_{LR}}{D^2} \quad (4-16)$$

Logo, para o tanque em estudo, a pressão de falha da junção entre teto e costado é de 1,93 kPa.

5. ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

5.1. Tanque novo

Neste capítulo serão avaliados alguns cenários para verificar a integridade estrutural do tanque através do Método dos Elementos Finitos. O *software* utilizado para análise será o *Ansys Mechanical*. Serão avaliados os seguintes cenários:

- 1) Tanque vazio;
- 2) Tanque contendo máximo volume operacional de S500;
- 3) Tanque durante teste hidrostático;

O modelo 3D do tanque foi obtido através do *SolidWorks* e é exibido na Figura 28:

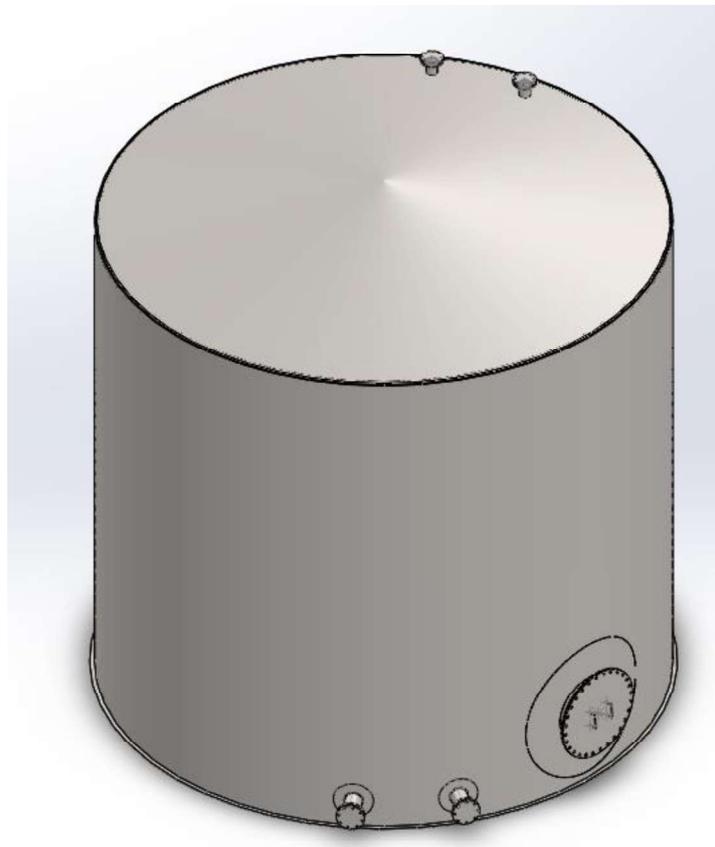


Figura 28: Modelo 3D do tanque de armazenamento

Fonte: Autor

A geometria do tanque foi simplificada de modo a reduzir a quantidade de cálculos a serem realizados. Primeiramente o tanque inteiro foi simulado (fundo, costado e teto) de forma a obter as regiões críticas de cada caso. Após obtenção dos resultados, as simulações serão refeitas utilizando apenas as partes do equipamento de maior interesse para permitir um refinamento de malha local. Para o primeiro conjunto de simulações

(tanque inteiro), deseja-se obter a maior quantidade possível de superfícies de revolução ou extrusão simples, de modo que a criação de malha por “*sweep*” (varredura) possa ser realizada. A geometria do tanque foi modelada no *SpaceClaim*, espécie de CAD do *Ansys*:

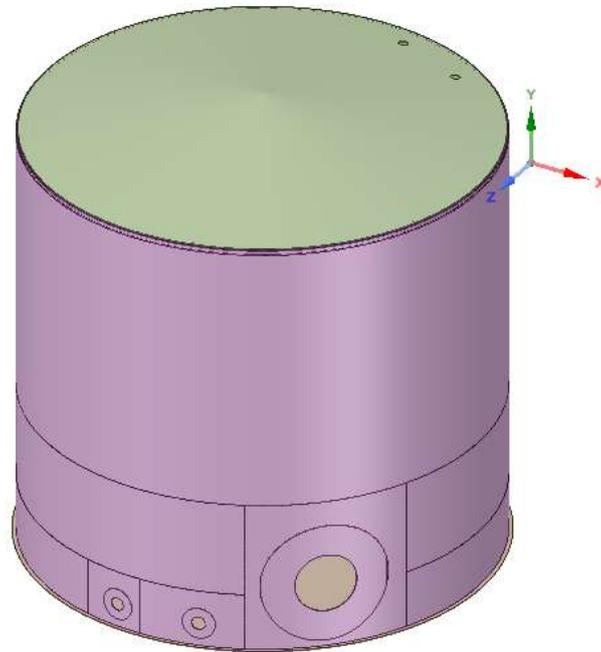


Figura 29: Geometria simplificada do tanque

Fonte: Autor

A Figura 30 exibe o estado de tensões na região crítica (parte superior da boca de visita, região interna do tanque) obtidos para o terceiro caso:

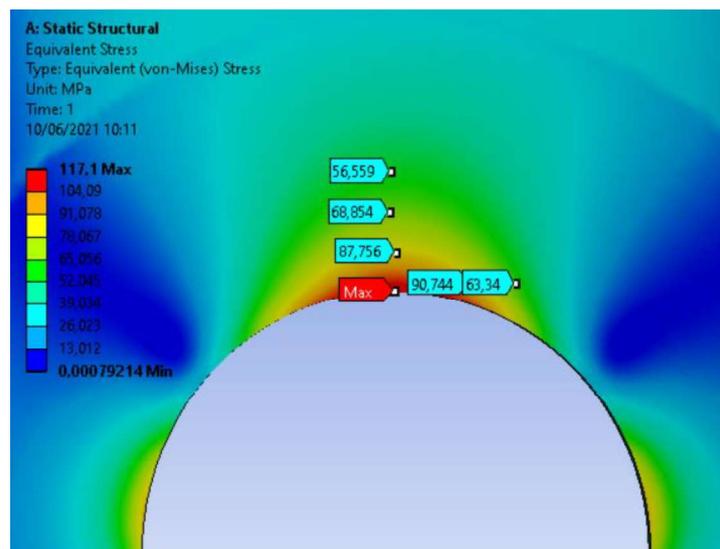


Figura 30: Simulação do caso 3: Pontos de máxima tensão de Mises (simulação do tanque inteiro)

Para simulação do caso 1, os bocais localizados no teto foram retirados de forma a simplificar o número de cálculos a serem realizados. A geometria a ser utilizada no *Mechanical* foi reduzida a $\frac{1}{4}$ utilizando o recurso de simetria do *Design Modeler* do próprio *Ansys*. A Figura 31 exibe o modelo simplificado para análise.

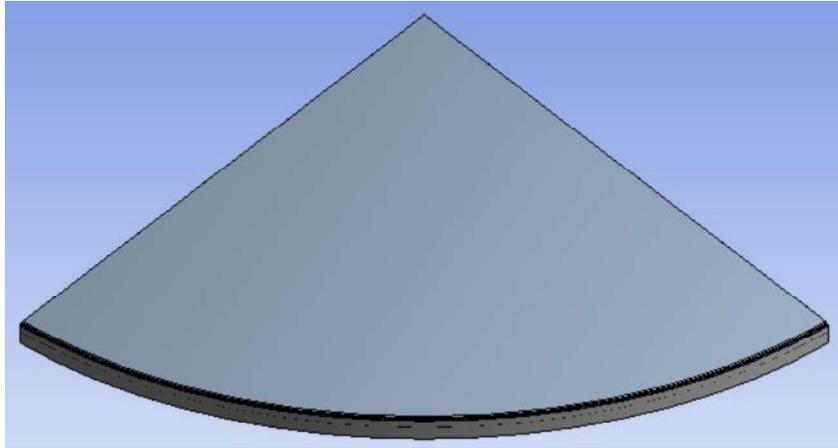


Figura 31: Teto simplificado para simulação do caso 1

Fonte: Autor

A malha utilizada foi de 30mm para o teto e 5mm para a cantoneira/costado. Em ambos os componentes foi utilizado o método “*hex dominant*” para que os elementos tornassem hexaédricos. Por fim, o modelo simulado possui 316.826 nós e 49.200 elementos.

