

PROJETO DE GRADUAÇÃO II

Título do Projeto:

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA EM VBA
PARA AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS
DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO**

Autor:

GABRIEL SALVADOR BARÇANTE BARROS

Orientador:

BRUNO CAMPOS PEDROZA

Data: 25 de julho de 2019

GABRIEL SALVADOR BARÇANTE BARROS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA EM VBA
PARA AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS
DE TANQUES DE ARMAZENAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador:
Prof. BRUNO CAMPOS PEDROZA

Niterói
2019

PROJETO DE GRADUAÇÃO II

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO

Título do Trabalho:

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA EM VBA
PARA AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS DE TANQUES DE
ARMAZENAMENTO.**

Parecer do Professor Orientador da Disciplina:

- Grau Final recebido pelos Relatórios de Acompanhamento:

- Grau atribuído ao grupo nos Seminários de Progresso:

Parecer do Professor Orientador:

Nome e assinatura do Prof. Orientador:

Prof.: Bruno Campos Pedroza

Assinatura:

Parecer Conclusivo da Banca Examinadora do Trabalho:

- Projeto Aprovado sem restrições
- Projeto Aprovado com restrições

Prazo concedido para cumprimento das exigências: / /

Discriminação das exigências e/ou observações adicionais:

PROJETO DE GRADUAÇÃO II

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO (continuação)

Título do Trabalho:

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA EM VBA
PARA AUTOMATIZAÇÃO DE PROJETOS BÁSICOS DE TANQUES DE
ARMAZENAMENTO.**

Aluno: Gabriel Salvador Barçante Barros

Grau:

Composição da Banca Examinadora:

Prof.: Bruno Campos Pedroza.

Assinatura :

Prof.: Fabio Toshio Kanizawa.

Assinatura :

Prof.: Heraldo da Costa Mattos.

Assinatura :

Data de Defesa do Trabalho: 25 / 07 / 2019

Departamento de Engenharia Mecânica, 25 / 07 / 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Andréa e Paulo.
Aos meus avós e avôs.
Ao meu irmão Pedro.
Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Fluminense, por tantos anos de aprendizados e noites viradas;

Ao professor orientador Bruno Campos Pedroza pela dedicação, compreensão e o apoio durante esta jornada;

Aos meus pais e irmão, pelo amor, incentivo e apoio incondicional;

Aos grandes amigos criados, em especial aos oriundos do Baja, por tantos anos de companheirismo e amizade;

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O projeto de um tanque de armazenamento atmosférico, cilíndrico, vertical, soldado e de teto fixo cônicos, seguindo as normas API 650 e N-270, é extremamente complexo e com muitos detalhes. Por isso, a fim de minimizar o tempo de projeto básico, busca-se, neste trabalho, desenvolver um programa de código aberto em VBA para automatizar o projeto básico desses tanques, com enfoque em ser um *software* de baixo custo, para utilização acadêmica. Com esse fim, neste trabalho será detalhado os principais requisitos impostos pelas normas ou de prática comum no mercado sobre o projeto de tanques de armazenamento de teto fixo cônicos sob pressão atmosférica, além do cálculo necessário para o dimensionamento dos principais componentes deles. Por fim, será desenvolvido uma modelagem para analisar, através do Método dos Elementos Finitos, a estrutura de sustentação do teto fixo suportado e uma outra para as chapas do costado, objetivando a validação do Programa Tanque de Armazenamento.

Palavras-Chave: Tanque de armazenamento. Teto fixo cônicos. API 650. N-270. VBA. FEM.

ABSTRACT

The design of an atmospheric, cylindrical, vertical, welded and fixed cone roof storage tank, following API 650 and N-270 standards, is extremely complex and detailed. Therefore, in order to minimize the time of basic design, this paper aims to develop an open source software in VBA to automate the basic design of these tanks, focusing on being a low-cost software for academic use. To this end, this paper will detail the main requirements imposed by the standards or common practice in the market on the design of storage tanks with close-top cone roof under atmospheric pressure, in addition to the calculation necessary for the design of the main components of them. Finally, a modeling will be developed to analyze, through the Finite Element Method, the support structure of the supported fixed roof, and another one for the shell plates, aiming the validation of the Storage Tank Program.

Key-Words: Storage tank. Fixed cone roof. API 650. N-270. VBA. FEM.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

- 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO 20
- 1.2 OBJETIVOS 24

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25

- 2.1 TIPOS DE TANQUES 25
 - 2.1.1 TANQUE DE TETO FIXO 26
 - 2.1.1.1 Teto cônico 26
 - 2.1.1.2 Teto curvo 26
 - 2.1.1.3 Teto em gomos 27
 - 2.1.2 TANQUE DE TETO COM DIAFRAGMA FLEXÍVEL 28
 - 2.1.3 TANQUE DE TETO MÓVEL 28
 - 2.1.4 TANQUE DE TETO FLUTUANTE 29
 - 2.1.4.1 Tanque de teto flutuante externo 29
 - 2.1.4.2 Tanque de teto flutuante interno 30
- 2.2 SELEÇÃO DO TIPO DE TANQUE 31
- 2.3 DIMENSÕES DE UM TANQUE 32
- 2.4 BASE E FUNDAÇÃO 33
 - 2.4.1 FUNDAÇÃO DIRETA (SUPERFICIAL) 34
 - 2.4.1.1 Fundação direta do tipo aterro compactado 34
 - 2.4.1.2 Fundação direta do tipo anel de concreto 35
 - 2.4.1.3 Fundação direta do tipo laje integral de concreto armado 36
 - 2.4.2 FUNDAÇÃO PROFUNDA (ESTAQUEADA) 36
- 2.5 PARÂMETROS DE PROJETO 37
 - 2.5.1 TEMPERATURA DE PROJETO 38
 - 2.5.2 PRESSÃO E VÁCUO DE PROJETO 38
- 2.6 MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE TANQUES 38
 - 2.6.1 CHAPAS 39
 - 2.6.2 PERFIS ESTRUTURAIS 43
 - 2.6.3 TUBOS E FORJADOS 44
 - 2.6.4 FLANGES 45
- 2.7 SOBRE-ESPESSURA DE CORROSÃO 45
- 2.8 PROJETO DO FUNDO 47
 - 2.8.1 CHAPAS ANULARES 48

2.8.2	CHAPAS RECORTADAS	52
2.9	PROJETO DO COSTADO	53
2.9.1	TENSÕES ADMISSÍVEIS	56
2.9.2	API 650 ANEXO A	59
2.9.3	API 650 CORPO DE NORMA E MÉTODO DO PONTO VARIÁVEL DE PROJETO	60
2.10	PROJETO DO TETO FIXO CÔNICO	64
2.10.1	CARGAS SOBRE O TETO	65
2.10.2	TETO FIXO CÔNICO SUPORTADO	66
2.10.2.1	Dimensionamento das vigas	68
2.10.2.2	Dimensionamento das colunas	72
2.10.3	TETO FIXO CÔNICO AUTOPORTANTE	76
2.11	ACESSÓRIOS	77
2.11.1	ACESSÓRIOS PARA O FUNDO	77
2.11.2	ACESSÓRIOS DO COSTADO	80
2.11.2.1	Bocais	80
2.11.2.2	Bocas de visita	82
2.11.2.3	Portas de limpeza	84
2.11.2.4	Anéis de contraventamento	85
2.11.3	ACESSÓRIOS DO TETO	88
2.11.3.1	Bocais	88
2.11.3.2	Bocas de visita	88

3 PROGRAMA TANQUE DE ARMAZENAMENTO 90

3.1	ENTRADA DE DADOS	90
3.2	EXECUÇÃO E RESULTADOS	97

4 ANÁLISE DO TANQUE TQ-01 100

4.1	ANÁLISE DAS CHAPAS DO COSTADO	100
4.2	ANÁLISE DA ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO DO TETO	106
4.2.1	ANÁLISE DAS VIGAS	107
4.2.2	ANÁLISE DAS COLUNAS	116

