

ARMANDO KENZO SATO

**PROJETO DE UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO COM
TETO FLUTUANTE PARA ESTOCAGEM DE GASOLINA**

Armando Kenzo Sato

**Projeto De Um Tanque De Armazenamento Atmosférico Com Teto Flutuante Para
Estocagem De Gasolina**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

S253p

Sato, Armando Kenzo

Projeto de um tanque de armazenamento atmosférico com teto flutuante para estocagem de gasolina / Armando Kenzo Sato – Guaratinguetá, 2015. 69 f. : il.

Bibliografia : f. 66-67

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

1. Tanques 2. Gasolina – armazenamento 3. Método dos elementos finitos I. Título

CDU 624.953

Armando Kenzo Sato

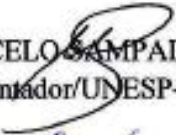
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Orientador/UNESP-FEG

Prof. Me. FABRÍCIO VIEIRA SILVA

UNESP-FEG

Profª. Me. CAMILLA GANDINE GONÇALVES

UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

Armando Kenzo Sato

NASCIMENTO	22.04.1988 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Armando Tsuyoshi Sato Elisa Arai Sato
2004/2006	Curso Técnico Técnico em Mecânica – Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá UNESP
2007/2015	Curso de Graduação em Engenharia Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá UNESP

DEDICATÓRIA

de modo especial, à minha noiva Caroline por seu apoio incondicional, oração e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, fonte da vida e da graça. Que me deu a inteligência, as oportunidades, minha família e meus amigos.

aos meus pais *Armando* e *Elisa* por me criar, sempre apoiar, acreditar e serem exemplos na minha vida.

à minha noiva *Caroline* por sempre estar ao meu lado e ter paciência em dividir seu tempo com meus estudos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* por sua dedicação, profissionalismo e pela oportunidade de ajuda a desenvolver meu conhecimento.

ao meu irmão *Fernando*, meus primos, meus amigos pessoais e meus amigos da faculdade que de inúmeras formas, sempre me ajudaram nos estudos e me incentivaram nesta jornada.

à família *Arai* pelos conselhos, conversas, ajuda e oração em todos os momentos desta caminhada.

à Confab Equipamentos, pela oportunidade de trabalhar e aprender por todos esses anos, aos amigos de lá e em particular ao *Sr. Rubens de Barros*, pela transferência de conhecimento e constante incentivo ao crescimento, e ao *Eng. Rogério de Paula*, também pelo incentivo e grande apoio aos meus estudos.

“Os grandes feitos são conseguidos não pela força, mas pela perseverança.”

Samuel Johnson

SATO, A. K. **Projeto de um tanque de armazenamento atmosférico com teto flutuante para estocagem de gasolina**. 2015. 69 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Neste trabalho abordam-se as principais etapas do projeto de um tanque de armazenamento atmosférico de teto flutuante. Ressaltam-se os cálculos do fundo, do costado e do teto flutuante, discutindo-se suas etapas e condições, tomando como base as normas técnicas aplicáveis para projeto. Os tanques de armazenamento são equipamentos estáticos que trabalham sob baixas pressões e tem uma importância essencial para o funcionamento de uma planta de processo. Tem-se como objetivo obter as dimensões e materiais de cada componente do tanque através dos cálculos e comprová-los com resultados obtidos através de simulação numérica por elementos finitos com auxílio do *software Autodesk Inventor*, assim consolidando o projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Tanque de armazenamento. Teto flutuante. Equipamentos estáticos. API-650. N-270.

SATO, A. K. **Project of a atmospheric storage tank with floating roof to gasoline stocking**. 2015. 69 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

In this paper are discussed the main project stages of an atmospheric storage tank with floating roof. It emphasizes the calculations of the bottom, the shell and the floating roof, discussing its stages and conditions, based on the technical standards of the project. The storage tanks are static equipment working under low pressure and has an essential importance for the operation of a process plant. This paper has the purpose of obtaining the dimensions and materials of each component of the tank through the calculations and prove them with results obtained by numerical simulation by finite elements with the help of Autodesk Inventor software, consolidating the project.

KEYWORDS: Storage tank. Floating roof. Static equipments. API-650. N-270.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tanques de armazenamento da refinaria Abreu e Lima (RNEST).....	17
Figura 2	Incêndio que atingiu tanques do terminal da Ultracargo em Santos	19
Figura 3	Corpo de bombeiros usou espuma especial para conter chamas.....	19
Figura 4	Peixes mortos, contaminados pela água utilizada na extinção do incêndio.....	20
Figura 5	Principais componentes de um tanque de armazenamento.....	21
Figura 6	Vapor de combustível em um tanque de teto fixo.....	23
Figura 7	Tanque de teto flutuante tipo Pontão Convencional.....	24
Figura 8	Disposição típica do fundo com chapas anulares.....	29
Figura 9	Fratura frágil em tanque de armazenamento.....	36
Figura 10	Soldas nas chapas do costado.....	37
Figura 11	Teto flutuante tipo Pontão em teste com membrana alagada.....	39
Figura 12	Suporte para flutuador do teto Pontão.....	41
Figura 13	Dimensões do Pontão [mm].....	56
Figura 14	Vista isométrica do tanque modelado.....	59
Figura 15	Malha e nós do costado.....	60
Figura 16	Análise Von Mises no costado.....	61
Figura 17	Malha e nós do suporte.....	62
Figura 18	Análise Von Mises no suporte.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Espessura mínima das chapas anulares.....	30
Tabela 2	Requisitos gerais para o projeto do costado.....	31
Tabela 3	Tensões admissíveis de materiais permitidos para chapas do costado.....	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Recomendações de tipos usuais de tanques.....	22
Quadro 2	Especificações de chapas pelo API 650.....	27
Quadro 3	Grupos dos materiais.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AISC = *American Institute of Steel Construction*;

API = *American Petroleum Institute*;

ASTM = *American Society for Testing and Materials*;

BS = *British Standards*;

FEA = *Finite Element Analysis*;

RNEST = Refinaria do Nordeste

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área do teto [m^2];

A_p = área do pontão [m^2];

A_t = área da secção do tubo [mm^2];

CA = corrosão [mm];

D = diâmetro do tanque [m];

E = empuxo [N];

E_t = módulo de elasticidade do tubo [GPa];

G = peso específico do produto a ser armazenado $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

H_t = altura do tanque [m];

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

h_1 = altura do primeiro anel [mm];

h_2 = altura do segundo anel [mm];

h_3 = altura do terceiro anel [mm];

h_4 = altura do quarto anel [mm];

h_5 = altura do quinto anel [mm];

h_n = altura normal de operação [mm];

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

L_t = comprimento do tubo [mm];

P_H = pressão hidrostática [kPa];

r = raio do tanque [mm];

r_g = raio de giração do tubo [mm];

S = sobrecarga $\left[\frac{N}{m^2}\right]$;

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

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

t = espessura do primeiro anel corroído [mm];

t_b = espessura da chapa anular [mm];

t_f = espessura da chapa do fundo [mm];

t_d = espessura de projeto preliminar [mm];

t_t = espessura de teste hidrostático preliminar [mm];

t_{1d} = espessura de projeto do primeiro anel [mm];

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

t_1 = espessura calculada do primeiro anel [mm];
 t_2 = espessura calculada do segundo anel [mm];
 t_3 = espessura calculada do terceiro anel [mm];
 t_4 = espessura calculada do quarto anel [mm];
 t_5 = espessura calculada do quinto anel [mm];
 t_6 = espessura calculada do sexto anel [mm];
 t_7 = espessura calculada do sétimo anel [mm];
 t_8 = espessura calculada do oitavo anel [mm];
 t_{2d} = espessura de projeto do segundo anel [mm];
 t_{2a} = espessura do segundo anel corroído [mm];
 t_u = espessura do anel superior corroído na circunferência de junta [mm];
 t_L = espessura do anel inferior corroído na circunferência de junta [mm];
 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];
 V = volume do tanque [m³];
 V_A = volume setor A [m³];
 V_B = volume setor B [m³];
 V_C = volume setor C [m³];
 V_d = volume deslocado [m³];
 V_T = volume total [m³];
 V_u = volume útil [m³];
 W = massa do teto [kg];
 W_g = massa global do teto [kg];
 σ_a = tensão admissível do tubo [MPa];
 σ_c = tensão de compressão do tubo [MPa];
 σ_e = tensão de escoamento do tubo [MPa];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	17
1.2	OBJETIVO	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	CONCEPÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO	21
2.2	SELEÇÃO DO TIPO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO	22
2.2.1	Tanques de Teto Flutuante (<i>Floating-Roof</i>)	23
2.3	DEFINIÇÃO DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	25
2.4	DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO	25
2.5	MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	26
2.6	PROJETO DO FUNDO	28
2.6.1	Declividade	28
2.6.2	Disposição, Material e Dimensões das Chapas	28
2.6.3	Reforços no Fundo	30
2.7	PROJETO DO COSTADO	30
2.7.1	Método do Ponto Variável	32
2.7.2	Espessura Mínima	36
2.7.3	Espessura Máxima	36
2.7.4	Disposição das Chapas do Costado	37
2.8	PROJETO DO TETO	38
2.8.1	Declividade e Material das Chapas do Teto	38
2.8.2	Flutuabilidade	39
2.8.3	Suportes do Teto	40
3	MÉTODO	43
3.1	DADOS DE PROJETO	43
3.2	CÁLCULOS DO VOLUME DO TANQUE	43
3.3	CÁLCULOS DO FUNDO DO TANQUE	44
3.3.1	Dimensionamento da Chapa do Fundo	44
3.3.2	Dimensionamento da Chapa Anular	44
3.4	CÁLCULOS DO COSTADO DO TANQUE	44
3.4.1	Cálculo do Primeiro Anel	44

3.4.2	Cálculo do Segundo Anel	45
3.4.3	Cálculo do Terceiro Anel	48
3.4.4	Cálculo do Quarto Anel	51
3.4.5	Cálculo do Quinto Anel	53
3.4.6	Definição do Sexto, Sétimo e Oitavo Anel	56
3.5	CÁLCULOS DO TETO DO TANQUE	56
3.5.1	Dimensionamento do Pontão	56
3.5.2	Cálculo de Flutuabilidade	57
3.5.3	Cálculo dos Suportes	58
3.6	MODELAGEM 3D E ANÁLISE DE TENSÕES	59
3.6.1	Cálculo da Pressão Hidrostática	60
3.6.2	Análise por Elementos Finitos (FEA)	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	DIMENSÕES DO TANQUE	63
4.2	FUNDO	63
4.3	COSTADO	63
4.4	TETO	64
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A	68
	ANEXO B	69

1- INTRODUÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

Tanques de armazenamento são equipamentos estáticos de caldeiraria pesada, sujeitos à pressão próxima à atmosférica e, na maioria das vezes, destinados ao armazenamento de petróleo e seus derivados. (Figura 1)

Este trabalho irá tratar de um tanque de armazenamento atmosférico (não pressurizado), cilíndrico, vertical, não enterrado, construído com chapas de aço-carbono posteriormente soldadas, para armazenamento de gasolina. Este equipamento é comumente encontrado em refinarias, bases de distribuição, parques industriais, etc.

Os tanques de armazenamento são uma divisão de vasos de armazenamento, cujos não são pressurizados. Os vasos de armazenamento com pressões baixas são denominados tanques de baixa pressão, e os de alta pressão são denominados vasos de pressão. (BARROS, 2014)

Figura 1 - Tanques de armazenamento da refinaria Abreu e Lima (RNEST)



Fonte: (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2014)

Os tanques de armazenamento podem ser projetados para armazenar uma ampla gama de volumes de produto. No Brasil, é usual projetar tanques de armazenamento com

capacidades que vão de 100 barris (16m^3) até 700.000 barris (112.000m^3). O Barril é uma unidade de medida de petróleo líquido (geralmente petróleo cru) igual a 158,987294928 litros no caso do barril estadunidense. Quanto maior o volume armazenado, menor é o custo de armazenamento por barril. Isso faz com que o interesse pela construção de tanques cada vez maiores seja cada vez mais comum. Porém, há um limite para dimensionamento de um tanque de armazenamento. Isso se deve à pressão hidrostática que o fluido armazenado exerce na parede do tanque. Quanto maior a pressão, maior a espessura de costado requerida no projeto. Estas espessuras têm medidas padronizadas pelos fabricantes de chapa de aço-carbono. Assim, chegando a um limite para o dimensionamento do tanque de armazenamento. (BARROS, 2014)

1.2 - OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo projetar um tanque de armazenamento atmosférico, de teto flutuante para estocagem de gasolina, com base na norma API 650 e requisitos Petrobras, que substitui os tanques incendiados em Santos. Este projeto é feito através de cálculos baseados nas normas e literaturas da bibliografia de referência, e validado por uma simulação por elementos finitos no *software Autodesk Inventor*.

1.3 - JUSTIFICATIVA

Os tanques de armazenamento são equipamentos essenciais para o funcionamento de uma unidade operacional. (BARROS, 2014)

Segundo experiência profissional do autor, o projeto e construção de um tanque de armazenamento envolvem um elevado investimento de capital, pois é necessário, além da grande quantidade de material utilizado, um conhecimento da tecnologia de projeto, fabricação e montagem especializados. Caso o projeto não seja desenvolvido para uma aplicação específica, as consequências podem ser severas.