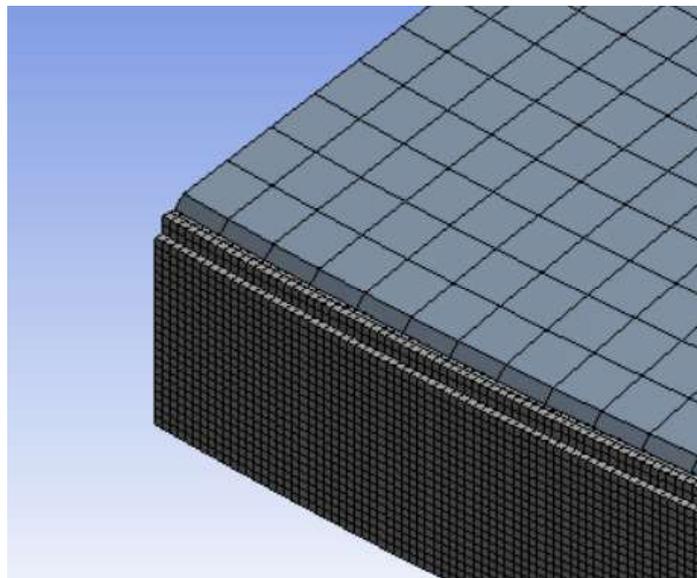


Figura 32: Malha utilizada na simulação do caso 1

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o caso 1 são exibidos abaixo:

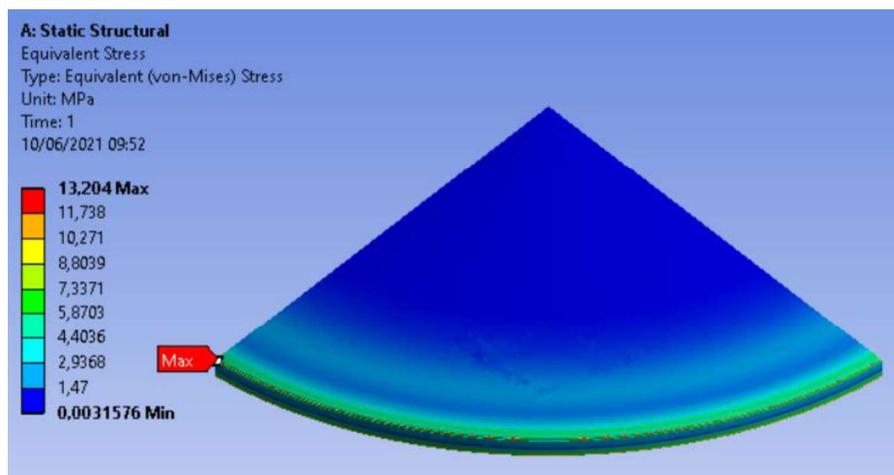


Figura 33: Resultados obtidos para o caso 1

Fonte: Autor

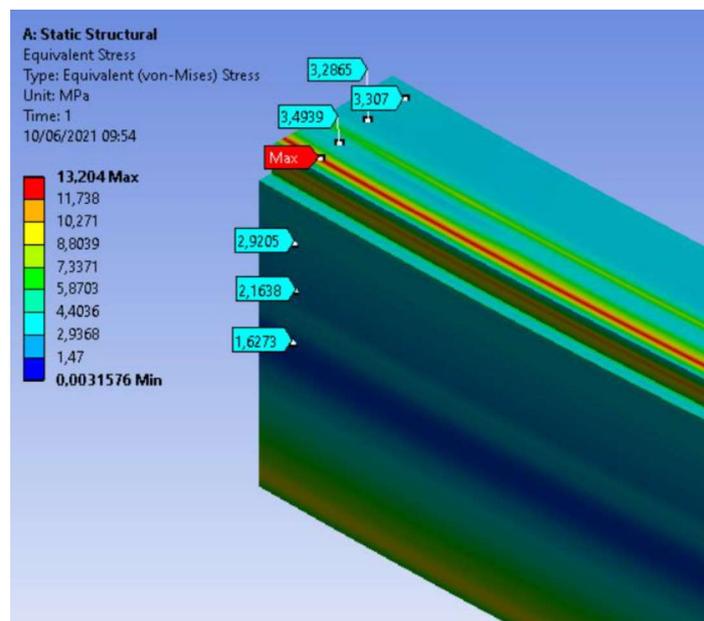


Figura 34: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 1)

Fonte: Autor

Para os casos 2 e 3 o ponto crítico do equipamento está localizado na parte superior da boca de visita (interior do tanque). Portanto, serão simulados apenas o primeiro anel do costado aplicando as condições de contorno pertinentes. Os bocais de movimentação de carga foram retirados do modelo uma vez que não apresentam regiões críticas para o equipamento.

Para os casos 2 e 3 a geometria estudada está exibida na figura abaixo:

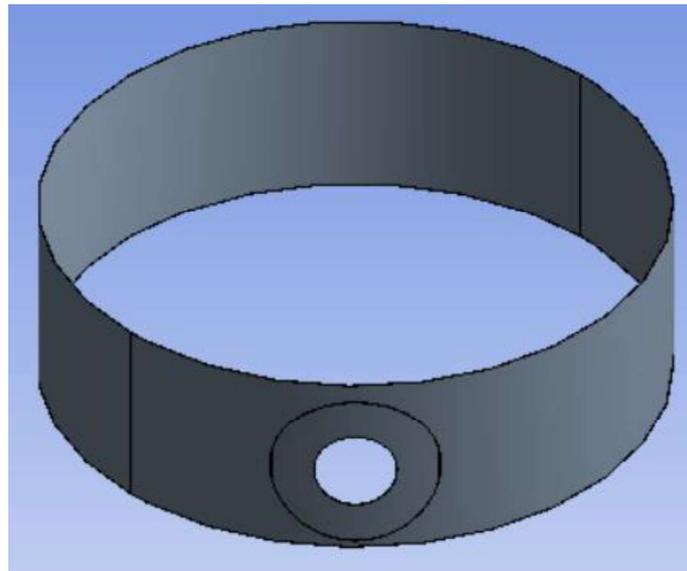


Figura 35: Primeiro anel do costado para simulação

Fonte: Autor

Os carregamentos causados no costado devido ao peso do teto foram inseridos nos modelos a seguir: Uma força de 38.315N e um momento de 36.820N.m. A Figura 36 exibe os carregamentos utilizados nas simulações:

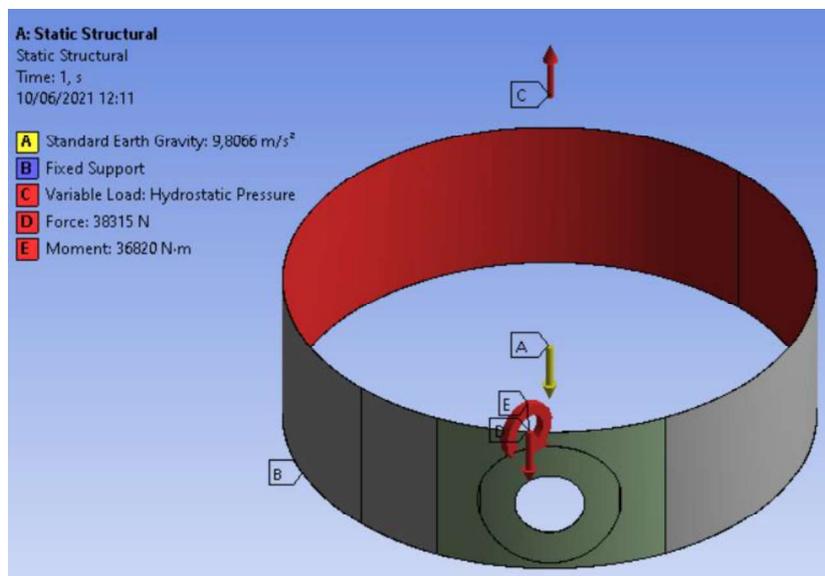


Figura 36: Carregamentos para simulação dos casos 2 e 3

Fonte: Autor

A malha utilizada no modelo foi dividida de acordo com a região: Na região de maior interesse (boca de visita) foi utilizada uma malha uniforme de 20mm juntamente com o

método “*hex dominant*”. Observe que, apesar de não ser mostrada na figura abaixo, a ligação nó com nó entre os elementos é respeitada, uma vez que foram utilizados elementos de segunda ordem para simulação dos casos estudados. Elementos de segunda ordem possuem como característica nós entre suas arestas.