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 123

5.1	CONCLUSÕES	123
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	123

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 125**7 APÊNDICES 127**

7.1 APÊNDICE 1 127

7.1.1 CÓDIGO PARA O PROJETO DO COSTADO 127

7.1.2 CÓDIGO PARA O PROJETO DO TETO 134

7.1.3 CÓDIGO PARA O PROJETO DO FUNDO 144

7.1.4 CÓDIGO PARA O PROJETO DO ANEL DE CONTRAVENTAMENTO INTERMEDIÁRIO 149

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1 - Tanque de armazenamento atmosférico.</i>	23
<i>Figura 2 - Principais componentes de um tanque de armazenamento.</i>	25
<i>Figura 3 - Tanques de teto fixo cônicos.</i>	26
<i>Figura 4 - Tanques de teto fixo curvo.</i>	27
<i>Figura 5 - Tanque de teto fixo em gomos.</i>	27
<i>Figura 6 - Tanque de teto com diafragma flexível.</i>	28
<i>Figura 7 - Tanque de teto móvel.</i>	28
<i>Figura 8 - Tanque de Teto Flutuante Externo.</i>	30
<i>Figura 9 - Tanque de Teto Flutuante Interno.</i>	30
<i>Figura 10 - Fundação direta tipo aterro compacto.</i>	35
<i>Figura 11 - Fundação direta do tipo anel de concreto.</i>	35
<i>Figura 12 - Fundação direta do tipo laje de concreto armado.</i>	36
<i>Figura 13 - Fundação profunda.</i>	37
<i>Figura 14 - Temperatura mínima de projeto admissível para chapas do costado de tanques de armazenamento sem realização de teste de impacto.</i>	42
<i>Figura 15 - Disposição típica do fundo com chapas anulares.</i>	51
<i>Figura 16 - Fundo de tanque com chapas anulares.</i>	51
<i>Figura 17 - Disposição típica do fundo com chapas recortadas.</i>	52
<i>Figura 18 - Fundo de tanque com chapas recortadas.</i>	53
<i>Figura 19 - Disposição das chapas do costado.</i>	53
<i>Figura 20 - Componentes da estrutura de sustentação de um teto fixo cônicos.</i>	67
<i>Figura 21 - Ligação das vigas radiais com o costado.</i>	68
<i>Figura 22 - Cargas sobre as colunas.</i>	76
<i>Figura 23 - Dreno de fundo do tipo com bacia.</i>	78
<i>Figura 24 - Dreno de fundo do tipo dreno com bacia.</i>	78
<i>Figura 25 - Exemplo de bocal de movimentação de carga.</i>	81
<i>Figura 26 - Bocal do tipo baixo.</i>	82
<i>Figura 27 - Exemplo de boca de visita.</i>	83
<i>Figura 28 - Exemplo de porta de limpeza.</i>	84
<i>Figura 29 - Tanque com anéis de contraventamento.</i>	85
<i>Figura 30 - Exemplo de boca de visita no teto fixo.</i>	89
<i>Figura 31 - Primeira aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento.</i>	90
<i>Figura 32 - Segunda aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento, focada no projeto do fundo.</i>	91
<i>Figura 33 - Mensagem alertando quanto ao tipo de fundo a ser utilizado quando o diâmetro tem até 6 m.</i>	92

<i>Figura 34 - Mensagem alertando a proibição de chapas recortadas quando o diâmetro é maior que 15 m.</i>	92
<i>Figura 35 - Terceira aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento, focada no projeto do teto.</i>	93
<i>Figura 36 - Mensagem alertando quanto ao tipo de teto a ser utilizado quando o diâmetro tem até 6 m.</i>	94
<i>Figura 37 - Última aba do formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento.</i>	95
<i>Figura 38 - Formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento para o projeto da estrutura de sustentação.</i>	96
<i>Figura 39 - Formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento para o material da estrutura de sustentação.</i>	96
<i>Figura 40 - Entrada de dados para o projeto do costado e estrutura de sustentação.</i>	97
<i>Figura 41 - Projeto do costado para o tanque TQ-01.</i>	98
<i>Figura 42 - Projeto do teto suportado para o tanque TQ-01.</i>	98
<i>Figura 43 - Projeto do fundo para o tanque TQ-01.</i>	99
<i>Figura 44 - Verificação quanto a necessidade de anel de contraventamento intermediário para o tanque TQ-01.</i>	99
<i>Figura 45 - Modelo 3D do tanque TQ-01.</i>	100
<i>Figura 46 - Vista frontal do tanque TQ-01.</i>	101
<i>Figura 47 - Vista frontal da simplificação 2D</i>	101
<i>Figura 48 - Condições de contorno aplicadas ao modelo simplificado do tanque.</i>	102
<i>Figura 49 - Cargas e condições de contorno aplicadas ao modelo simplificado do tanque.</i>	103
<i>Figura 50 – Malha de 4828 elementos gerada para a simulação do tanque.</i>	104
<i>Figura 51 - Gráfico tensão de Von Mises versus número de elementos.</i>	105
<i>Figura 52 – Gráfico deslocamento na direção X versus número de elementos.</i>	106
<i>Figura 53 - Viga radial 1, perfil U 8" x 20,5.</i>	107
<i>Figura 54 - Viga radial 2, perfil U 6" x 15,62.</i>	108
<i>Figura 55 - Viga transversal, perfil W 250 x 44,8.</i>	108
<i>Figura 56 - Resultado de tensão axial para a VR1 com 10 elementos.</i>	109
<i>Figura 57 - Resultado do deslocamento em Y para VR1 com 10 elementos.</i>	110
<i>Figura 58 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para a VR1.</i>	111
<i>Figura 59 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número de elementos para a VR1.</i>	111
<i>Figura 60 - Resultado de tensão para a VR2 com 10 elementos.</i>	112
<i>Figura 61 - Resultado do deslocamento em Y para VR2 com 10 elementos.</i>	112
<i>Figura 62 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para a VR2.</i>	113
<i>Figura 63 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número elementos para a VR2.</i>	113
<i>Figura 64 - Resultado de tensão para a VT com 10 elementos.</i>	114
<i>Figura 65 - Resultado do deslocamento em Y para VT com 10 elementos.</i>	114
<i>Figura 66 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para VT.</i>	115

<i>Figura 67 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número de elementos para VT.</i>	116
<i>Figura 68 - Coluna intermediária, DN 10" Sch 160.</i>	117
<i>Figura 69 - Coluna central, DN 10" Sch 100.</i>	117
<i>Figura 70 - Resultado da amplitude resultante (radianos) para a coluna intermediária com 6 elementos.</i>	118
<i>Figura 71 - Gráfico amplitude resultante versus número de elementos para a coluna intermediária.</i>	119
<hr/>	
<i>Figura 72 - Gráfico fator de segurança da flambagem versus número de elementos para a coluna intermediária.</i>	120
<i>Figura 73 - Resultado da amplitude resultante (radianos) para a coluna central com 6 elementos.</i>	120
<i>Figura 74 - Gráfico amplitude resultante versus número de elementos para a coluna central.</i>	121
<i>Figura 75 - Gráfico fator de segurança da flambagem versus número de elementos para a coluna central.</i>	122

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Recomendações de Tipos Usuais de Tanques.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 2: Graus aceitáveis de materiais de chapas produzidos por normas nacionais.</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 3: Grupos de materiais.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4: Taxas Anuais de Corrosão para Aço-Carbono (mm por ano).</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 5: Espessura Mínima das Chapas Anulares.</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 6: Espessura da chapa anular do fundo.</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 7: Espessura mínima das chapas do costado segundo a API 650(2016).</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 8: Espessura mínima das chapas do costado segundo a N-270 (2014).</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 9: Dimensões mínimas das cantoneiras de topo dos costados.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 10: Tensões admissíveis de materiais permitidos para chapas do costado.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 11: Tensões admissíveis de materiais permitidos para chapas do costado (continuação da Tabela 10).</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 12: Dimensões do dreno de fundo do tipo com bacia.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 13: Drenos de fundo dos tanques.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 14: Diâmetro do bocal secundário.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 15: Quantidades e dimensões de bocas de visita e portas de limpeza dos tanques.</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 16: Dimensões do anel de contraventamento intermediário.</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 17: Pressão hidrostática aplica em cada anel do costado.</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 18: Propriedades do aço ASTM A 283M Grau C.</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 19: Resultados do estudo de convergência.</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 20: Propriedades do aço ASTM A 36M.</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 21: Esforços sobre as vigas.</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 22: Resultados do estudo de convergência para viga radial 1.</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 23: Resultados do estudo de convergência para viga radial 2.</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 24: Resultados do estudo de convergência para viga transversal.</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 25: Esforços sobre as colunas.</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 26: Resultados do estudo de convergência para coluna intermediária.</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 27: Resultados do estudo de convergência para coluna central.</i>	<i>121</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AISC = *American Institute of Steel Construction*;
API = *American Petroleum Institute*;
ANP = Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;
ASTM = *American Society for Testing and Materials*;
BP = *British Petroleum*;
BS = *British Standards*;
CSA = *Canadian Standards Association*
CTA = Cálculo de Tanques de Armazenamento;
EN = *European Committee for Standardization*;
FISPQ = Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico;
ISO = *International Organization for Standardization*;
FEM = Método dos Elementos Finitos;
PTA = Programa Tanque de Armazenamento;
VBA = *Visual Basic for Applications*;
VR1 = Viga Radial 1;
VR2 = Viga Radial 2;
VT = Viga Transversal.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a = diâmetro do círculo formado pelas colunas intermediárias (ver Figura 20), [m];
 b = espaçamento máxima admissível entre as vigas radiais, medido circumferencialmente entre os centros delas, [mm];
 g = aceleração da gravidade, [m/s^2];
 h_{ac} = distância vertical entre o anel de contraventamento intermediário e a cantoneira no topo do costado, [m];
 h_1 = altura do 1º anel do costado, [mm];
 q = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga, [kgf/m];
 q_{vr1} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga externa (VR_1), [kgf/m];
 q_{vr2} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga intermediária (VR_2), [kgf/m];
 q_{vt} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga transversal, [kgf/m];
 r = raio nominal do tanque, [mm];
 r_{adot} = raio de giração adotado do perfil selecionado para coluna, [cm];
 r_{min} = raio de giração mínimo possível para o perfil da coluna, [cm];
 t = espessura corroída do 1º anel do costado, ou seja, é a espessura nominal menos qualquer sobre-espessura de corrosão, [mm];
 t_b = espessura nominal da chapa anular, [mm];
 t_{com} = espessura nominal comercial do 1º anel do costado, [mm];
 t_{dx} = espessura mínima de projeto calculada pelo método do anel superior [mm];
 t_f = espessura nominal do anel do costado mais fino, [mm];
 t_L = espessura corroída do anel inferior ao anel em análise, para as condições de projeto e teste hidrostático, [mm];
 t_n = espessura nominal, [mm];
 t_{pd} = espessura preliminar do 1º anel para condição de projeto, [mm];
 t_{pt} = espessura preliminar do 1º anel para condição de teste hidrostático, [mm];
 t_r = espessura corroída do teto, [mm];
 t_{ra} = espessura nominal das chapas do teto autoportante, não menor que 5 mm, [mm];

t_t = espessura nominal do anel do costado para qual a largura transposta está sendo calculada, [mm];

t_{tub} = espessura da seção tubular, sendo 1/4 in o valor mínimo aceitável, [in];