Um exemplo de projeto de tanque de armazenamento incoerente ocorreu no dia 02 de abril de 2015 na empresa Ultracargo na cidade de Santos. Seis tanques de combustível foram atingidos por um grande incêndio (Figura 2 e 3): dois de etanol e quatro de gasolina. Ao todo, eles tinham capacidade para armazenar 34 milhões de litros de combustível. No início, a temperatura chegou a 800°C . As causas ainda são desconhecidas e o incêndio provocou grandes impactos ambientais (Figura 4) e econômicos. (G1, 2015)

Figura 2 - Incêndio que atingiu tanques do terminal da Ultracargo em Santos



Fonte: (EXAME, 2015)

Figura 3 - Corpo de bombeiros usou espuma especial para conter chamas



Fonte: (O GLOBO, 2015)

Figura 4 - Peixes mortos, contaminados pela água utilizada na extinção do incêndio.



Fonte: (AMBIENTE LEGAL, 2015)

1.4 - CONCEPÇÃO

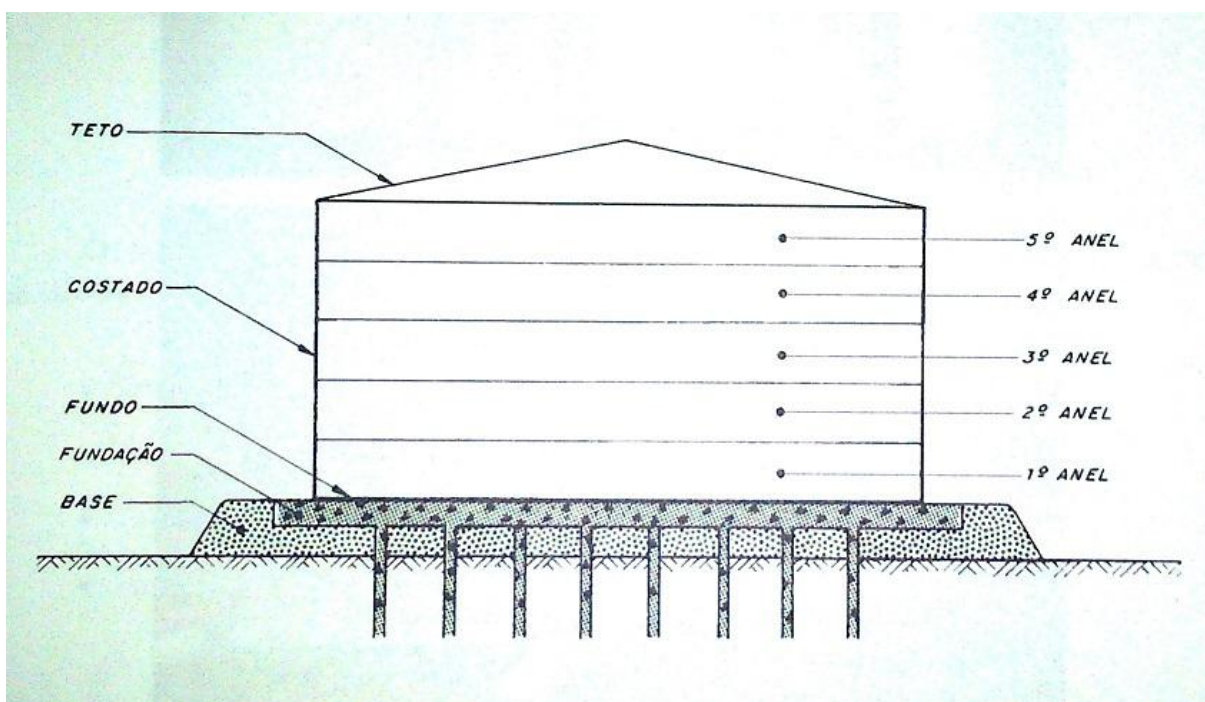
Este trabalho contempla um projeto completo de um tanque de armazenamento. A primeira etapa diz respeito à escolha do tipo de tanque de armazenamento a ser projetado em função do produto a ser estocado. Na sequência, a determinação da capacidade de armazenamento, das dimensões do tanque de armazenamento e dos materiais de construção. A segunda etapa contempla o projeto do fundo, na sequência, do costado e do teto. A terceira e última etapa, a modelagem em software para simulação e análises.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

Os principais componentes de um tanque de armazenamento são representados na Figura 5. (BARROS, 2014)

Figura 5 – Principais componentes de um tanque de armazenamento



Fonte: (BARROS, 2014)

2.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Os tanques de armazenamento são classificados em função da natureza do seu teto:

- Tanques de Teto Fixo
- Tanques de Teto Móvel
- Tanques de Teto com Diafragma Flexível
- Tanques de Teto Flutuante (BARROS, 2014)

2.2 - SELEÇÃO DO TIPO DE TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Quadro 1 – Recomendações de tipos usuais de tanques

Produto armazenado	Tipo de tanque (selecionado conforme o projeto) [Prática Recomendada]
Produtos leves da faixa de gasolina e nafta leve. 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 650:2007 Appendix 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 650:2007 Appendix 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 650:2007 Appendix 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) nafta pesada; b) querosene; c) óleo diesel classe III; d) resíduo de vácuo; e) diesel do FCC ("cycle-oil"); f) óleo combustível; g) resíduos ("slop"); h) óleo lubrificante; i) "flushing-oil"; j) asfalto e cimento asfáltico; k) 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). Não se recomenda a utilização de teto flutuante 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, é recomendado utilizar tanque pressurizado (API STD 650:2007 Appendix F ou API STD 620) ou tanque atmosférico de teto fixo com sistema de recuperação de vapor. [Prática Recomendada]

NOTA 2 A utilização de teto flutuante externo está condicionada à possibilidade de construção da escada de acesso ao teto (ver 19.1).

NOTA 3 As classes I, II e III do óleo diesel são dadas pela ABNT NBR 17505-1.

NOTA 4 Os tanques de GAV, QAV e biodiesel não devem utilizar internos de cobre e zinco ou ligas desses elementos.

NOTA 5 Um sistema de recuperação de vapor pode ser usado em tanques atmosféricos de teto fixo, inclusive como alternativa a tanques atmosféricos de teto flutuante, em função de um estudo técnico, econômico e ambiental.

NOTA 6 Para produtos que se degradam por oxidação ou umidade (exemplo: biodiesel, parafinas, entre outros) deve ser analisada a necessidade de um sistema de inertização.

NOTA 7 Teto fixo geodésico e cobertura geodésica de teto flutuante são permitidos quando justificados economicamente.

Fonte: (N-270, 2010)

Para selecionarmos um tipo de tanque em função do produto a ser armazenado, recorreremos à norma Petrobras N-270. Esta norma possui a Tabela A.1 (Quadro 1), que recomenda os tipos mais usuais de tanque para cada aplicação. (N-270, 2010)

É importante notar que tanto para armazenamento de gasolina, como de álcool, recomenda-se a construção de um tanque com teto flutuante ou interno, ou externo. Este pode ter sido um erro de projeto que possivelmente tenha colaborado para o acidente do incêndio dos tanques de armazenamento de Santos, abordados na justificativa deste trabalho. Pois os tanques incendiados eram de teto fixo. Observa-se o acúmulo de gás pela evaporação do combustível na Figura 6.

Figura 6 - Vapor de combustível em um tanque de teto fixo



Fonte: (G1, 2015)

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

2.2.1 - Tanques de Teto Flutuante (*Floating-Roof*)

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

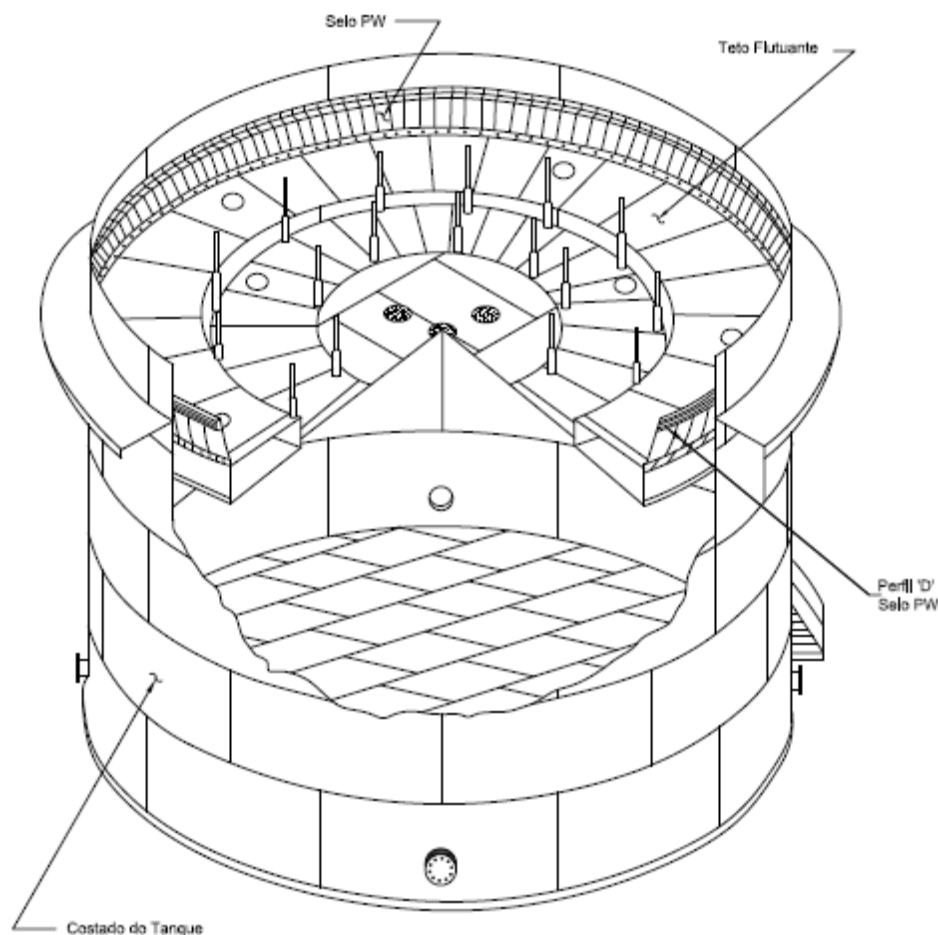
Os tetos flutuantes podem ser do tipo externo ou interno a um tanque de teto fixo. Os externos podem apresentar os seguintes tipos construtivos:

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

(BARROS, 2014)

Escolheu-se então o Teto Flutuante com Flutuador na Periferia - Pontão Convencional (*Pontoon Floating-Roof*) (Figura 7), pois este tipo apresenta maior flutuabilidade, menor perda por evaporação e custo intermediário em relação aos três apresentados aqui.

Figura 7 – Tanque de teto flutuante tipo Pontão Convencional



Fonte: (N-1742, 2010)

2.3 - DEFINIÇÃO DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

Tomaram-se como base os tanques danificados no acidente da Ultracargo. Foram 6 tanques, que juntos tinham a capacidade de 34 milhões de litros. Quatro eram de gasolina. Considerando que todos tinham a mesma capacidade, os 4 tanques de gasolina juntos, tinham uma capacidade de aproximadamente 22,7 milhões de litros. Esse volume equivale a 143 mil barris aproximadamente. Adotou-se então 150 mil barris, que equivalem a aproximadamente 24 milhões de litros.

2.4 - DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Antes do projeto de um tanque de armazenamento, é necessário determinar sua proporção de diâmetro / altura. Usualmente os diâmetros de tanques de armazenamento variam de 3 m a 67 m e sua altura, de 2 m a 20 m.

Para tanques de pequena e média capacidade, a proporção deve ser de aproximadamente: $D = H_t$.

Para tanques de grande capacidade, a proporção deverá ser de aproximadamente:

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

(BROWNELL & YOUNG, 1959)

Com base na experiência profissional do autor, para uma aproximação inicial, utilizam-se estas proporções como base. Os critérios usados para se chegar à elas foram puramente econômicos, levando em consideração o preço do costado em relação ao preço do fundo e teto. Porém, ainda levando o fator econômico em conta, esta proporção pode ser, em pequeno grau, alterada em função de projetarmos o diâmetro do costado com chapas em seu comprimento total, e a altura do costado com chapas em sua largura total. Isso faz com que economizemos em corte de chapas, soldas e horas de mão de obra. Outros fatores que também podem alterar um pouco esta proporção é a área disponível para a construção do tanque, as limitações de altura do local, e a necessidade do processo que pode ocorrer dentro do tanque.

2.5 – MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

As chapas a serem utilizadas nos tanques, são fabricadas nas siderúrgicas brasileiras. Elas podem ser classificadas em função de sua espessura como abaixo:

- chapas grossas: com espessura igual ou superior a $\frac{1}{4}$ polegadas (6,35mm);
- chapas finas: com espessura inferior a $\frac{1}{4}$ polegadas (6,35mm).

As bordas das chapas, podem ser fornecidas como abaixo:

- com bordas universais (naturais): apresentam as bordas naturais de laminação;
- com bordas aparadas: as bordas de laminação foram trabalhadas por meio de aparamento lateral.