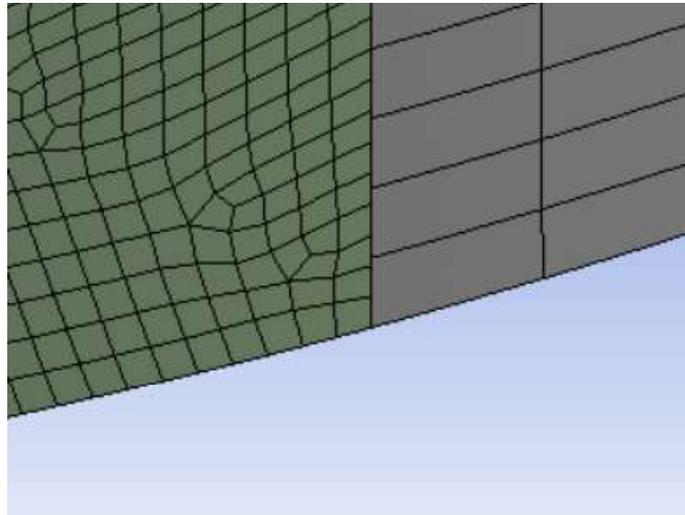


Figura 37: Malha na região da boca de visita (20mm)

Fonte: Autor

Por fim, a malha na região de menor interesse (restante do costado) foi utilizada a malha por varredura (*sweep*) contendo 40 divisões e tamanho de 100mm. O modelo então possui 146.273 nós e 38.454 elementos.

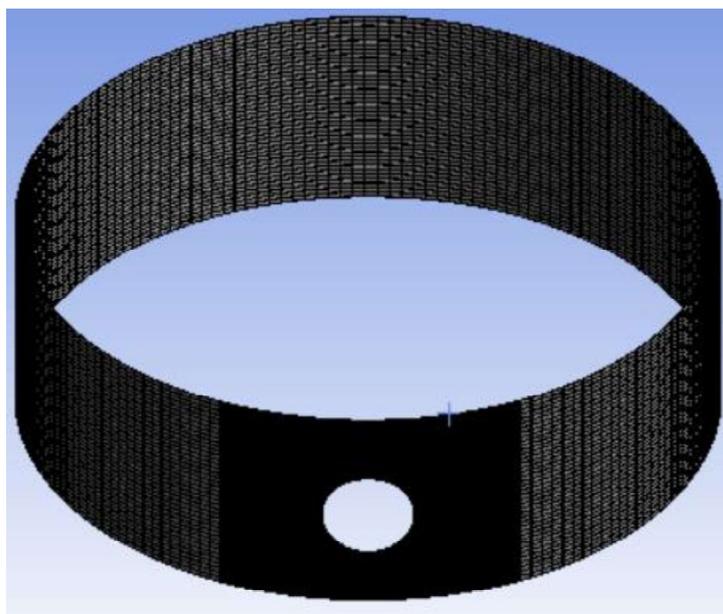


Figura 38: Malha utilizada para os casos 2 e 3

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o caso 2 são exibidos abaixo:

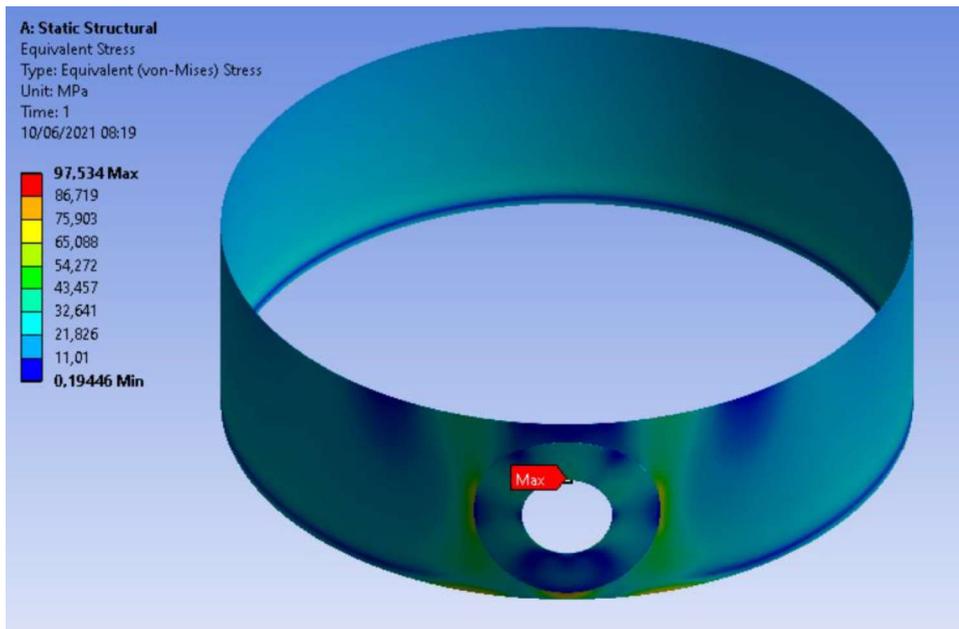


Figura 39: Resultados obtidos para o caso 2

Fonte: Autor

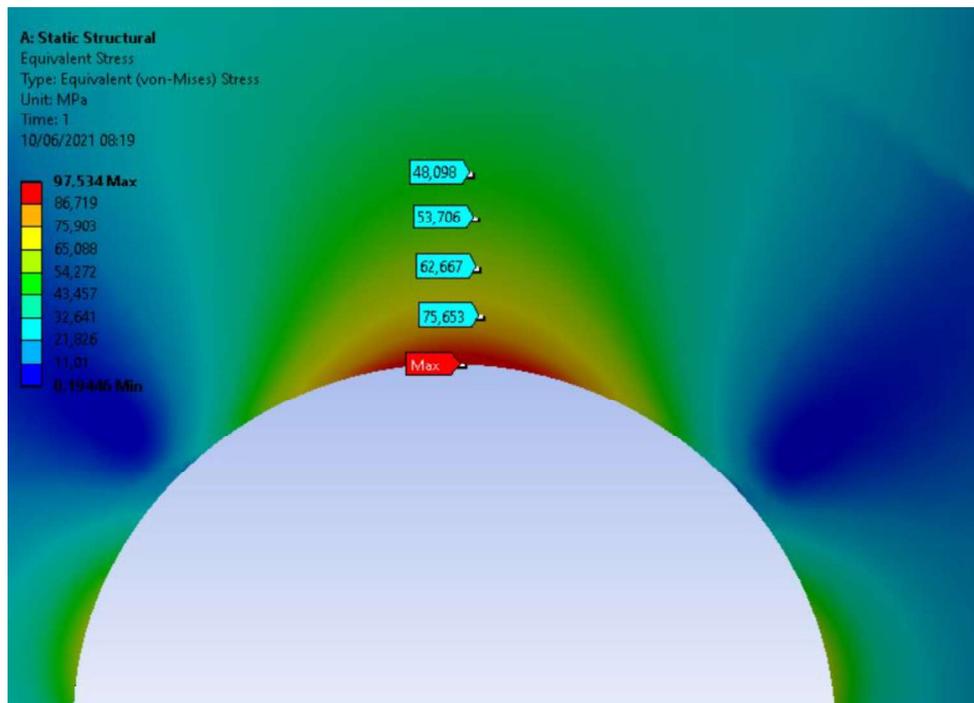


Figura 40: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 2)

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o caso 3 são exibidos abaixo:

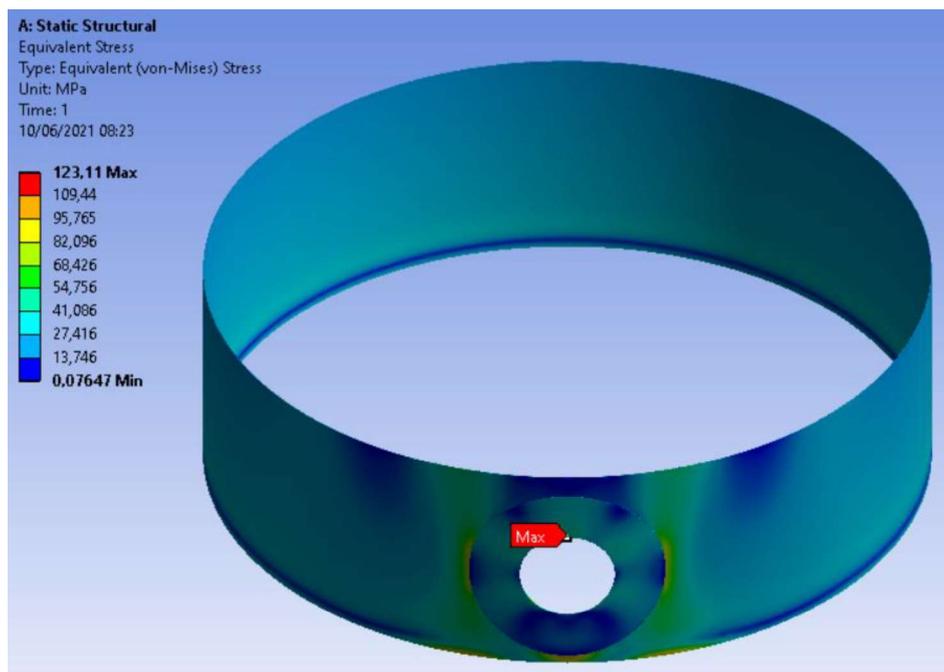


Figura 41: Resultados obtidos para o caso 3

Fonte: Autor

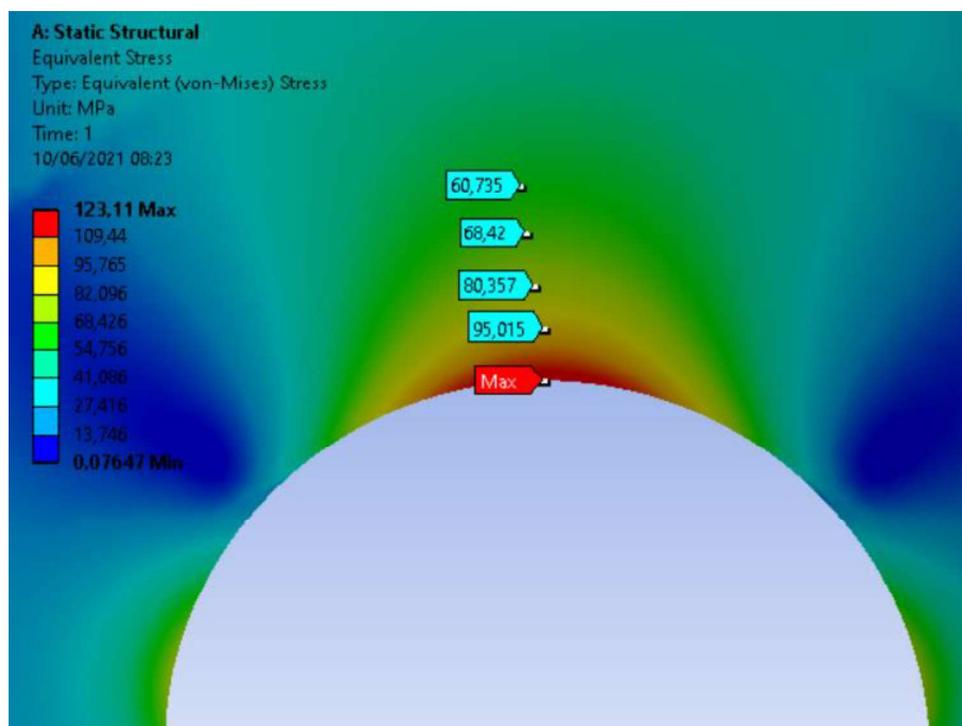


Figura 42: Pontos de máxima tensão de Mises (caso 3)

Fonte: Autor

A Tabela 15 sumariza os resultados obtidos pelas três análises:

Tabela 15: Resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos

Caso estudado	Máxima tensão de Mises	Máxima tensão admissível conforme API 650 Tabela 5.2a	Localização
1	13,20 MPa	137 MPa	Junção teto-costado
2	97,55 MPa	137 MPa	Boca de visita
3	123,11 MPa	154 MPa	Boca de visita

Fonte: Autor

Os picos de tensão obtidos pelas três simulações estão não apenas abaixo do limite de escoamento do material, como também abaixo dos limites de tensão impostos pela API 650. Na condição mais severa de operação normal o fator de segurança do equipamento é de 1,67 para a condição novo.

5.2. Tanque corroído

A fim de aprofundar o presente estudo, serão analisados os efeitos da corrosão no tanque que se mostram relevantes ao decorrer da operação do equipamento (aumento da concentração de tensões devido a perda de material). Segundo [15], algumas das formas de corrosão existentes são:

- Uniforme;
- Por placas;
- Alveolar;
- Puntiforme ou pite (*pitting*);

Nas subseções posteriores deste capítulo serão abordados dois casos de corrosão, sendo o primeiro caso a presença de corrosão uniforme no interior do costado do tanque e o segundo caso a presença de corrosão local na região crítica do tanque (boca de visita). O costado foi escolhido como componente de estudo uma vez que a presença da corrosão neste componente possui grande nocividade para integridade estrutural do tanque. Assim, serão abordadas duas situações distintas do mesmo fenômeno.

5.2.1. Corrosão uniforme

De acordo com API 563 4.3.1.3, a corrosão no costado resulta na perda de metal distribuída uniformemente em grandes seções. A Figura 43 exibe um tanque de armazenamento com corrosão aparente ao longo de seu costado:



Figura 43: Tanque de armazenamento com corrosão aparente no costado

Fonte: [22]

Segundo API 653 4.3.3.1, a espessura mínima permitida para determinado anel do costado considerando o tanque operando continuamente (contabilizadas as reduções de espessura devido a corrosão) é dada por:

$$t_{min,anel} = \frac{2,6(H - 1)DG}{S_{corr}} \quad (5-1)$$

Na equação acima foi considerada eficiência de solda igual a unidade (soldas com penetração total e 100% radiografadas). A Tabela 16 exhibe as espessuras obtidas para os anéis do costado:

Tabela 16: Espessuras mínimas permitidas para o costado (corroído)

Anel	Esp. mín. permitida durante operação [mm]	Esp. mín. permitida durante teste hidrostático [mm]
1	0,76	0,88
2	0,49	0,57
3	0,20	0,23

Fonte: Autor

Observe que todas as espessuras obtidas acima são menores que o limite mínimo permitido por norma (2,54mm conforme API 653 4.3.3.1). Por este motivo, será simulado

apenas o caso do tanque com máxima capacidade operacional de S500 com o costado possuindo 2,54mm de espessura.

Para simulação do modelo corroído, a malha escolhida foi semelhante à utilizada na primeira seção deste Capítulo assim como as condições de contorno e, por isso, não serão exibidas. Foi simulada a situação de volume máximo operacional com S500.

Os resultados obtidos são exibidos nas figuras abaixo:

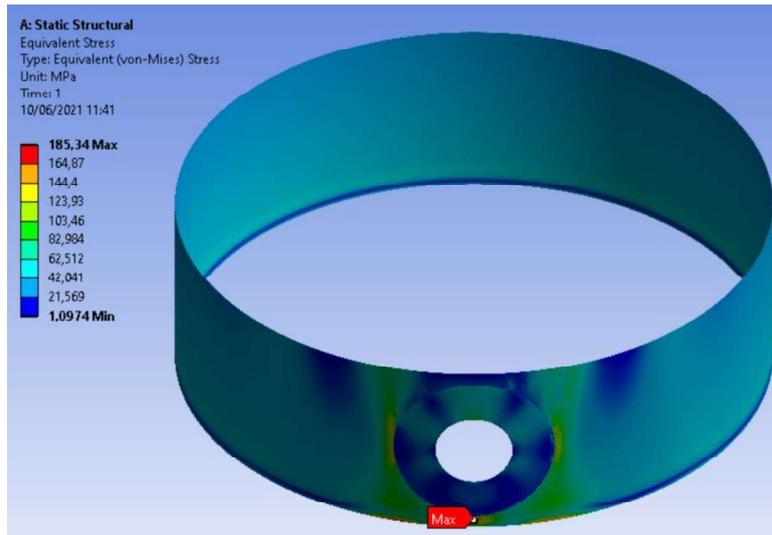


Figura 44: Resultados obtidos com a simulação do tanque corroído

Fonte: Autor

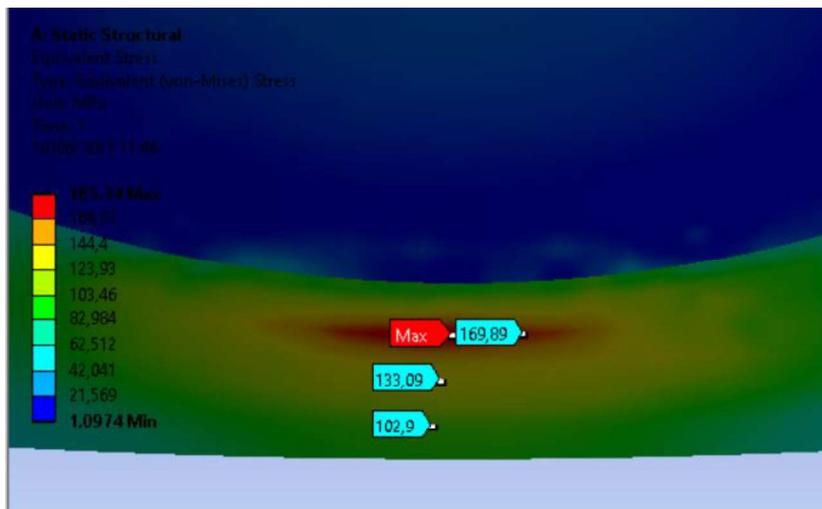


Figura 45: Pontos de máxima tensão de Mises (tanque corroído)

Fonte: Autor

Observa-se que o ponto crítico do tanque mudou de local quando a corrosão se fez presente de forma uniforme no primeiro anel do costado. Isso ocorre devido a boca de

visita ser localizada no ponto mais baixo permitido por norma e, por isso, houve uma concentração de tensões na porção inferior da boca de visita (parte externa do costado) devido à baixa quantidade de material na região. Outra observação que se faz importante é que o pico de tensão para a condição de tanque corroído (185,34 MPa) é 1,9 vezes maior que para a condição novo. Na situação do tanque corroído, o gradiente de tensões é maior que o permitido pela API 650 Tabela 5.2a. Todavia, o escoamento do material não é atingido e o coeficiente de segurança do equipamento na condição de primeiro anel do costado corroído é de 1,06.

5.2.2. Corrosão local

O estudo da corrosão local presente no tanque teve como motivação os estudos realizados por *SUN et. al* [24] e *HIDELBRANDT* [24] e terá sua análise dividida em duas partes: a primeira parte será pautada na presença de uma cratera (corrosão por placas) na porção superior da boca de visita, possuindo a profundidade máxima permitida pela API 653 e desconsiderando o limitante mínimo de 2,54mm de espessura no costado e será analisada a variação do gradiente de tensões em função do crescimento do diâmetro da cratera (mantendo-se constante a profundidade do defeito). Na segunda parte, será observado o aumento do gradiente de tensões no tanque utilizando o mesmo diâmetro de cratera obtido para o caso de falha do tanque na primeira análise, porém com diferentes profundidades. Desta forma, de uma maneira simples serão analisados a influência do diâmetro e da profundidade em um defeito localizado no costado do tanque.

Para análise de ambos os casos, a geometria do tanque foi reduzida à região de interesse, sendo ela a boca de visita e suas adjacências (Figura 46):

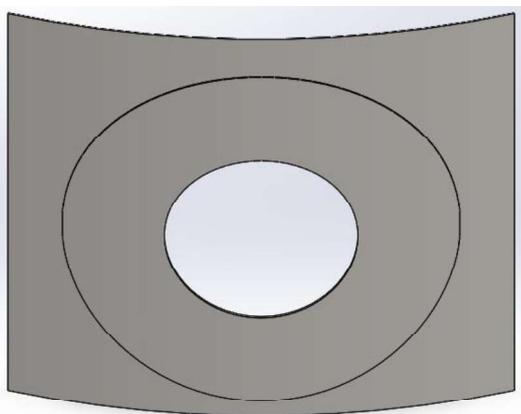


Figura 46: Região analisada, presença de corrosão local

Fonte: Autor

Na região interna, foi criado um semicírculo logo acima da boca de visita (Figura 47) cujo diâmetro e profundidade possam ser facilmente modificados utilizando o *SolidWorks*. A geometria estudada foi reduzida em 50% devido à sua simetria vertical. Novamente foi utilizado o *Design Modeler* para utilização do recurso de simetria. Foi utilizada uma malha uniforme possuindo 10mm de tamanho ao longo de toda a geometria.

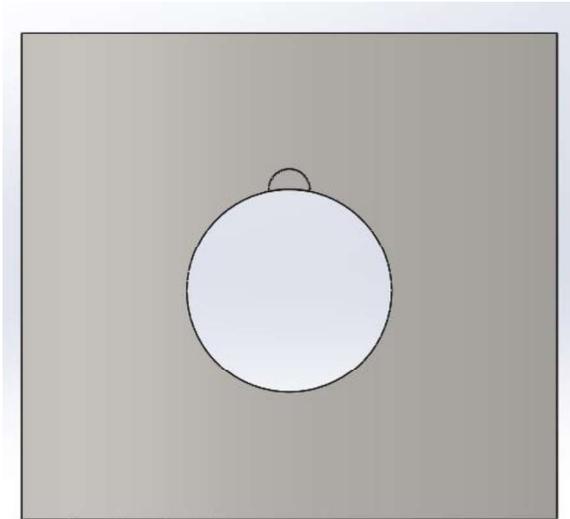


Figura 47: Representação da corrosão por placas

Fonte: Autor

A fim de simular apenas a influência da pressão hidrostática no estado de tensões da região em estudo, o peso dos anéis 2 e 3 do costado e do teto, assim como o momento do teto em relação à boca de visita foram desconsiderados. A pressão hidrostática em questão foi calculada considerando o tanque com máximo volume operacional de S500 (Figura 48).

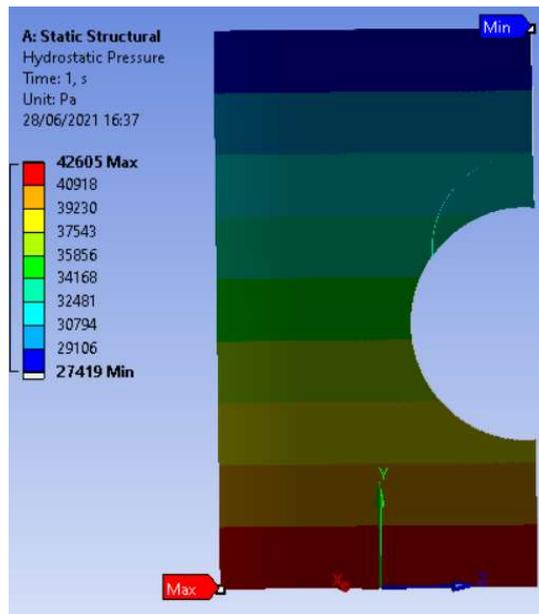


Figura 48: Pressão hidrostática (tanque em operação)

Fonte: Autor

Foram realizadas seis simulações com objetivo de avaliar o crescimento do pico de tensões de acordo com o diâmetro da cratera. Os resultados são exibidos no gráfico abaixo:

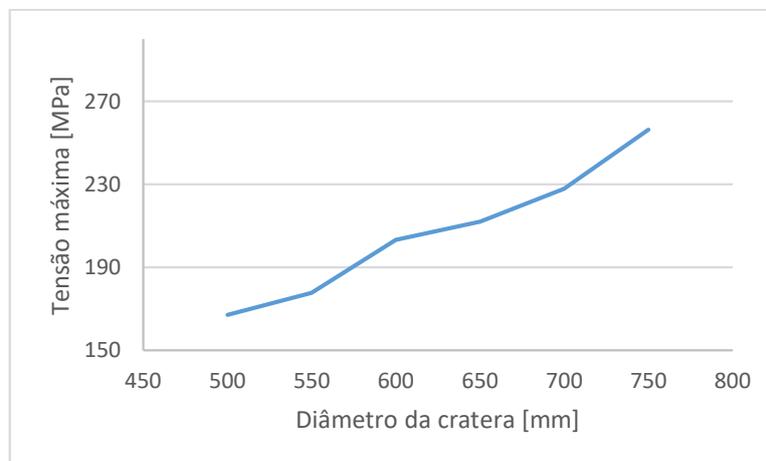


Figura 49: Influência do diâmetro da cratera no gradiente de tensões

Fonte: Autor

Observando o gráfico acima, conclui-se que o escoamento do material (205 MPa) é atingido quando a cratera possui aproximadamente 610mm de diâmetro. Para a segunda análise, será analisada a influência da profundidade do defeito no gradiente de tensões da região de interesse. Portanto, serão simuladas crateras com 610mm de diâmetro e profundidades variando até atingir o valor mínimo permitido pela norma (0,76mm). A

profundidade inicial estudada será de 1mm, com incrementos de 2mm em cada simulação. Por fim, será simulado o caso da cratera cuja profundidade é de 9,24mm. Novamente, foram realizadas seis simulações e os resultados são exibidos no gráfico abaixo:

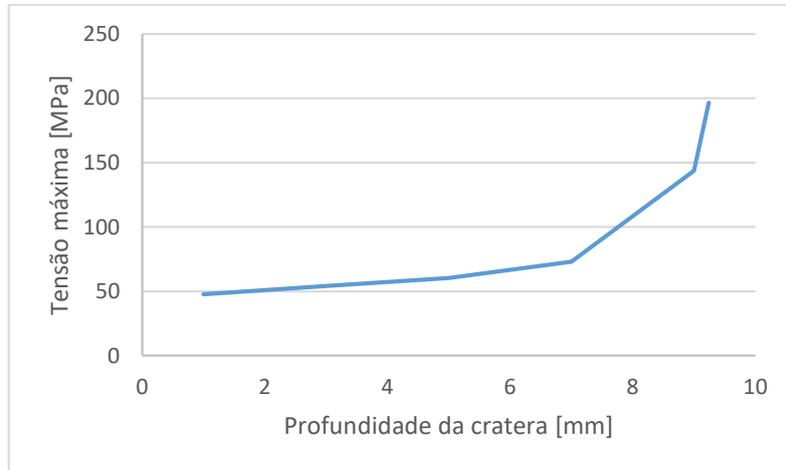


Figura 50: Influência da profundidade da cratera no gradiente de tensões

Fonte: Autor

Ao término das doze simulações e posterior construção dos gráficos acima é possível diferenciar a maneira que cada parâmetro geométrico (diâmetro e profundidade) influencia no estado de tensões da região analisada. Em relação ao diâmetro, observou-se um comportamento aproximadamente linear no gráfico ao passo que em relação a profundidade, notou-se um comportamento exponencial do aumento do valor máximo de tensão.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um tanque de armazenamento com teto fixo para estocagem de diesel S500 seguindo as recomendações de API 650 – *Welded Tanks for Oil Storage*.

Primeiramente, foram apresentados os tipos de tanque assim como os componentes principais e secundários necessários para sua operação.

Em um segundo momento, foram projetados e desenhados os principais componentes do tanque, sendo eles teto, costado, fundo e bocais. Foram também calculadas as pressões de falha do tanque, assim como a necessidade de ancoragem do tanque.

Posteriormente, a integridade estrutural do tanque foi verificada através do Método dos Elementos Finitos e os resultados obtidos foram comparados com os valores permitidos pela API 650. Foram simulados três casos: o primeiro sendo o tanque vazio; o segundo caso a situação do tanque operando como volume máximo de S500 e, por fim, foi simulada a realização de um teste hidrostático no tanque.

Por fim, para finalizar o estudo em questão, a presença de corrosão no costado do tanque foi estudada. Foram simulados dois casos distintos, sendo eles a perda de material no costado do tanque como um todo (corrosão uniforme) e a perda localizada de material (corrosão local). A motivação para estudo do primeiro caso veio da recomendação de API 653 para espessura mínima permitida em determinado anel do costado. A justificativa para estudo do segundo caso é a possibilidade de deformação plástica do costado em detrimento de um defeito local próximo ao ponto crítico do tanque (boca de visita).

As simulações mostraram resultados satisfatórios, especialmente no que tange à influência da modificação dos parâmetros geométricos (diâmetro e profundidade) que os defeitos de corrosão causam na integridade estrutural do tanque. Observou-se um comportamento linear do pico de tensões com a variação do diâmetro do defeito e um comportamento exponencial pôde ser observado quando a profundidade teve variação. Para a situação de corrosão uniforme, verificou-se que mesmo com o primeiro anel do costado corroído possuindo espessura mínima permitida pela norma (API 653) e os demais anéis na condição novo, o escoamento não foi atingido, comprovando a relevância das normas API no que tange à tanques de armazenamento.

Para trabalhos futuros, sugere-se o dimensionamento dos componentes considerados secundários do ponto de vista do projeto mecânico porém essenciais para operação segura do tanque de armazenamento, são eles: bocal de *overflow*, escadas, guarda-corpo, sistema de combate a incêndio, fundação, entre outros. Recomenda-se também a especificação dos instrumentos a serem instalados no tanque. Em relação a corrosão, sugere-se a análise de sua presença nos outros componentes do tanque, especialmente no interior dos bocais e no fundo do tanque.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Boletim de Abastecimento em Números, Ano 14, n. 63. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/abastecimento/63/boletim-n63.pdf>> Acessado em: 22 fev, 2021.
- [2] ESTEVES, Heloisa Borges B. BICALHO, Lúcia N. **Aspectos Técnicos-Econômicos da Logística da Distribuição de Combustíveis no Brasil**. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008.
- [3] DEPOSIT PHOTOS. **Tanque de Armazenamento Químico e Caminhão-Tanque**. Disponível em <<https://br.depositphotos.com/stock-photos/fuel-plant.html?offset=200&filter=all&qview=20310041>> Acessado em 14, jul 2021.
- [4] BARROS, Stenio Monteiro de. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro. Universidade Petrobras. Março de 2010.
- [5] PULLARCOT, Sunil. **Above Ground Storage Tanks – Practical Guide to Construction, Inspection, and Testing**. Boca Raton. CRC Press. 2015.
- [6] EMERSON. **The Engineer’s Guide to Tank Gauging**. Disponível em <<https://www.emerson.com/documents/automation/-engineer-s-guide-to-tank-gauging-en-175314.pdf>> Acessado em: 22 fev, 2021.
- [7] INST TOOLS. **Breather Valve**. Disponível em <<https://instrumentationtools.com/breather-valve-working-principle/>> Acessado em: 22 fev, 2021.
- [8] DEPOSIT PHOTOS. **Grande Tanque de Óleo com Telhado Flutuante**. Disponível em <<https://br.depositphotos.com/12186100/stock-photo-large-oil-tank-with-floating.html>> Acessado em: 14 jul, 2021.
- [9] PETROWIKI. **Internal Pan Floating-Roof Tank**. Disponível em <https://petrowiki.spe.org/Floating_roof_tanks> Acessado em: 22 fev, 2021.
- [10] FICHA DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS. **Óleo Diesel S500 Adit. Petrobras Grid**. Disponível em <<https://www.br.com.br/wcm/connect/11b37d2a-a690-453d-9602-7c7d594da448/fispq-comb-oleodiesel-auto-oleodiesel-b-s500-petrobras>>

[grid.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mbfxV48&CVID=mbfxV48](#) > Acessado em 22 fev, 2021.

[11] N-270: 2010. Norma Petrobras - **Projeto de Tanque Atmosférico**. Revisão G. Julho de 2020.

[12] BROWNELL, Lloyd E. YOUNG, Edwing H. **Process Equipment Design**. New York. John Willey & Sons Inc. 1959.

[13] NBR-11889: **Bobinas e Chapas Grossas de Aço-Carbono e de Aço de Baixa Liga e Alta Resistência - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 2013.

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

[15] GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1982.

[16] PIPEDATA ONLINE. **2” Slip-on Flange 150#**. Disponível em <
https://www.pipedata.com/cgi-bin/WebApp/Flan/Flan2/Flan2_1/Flan2_150_RF_100009.pl> Acessado em 26 abr, 2021.

[17] PIPEDATA ONLINE. **6” Slip-on Flange 150#**. Disponível em <
https://www.pipedata.com/cgi-bin/WebApp/Flan/Flan2/Flan2_1/Flan2_150_RF_1000015.pl?> Acessado em 26 abr, 2021.