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

t_u = espessura corroída do anel superior que está em análise, para as condições de projeto e teste hidrostático, [mm];

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

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

t_1 = espessura corroída do 1º anel do costado usado para o cálculo da espessura do 2º anel pela condição de projeto. A espessura do 1º anel calculada para condição de teste hidrostático deve ser usada para o cálculo da espessura do 2º anel, [mm];

t_{1d} = espessura do 1º anel do costado calculada para condição de projeto, [mm];

t_{1t} = espessura do 1º anel do costado calculada para condição de teste hidrostático, [mm];

t_2 = espessura mínima requerida para o 2º anel do costado, ou seja, o maior valor entre o calculado pela condição de projeto ou condição de teste hidrostático, [mm];

t_{2a} = espessura corroída do 2º anel do costado, [mm];

x = menor valor determinado entre x_1 , x_2 e x_3 ;

y = fator dependente do tipo de perfil selecionado para a coluna;

A_{alma} = área da alma do perfil selecionado, [cm^2];

A_c = área da seção transversal da coluna, [in^2];

A_r = área da seção da cantoneira de topo, [mm^2];

C = parâmetro adimensional simbolizado pela Equação (20);

CA = sobre-espessura de corrosão, [mm];

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

D_b = declividade do fundo;

D_L = carga morta, ou seja, peso próprio do teto, que inclui o peso das chapas e da estrutura de sustentação, [kgf/m^2];

Dr = declividade do teto;

E = módulo de elasticidade do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar $2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ($30 \times 10^6 \text{ psi}$), [kgf/cm^2];

E_j = fator de eficiência da junta;

F_a = mínima tensão de tração admissível para o material na junta entre o teto e o costado, [MPa];

F_c = cortante máximo, que para viga com carregamento uniformemente distribuído e bi-apoiada é igual a reação no apoio, [kgf];

F_{pe} = fator de combinação da pressão externa que é definido como a razão da pressão de operação normal externa para a pressão externa de projeto, com valor mínimo de 0,4 (para Barros (2017), $F_{pe} = 0,4$);

FS = fator de segurança;

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

F_{yj} = limite de escoamento mínimo da junta entre o teto e costado na máxima temperatura de projeto, [MPa];

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

G = gravidade específica (densidade relativa) para o líquido armazenado;

H = nível de líquido de projeto, ou seja, é a altura do fundo do anel, que está sendo considerado, até o topo do costado incluindo a cantoneira no topo, caso exista, [m];

$H_{máx}$ = altura nominal do tanque de armazenamento, [m];

H_l = máxima altura do costado não reforçado, [m];

I = momento de inércia da seção transversal do perfil, [cm⁴];

K = parâmetro adimensional simbolizado pela Equação (19);

L = parâmetro simbolizado pela Equação (8), [mm];

L_c = comprimento real da coluna, [m];

L_e = comprimento efetivo da coluna, [m];

L_r = carga viva do teto, ou seja, sobrecarga correspondente a uma carga viva. Pela N-270 (2014), o valor a ser considerado é de 100 kgf/m² (981 N/m²), [kgf/m²];

L_t = comprimento da viga transversal (VT), [m];

L_v = comprimento da viga em questão, [m];

L_{vr} = comprimento da viga radial, [m];

M = momento fletor máximo, [kgf.m];

N_l = número mínimo de vigas radiais externas (VR₁);

N_2 = número mínimo de vigas radiais intermediárias (VR₂);

P_{cc} = carga atuando sobre a coluna central, [kgf];

P_{ci} = carga atuando sobre a coluna intermediária, [kgf];

P_e = pressão externa de projeto, que, segundo a seção 2.5.2, deve estar limitado a 0,25kPa (25,4 kgf/m), [kgf/m²];

P_h = pressão hidrostática, [Pa];

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

Q_D = reação de apoio da viga transversal na coluna intermediária à direita, [kgf];

Q_E = reação de apoio da viga transversal na coluna intermediária à esquerda, [kgf];

Q_1 = forma 1 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [kgf/m²];

Q_2 = forma 2 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [kgf/m²];

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

R_o = raio externo da seção tubular, [in];

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

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

V = velocidade do vento de projeto, considerando uma rajada de 3 segundo, [km/h];

W = módulo de resistência, [cm³];

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

W_r = largura real de cada anel do costado, [mm];

W_{tr} = largura transposta de cada anel do costado, [mm];

Z = módulo de resistência mínimo requerido, [cm³];

δ = deflexão máxima, [cm];

λ = índice de esbeltez do perfil adotado;

θ = ângulo entre o teto cônicos e a horizontal, [graus];

σ_a = tensão admissível do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar 1540 kgf/cm² (22000 psi), [kgf/cm²];

σ_{adm} = máxima tensão admissível à compressão nas colunas, [psi];

σ_{cc} = tensão de compressão na coluna central, [psi];

σ_{ci} = tensão de compressão na coluna intermediária, [psi];

τ = tensão cisalhante, [kgf/cm²];

τ_a = tensão admissível ao cisalhamento do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar 910 kgf/cm² (13000 psi), [kgf/cm²];

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

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Muito se tem discutido, hoje em dia, acerca de energia renovável e o futuro da indústria de óleo e gás no mundo. Para Dale e Fattouh (2018), as previsões do ponto em que a demanda de petróleo atingirá seu pico são muito incertas e dependem de muitas suposições, mas a maioria das previsões, de organizações públicas e privadas, projeta que o nível de demanda de petróleo entre 2035 e 2040 será maior que hoje. Além disso, nenhuma dessas previsões indica que, após o pico de demanda ser atingido, a demanda por petróleo cairá significativamente.

Já no Brasil, a indústria de óleo e gás, após anos de incertezas na economia, vem demonstrando sua retomada em investimentos, sendo o ano de 2017 marcado pela retomada das rodadas de licitação de blocos para exploração e produção de petróleo e gás natural. Ao mesmo tempo, de acordo com a *BP Energy Outlook* (2018), o país se consolidou como o segundo maior consumidor de biocombustíveis no mundo em 2016, sendo superado apenas pelos EUA, devendo manter essa posição até 2040. Isso significa que, do total de combustíveis líquidos consumidos pelo país em 2016, os biocombustíveis representavam 15%, devendo chegar a 24% em 2040.

Com isso, o Brasil se consolida com uma carteira bastante diversificada de energia, se preparando para o futuro, ao mesmo tempo em que volta a se afirmar, após alguns anos incertezas devido a questões políticas, como um dos maiores produtores do mundo de petróleo e seus derivados, além dos biocombustíveis.

Segundo a ANP (2018), em 2017 a indústria de óleo e gás nacional apresentou crescimento pelo quarto ano consecutivo na sua produção de petróleo, alcançando um crescimento de 4,2% em comparação a 2016, e atingindo 957 milhões de barris produzidos no ano, com média de 2,6 milhões de barris diários. Isso decorre, principalmente, da importante marca alcançada pela produção no pré-sal, que apresentou uma elevação de 26,1% em relação a 2016. É importante destacar que o Brasil, além de apresentar este aumento na sua produção, ainda importou 54,5 milhões de barris de petróleo em 2017.

Em 2017, a produção de derivados do petróleo sofreu uma retração de 3,7%, em comparação ao ano anterior, totalizando uma produção de 110,2 milhões de m³. Concomitantemente, o processamento de xisto bruto, que da sua transformação são obtidos derivados energéticos, como óleo combustível, e não energéticos, como a Nafta – que é usada na produção de outros derivados –, sofreu uma diminuição de 2,6% em relação a 2016,

totalizando 1,5 milhão de toneladas. Entretanto, o volume de derivados importados apresentou um crescimento significativo de 26,3%, o que corresponde a 35,7 milhões de m³ (ANP, 2018).

O setor de biocombustíveis no Brasil também sofreu alterações em 2017, comparado ao ano de 2016. A produção total de etanol, tanto hidratado quanto o anidro, caiu 0,3%, totalizando 28,6 milhões de m³. Porém, a taxa média anual de crescimento entre 2008 e 2017 foi de 0,5%. Ademais, o Brasil importou 1.825,6 mil m³ em 2017, correspondendo a uma elevação de 119,4% ao ano anterior (ANP, 2018).