As dimensões comerciais de chapas de aço carbono no Brasil, adotadas para o projeto são conforme abaixo:

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

(BARROS, 2014)

A norma API 650 especifica as chapas que devem ser utilizadas no projeto de um tanque de armazenamento em sua seção 4, como no quadro abaixo (Quadro 2): (API 650, 2013 traduzido)

Quadro 2 – Especificações de chapas pelo API 650

4.2.2 Especificações de ASTM

As placas que estão em conformidade com as seguintes especificações ASTM são aceitáveis, desde que as placas estejam dentro das limitações especificadas:

- a. ASTM A 36M / A 36 para chapas com uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.). Nenhuma das especificações para os materiais que constam na Tabela 1 da ASTM A 36M / A 36 são considerados aceitáveis para os tanques construídos segundo esta Norma a menos que seja expressamente declarado nesta Norma que as especificações são aceitáveis.
- b. ASTM A 131m / A 131, classe A, com placas a uma espessura máxima de 13 mm (0,5 pol.); Série B para as placas para uma máxima espessura de 25 mm (1 pol.); e grau EH36 para placas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 pol.) (placas de inserção e flanges para uma espessura máxima de 50 mm [2 pol.]).
- c. ASTM A 283m / A 283, Série C, com placas a uma espessura máxima de 25 mm (1 in.).
- d. ASTM A 285M / A 285, Série C, com placas a uma espessura máxima de 25 mm (1 in.).
- e. ASTM A 380 Graus 516m, 415, 450, 485 / A 516, Grades 55, 60, 65 e 70, para placas com uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.) (Placas de inserção e flanges para uma espessura máxima de 100 milímetros [4 pol.]).
- f. ASTM A 537M / A 537, Classe 1 e Classe 2, com placas a uma espessura máxima de 45 mm (1,75 pol.) (Placas de inserção para um máximo espessura de 100 mm [4 pol.]).
- g. ASTM A 573M classes 400, 450, 485 / A 573, as notas 58, 65 e 70, para placas com uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.).
- h. ASTM A 633m / A 633, as classes C e D, para placas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 pol.) (Placas de inserção para um máximo espessura de 100 mm [4,0 pol.]).
- i. ASTM A 662M / A 662, as classes B e C, com placas a uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.).
- j. ASTM A 678m / A 678, classe A, com placas a uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.) (Placas de inserção para uma espessura máxima de 65 mm [2,5 pol.]) e Série B para placas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 pol.) (placas de inserção para uma espessura máxima de 65 mm [2,5 pol.]). Adições de boro não são permitidas.
- k. ASTM A 737M / A 737, Série B, com placas a uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.).
- l. ASTM A 841M / A 841 Grau A, classe 1 e classe B, classe 2 para placas a uma espessura máxima de 40 mm (1,5 pol.) (placas de inserção para uma espessura máxima de 65 mm [2,5 pol.]).

Fonte: (API 650, 2013 traduzido)

Uma vez escolhido o material, utilizamos a tabela 4.4a do API 650 para identificar o grupo definido pela norma. (Quadro 3). (BARROS, 2014)

Quadro 3 – Grupos dos materiais

Group I As Rolled, Semi-Killed		Group II As Rolled, Killed or Semi-Killed		Group III As Rolled, Killed Fine-Grain Practice		Group IIIA Normalized, Killed Fine-Grain Practice	
Material	Notes	Material	Notes	Material	Notes	Material	Notes
A283M C	2	A131M B	6	A573M-400		A573M-400	9
A285M C	2	A36M	2, 5	A516M-380		A516M-380	9
A131M A	2	G40.21-260W		A516M-415		A516M-415	9
A36M	2, 3	Grade 250	7	G40.21-260W	8	G40.21-260W	8, 9
Grade 235	3			Grade 250	8	Grade 250	8, 9
Grade 250	5						
Group IV As Rolled, Killed Fine-Grain Practice		Group IVA As Rolled, Killed Fine-Grain Practice		Group V Normalized, Killed Fine-Grain Practice		Group VI Normalized or Quenched and Tempered, Killed Fine-Grain Practice Reduced Carbon	
Material	Notes	Material	Notes	Material	Notes	Material	Notes
A573M-450		A662M C		A573M-485	9	A131M EH 36	
A573M-485		A573M-485	10	A516M-450	9	A633M C	
A516M-450		G40.21-300W	8, 10	A516M-485	9	A633M D	
A516M-485		G40.21-350W	8, 10	G40.21-300W	8, 9	A537M Class 1	
A662M B		E275 D		G40.21-350W	8, 9	A537M Class 2	12
G40.21-300W	8	E355 D				A678M A	
G40.21-350W	8	S275 J2	8			A678M B	12
E275 C	8	S355 (J2 or K2)	8			A737M B	
E355 C	8					A841M, Grade A, Class 1	11, 12, 13
S275 J0	8					A841M, Grade B, Class 2	11, 12, 13
S355 J0	8						
Grade 275	8						

Fonte: (API 650, 2013)

2.6 – PROJETO DO FUNDO

2.6.1 - Declividade

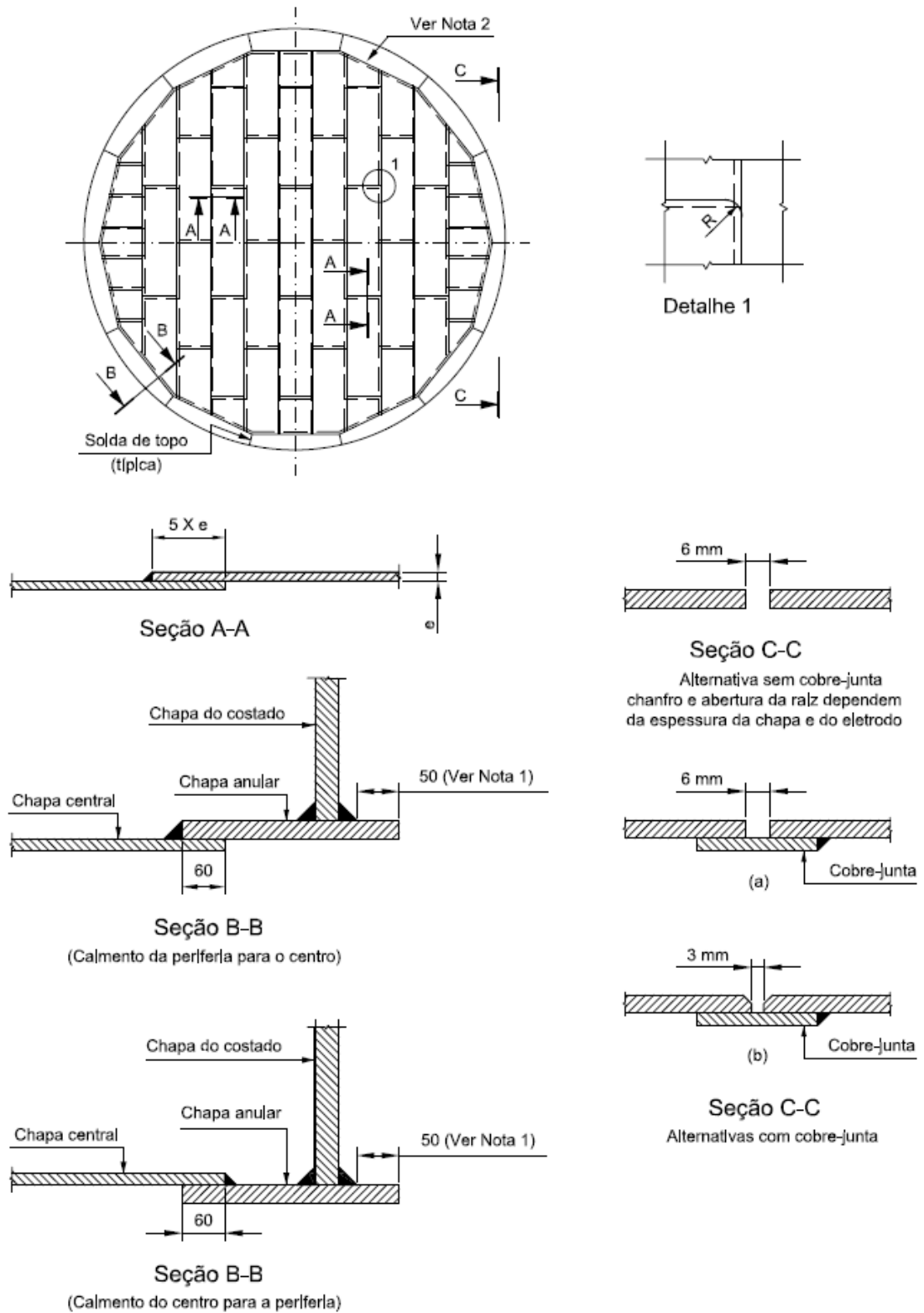
Os tanques de armazenamento devem ter o fundo cônico, com um caimento mínimo de 1:120 do centro para a periferia no caso de grandes diâmetros, pois o bocal de saída do produto se encontra no costado do equipamento. Os tanques com até 6m de diâmetro podem ter o fundo plano. (BARROS, 2014)

2.6.2 – Disposição, Material e Dimensões das Chapas

O contorno do fundo de um tanque de armazenamento pode ser feito através de dois tipos de disposição de chapas:

- chapas anulares (*anular plates*);
- chapas recortadas (*sketch plates*). (BARROS, 2014)

Figura 8 – Disposição típica do fundo com chapas anulares



NOTA 1 Esta cota é medida a partir da solda do costado ou da solda de qualquer chapa de reforço do costado.

NOTA 2 As chapas anulares podem ter internamente a forma poligonal ou circular.

Tabela 1 – Espessura mínima das chapas anulares

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

Fonte: (N-270, 2010)

Para tanques com diâmetro maior que 15m, é obrigatório adotar a disposição das chapas anulares (Figura 8). A espessura das chapas deve obedecer a tabela da N-270 (Tabela 1) que limita as espessuras mínimas em função do diâmetro. A largura não pode ser menor que 750mm. (N-270, 2010)

As chapas centrais do fundo geralmente são de espessuras menores do que as do costado do tanque. Isso se deve à posição em que são construídas. São apoiadas diretamente em uma base de concreto e está apoiada no solo. Desta forma, a única tensão que as chapas do fundo sofrem, é a tensão de compressão no sentido transversal. Porém, para melhor soldabilidade, recomenda-se que se usem chapas de no mínimo $\frac{1}{4}$ polegadas (6,35mm) de espessura. (BROWNELL & YOUNG, 1959)

2.6.3 – Reforços no Fundo

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

2.7 – PROJETO DO COSTADO

O dimensionamento do costado depende da norma de projeto adotada. Podendo ser a NBR 7821, o API 650, ou a BSI BS EN 14015. Como salientado na revisão bibliográfica deste trabalho, a norma mais utilizada nas indústrias para o projeto de um tanque de

armazenamento, é a norma API 650. Por este motivo, irá adotar-se esta norma para o dimensionamento do costado.

A pressão hidrostática nos vasos cilíndricos verticais, variam do mínimo no plano da superfície superior do vaso, para o máximo na superfície inferior do vaso. Portanto, se dimensionarem o costado em toda a sua extensão com a espessura calculada em função da pressão no fundo, estarão superdimensionando o projeto gerando um custo desnecessário. Se dimensionarem o costado em toda a sua extensão com a espessura calculada em função da pressão na superfície, estarão subdimensionando o projeto, de modo que não haverá confiabilidade. (BROWNELL & YOUNG, 1959)

A edição atual do API 650, de março de 2013, apresenta três alternativas para dimensionamento do costado de um tanque de armazenamento:

- API 650 corpo de norma e método básico (*One-Foot Method*);
- API 650 corpo de norma e método do ponto variável de projeto;
- API 650 Anexo A (método básico).

Os requisitos gerais e o critério para fixação dos valores das tensões admissíveis, adotados no projeto do costado de um tanque de armazenamento pelo API 650, estão descritos nas Tabelas 2 e 3.

As chapas do costado com espessura acima de 1.1/2 polegadas (40 mm) devem receber os tratamentos térmicos de normalização ou têmpera, devem ser revenidas, acalmadas, fabricadas com a técnica de grão fino e testadas com impacto. (BARROS, 2014)

Tabela 2 – Requisitos gerais para o projeto do costado

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

Fonte: (API 650, 2013)

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

Tabela 3 – Tensões admissíveis de materiais permitidos para chapas do costado

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_y 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: (API 650 – SI, 2013)

2.7.1 – Método do Ponto Variável

Este método pode ser usado se a seguinte proporção for verdadeira:

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

$$L = (500 D t)^{0,5} \text{ [mm]} \quad (3)$$

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

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

D = diâmetro do tanque [m];

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

O cálculo de cada anel, deve ser feita de maneira independente para as condições de projeto e condições de teste hidrostático. A espessura que deverá ser utilizada, será a maior encontrada entre o cálculo sob condições de projeto mais a sobre-espessura de corrosão e o cálculo sob condições de teste hidrostático. Porém, a espessura não poderá ser menor do que as apresentadas na Tabela 2.

Para os cálculos preliminares do primeiro anel utilizou-se as equações:

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

para condições de projeto

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

G = peso específico do produto a ser armazenado $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

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

CA = corrosão [mm].

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

para condições de teste hidrostático

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

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

Para os cálculos do primeiro anel utilizou-se as equações:

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

para condições de projeto

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

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

para condições de teste hidrostático

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

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

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

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

r = raio do tanque [mm];

t_1 = espessura calculada do primeiro anel [mm];

Se o valor encontrado na equação (8) for menor ou igual a 1,375:

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

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

Se o valor encontrado na equação (8) for maior ou igual a 2,625:

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

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

Se o valor encontrado na equação (8) for maior que 1,375 e menor que 2,625:

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

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

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

$$x_2 = 1000 CH \quad (13)$$

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

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

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

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

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

C = variável empírica em função de K;

K = variável empírica em função de t_L e t_u .

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

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

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

x = o menor valor encontrado entre x_1 , x_2 e x_3 .