[18] LU, Zhi. **Evaluation of Design Criteria for Storage Tanks with Frangible Roof Joints**. 1994.

[19] OFFSHORE TIGERS. **Frangible Roof**. Disponível em <
<http://offshoretigers.blogspot.com/2010/02/frangible-roof.html>> Acessado em 26 abr, 2021.

[20] BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8ª Ed. Nova Iorque. Mc Graw Hill. 2011.

[21] API 653: 2014. **Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction**. 15th Edition. November 2014.

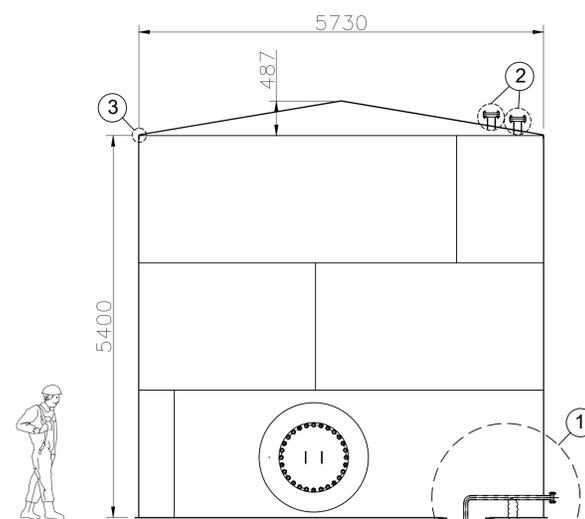
[22] DEPOSIT PHOTOS. **Tanques Enferrujados de Altos Cinzento, na Antiga Fábrica.** Disponível em < <https://br.depositphotos.com/22551325/stock-photo-rusted-gray-tall-tanks-on.html> > Acessado em 14, jul 2021.

[23] SUN, Jialin CHENG, Y. Frank. **Assessment by finite element modeling of the interaction of multiple corrosion defects and the effect on failure pressure of corroded pipelines.** Engineering Structures Journal, 2018.

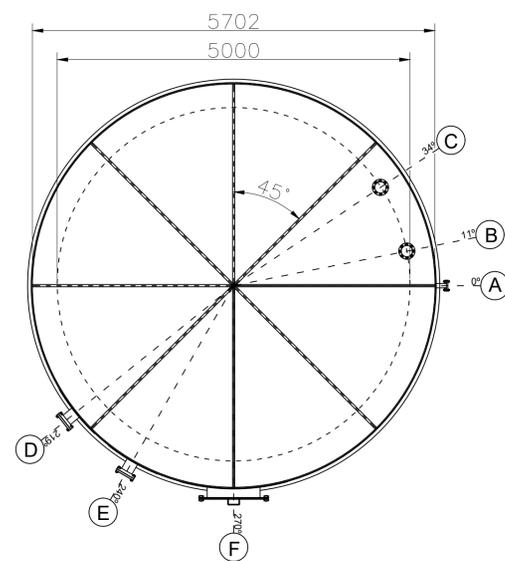
[24] HIDELBRANDT, Clara Costa. **Estudo da Influência de Parâmetros Geométricos na Pressão de Falha de Dutos Corroídos Utilizando o Método dos Elementos Finitos.** Maio, 2021.

8. ANEXOS

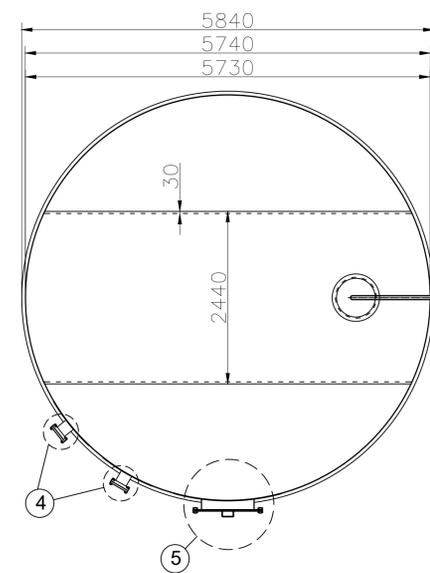
Desenho 2D do tanque e seus acessórios (realizados no *AutoCAD*)



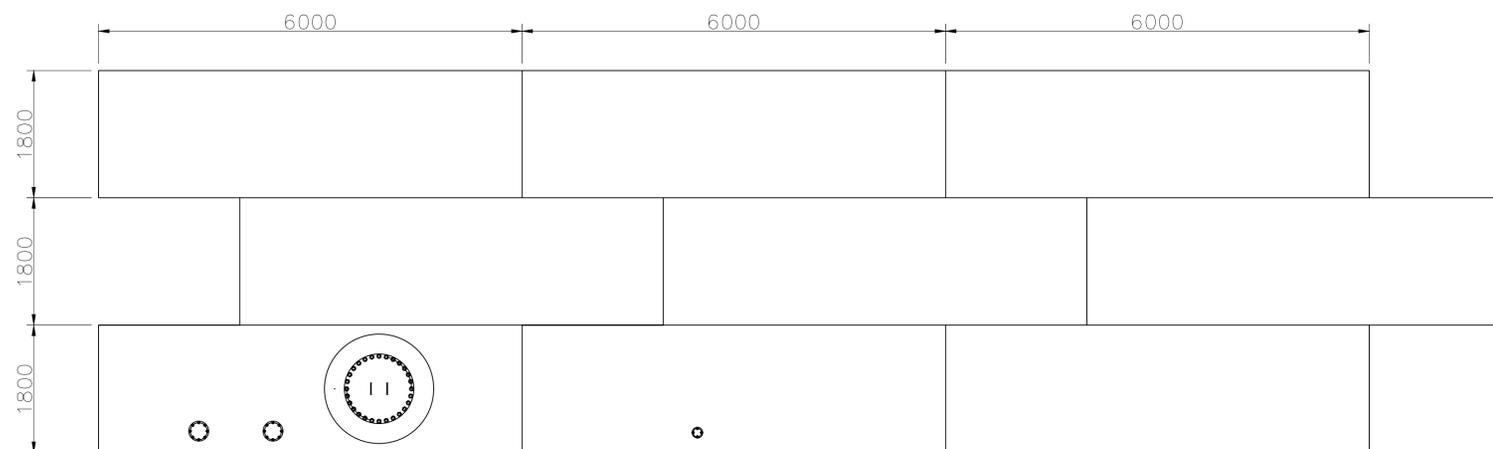
DIMENSÕES PRINCIPAIS



VISTA DE PLANTA



FUNDO DO TANQUE



DISPOSIÇÃO DAS CHAPAS DO COSTADO

NOTAS GERAIS

- 1) DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2) AJUSTES EM CAMPO SÃO PERMITIDOS, CASO NECESSÁRIOS.
- 3) ESPECIFICAÇÕES DE SOLDAGEM NÃO REPRESENTADAS.
- 4) BOCAL PARA VENTILAÇÃO NÃO REPRESENTADO. O MESMO DEVERÁ SER ESPECIFICADO CONFORME API 2000.
- 5) FUNDAÇÃO, ESCADA, GUARDA-CORPO, ATERRAMENTO E SISTEMA DE COMBATE À INCÊNDIO NÃO REPRESENTADOS.
- 6) DETALHES DOS ACESSÓRIOS PRESENTES NA FOLHA 2.
- 7) ALTURAS DOS BOCAIS MEDIDAS EM RELAÇÃO A LINHA DE CENTRO.
- 8) ALTURA DA BOCA DE VISITA: 900mm
- 9) ALTURA DO BOCAL DE DRENAGEM: 280mm
- 10) ALTURA DOS BOCAIS DE MOVIMENTAÇÃO DE CARGA: 300mm
- 11) O PESO DOS COMPONENTES FORAM LEVADOS EM CONTA NA TABELA DE DADOS.