Além do etanol, outro biocombustível importante é o Biodiesel (B100), que apresentou produção 12,9% superior em 2017, em relação a 2016. Esse resultado se deve, principalmente, ao aumento da proporção de B100 adicionado ao óleo diesel, passando de 7% para 8%, em volume, em março de 2017, conforme Lei nº 13.263/2016 (ANP, 2018). Porém, o valor da produção nacional deve ser ainda maior em 2018, já que em março deste mesmo ano, a mistura obrigatória passou a ser de 10%, antecipando em um ano o aumento previsto naquela lei.

Em 2017, as exportações brasileiras de petróleo tiveram um aumento de 24,8% em relação a 2016, alcançando o valor de 363,7 milhões de barris. Paralelamente a esse fato, as exportações de derivados de petróleo registraram um aumento de 5,2%, totalizando 12,5 milhões de m³, concomitante ao aumento das vendas nacionais, registradas pelas distribuidoras de combustíveis, de 1,3%, totalizando 122,4 milhões de m³ (ANP, 2018).

Assim, a movimentação de petróleo e seus derivados, além dos biocombustíveis, mostra-se crescente na produção, exportação, importação e vendas para o mercado interno, fazendo com que o sistema logístico se torne cada vez mais complexo. Isso leva ao agravamento de conhecidos problemas no transporte e armazenagem de carga no Brasil, como a qualidade das estradas e a má qualidade na frota em circulação, agravado devido ao transporte rodoviário ser o principal modal no país; a limitação da infraestrutura do modal ferroviário, que viria como um reparo ao problema anterior; entre outros.

Segundo Cardoso (2004), não existe tratamento logístico diferenciado quando o produto a ser movimentado for petróleo e/ou seus derivados, a não ser no aspecto de segurança ambiental. Por isso, conceitua-se logística de acordo com a definição do *Council of Supply Chain Management Professionals* norte-americano, citado em Novaes (2007):

Logística é o processo de planejar, implementar e controlar de maneira eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor.

Então, ao se tratar da logística de movimentação de petróleo e seus derivados, e levando em conta as dimensões continentais do Brasil, faz-se necessário um sistema logístico bem planejado e bem implementado, com sua operação devidamente realizada. Esse sistema deve ser constantemente avaliado, monitorado e controlado, devido à complexidade dos problemas logísticos e sua natureza dinâmica (NOVAES, 2007).

No Brasil, a cadeia logística do petróleo e seus derivados começa na produção de petróleo *offshore* ou *onshore*, que é transportado dos campos aos terminais ou até as refinarias diretamente. Os combustíveis líquidos produzidos nas refinarias podem ser entregues diretamente às distribuidoras ou enviados para outros terminais, ambos por modal dutoviário ou aquaviário.

Já os biocombustíveis líquidos, depois de produzidos nas usinas de etanol e plantas de biodiesel, podem ser transportados diretamente pelos produtores para as distribuidoras ou entregues em terminais, para posteriormente serem entregues às distribuidoras ou exportados.

Em 2017, o Brasil contava com 17 refinarias, com capacidade para processar 2,4 milhões de barris/dia, mesmo valor de 2016, mas apresentando um fator de utilização de 76,2%. Elas possuíam capacidade de armazenamento de 5,7 milhões de m³ de petróleo e 10,6 milhões de m³ de derivados de petróleo, intermediários e etanol, grande parte disto estocados em tanques de armazenamento atmosféricos. O país ainda dispunha de 107 terminais, sendo 59 terminais aquaviários (com 1.389 tanques) e 48 terminais terrestres (com 533 tanques), totalizando 1.922 tanques com capacidade nominal de 13,2 milhões de m³ (ANP, 2018).

Ao fim de 2017, o Brasil possuía 293 bases de distribuição de combustíveis líquidos, com capacidade nominal de armazenamento de 3,8 milhões de m³, sendo que grande parte deste total é estocado em tanques de armazenamento, com exceção de GLP que corresponde apenas a 3,9% do total, ou seja, 149,6 mil m³ (ANP, 2018).

Os dados apresentados comprovam uma expansão na indústria de óleo e gás no Brasil, que no curto e médio prazo devem se expandir ainda mais, principalmente devido ao crescimento na exploração de petróleo no pré-sal. Como consequência dessa expansão, surge a necessidade cada vez maior de melhorar o sistema logístico dos produtos líquidos pelo território nacional, passando pela exploração, refino, distribuição, armazenamento e exportação, no qual um dos itens de elevada importância é o tanque de armazenamento atmosférico.

Segundo Barros (2017), os tanques de armazenamento atmosférico são equipamentos de caldeiraria pesada, sujeitos a pressão aproximadamente atmosférica e destinados,

principalmente, ao armazenamento de petróleo, seus derivados líquidos e outros produtos líquidos, tais como: álcool, biodiesel, produtos químicos e água.

Eles podem ser observados na Figura 1 e são tipicamente encontrados em refinarias, terminais, oleodutos, bases de distribuição, parques industriais, entre outros locais onde se tenha necessidade de armazenamento de produtos líquidos à pressão aproximadamente atmosférica.

Esses tanques são construídos de diferentes tipos, formas, tamanhos, com um número variado de materiais e diferentes formas de fabricação - soldados, rebitados e aparafusados. Eles possuem diferentes normas para sua regulamentação, de institutos nacionais, como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e internacionais, como API (*American Petroleum Institute*), além de normas internas de grandes empresas, como a Petrobras.



Figura 1 - Tanque de armazenamento atmosférico.
Fonte: Barros (2017)

Os tanques de armazenamento convencionais – projeto convencional (segundo normas nacionais e internacionais) e material de fabricação nacional – são construídos em uma vasta faixa de capacidades, desde 16 m³ até aproximadamente 95.400 m³. Contudo, com a utilização de material de alta resistência mecânica e elevada tenacidade, além de um projeto mais elaborado, é possível a construção de tanques com capacidade de 159.000 m³ (BARROS, 2017).

Os tanques de armazenamento são equipamentos imprescindíveis para o funcionamento de uma unidade operacional, além de possuírem um elevado investimento, o que faz com que seu projeto mereça o maior cuidado possível. Também deve-se levar em consideração que a falha no projeto desses equipamentos pode levar a danos irreparáveis, como a perda de vida humana, além de desastres ambientais em larga escala.

Por isso, é de extrema importância que o projeto de tanques de armazenamento seja assertivo, para evitar qualquer tipo de falha futura e necessidade de retrabalho, além de precisar

ser extremamente rápido, para diminuir o tempo levado na etapa de projeto, tornando o uso de *softwares* para dimensionamento e análise desses equipamentos extremamente úteis na indústria.

Entre os *softwares* comerciais, se destaca o *TANK™* desenvolvido pela *Intergraph CADWorx® & Analysis Solutions*, que é parte do grupo *Hexagon PPM*, também se destaca o *AMETank©*, desenvolvido pela *TechnoSoft*. Ambos os *softwares* realizam o dimensionamento e análise de tanques de armazenamento baseados nas normas da *American Petroleum Institute* (API), entre elas a API 650, 653 e 620. Além deles, existem *softwares* para uso interno de grandes empresas, como o programa Cálculo de Tanques de Armazenamento (CTA), desenvolvido pela Petrobras.

Porém, o uso desses *softwares* acaba sendo limitado, ou devido ao elevado custo para aquisição de licenças válidas, ou devido à exclusividade no uso para a empresa desenvolvedora. Isso, aliado a inexistência de *softwares* de baixo custo, faz com que a utilização de programas para o dimensionamento de tanques se torne praticamente impossível em universidades.

1.2 OBJETIVOS

Devido à dificuldade para atender de forma rápida e eficiente a demanda existente, principalmente de um *software* de baixo custo, para o dimensionamento de tanques de armazenamento atmosféricos, cilíndricos, verticais, não enterrados e soldados, projetados segundo as normas API 650 e N-270 para indústria de óleo e gás, este trabalho tem por objetivo principal desenvolver um programa de código aberto em *Visual Basic for Applications* (VBA) para automatização do projeto básico de tanques de armazenamento de teto fixo.

O objetivo secundário será o desenvolvimento de uma modelagem apropriada para a análise de tanques de armazenamento atmosféricos, através do Método de Elementos Finitos. Essa análise servirá para a validação do *software* desenvolvido neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, os tanques de armazenamento são normalmente projetados de acordo com a API 650 (*Welded Tanks for Oil Storage*) do *American Petroleum Institute* (API). No entanto, também pode ser feito de acordo com a norma NBR 7821 (Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados), publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A norma N-270 (Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico), publicada pela Petrobras, através da CONTEC (Comissão de Normalização Técnica), é uma norma para uso interno da empresa e complementa a API 650. A norma N-270 afirma que as condições não fixadas por ela, devem estar de acordo com a norma da API.

Os principais componentes de um tanque de armazenamento atmosférico metálico, cilíndrico-vertical, de fabricação e montagem soldada, podem ser vistos na Figura 2.