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

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

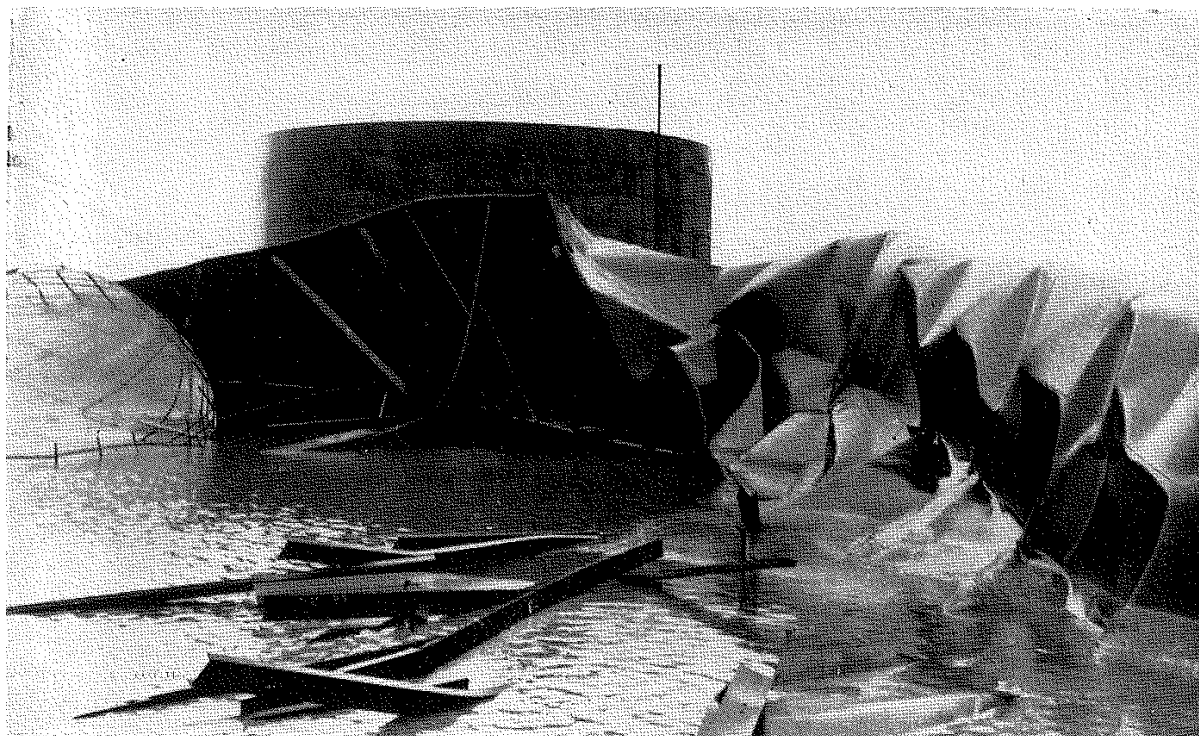
Para o cálculo do terceiro anel em diante, utilizamos o mesmo método do segundo anel. (API 650, 2013)

2.7.2 – Espessura Mínima

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

2.7.3 – Espessura Máxima

Figura 9 – Fratura frágil em tanque de armazenamento



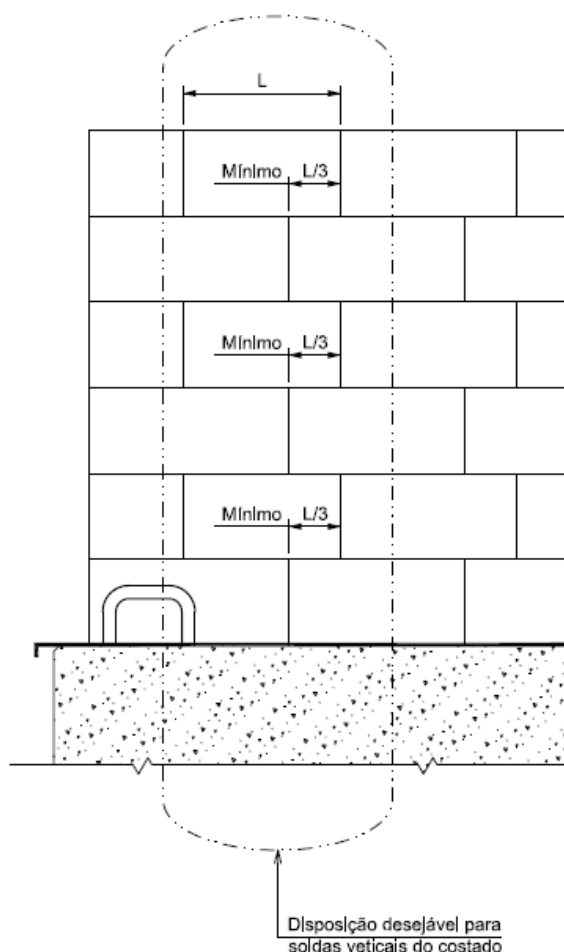
Fonte: (BROWNELL & YOUNG, 1959)

Os tanques de armazenamento são equipamentos soldados e não são usualmente tratados termicamente, para alívio de tensões. Por este motivo, é necessário estabelecer uma espessura máxima da chapa do costado para que não haja risco de fratura frágil (Figura 9). A falha nesta figura ocorreu como resultado de uma trinca ocasionada na chapa na região onde havia a maior concentração de tensão, a trinca tinha um comprimento maior que o comprimento crítico para propagação. No caso da norma API, a espessura máxima é dada em função do material adotado para o projeto do tanque (Quadro 2). (BARROS, 2014)

2.7.4 – Disposição das Chapas do Costado

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

Figura 10 – Soldas nas chapas do costado



Fonte: (N-270, 2010)

As juntas entre os anéis do costado devem estar defasadas de pelo menos $1/3$ do comprimento L da chapa (Figura 10), admitindo-se um mínimo para chapas de fechamento de anel de 5 vezes a espessura nominal do anel mais espesso dos considerados. Não deve haver acúmulo de juntas verticais em uma mesma região do costado do tanque. (BARROS, 2014)

2.8 – PROJETO DO TETO

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

A temperatura máxima de armazenamento do produto deve ser inferior à sua temperatura inicial de ebulição na pressão atmosférica do local de armazenamento.

A temperatura da superfície líquida sob a chaparia central do teto tipo pontão deve ser calculada para a condição de máxima radiação solar na região de construção do equipamento. Essa temperatura deve ser inferior à temperatura inicial de ebulição do produto na pressão correspondente ao peso do teto. (BARROS, 2014)

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

Segundo experiência profissional do autor obtida junto a profissionais com experiência de mais de 30 anos de projetos de equipamentos, usualmente, a área de cobertura do pontão deve ser maior que 30% da área total do teto do tanque.

2.8.1 – Declividade e Material das Chapas do Teto

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

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

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

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

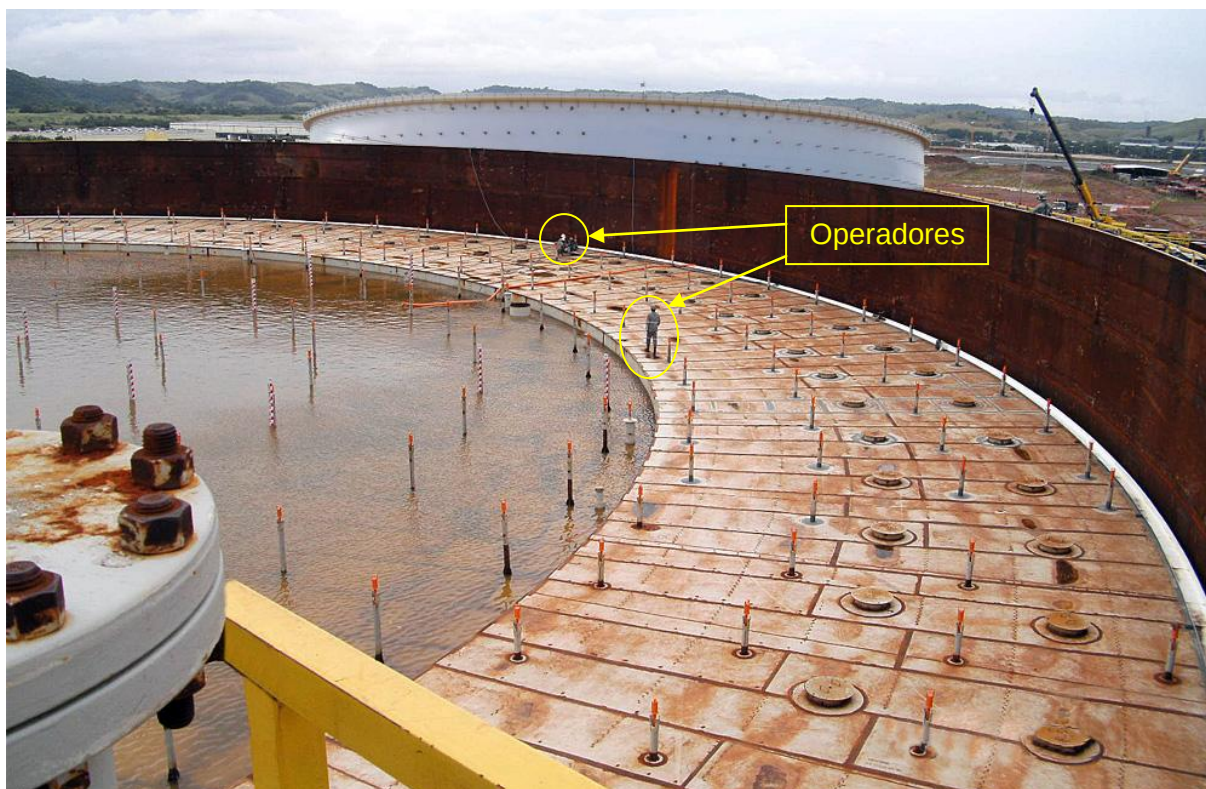
Todas as chapas divisórias dos compartimentos do teto flutuante devem ser soldadas de maneira que o compartimento seja estanque. (BARROS, 2014)

2.8.2 – Flutuabilidade

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

- Teto com carga de água equivalente a uma altura pluviométrica de 250 [mm] sobre toda a área do tanque, estando o teto flutuando em produto com densidade 0,7 ou a do próprio produto na temperatura máxima de armazenamento, considerando-se a menor densidade (Figura 11, operadores testando a flutuabilidade do teto);

Figura 11 – Teto flutuante tipo Pontão em teste com membrana alagada



Fonte: (EMROD, 2009)

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

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

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

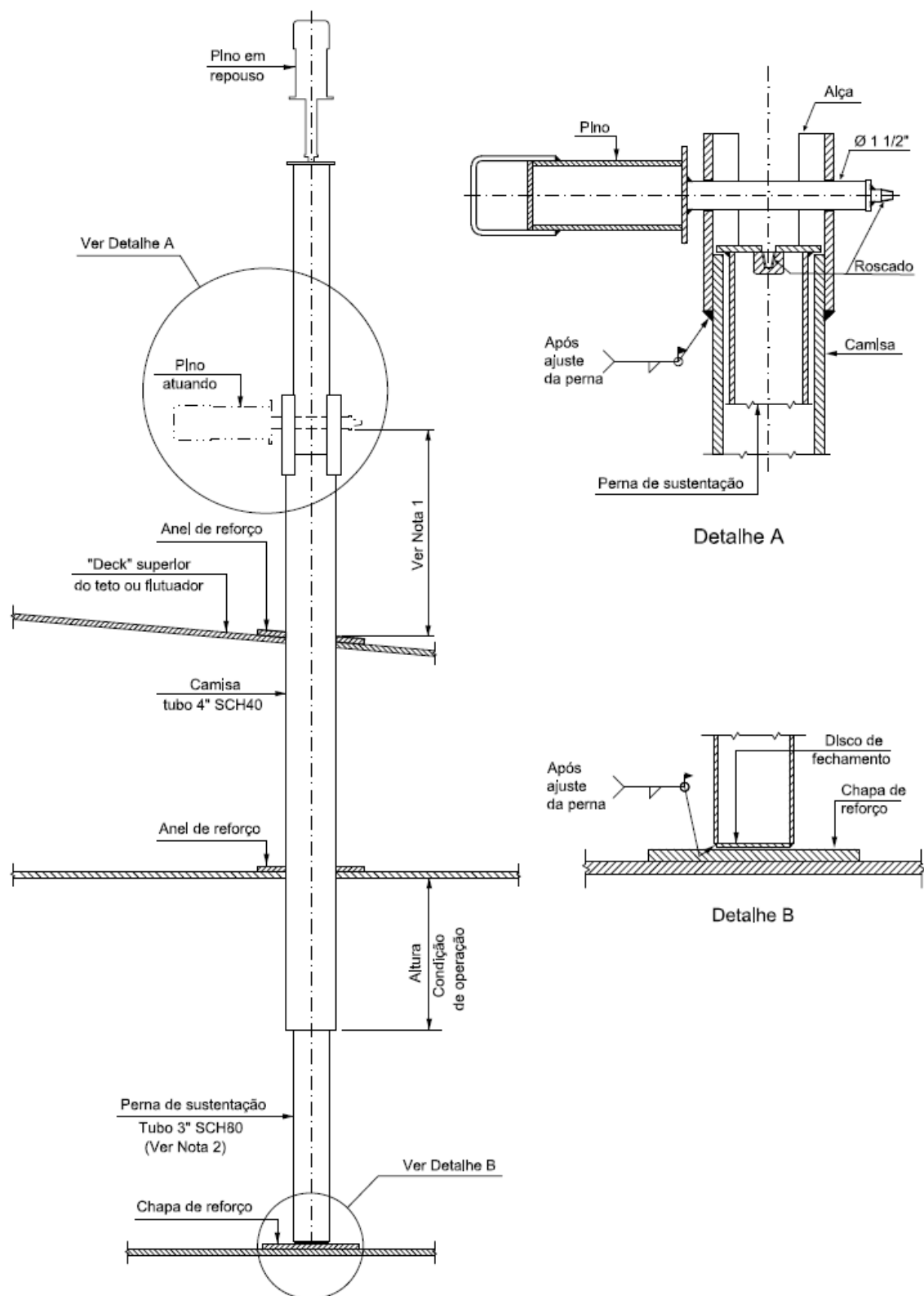
2.8.3 – Suportes do Teto

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

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

Na região dos compartimentos estanques, as camisas das pernas de sustentação devem ser fixadas nas chapas divisórias, sempre que possível, e nas chapas superiores e inferiores do teto. As chapas superiores e inferiores devem ser reforçadas para evitar trincas por fadiga. (Figura 12) (N-270, 2010)

Figura 12 – Suporte para flutuador do teto Pontão



Fonte: (N-270, 2010)

Para o cálculo dos suportes do teto, utilizou-se o cálculo de flambagem pelo Método da Tensão Admissível. Considerou-se o suporte bi-articulado. Onde:

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

Onde: L_t = comprimento do tubo [mm];

r_g = raio de giração do tubo [mm].