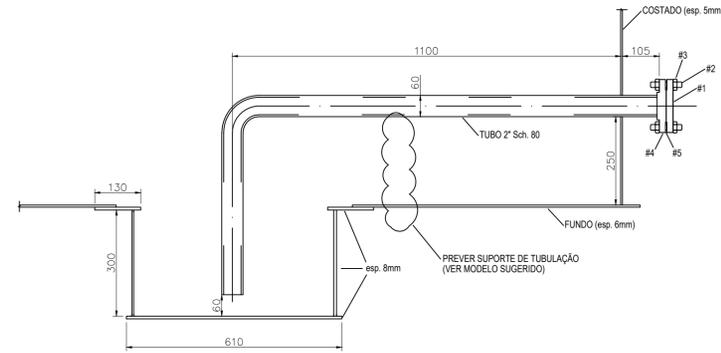
DADOS		TABELA DE BOCAIS		
		DESCRIÇÃO	TAMANHO	POSIÇÃO
FLUIDO ARMAZENADO: DIESEL S-500				
DIÂMETRO INTERNO:	5,73m	A DRENAGEM	2" Sch. 80	0°
ALTURA:	5,40m	B MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	4" Sch. 40	11°
PRESSÃO INTERNA DE PROJETO:	0,363 kPa	C MEDIÇÃO DE NÍVEL	4" Sch. 40	34°
TEMPERATURA DE PROJETO:	40°C	D ENTRADA DE FLUIDO	6" Sch. 80	219°
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO:	30°C	E SAÍDA DE FLUIDO	6" Sch. 80	240°
VOLUME MÁXIMO OPERACIONAL:	130m ³	F BOCA DE VISITA	Ø750 mm	270°
VOLUME DURANTE TESTE HIDROSTÁTICO:	139,25m ³			
VOLUME MORTO:	5,85m ³			
PESO DO TETO:	1310 kgf			
PESO DO COSTADO:	3830 kgf			
PESO DO FUNDO:	1270 kgf			
PESO DURANTE TESTE HIDROSTÁTICO:	145660 kgf			

ESCOLA POLITÉCNICA DA UFRJ

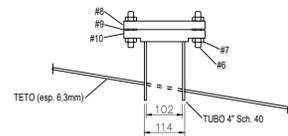
PROJETO E ANÁLISE DE TENSÕES DEVIDO À CORROSÃO EM UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO API 650 PARA O DIESEL S500

TANQUE API 650, DIMENSÕES PRINCIPAIS JOÃO RAFAEL LIMA AMARAL

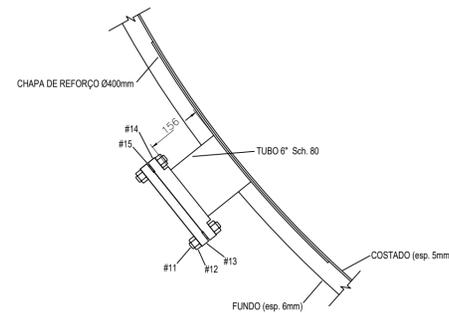
02/07/2021 ESCALA 1:50 Rev. 4 FOLHA 1 DE 2



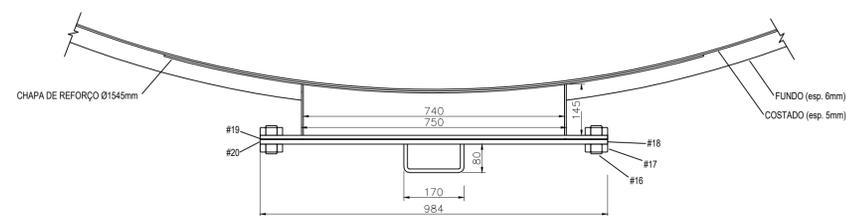
DETALHE 1
Escala 1:10



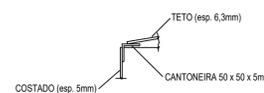
DETALHE 2
Escala 1:10



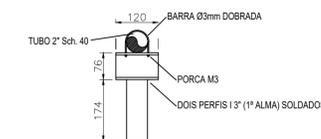
DETALHE 3
Escala 1:10



DETALHE 4 (NOTA 6)
Escala 1:10



DETALHE 5
Escala 1:10



SUPORTE DE TUBULAÇÃO
(modelo sugerido)
Escala 1:10

LISTA DE ACESSÓRIOS

ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	MATERIAL
1	FLANGE CEGO ASME B16.5 2" 150#, FR	1	ASTM A105
2	PARAFUSO ESTOJO 5/8" x 3 1/2"	4	ASTM A193 Gr. B7
3	PORCA 2" SEXTAVADA SÉRIE PESADA	8	ASTM A194 Gr. 2H
4	FLANGE SOBREPOSTO ASME B16.5 2" 150#, FR	1	ASTM A105
5	JUNTA CIRCULAR FLANGE 2", ESPIRALADA, ASME B16.20, esp. 4,4mm	1	AISI 316 COM ENCHIMENTO DE GRAFITE FLEXÍVEL, ANEL DE CENTRALIZAÇÃO EXTERNO EM AÇO CARBONO E INTERNO EM AISI 316
6	PARAFUSO ESTOJO 5/8" x 4"	16	ASTM A193 Gr. B7
7	PORCA 5/8" SEXTAVADA SÉRIE PESADA	32	ASTM A194 Gr. 2H
8	FLANGE CEGO ASME B16.5 4" 150#, FR	2	ASTM A105
9	JUNTA CIRCULAR FLANGE 4", ESPIRALADA, ASME B16.20, esp. 4,4mm	2	AISI 316 COM ENCHIMENTO DE GRAFITE FLEXÍVEL, ANEL DE CENTRALIZAÇÃO EXTERNO EM AÇO CARBONO E INTERNO EM AISI 316
10	FLANGE SOBREPOSTO ASME B16.5 4", 150#, FR	2	ASTM A105
11	PARAFUSO ESTOJO 3/4" x 4"	16	ASTM A193 Gr. B7
12	PORCA 3/4" SEXTAVADA SÉRIE PESADA	32	ASTM A194 Gr. 2H
13	FLANGE CEGO ASME B16.5 6" 150#, FR	2	ASTM A105
14	FLANGE SOBREPOSTO ASME B16.5 6" 150#, FR	2	ASTM A105
15	JUNTA CIRCULAR FLANGE 6", ESPIRALADA, ASME B16.20, esp. 4,4mm	2	AISI 316 COM ENCHIMENTO DE GRAFITE FLEXÍVEL, ANEL DE CENTRALIZAÇÃO EXTERNO EM AÇO CARBONO E INTERNO EM AISI 316
16	PARAFUSO ESTOJO 1 1/4" x 80mm	28	ASTM A193 Gr. B7
17	PORCA 1 1/4" SEXTAVADA SÉRIE PESADA	56	ASTM A194 Gr. 2H
18	FLANGE CEGO Ø750mm (NOTA 6)	1	ASTM A105
19	JUNTA CIRCULAR FLANGE Ø750mm, ESPIRALADA, ASME B16.20, esp. 4,4mm	1	AISI 316 COM ENCHIMENTO DE GRAFITE FLEXÍVEL, ANEL DE CENTRALIZAÇÃO EXTERNO EM AÇO CARBONO E INTERNO EM AISI 316
20	FLANGE SOBREPOSTO Ø750mm (NOTA 6)	1	ASTM A105

NOTAS GERAIS

- 1) DIMENSÕES EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
- 2) AJUSTES EM CAMPO SÃO PERMITIDOS, CASO NECESSÁRIOS.
- 3) ESPECIFICAÇÕES DE SOLDAGEM NÃO REPRESENTADAS.
- 4) DEMAIS DETALHES DO TANQUE E DOS ACESSÓRIOS PRESENTES NA FOLHA 1.
- 5) AS CHAPAS DE REFORÇO DEVEM SER DOBRADAS DE TAL MODO QUE ACOMPANHEM A CURVATURA DO COSTADO.
- 6) DETALHES CONSTRUTIVOS PRESENTES EM API 650 TABELAS 5.3a À 5.7a.
- 7) OS MATERIAIS ESCOLHIDOS FORAM BASEADOS EM API 650 E PETROBRAS N-76.
- 8) AS CHAPAS DE REFORÇO DOS BOCAIS POSSUEM ESPESSURA DE 5mm.

LEGENDA

FR: FACE COM RESSALTO

ESCOLA POLITÉCNICA DA UFRJ

PROJETO E ANÁLISE DE TENSÕES DEVIDO À CORROSÃO EM UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO API 650 PARA O DIESEL S500

TANQUE API 650, ACESSÓRIOS

JOÃO RAFAEL LIMA AMARAL

02/07/2021

ESCALA: INDICADA

Rev. 4

FOLHA 2 DE 2