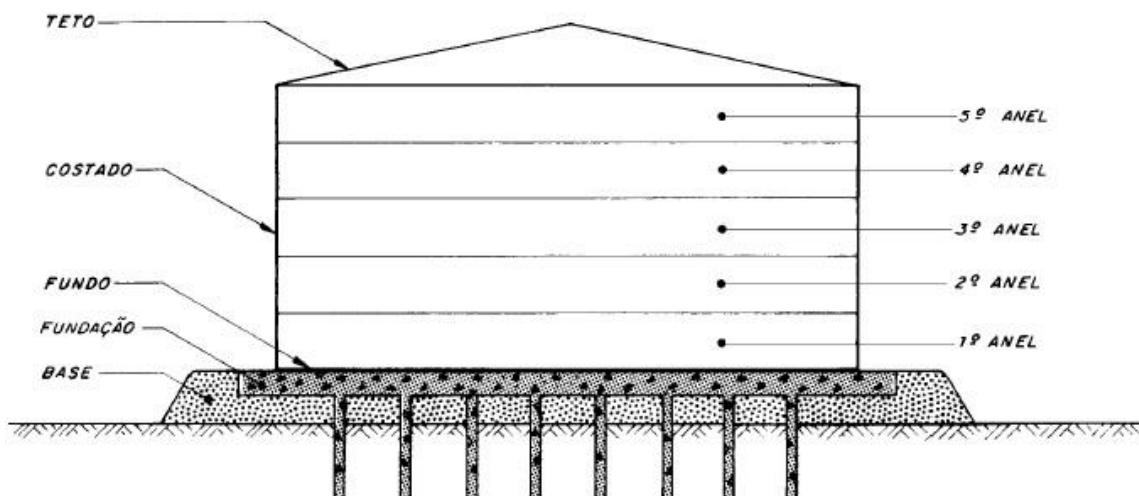


Figura 2 - Principais componentes de um tanque de armazenamento.

Fonte: Barros (2017)

2.1 TIPOS DE TANQUES

Segundo Barros (2017), os tanques de armazenamento podem ser classificados, didaticamente, de acordo com a natureza do teto, como:

- Tanque de teto fixo;
- Tanque de teto com diafragma flexível;
- Tanque de teto móvel;

- Tanque de teto flutuante.

2.1.1 Tanque de teto fixo

Os tanques de teto fixo são aqueles em que o teto está ligado diretamente ao anel superior do seu costado, podendo ser de dois tipos: os autoportantes e os suportados.

Os tetos fixos autoportantes são apoiados exclusivamente na periferia do costado, e recomenda-se, segundo a N-270 (2014), que todo tanque de teto fixo de até 6 m de diâmetro seja desse tipo. O outro tipo de teto fixo é suportado por uma estrutura interna de perfis metálicos, com estruturas de sustentação tipo treliça ou colunas.

Segundo Barros (2017), dependendo da forma do teto fixo, podem ser distinguidos as seguintes formas construtivas:

- Teto Cônico;
- Teto Curvo;
- Teto em Gomos.

2.1.1.1 Teto cônico

A API 650 (2016) define o teto cônico como tendo forma aproximada de um cone reto, e a N-270 (2014) recomenda que todo tanque de teto fixo seja deste tipo (ver Figura 3).



Figura 3 - Tanques de teto fixo cônicos.
Fonte: Barros (2017)

2.1.1.2 Teto curvo

A API 650 (2016) define o teto curvo como tendo forma aproximada de uma superfície esférica. Normalmente são tetos autoportantes. A N-270 (2014) chama esse tipo de teto como teto em domo (ver Figura 4).



Figura 4 - Tanques de teto fixo curvo.
Fonte: Barros (2017)

2.1.1.3 Teto em gomos

A API 650 (2016) define o teto em gomos como uma modificação do teto curvo, onde qualquer seção horizontal terá a forma de um polígono regular com tantos lados quanto o número de chapas do teto. Normalmente são autoportantes (ver Figura 5).



Figura 5 - Tanque de teto fixo em gomos.
Fonte: Barros (2017)

2.1.2 Tanque de teto com diafragma flexível

Segundo Barros (2017), os tanques de teto com diafragma flexível são aqueles em que o teto é fixo ao costado e é capaz de variar o volume do espaço vapor, em consequência da pressão de armazenamento. A variação do espaço vapor ocorre através da deformação de um componente interno, que funciona como uma membrana flexível. Este diafragma flexível normalmente é fabricado de material plástico (nylon, neoprene, etc.), e deve ser resistente ao produto armazenado sob a forma de líquido ou vapor (ver Figura 6).

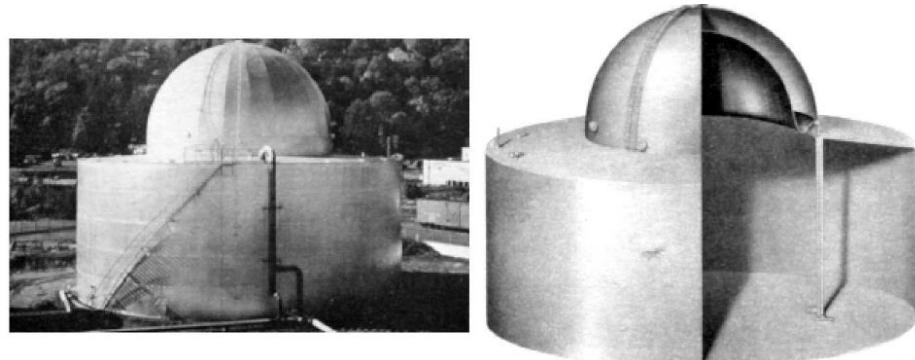


Figura 6 - Tanque de teto com diafragma flexível.
Fonte: Barros (2017)

2.1.3 Tanque de teto móvel

Segundo Barros (2017), os tanques de teto móvel são aqueles em que o teto se movimenta externamente ao costado, devido à pressão de seu espaço vapor. Necessitam de selagem entre o teto e costado para evitar as perdas por evaporação, além de necessitarem de dispositivos de segurança para evitar o excesso de pressão ou vácuo interno (ver Figura 7).

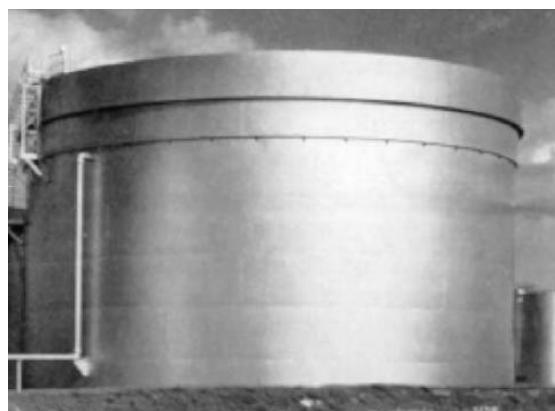


Figura 7 - Tanque de teto móvel.
Fonte: Barros (2017)

Segundo Barros (2017), os tanques de teto móvel e com diafragma flexível são, frequentemente, usados em sistemas fechados com o objetivo de reduzir as perdas por evaporação, trabalhando como um tanque pulmão.

2.1.4 Tanque de teto flutuante

Os tanques de teto flutuante são aqueles em que o teto está em contato direto com a superfície do líquido armazenado, no qual flutuam e acompanham a movimentação de enchimento e esvaziamento, movimentando-se internamente ao costado. Dessa forma, necessitam de um sistema de selagem entre o teto e costado. O objetivo de se utilizar esse tipo de tanque é o de minimizar as perdas por evaporação devido à movimentação do produto armazenado (BARROS, 2017). O teto flutuante pode ser de dois tipos:

- Externo;
- Interno a um tanque de teto fixo.

2.1.4.1 Tanque de teto flutuante externo

Os tanques de teto flutuante externo consistem de um cilindro de metal aberto no topo (costado), equipado com um teto que flutua sobre a superfície do líquido. O teto flutuante é composto por um deque construído de chapas metálicas, acessórios e um sistema de selagem entre o teto e o costado (ver Figura 8).

Segundo Barros (2017), o teto flutuante externo apresenta os seguintes tipos construtivos:

- Teto Flutuante Simples;
- Teto Flutuante com Flutuador na Periferia (Pontão Convencional);
- Teto Flutuante Duplo.

A norma N-270 (2014) especifica que os tetos flutuantes externos devem ser do tipo duplo para tanques de até 20 m, do tipo pontão convencional para diâmetros entre 20 m e 35 m, e para tanques maiores de 35 m devem ser do tipo pontão reforçado. A API 650 (2016) não permite mais o teto flutuante simples como teto externo.

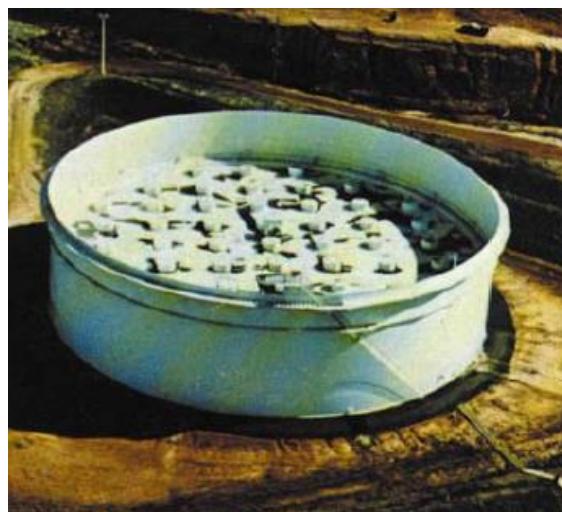


Figura 8 - Tanque de Teto Flutuante Externo.
Fonte: Barros (2017)

2.1.4.2 Tanque de teto flutuante interno

Os tanques de teto flutuante interno consistem de um de teto fixo permanente e um teto flutuante interno que flutua sobre a superfície do produto armazenado (ver Figura 9). Esses tanques podem ser de dois tipos:

- Tanque com teto fixo suportado por uma estrutura interna;
- Tanque com teto fixo autoportante.