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

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

E_t = módulo de elasticidade do tubo [GPa];

σ_e = tensão de escoamento do tubo [MPa].

Se $L/r_g < C_c$, então:

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

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

(BEER, 2006)

3 - MÉTODO

3.1 – DADOS DE PROJETO

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

3.2 – CÁLCULOS DO VOLUME DO TANQUE

Seguindo a proporção de tanques de grande capacidade, calculou-se as dimensões do tanque.

$$V = 24.000 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$D = (8/3) \times H \quad \text{equação (1)}$$

$$V = (\pi \times D^2/4) \times H$$

$$24.000 = (\pi \times D^2/4) \times (3/8) \times D$$

$$24.000 = (3 \times \pi \times D^3)/32$$

$$81487,33 = D^3$$

$$D = 43,35 \text{ [m]}$$

Arredondou-se D para 44,0 [m]. Sendo assim, H é obtido em função do diâmetro adotado.

$$D = 44,00 \text{ [m]}$$

$$V = (\pi \times D^2/4) \times H$$

$$24.000 = (\pi \times 44^2/4) \times H$$

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

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

$$H_t = 19,596 \text{ [m]}$$

3.3 – CÁLCULOS DO FUNDO DO TANQUE

3.3.1 – Dimensionamento da Chapa do Fundo

Obtém-se a espessura da chapa do fundo com base no item 3.6.3. As chapas devem suportar as pernas do teto flutuante.

$$t_f = 9,5 \text{ [mm]}$$

3.3.2 – Dimensionamento da Chapa Anular

Obtém-se a espessura da chapa anular pela Tabela 3. No Item 3.4.1 obtém-se uma espessura de primeiro anel de 22,4 [mm]. Pela tabela, a espessura mínima da chapa anular com declividade para periferia é de 8 [mm]. Porém, como foi utilizado 9,5 [mm] para as chapas do fundo, adotou-se também esta espessura para as chapas anulares, que não são usualmente menos espessas que as chapas do fundo.

$$t_b = 9,5 \text{ [mm]}$$

3.4 – CÁLCULOS DO COSTADO DO TANQUE

3.4.1 – Cálculo do Primeiro Anel

Com base no Quadro 2, selecionou-se o material ASTM A-36 para o projeto do costado. Da Tabela 3, obteve-se a tensão admissível de projeto ($S_d = 160 \text{ [MPa]}$) e a tensão admissível de Teste Hidrostático ($S_t = 171 \text{ [MPa]}$).

$$t_d = \frac{4,9 \times 44(15,8 - 0,3)0,76}{160} + 2 \quad \text{equação(4)}$$

$$t_d = 17,86 \text{ [mm]}$$

$$t_t = \frac{4,9 \times 44(15,8 - 0,3)}{171} \quad \text{equação(5)}$$

$$t_t = 19,52 \text{ [mm]}$$

$$L = (500 \times 44 \times 19,52)^{0,5} \quad \text{equação(3)}$$

$$L = 655,36$$

$$\frac{655,36}{15,8} \leq \frac{1000}{6} \quad \text{equação(2)}$$

$$41,52 \leq 166,67$$

Condição satisfeita. Pode-se utilizar o método do ponto variável.

Para condição de projeto:

$$t_{1d} = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{15,8} \sqrt{\frac{15,8 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 15,8 \times 44 \times 0,76}{160} \right) + 2 \quad \text{equação(6)}$$

$$t_{1d} = 18,28 \text{ [mm]}$$

Para condição de teste hidrostático:

$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{15,8} \sqrt{\frac{15,8}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 15,8 \times 44}{171} \right) \quad \text{equação(7)}$$

$$t_{1t} = 19,92 \text{ [mm]} \leftarrow \text{maior valor de espessura}$$

Da Tabela 2, a espessura mínima para um tanque com este diâmetro é de 8 [mm]. A maior espessura dentre estas 3 apresentadas, é a espessura do primeiro anel t_1 .

$$t_1 = 19,92 \text{ [mm]}$$

$$t_{1\text{comercial}} = 22,4 \text{ [mm]}$$

3.4.2 – Cálculo do Segundo Anel

$$h_1 = 2440 \text{ [mm]}$$

$$H = 15,8 - 2,44$$

$$H = 13,34 \text{ [m]}$$

$$t_1 = 19,92 \text{ [mm]}$$

$$\frac{2440}{(22000 \times 19,92)^{0,5}} > 2,628 \quad \text{equação(8)}$$

$$3,686 > 2,628$$

Condição satisfeita. Pode-se utilizar o método dos anéis superiores.

Condição de Projeto

$t_u = t_{1d} - \text{CA}$ (com H do anel superior)

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{13,34} \sqrt{\frac{13,34 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 13,34 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_u = 13,70 \text{ [mm]}$$

$t_L = t_{1d} - \text{CA}$ (com H do anel inferior)

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{15,8} \sqrt{\frac{15,8 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 15,8 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_L = 16,28 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{16,28}{13,70} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,188$$

$$C = \frac{[1,188^{0,5}(1,188 - 1)]}{(1 + 1,188^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,089$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 13,70)^{0,5} + 320 \times 0,089 \times 13,34 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 716,78$$

$$x_2 = 1000 \times 0,089 \times 13,34 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1193,57$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 13,70)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 669,68 \leftarrow \text{menor valor de } x$$

$$x = 669,68$$

$$t_{dx} = \frac{4,9 \times 44 \left(13,34 - \frac{669,68}{1000} \right) 0,76}{160} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{dx} = 12,98 \text{ [mm]}$$

Condição de Teste Hidrostático

$$t_u = t_{1t} - \text{CA (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{13,34} \sqrt{\frac{13,34}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 13,34 \times 44}{171} \right)$$

$$t_u = 16,76 \text{ [mm]}$$

$$t_L = t_{1t} - \text{CA (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{15,8} \sqrt{\frac{15,8}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 15,8 \times 44}{171} \right)$$

$$t_L = 19,92 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{19,92}{16,76} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,189$$

$$C = \frac{[1,189^{0,5}(1,189 - 1)]}{(1 + 1,189^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,090$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 16,76)^{0,5} + 320 \times 0,090 \times 13,34 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 753,52$$

$$x_2 = 1000 \times 0,090 \times 13,34 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1193,57$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 16,76)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 740,70 \quad \blackleftarrow{\text{menor valor de x}}$$

$$x = 740,70$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 \times 44 \left(13,34 - \frac{740,70}{1000} \right)}{171} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{tx} = 15,89 [mm] \quad \blacktriangleleft \text{ maior valor de espessura}$$

$$t_{\text{mínimo}} = 8,00 [mm] \quad (\text{Tabela 2})$$

$$t_2 = 15,89 [mm]$$

$$t_{2\text{comercial}} = 16,00 [mm]$$

3.4.3 – Cálculo do Terceiro Anel

$$h_2 = 2440 [mm]$$

$$H = 13,34 - 2,44$$

$$H = 10,90 [m]$$

$$t_2 = 15,89 [mm]$$

$$\frac{2440}{(22000 \times 15,89)^{0,5}} > 2,628 \quad \text{equação(8)}$$

$$4,127 > 2,628$$

Condição satisfeita. Pode-se utilizar o método dos anéis superiores.

Condição de Projeto

$$t_u = t_{1d} - CA \quad (\text{com H do anel superior})$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{10,90} \sqrt{\frac{10,90 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 10,90 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_u = 11,12 [mm]$$

$$t_L = t_{1d} - CA \quad (\text{com H do anel inferior})$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{13,34} \sqrt{\frac{13,34 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 13,34 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_L = 13,70 [mm]$$

$$K = \frac{13,70}{11,12} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,231$$

$$C = \frac{[1,231^{0,5}(1,231 - 1)]}{(1 + 1,231^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,108$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 11,12)^{0,5} + 320 \times 0,108 \times 10,90 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 680,24$$

$$x_2 = 1000 \times 0,108 \times 10,90 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1182,76$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 11,12)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 603,51 \leftarrow \text{menor valor de } x$$

$$x = 603,51$$

$$t_{dx} = \frac{4,9 \times 44 \left(10,90 - \frac{603,51}{1000} \right) 0,76}{160} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{dx} = 10,55 [mm]$$

Condição de Teste Hidrostático

$$t_u = t_{1t} - CA \text{ (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{10,90} \sqrt{\frac{10,90}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 10,90 \times 44}{171} \right)$$

$$t_u = 13,60 [mm]$$

$$t_L = t_{1t} - CA \text{ (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{13,34} \sqrt{\frac{13,34}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 13,34 \times 44}{171} \right)$$

$$t_L = 16,76 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{16,76}{13,60} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,232$$

$$C = \frac{[1,232^{0,5}(1,232 - 1)]}{(1 + 1,232^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,109$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 13,60)^{0,5} + 320 \times 0,109 \times 10,90 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 713,47$$

$$x_2 = 1000 \times 0,109 \times 10,90 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1182,76$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 13,60)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 667,28 \leftarrow \text{menor valor de x}$$

$$x = 667,28$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 \times 44 \left(10,90 - \frac{667,28}{1000} \right)}{171} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{tx} = 12,91 \text{ [mm]} \leftarrow \text{maior valor de espessura}$$

$$t_{\text{mínimo}} = 8,00 \text{ [mm]} \text{ (Tabela 2)}$$

$$t_3 = 12,91 \text{ [mm]}$$

$$t_{3\text{comercial}} = 16,00 \text{ [mm]}$$

3.4.4 – Cálculo do Quarto Anel

$$h_3 = 2440 \text{ [mm]}$$

$$H = 10,90 - 2,44$$

$$H = 8,46 \text{ [m]}$$

$$t_3 = 12,91 \text{ [mm]}$$

$$\frac{2440}{(22000 \times 12,91)^{0,5}} > 2,628 \quad \text{equação(8)}$$

$$4,579 > 2,628$$

Condição satisfeita. Pode-se utilizar o método dos anéis superiores.

Condição de Projeto

$$t_u = t_{1d} - \text{CA (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{8,46} \sqrt{\frac{8,46 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 8,46 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_u = 8,56 \text{ [mm]}$$

$$t_L = t_{1d} - \text{CA (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{10,90} \sqrt{\frac{10,90 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 10,90 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_L = 11,12 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{11,12}{8,56} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,299$$

$$C = \frac{[1,299^{0,5}(1,299 - 1)]}{(1 + 1,299^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,138$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 8,56)^{0,5} + 320 \times 0,138 \times 8,46 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 637,41$$

$$x_2 = 1000 \times 0,138 \times 8,46 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1164,72$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 8,56)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 529,40 \quad \leftarrow \text{menor valor de } x$$

$$x = 529,40$$

$$t_{dx} = \frac{4,9 \times 44 \left(8,46 - \frac{529,40}{1000} \right) 0,76}{160} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{dx} = 8,13 [mm]$$

Condição de Teste Hidrostático

$$t_u = t_{1t} - CA \text{ (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{8,46} \sqrt{\frac{8,46}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 8,46 \times 44}{171} \right)$$

$$t_u = 10,45 [mm]$$

$$t_L = t_{1t} - CA \text{ (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{10,90} \sqrt{\frac{10,90}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 10,90 \times 44}{171} \right)$$

$$t_L = 13,60 [mm]$$

$$K = \frac{13,60}{10,45} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,300$$

$$C = \frac{[1,300^{0,5}(1,300 - 1)]}{(1 + 1,300^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,138$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 10,45)^{0,5} + 320 \times 0,138 \times 8,46 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 666,74$$

$$x_2 = 1000 \times 0,138 \times 8,46 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1164,72$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 10,45)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 585,04 \leftarrow \text{menor valor de } x$$

$$x = 585,04$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 \times 44 \left(8,46 - \frac{585,04}{1000} \right)}{171} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{tx} = 9,93 \text{ [mm]} \leftarrow \text{maior valor de espessura}$$

$$t_{\text{mínimo}} = 8,00 \text{ [mm]} \text{ (Tabela 2)}$$

$$t_4 = 9,93 \text{ [mm]}$$

$$t_{4\text{comercial}} = 12,5 \text{ [mm]}$$

3.4.5 – Cálculo do Quinto Anel

$$h_4 = 2440 \text{ [mm]}$$

$$H = 8,46 - 2,44$$

$$H = 6,02 \text{ [m]}$$

$$t_4 = 9,93 \text{ [mm]}$$

$$\frac{2440}{(22000 \times 9,93)^{0,5}} > 2,628 \quad \text{equação(8)}$$

$$5,219 > 2,628$$

Condição satisfeita. Pode-se utilizar o método dos anéis superiores.