Esses dois tipos de tanques são idênticos aos tanques de teto fixo correspondentes, mas agora apresentam um flutuante interno.

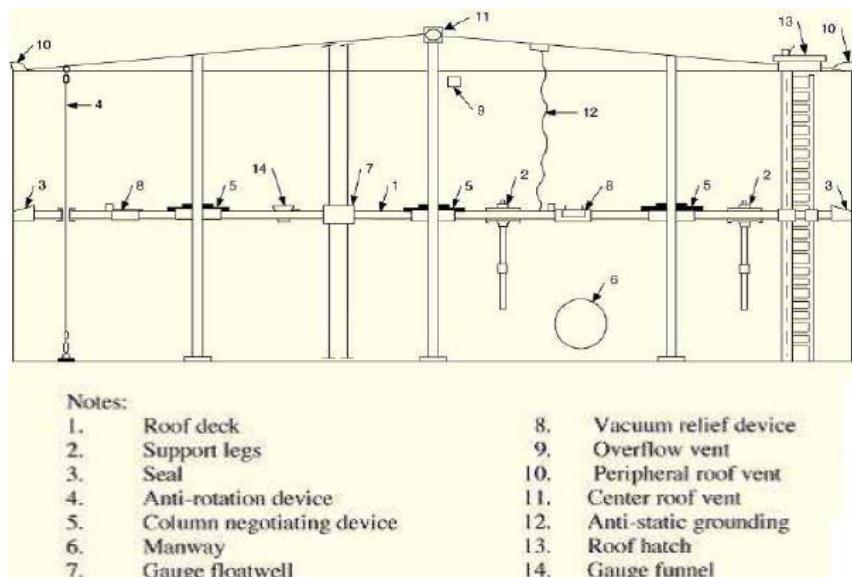


Figura 9 - Tanque de Teto Flutuante Interno.
Fonte: Barros (2017)

2.2 SELEÇÃO DO TIPO DE TANQUE

Segundo a norma N-270 (2014), para que o tipo de tanque de armazenamento seja selecionado em função do produto armazenado, deve-se levar em consideração as condições e requisitos ambientais, segurança operacional, custo do tanque, perdas operacionais e qualidade exigida no produto armazenado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Recomendações de Tipos Usuais de Tanques.

Produto armazenado	Tipo de tanque (selecionado conforme o projeto)
Produtos leves da faixa de gasolina e nafta leve. Petróleo cru.	<ul style="list-style-type: none"> — 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 cônicoo, segundo a API STD 620.
Gasolina de Aviação (GAV).	<ul style="list-style-type: none"> — 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 cônicoo, segundo a API STD 620.
Álcool etílico hidratado. Metanol.	<ul style="list-style-type: none"> — tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Biodiesel.	<ul style="list-style-type: none"> — 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.	<ul style="list-style-type: none"> — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classes I e II.	<ul style="list-style-type: none"> — tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Querosene de Aviação (QAV).	<ul style="list-style-type: none"> — 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.	<ul style="list-style-type: none"> — tanque atmosférico de teto fixo.
Água bruta.	<ul style="list-style-type: none"> — 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: Tabela A-1 da N-270 (2014)

Além da seleção em função do tipo de produto armazenado, o comprador deve levar em consideração a função a que se destina o tanque de armazenamento: pulmão; estoque; ou reservas.

2.3 DIMENSÕES DE UM TANQUE

A capacidade volumétrica do tanque dependerá da necessidade do comprador, e pode-se levar em consideração que, segundo Barros (2017), o custo do barril armazenado decresce com a capacidade do tanque de armazenamento.

Após a fixação do volume do tanque, surge a necessidade para a determinação do diâmetro e altura dele. Porém, a determinação da melhor relação entre altura e diâmetro para um tanque de armazenamento através de um método analítico é muito difícil, devido, principalmente, ao grande número de variáveis que existem. Entre essas variáveis, pode-se destacar estas: restrições físicas impostas pela unidade operacional; um diâmetro grande pode ser conveniente, à medida em que se deseja distribuir melhor a carga sobre a fundação, mas isso implicará num maior volume não movimentado para o tanque, ou seja, num menor volume útil; a fim de minimizar as operações de soldagem e controle de qualidade, o que pode levar a diminuição dos custos e riscos envolvidos na construção de um tanque, procura-se utilizar no costado, sempre que possível, chapas com o comprimento máximo e largura máxima (BARROS, 2017).

A despeito de toda dificuldade envolvida para a determinação da altura e diâmetro, em Brownell e Young (1959), define-se algumas relações para a determinação dessas dimensões:

- Tanques de pequena e média capacidade:

$$D \sim H_{máx} \quad (1)$$

onde:

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

$H_{máx}$ = altura nominal do tanque de armazenamento, [m].

- Tanques de grande capacidade:

$$D \sim \frac{8}{3} H_{máx} \quad (2)$$

Como essas relações simplificam a análise para determinação das duas dimensões, deve-se adota-las como uma aproximação inicial, e os valores finais devem ser obtidos a partir da análise das variáveis apresentadas anteriormente, acrescidas de outras que forem pertinentes.

2.4 BASE E FUNDAÇÃO

O projeto e construção das bases e fundações para os tanques de armazenamento necessitam de extremo cuidado, ambos devem ser projetados de modo que o recalque absoluto e o recalque diferencial não ultrapassem valores máximos aceitáveis pelo equipamento (N-270, 2014).

Seja qual for o local em que o tanque for construído, deve-se conhecer as condições do subsolo para se estimar a capacidade de sustentação do solo, além do recalque que será esperado nele. Essas condições podem ser adquiridas a partir de sondagens, testes de carga, amostras de solo e experiências anteriores com estruturas semelhantes, construídas no mesmo local (API 650, 2016).

Segundo Clarke (1971), os tanques de armazenamento são mais suscetíveis à falha frágil, catastrófica, quando comparados a outros tipos de vasos, já que as tensões devido ao recalque diferencial podem exceder em muito as tensões devido à pressão hidrostática, o que pode gerar plasticidade no material. Além disso, adiciona-se o fato de não ser prático o alívio de tensões no tanque todo, que poderia eliminar as tensões residuais causadas pela soldagem, cuja existência aumentam a probabilidade de ocorrer falha frágil.

O recalque excessivo, mesmo que não leve à falha do equipamento, poderá ocasionar: deformações e tensões elevadas no tanque; esforços elevados nos bocais e tubos conectados ao equipamento, caso não haja flexibilidade suficiente na tubulação para acomodar o recalque; erros na medição de nível; e funcionamento inadequado de componentes do tanque, como o selo do teto flutuante (BARROS, 2017).

A norma N-270 (2014) estabelece valores de recalques máximos aceitáveis, para a periferia da base (sob o costado do tanque), durante o teste hidrostático, além de valores de recalques admitidos após a realização desse teste.

Segundo a norma N-271 (2014), o teste hidrostático deve ser realizado em todos os tanques novos após sua montagem em campo, além disso, os que forem montados em oficina devem ser testados hidrostaticamente tanto na oficina quanto em campo após sua instalação na

base. Conforme exigido na norma N-1807 (2015), o teste deve ser realizado antes que as tubulações externas estejam conectadas.

A norma API 650 (2016) exige que a superfície superior da base, que estará em contato com o fundo do tanque, deve ser construída com pelo menos 0,3 m acima da superfície ao redor do tanque. Isso irá garantir drenagem adequada, ajudará a manter o fundo do tanque seco, e irá compensar algum recalque pequeno que é provável de ocorrer. Caso for esperado um recalque maior, a elevação do fundo do tanque deve ser elevada de modo que a elevação final da base deve ser no mínimo de 150 mm após o recalque.

Os tanques de armazenamento podem ser construídos sobre duas formas de fundações:

- Fundação direta (superficial);
- Fundação profunda (estaqueada).

2.4.1 Fundação direta (superficial)

A norma NBR 6122 (2009) define fundação direta como:

Elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

Segundo Barros (2017), há, basicamente, dois aspectos construtivos para esse tipo de fundação: aterro compactado e anel de concreto. A N-1822 (2013) apresenta ainda uma terceira forma construtiva desse tipo de fundação, a em laje de concreto armado.

2.4.1.1 Fundação direta do tipo aterro compactado

A fundação desse tipo, como pode ser visto na Figura 10, consiste na remoção da camada superficial do terreno, que é substituído por um material adequado (pedra britada ou cascalho grosso), que deverá ser compactado (BARROS, 2017). A API 650 (2016) indica esse tipo de fundação para tanques pequenos.