Condição de Projeto

$$t_u = t_{1d} - \text{CA (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{6,02} \sqrt{\frac{6,02 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 6,02 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_u = 6,01 \text{ [mm]}$$

$$t_L = t_{1d} - \text{CA (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{8,46} \sqrt{\frac{8,46 \times 0,76}{160}} \right) \left(\frac{4,9 \times 8,46 \times 44 \times 0,76}{160} \right)$$

$$t_L = 8,56 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{8,56}{6,01} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,424$$

$$C = \frac{[1,424^{0,5}(1,424 - 1)]}{(1 + 1,424^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,188$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 6,01)^{0,5} + 320 \times 0,188 \times 6,02 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 583,45$$

$$x_2 = 1000 \times 0,188 \times 6,02 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1130,19$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 6,01)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 443,57 \leftarrow \text{menor valor de x}$$

$$x = 443,57$$

$$t_{dx} = \frac{4,9 \times 44 \left(6,02 - \frac{443,57}{1000} \right) 0,76}{160} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{dx} = 5,71 \text{ [mm]}$$

Condição de Teste Hidrostático

$$t_u = t_{1t} - \text{CA (com H do anel superior)}$$

$$t_u = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{6,02} \sqrt{\frac{6,02}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 6,02 \times 44}{171} \right)$$

$$t_u = 7,33 \text{ [mm]}$$

$$t_L = t_{1t} - \text{CA (com H do anel inferior)}$$

$$t_L = \left(1,06 - \frac{0,0696 \times 44}{8,46} \sqrt{\frac{8,46}{171}} \right) \left(\frac{4,9 \times 8,46 \times 44}{171} \right)$$

$$t_L = 10,45 \text{ [mm]}$$

$$K = \frac{10,45}{7,33} \quad \text{equação(16)}$$

$$K = 1,427$$

$$C = \frac{[1,427^{0,5}(1,427 - 1)]}{(1 + 1,427^{1,5})} \quad \text{equação(15)}$$

$$C = 0,189$$

$$x_1 = 0,61 (22000 \times 7,33)^{0,5} + 320 \times 0,189 \times 6,02 \quad \text{equação(12)}$$

$$x_1 = 608,28$$

$$x_2 = 1000 \times 0,189 \times 6,02 \quad \text{equação(13)}$$

$$x_2 = 1130,19$$

$$x_3 = 1,22 (22000 \times 7,33)^{0,5} \quad \text{equação(14)}$$

$$x_3 = 489,79 \leftarrow \text{menor valor de x}$$

$$x = 489,79$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 \times 44 \left(6,02 - \frac{489,79}{1000} \right)}{171} \quad \text{equação(17)}$$

$$t_{tx} = 6,98 \text{ [mm]}$$

$$t_{\text{mínimo}} = 8,00 \text{ [mm]} \text{ (Tabela 2) } \leftarrow \text{maior valor de espessura}$$

$$t_5 = 8,00 \text{ [mm]}$$

$$t_{5\text{comercial}} = 8,00 \text{ [mm]}$$

3.4.6 – Definição do Sexto, Sétimo e Oitavo Anel

A espessura do quinto anel, é a mínima permitida pela norma API 650 para um tanque com este diâmetro conforme Tabela 2. Com base nisso, e no conceito de que a pressão na elevação do costado diminui diretamente proporcional ao anel analisado, considerou-se a espessura mínima também para o sexto, sétimo e oitavo anel.

$$t_{6\text{comercial}} = 8,00 \text{ [mm]};$$

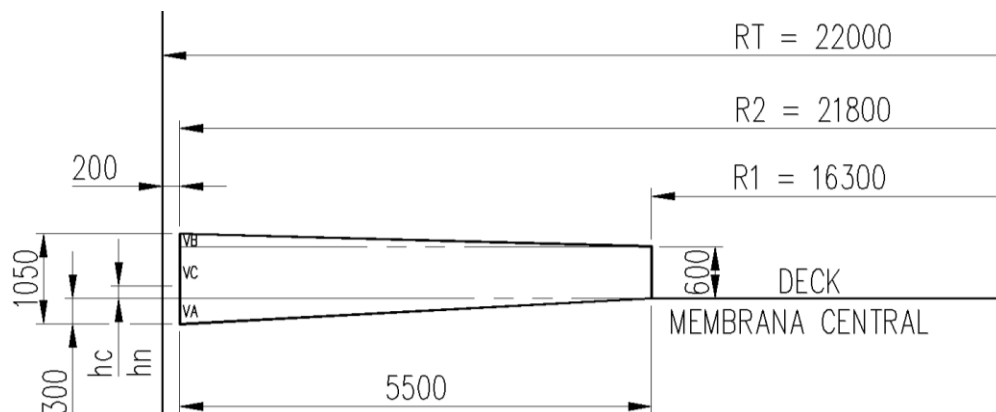
$$t_{7\text{comercial}} = 8,00 \text{ [mm]};$$

$$t_{8\text{comercial}} = 8,00 \text{ [mm]}.$$

3.5 – CÁLCULOS DO TETO DO TANQUE

3.5.1 – Dimensionamento do Pontão

Figura 13 – Dimensões do Pontão [mm]



Fonte: Produção do próprio autor

Dimensionou-se um teto pontão com 16 compartimentos, cujas dimensões são representadas na Figura 13.

As chapas a serem utilizadas no teto, serão de ASTM A-283 Gr. C. Para o cálculo da espessura do teto, utiliza-se a “teoria de membrana e cascas” de complexidade incompatível com este trabalho. Por este motivo, adotou-se a espessura mínima permitida de 4,75 [mm]. A escolha desta espessura é baseada em projetos similares onde se fez os devidos cálculos. O teto nestas dimensões, tem uma massa (W) de 91.593 [kg]. Com base nas dimensões da Figura 13, obteve-se as áreas.

$$A = 1493 [m^2]$$

$$A_p = 628,32 [m^2] > 0,3 \times A \leftarrow \text{satisfatório}$$

3.5.2 – Cálculo de Flutuabilidade

$$V_A = 103,5 [m^3]$$

$$V_B = 51,7 [m^3]$$

$$V_C = 395,0 [m^3]$$

$$V_T = 550,2 [m^3]$$

Para condição de operação normal:

Para que o teto flutue, peso = empuxo.

$$E = V_d \times G \times g$$

$$W \times g = V_d \times G \times g$$

$$V_d = \frac{W}{G \times 1000}$$

$$V_d = \frac{91593}{760}$$

$$V_d = 120,5 [m^3]$$

$$V_d = V_A + h_n \times \pi \times R_2^2$$

$$h_n = \frac{V_d - V_A}{\pi \times R_2^2}$$

$$h_n = \frac{120,5 - 103,5}{\pi \times 21,8^2}$$

$$h_n = 20 [mm]$$

3.5.3 – Cálculo dos Suportes

Conforme a Figura 12, calculou-se os 53 suportes de tubos de 3", SCH 80, de material ASTM A-53 Gr.B que possui as seguintes propriedades:

Tensão de Escoamento σ_e	241 [MPa]
Diâmetro Externo	88,9 [mm]
Espessura de Parede	7,62 [mm]
Área A_t	1946 [mm ²]
Momento de Inércia	1621000 [mm ⁴]
Raio de Giração r_g	28,863 [mm]
Comprimento Adotado L	4000 [mm]
Módulo de Elasticidade E	200 [GPa]

Índice de esbeltez :

$$\frac{L}{r_g} = \frac{4000}{28,863} \quad (\text{equação 19})$$

$$\frac{L}{r_g} = 138,59$$

$$C_c = \sqrt{\left(\frac{2\pi^2 \times 200}{241}\right)} \quad (\text{equação 20})$$

$$C_c = 127,99$$

$$\frac{L}{r_g} > C_c \quad \text{Assim,}$$

$$\sigma_a = \frac{\pi^2 \times 200}{1,92 \times \left(\frac{4000}{28,863}\right)^2} \quad (\text{equação 21})$$

$$\sigma_a = 53,53 \text{ [MPa]}$$

Massa global do teto W_g , com sobrecarga prevista por norma adicionada à mssa do teto W :

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

$$W_g = 91593 + 0,1 \times \left(\frac{\pi \times 44^2}{4} \right)$$

$$W_g = 244053 \text{ kg}$$

Tensão de compressão por suporte:

$$\sigma_c = \frac{W_g \times 9,81}{n^{\circ} \text{ suportes} \times A_t}$$

$$\sigma_c = \frac{244053 \times 9,81}{53 \times 1946}$$

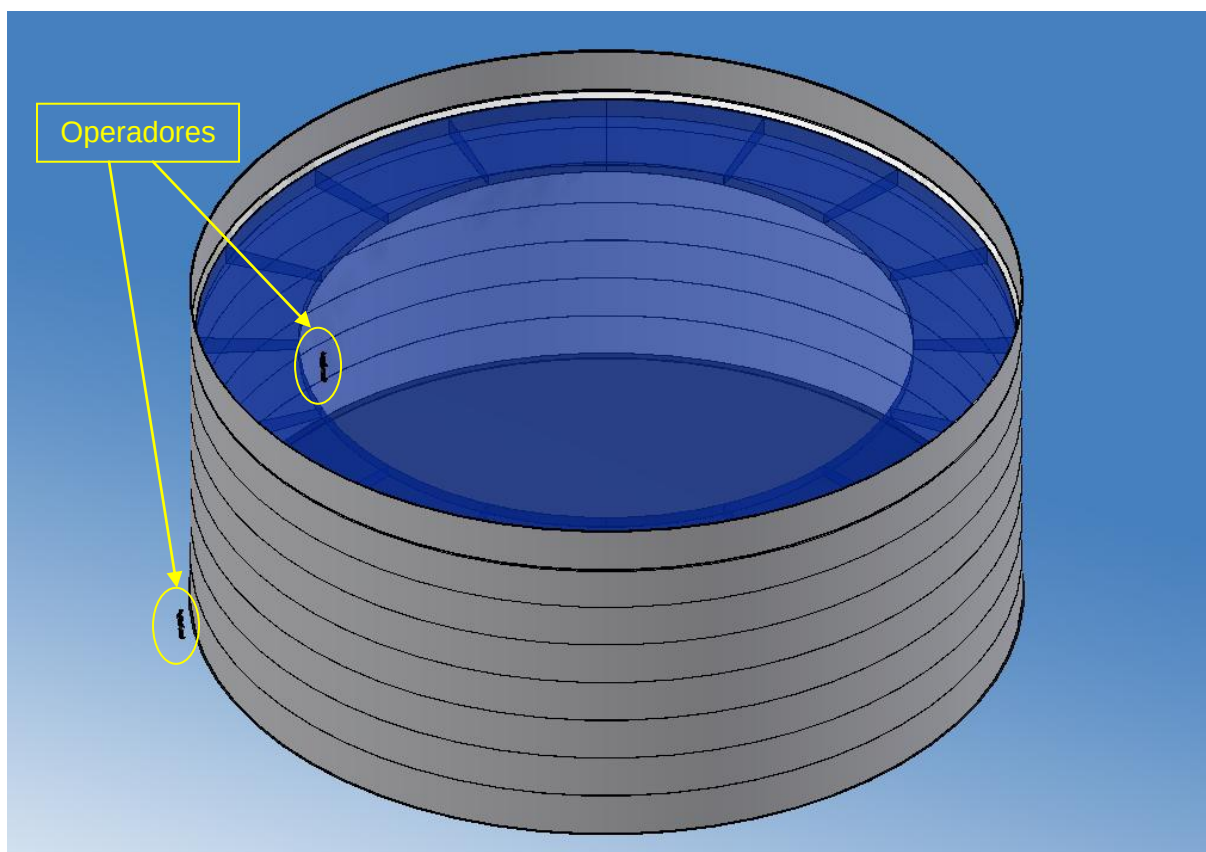
$$\sigma_c = 23,32 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_c < \sigma_a \leftarrow \text{satisfatório}$$

3.6 – MODELAGEM 3D E ANÁLISE DE TENSÕES

Modelou-se o tanque no *software* de modelagem 3D *Autodesk Inventor*. (Figura 14, com operadores representados em escala real para noção de proporção do tanque). Com base no modelo, desenhou-se o conjunto do tanque. (Anexo A)

Figura 14 – Vista isométrica do tanque modelado



Fonte: Produção do próprio autor

Com os componentes modelados, executou-se as simulações de análise de tensões por elementos finitos, ferramenta do próprio *software* utilizado.

3.6.1 – Cálculo da Pressão Hidrostática

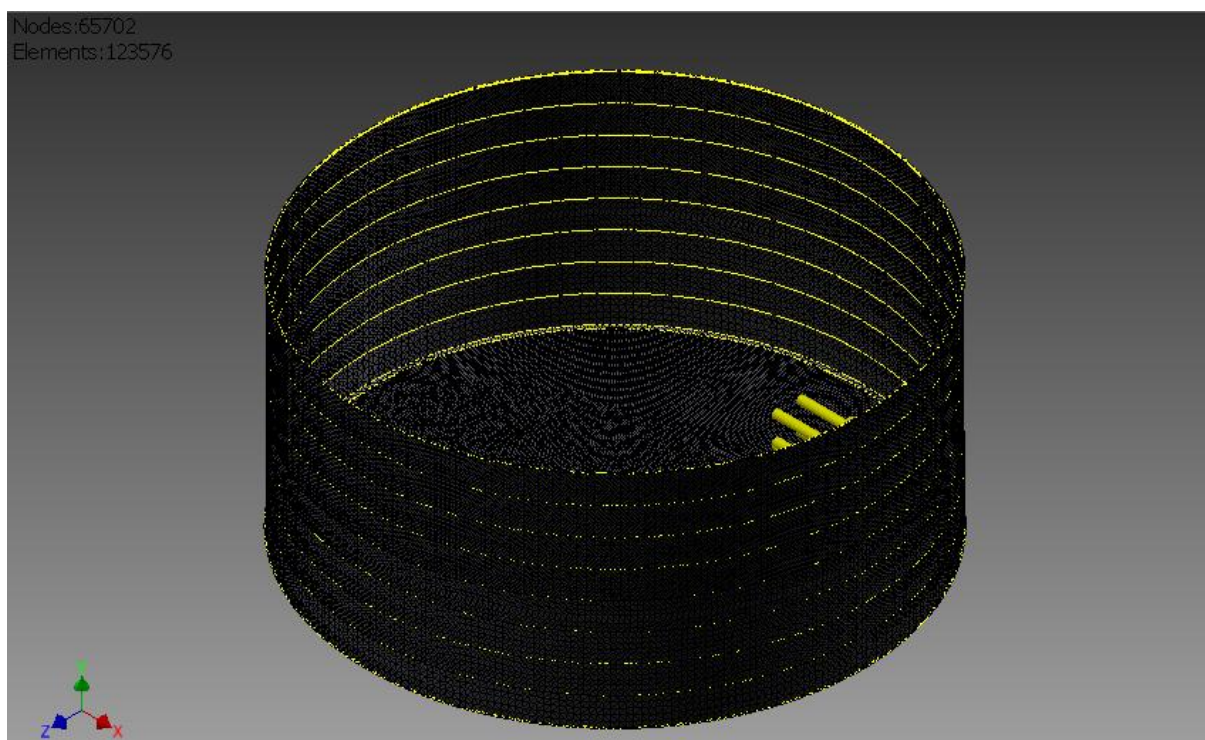
Sabe-se que a pressão hidrostática é calculada por:

$$P_H = G \times 1000 \times H \times g$$

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

3.6.2 – Análise por Elementos Finitos (FEA)

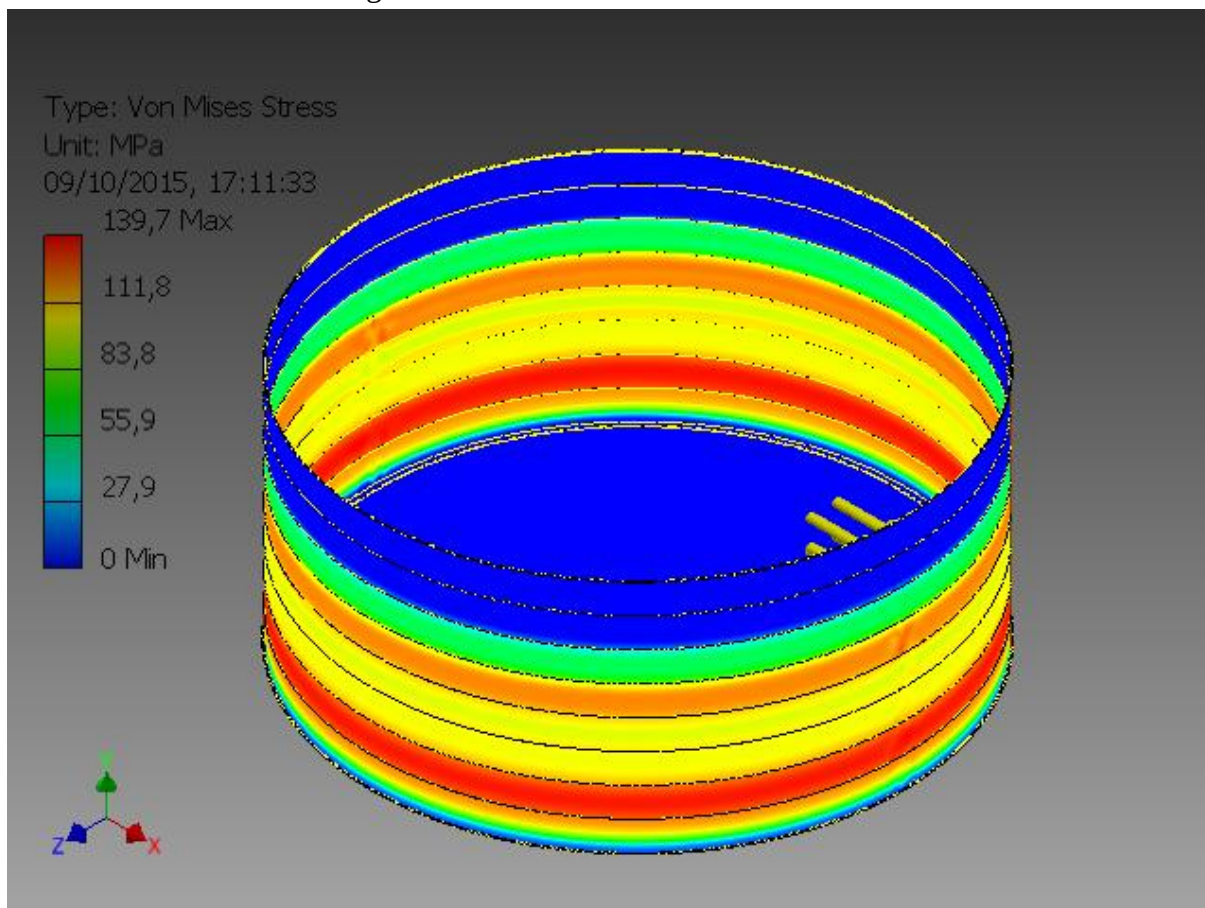
Figura 15 – Malha e nós do costado



Fonte: Produção do próprio autor

Colocaram-se as pressões hidrostáticas calculadas de *inputs* no *software* e obteve-se o valor máximo de tensão de 139,7 [MPa]. (Figura 15 e 16)

Figura 16 – Análise Von Mises do costado

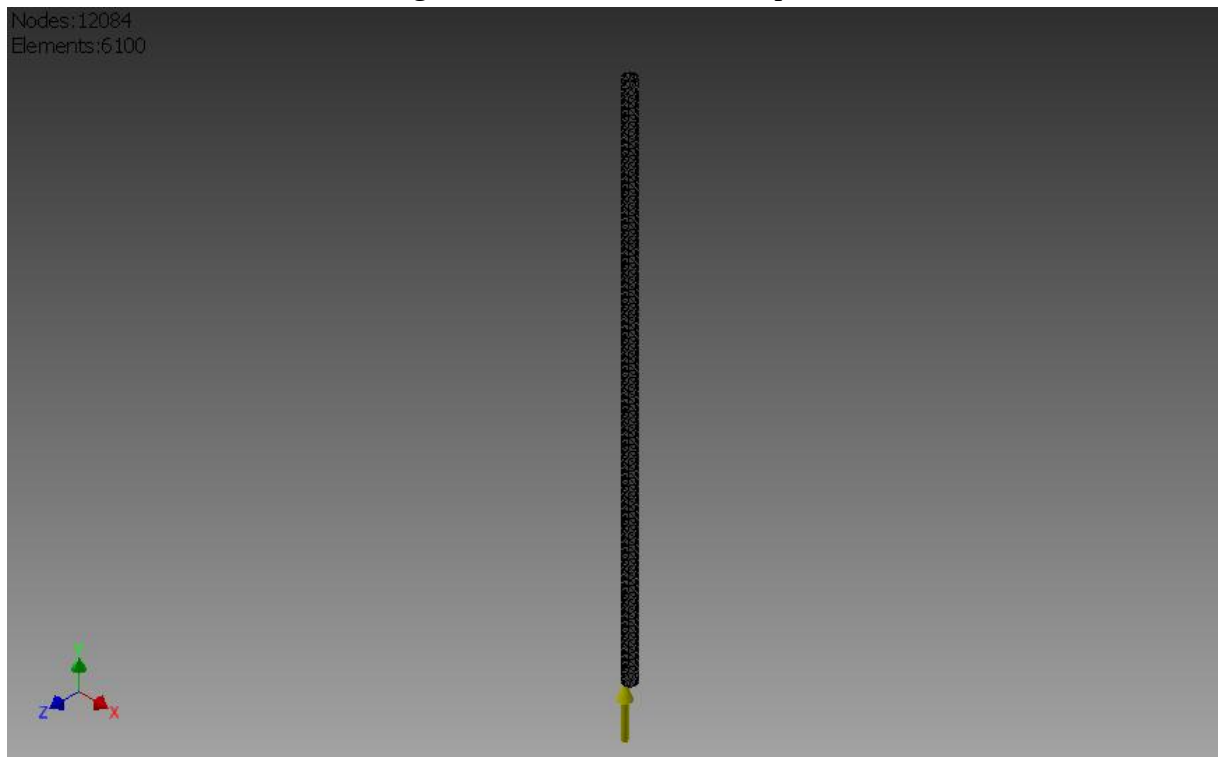


Fonte: Produção do próprio autor

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

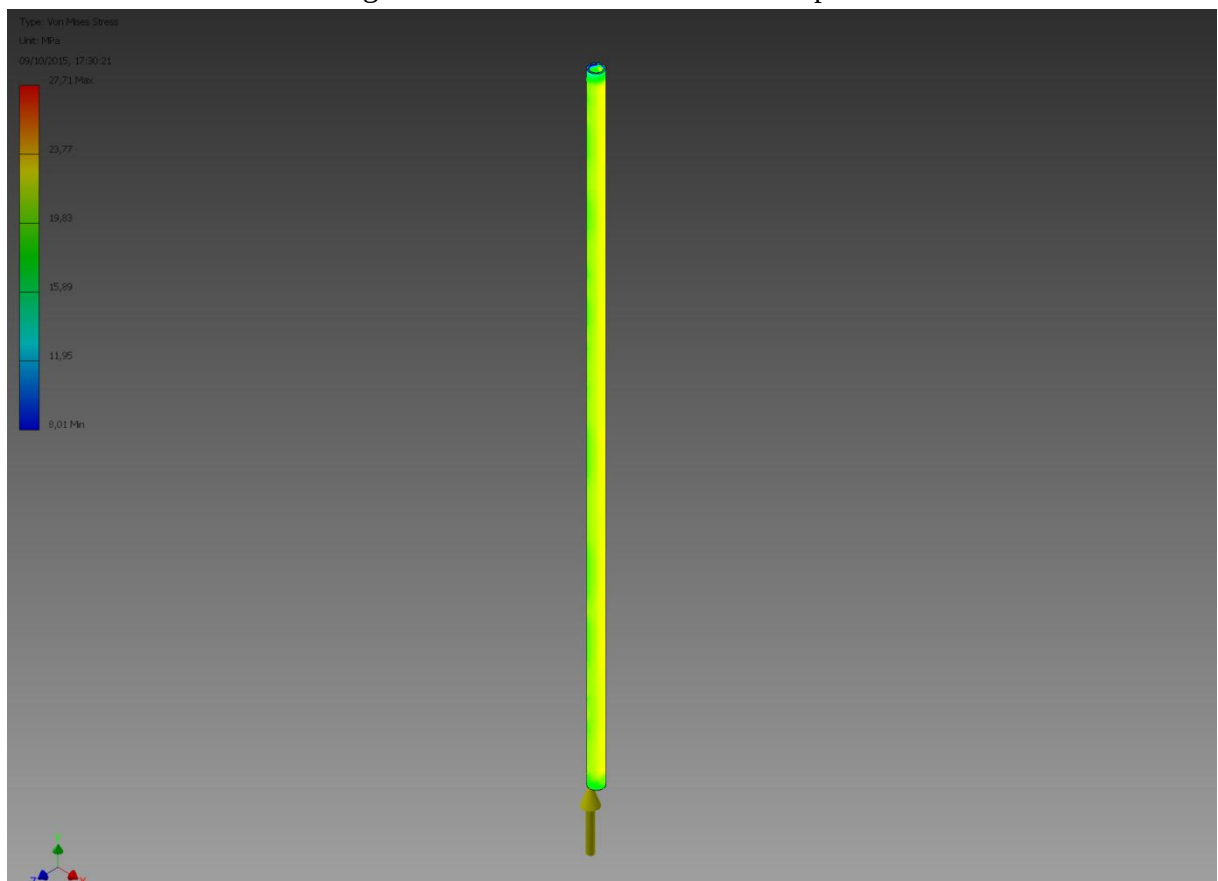
Colocou-se então a carga do teto por suporte de *input* no *software* e obteve-se o valor máximo de tensão de 27,71 [MPa]. (Figura 17 e 18)

Figura 17 – Malha e nós do suporte



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 18 – Análise Von Mises do suporte



Fonte: Produção do próprio autor

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – DIMENSÕES DO TANQUE

Volume do Tanque	24.000 [m ³]
Diâmetro do Tanque	44,0 [m]
Altura do Tanque	19,596 [m]
Máximo Nível de Líquido	15,8 [m]
Peso Vazio	471.000 [kg]
Peso em Teste Hidrostático	24.471.000 [kg]
Peso em Operação	18.711.000 [kg]

O volume do tanque atende a requisição de suprir o combustível estocado nos 4 tanques de gasolina incendiados, apresentados no item 2.3.