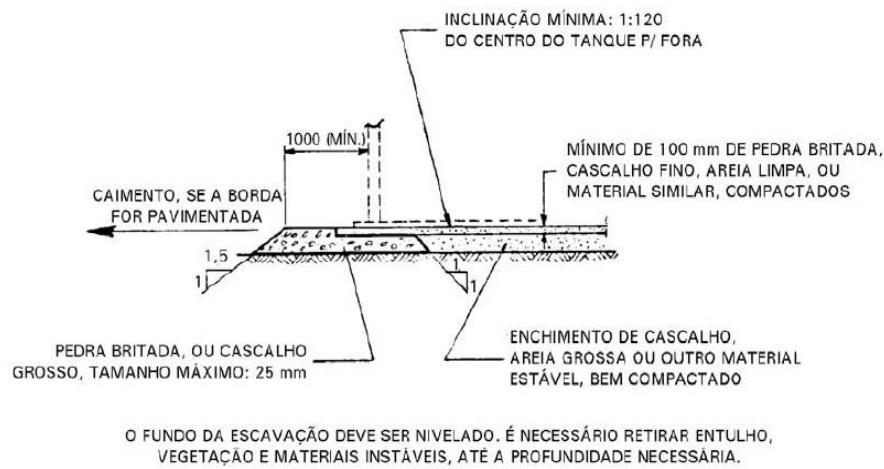


Figura 10 - Fundação direta tipo aterro compacto.
Fonte: NBR 7821 (1983).

2.4.1.2 Fundação direta do tipo anel de concreto

A fundação desse tipo consiste em um anel de concreto periférico, centrado sob o costado (BARROS, 2017). Segundo a API 650 (2016), é indicado para tanques de grandes diâmetros, tanques com costado pesado ou alto e/ou de teto fixo autoportante que imponha carga elevada na fundação sob o costado. Ela também indica este tipo de fundação para tanques de teto flutuante (ver Figura 11).

Recomenda-se o uso do anel de concreto quando a capacidade de carga do terreno for duvidosa quanto à capacidade de carregar a carga imposta pelo costado diretamente (API 650, 2016).

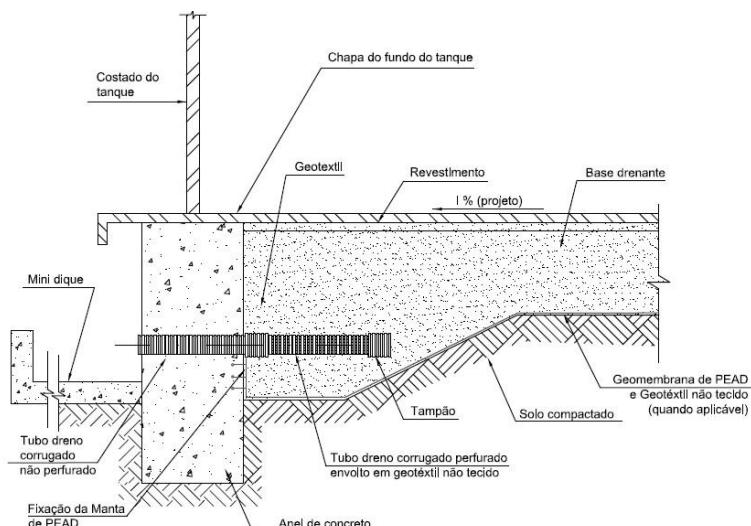


Figura 11 - Fundação direta do tipo anel de concreto.
Fonte: Figura A.1 da N-1822 (2013)

2.4.1.3 Fundação direta do tipo laje integral de concreto armado

Este tipo de fundação consiste em uma laje de concreto armado, segundo a API 650 (2016) é usada quando se precisa distribuir a carga sobre o solo em uma área maior que a área do tanque (ver Figura 12).

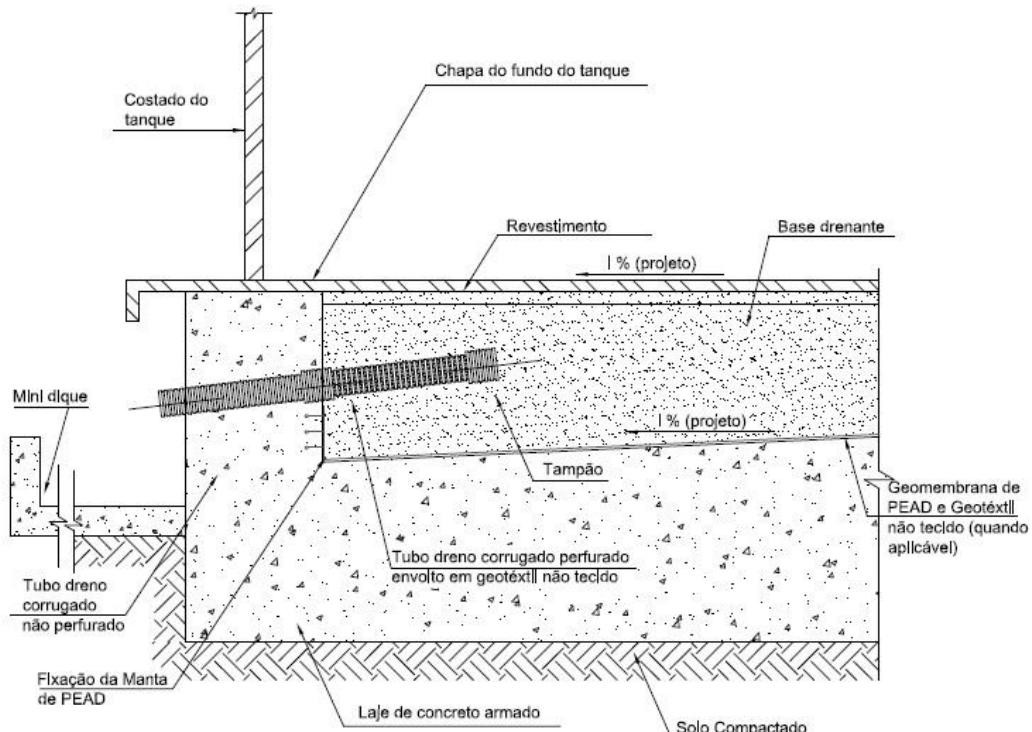


Figura 12 - Fundação direta do tipo laje de concreto armado.

Fonte: Figura A.2 da N-1822 (2013)

2.4.2 Fundação profunda (estaqueada)

A norma NBR 6122 (2009) define fundação profunda como:

Elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões.

Esse tipo de fundação consiste em uma série de estacas sob uma laje integral, onde busca-se distribuir a carga total do tanque (peso próprio mais o peso de produto em movimento), sobre uma superfície suficientemente grande, na qual o equipamento se sustenta, e assim evitar

a possibilidade de recalque excessivo (ver Figura 13). Por ser o tipo de fundação mais cara, só é utilizada quando a fundação direta é inviável (BARROS, 2017).

Segundo Barros (2017), as estacas podem ser metálicas ou de concreto, sendo que as de concreto podem ser do tipo “Franki” (em desuso), do tipo pré-moldada centrifugada em fábrica ou do tipo hélice contínua (mais utilizadas atualmente).

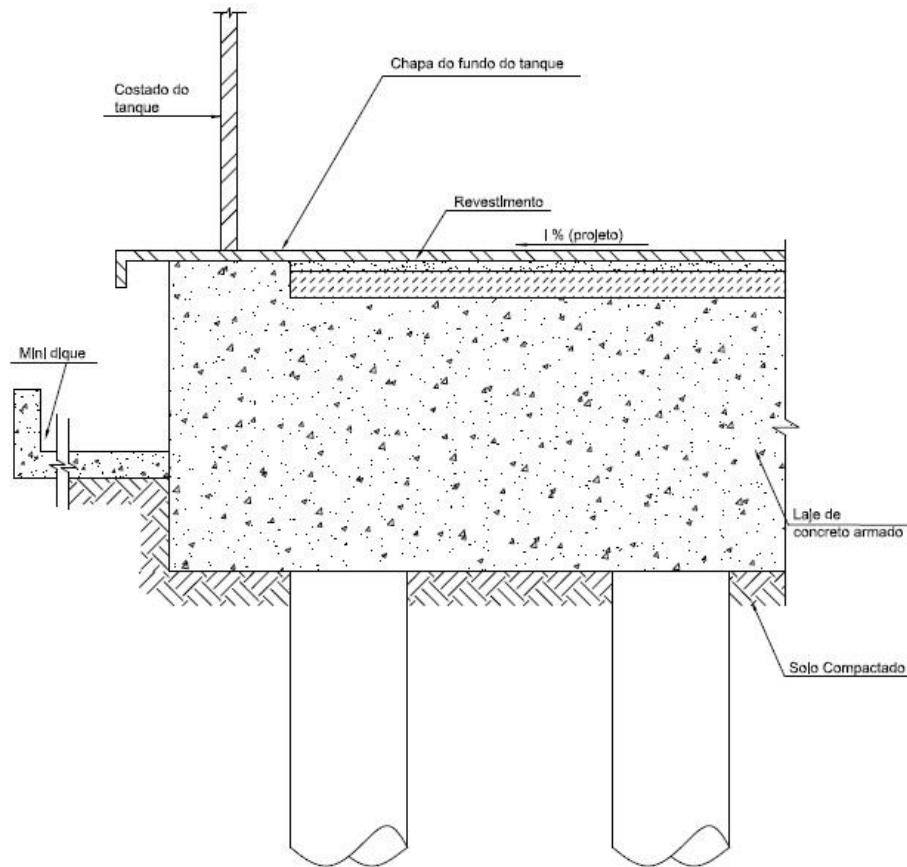


Figura 13 - Fundação profunda.
Fonte: Figura A.5 da N-1822 (2013)

2.5 PARÂMETROS DE PROJETO

Para o projeto de tanques de armazenamento faz-se necessário a definição de alguns parâmetros importantes para, por exemplo, definir-se o material que o equipamento será fabricado, atender a requisitos adicionais das normas, dimensionar equipamentos de segurança, entre outros. Entre os parâmetros encontra-se a temperatura de projeto – máxima e mínima –, a pressão e o vácuo de projeto.