4.2 – FUNDO

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

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

4.3 – COSTADO

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

Pode-se observar que a tensão máxima atingida em cada anel é maior quanto menor a diferença entre espessura adotada e espessura calculada. Isso ocorre porque a espessura calculada prevê a menor espessura possível sem que a tensão admissível do material seja atingida.

A análise de elementos finitos obteve 139,7 [MPa] de tensão máxima no costado. Esta tensão se encontra no segundo anel, onde a espessura adotada tem apenas 0,11 [mm] de diferença da espessura calculada. Esta é a menor diferença de espessura do costado em sua totalidade.

A tensão máxima obtida pelo FEA, ainda é menor do que a tensão admissível do ASTM A-36 prevista pelo API-650 (Tabela 3) de 160 [MPa]. Portanto, o costado resistirá à pressão hidrostática.

4.4 – TETO

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

Pode-se observar que a tensão máxima obtida pelo FEA de 27,71 [MPa] é pouco superior à tensão de compressão calculada no item 3.5.3 de 23,32 [MPa]. Porém, é inferior à tensão admissível também calculada no item 3.5.3 de 53,53 [MPa]. Portanto o suporte resistirá à carga do teto.

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

5- CONCLUSÃO

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

REFERÊNCIAS

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

AMBIENTE LEGAL. **Muito Além do Fogo**. Disponível em <<http://www.ambientelegal.com.br/muito-alem-do-fogo/>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2015.

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

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

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

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

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

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

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

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

EMROD, Soluções em Engenharia. **Portfólio Mecânica**. Disponível em <<http://emrod.com.br/2013/portfolio-item/tanque-teto-flutuante/>>. Acesso em: 29 de Setembro de 2015.

EXAME. **Incêndio em Santos Atinge Novo Tanque de Combustível.** Disponível em <<http://exame.abril.com.br/brasil/noticias/incendio-em-santos-atinge-novo-tanque-de-combustivel-2>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2015.

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

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

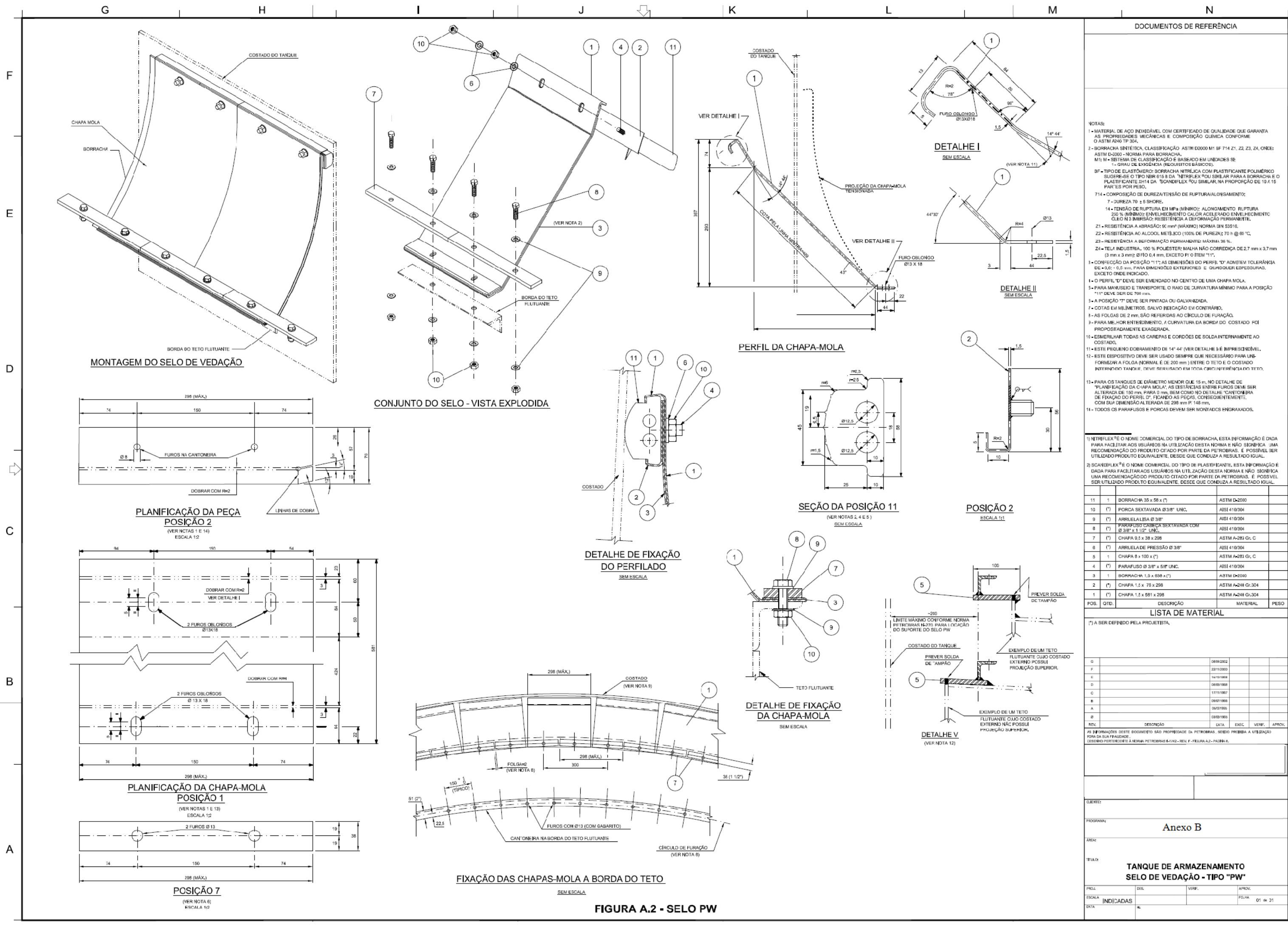
N-1742: 2003. Norma Petrobras - **Tanque de Teto Flutuante Selo PW.** Revisão F. Dezembro de 2010.

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

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Refinaria Abreu e Lima já Pode Iniciar a Produção de Diesel.** Disponível em <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,refinaria-abreu-e-lima-ja-pode-iniciar-a-producao-de-diesel-imp-,1602421>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2015.

O GLOBO. **Corpo de Bombeiros Anuncia Fim de Incêndio em Tanques de Combustível em Santos.** Disponível em <<http://oglobo.globo.com/brasil/corpo-de-bombeiros-anuncia-fim-de-incendio-em-tanques-de-combustivel-em-santos-15837461>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2015.

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



DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA				
NOTAS:				
1 - MATERIAL DE AÇO INOXIDÁVEL COM CERTIFICADO DE QUALIDADE QUE GARANTA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA CONFORME O ASTM A240 TP 304.				
2 - BORRACHA SINTÉTICA, CLASSIFICAÇÃO ASTM D2000 M1 BF 714 Z1, Z2, Z3, Z4, ONDE: ASTM D-2000 - NORMA PARA BORRACHA; M1 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO É BASEADO EM UNIDADES DE 1 - GRAU DE EXIGÊNCIA (REQUISITOS BÁSICOS).				
BF - TIPO DE ELASTÔMERO; BORRACHA NITRILICA COM PLASTIFICANTE POLIMÉRICO SUGERE-SE O TIPO NBR 615.8 DA "NITRIFLEX" OU SIMILAR PARA A BORRACHA E O PLASTIFICANTE 3014 DA "SCANDIFLEX" OU SIMILAR, NA PROPORÇÃO DE 10 x 15 PARTES POR PESO.				
714 - COMPOSIÇÃO DE DUREZA/TENSÃO DE RUPTURA/ALONGAMENTO:				
7 - DUREZA 70 ± 5 SHORE.				
14 - TENSÃO DE RUPTURA EM MPa (MÍNIMO); ALONGAMENTO RUPTURA 250 % (MÍNIMO); ENVELHECIMENTO CALOR ACELERADO ENVELHECIMENTO CLEO N3 IMERSÃO; RESISTÊNCIA A DEFORMAÇÃO PERMANENTE.				
Z1 - RESISTÊNCIA A ABRASÃO: 95 mm³ (MÁXIMO) NORMA DIN 53516.				
Z2 - RESISTÊNCIA A ALCOL METILICO (100% DE PUREZA); 70 h @ 80 °C.				
Z3 - RESISTÊNCIA A DEFORMAÇÃO PERMANENTE MÁXIMA 36 %.				
Z4 - TELA INDUSTRIAL, 100 % POLIESTER; MALHA NÃO CORROÍDICA DE 2,7 mm x 3,7 mm (3 mm x 3 mm); Ø FIO 0,4 mm, EXCETO P/ O ÍTEM "11".				
3 - CONFECÇÃO DA POSIÇÃO "11": AS DIMENSÕES DO PERFIL "11" ADMITEM TOLERÂNCIA DE +0,0/-0,5 mm, PARA DIMENSÕES EXTERIORES E QUANDO INDICADAS, EXCETO ONDE INDICADO.				
4 - O PERFIL "11" DEVE SER EMENDADO NO CENTRO DE UMA CHAPA-MOLA.				
5 - PARA MANUSEIO E TRANSPORTE, O RAIO DE CURVATURA MÍNIMO PARA A POSIÇÃO "11" DEVE SER DE 700 mm.				
3 - A POSIÇÃO "7" DEVE SER PINTADA OU GALVANIZADA.				
7 - COTAS EM MILÍMETROS, SALVO INDICAÇÃO EM CONTRÁRIO.				
8 - AS FOLHAS DE 2 mm, SÃO REFERIDAS AO CÍRCULO DE FURAÇÃO.				
3 - PARA MELHOR ENTENDIMENTO, A CURVATURA DA BORDA DO COSTADO FOI PROPOSITADAMENTE EXAGERADA.				
10 - ESMERILHAR TODAS AS CAPEAS E CORDÕES DE SOLDA INTERNAMENTE AO COSTADO.				
11 - ESTE PEQUENO DOBRAMENTO DE 14° 44' (VER DETALHE II) É IMPRESONDÍVEL.				
12 - ESTE DISPOSITIVO DEVE SER USADO SEMPRE QUE NECESSÁRIO PARA UNIFORMIZAR A FOLGA NORMAL E DE 200 mm) ENTRE O TETO E O COSTADO INTERNO DO TANQUE, DEVE SER USADO EM TODA CIRCONFERÊNCIA DO TETO.				
13 - PARA OS TANQUES DE DIÂMETRO MENOR QUE 15 m, NO DETALHE DE "PLANIFICAÇÃO DA CHAPA-MOLA", AS DISTÂNCIAS ENTRE Furos DEVE SER ALTERADA DE 150 mm, PARA 0 mm, SEM COMO NO DETALHE "CANTONEIRA DE FIXAÇÃO DO PERFIL "11", FICANDO AS PEÇAS, CONSEQUENTEMENTE, COM SUA DIMENSÃO ALTERADA DE 298 mm P/ 148 mm.				
14 - TODOS OS PARAFUSOS E PORCAS DEVEM SER MONTADOS ENGRAXADOS.				
1) NITRIFLEX® É O NOME COMERCIAL DO TIPO DE BORRACHA, ESTA INFORMAÇÃO É DADA PARA FACILITAR AOS USUÁRIOS NA UTILIZAÇÃO DESTA NORMA E NÃO SIGNIFICA UMA RECOMENDAÇÃO DO PRODUTO CITADO POR PARTE DA PETROBRAS. É POSSÍVEL SER UTILIZADO PRODUTO EQUIVALENTE, DESDE QUE CONDUZA A RESULTADO IGUAL.				
2) SCANDIFLEX® É O NOME COMERCIAL DO TIPO DE PLASTIFICANTE, ESTA INFORMAÇÃO É DADA PARA FACILITAR AOS USUÁRIOS NA UTILIZAÇÃO DESTA NORMA E NÃO SIGNIFICA UMA RECOMENDAÇÃO DO PRODUTO CITADO POR PARTE DA PETROBRAS. É POSSÍVEL SER UTILIZADO PRODUTO EQUIVALENTE, DESDE QUE CONDUZA A RESULTADO IGUAL.				
POS.	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	PESO
LISTA DE MATERIAL				
(*) A SER DEFINIDO PELA PROJETISTA.				
G			08/04/2002	
F			22/11/2000	
E			14/10/1998	
D			08/05/1998	
C			17/11/1997	
B			08/03/1996	
A			06/03/1995	
REV.	DESCRIÇÃO	DATA	EXEC.	VERIF.
AS INFORMAÇÕES DESTA DOCUMENTO SÃO PROPRIEDADE DA PETROBRAS. SEU USO É PROIBIDO SEM A AUTORIZAÇÃO DA PETROBRAS. SEU USO É PROIBIDO SEM A AUTORIZAÇÃO DA PETROBRAS. SEU USO É PROIBIDO SEM A AUTORIZAÇÃO DA PETROBRAS.				
CLIENTE:				
PROGRAMA:				
ÁREA:				
TÍTULO:				
TANQUE DE ARMAZENAMENTO				
SELO DE VEDAÇÃO - TIPO "PW"				
PROJ.	DES.	VERIF.	APROV.	
ESCALA	INDICADAS		FOLHA	01 de 01
DATA	14			