2.5.1 Temperatura de projeto

A norma N-270 (2014) define a temperatura mínima de projeto como o menor entre os seguintes valores:

- A temperatura média diária mais baixa da localidade onde o tanque será construído, acrescida de 8°C;
- Temperatura mínima do produto armazenado.

A temperatura máxima de projeto é a máxima temperatura de operação do produto armazenado. Para tanques de teto flutuante interno e externo, ela deve ser inferior à temperatura inicial de ebulação do produto armazenado, na pressão atmosférica do local (N-270, 2014).

A temperatura máxima de projeto não deve exceder 260°C. Caso essa temperatura seja superior a 93°C deve-se atender o Anexo M da API 650, que desaconselha, para este caso, a utilização de tanques abertos, de teto flutuante externo, de teto fixo curvo de alumínio, de teto flutuante interno construído de alumínio ou material composto (API 650, 2016).

2.5.2 Pressão e vácuo de projeto

Os tanques de armazenamento estão sujeitos à pressão aproximadamente atmosférica, assim a pressão de projeto, segundo a N-270 (2014), é a máxima pressão de operação no espaço vapor para tanques de teto fixo, não aplicável a tanques sem teto, com teto flutuante externo ou com cobertura geodésica.

A pressão de projeto do tanque é limitada pelo peso das chapas do teto por unidade de área, de modo que para as chapas de 4,75 mm a pressão manométrica de projeto é de 0,363 kPa, admitindo-se valores maiores até 18 kPa, caso o Anexo F da API 650 (2016) seja aplicada.

O vácuo de projeto, segundo a N-270 (2014), é o máximo vácuo de operação no espaço vapor para tanques de teto fixo. O valor dele é limitado a 0,25 kPa, admitindo-se valores maiores até 6,9 kPa, caso o Anexo V da API 650 (2016) seja aplicada.

2.6 MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE TANQUES

Os materiais a serem usados na construção dos tanques de armazenamento devem estar em conformidade com os materiais expostos nesta seção, para qualquer que seja a parte do tanque em que o material se destina. Material com especificação outra que não listada nesta

seção, pode ser utilizado, previsto que o material esteja certificado a cumprir todos os requerimentos da especificação de algum material listado nesta seção (API 650, 2016).

2.6.1 Chapas

Segundo Barros (2017), as chapas utilizadas nos tanques podem ser fornecidas, de acordo com as bordas, como:

- Bordas universais (naturais): apresenta as bordas naturais do processo de laminação;
- Bordas aparadas: as bordas de laminação foram eliminadas por meio de apamento lateral.

Segundo a N-270 (2014), as chapas destinadas ao fundo devem ser aparadas, enquanto as chapas destinadas ao costado devem ser esquadrejadas. Além disso, as chapas aparadas também são normalmente utilizadas para a construção do teto (BARROS, 2017).

De acordo com Barros (2017), as chapas também podem ser classificadas quanto a sua espessura:

- Chapas finas: com espessura inferior 1/4 in;
- Chapas grossas: com espessura igual ou superior a 1/4 in;

Segundo a norma N-270 (2014), as chapas que deverão ser utilizadas na construção dos tanques devem conter as seguintes dimensões comercializadas no Brasil:

- Espessura de 4,75 mm (chapas finas laminadas a quente):
 - ◆ 1500 mm x 6000 mm;
 - ◆ 1800 mm x 6000 mm;
- Espessura de 6,30 mm e acima (chapas grossas laminadas a quente):
 - ◆ 2440 mm x 12000 mm.

Segundo a API 650 (2016), as chapas finas, de aço-carbono, devem estar de acordo com a especificação ASTM A 1011 Gr 33, quando forem usadas para tanques de teto fixo ou flutuante. Enquanto isso, as chapas grossas deverão estar em conformidade com uma das especificações apresentadas a seguir:

- ASTM A36M / A36 para chapas com espessura máxima de 40 mm (1,5 in).

Nenhuma das especificações para os materiais listados na Tabela 1 da ASTM A36M / A36 é aceitável para tanques construídos sob esta norma, a menos que expressamente declarado nesta norma;

- ASTM A131M / A131, Gr. A, para chapas com espessura máxima de 13 mm (0,5 in); Gr. B, para chapas com espessura máxima de 25 mm (1 in); e Gr. EH36, para chapas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas e flanges até uma espessura máxima de 50 mm [2 in]);
- ASTM A283M / A283, Gr. C, para chapas com espessura máxima de 25 mm (1 in);
- ASTM A285M / A285, Gr. C, para chapas com espessura máxima de 25 mm (1 in).
- ASTM A516M Gr. 380, 415, 450, 485 / A516, Gr. 55, 60, 65 e 70, para chapas com uma espessura máxima de 40 mm (1,5 in) (chapas inseridas espessas e flanges até uma espessura máxima de 100 mm [4 in]);
- ASTM A537M / A537, Classe 1 e Classe 2, para chapas com espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 100 mm [4 in]);
- ASTM A573M Gr. 400, 450, 485 / A573, Gr. 58, 65 e 70, para chapas com espessura máxima de 40 mm (1,5 in);
- ASTM A633M / A633, Gr. C e D, para chapas com espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 100 mm [4 in]);
- ASTM A662M / A662, Gr. B e C, para chapas com espessura máxima de 40 mm (1,5 in);
- ASTM A678M / A678, Gr. A, para chapas com espessura máxima de 40 mm (1,5 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 65 mm [2.5 in]) e Gr. B para chapas com espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 65 mm [2,5 in]). Adições de boro não são permitidas;
- ASTM A737M / A737, Gr. B, para chapas com espessura máxima de 40 mm (1,5 in);
- ASTM A841M / A841 Gr. A, Classe 1 e Gr. B, Classe 2 para chapas com uma espessura máxima de 40 mm (1,5 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 65 mm [2,5 in]);
- CSA G40.21 Gr. 260W (38W) e 300W (44W) são aceitáveis para chapas com uma espessura máxima de 25 mm (1 in) se semi-acalmados e até uma espessura

máxima de 40 mm (1,5 in) se forem totalmente acalmados e fabricadas com a técnica de grão fino;

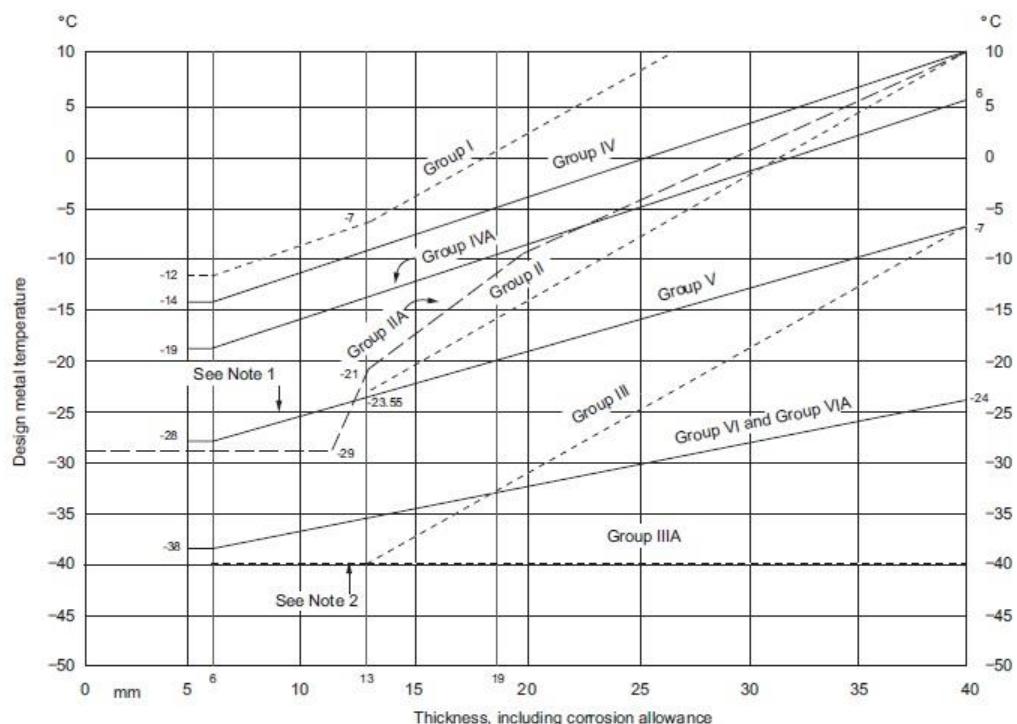
- CSA G40.21 Gr. 350W (50W) é aceitável para chapas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 100 mm [4 in]) se forem totalmente acalmados e fabricadas com a técnica de grão fino;
- ISO 630 Gr. E275 nas qualidades C e D para chapas até uma espessura máxima de 40 mm (1,5 in);
- ISO 630 Gr. E355 nas qualidades C e D para chapas com uma espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 50 mm [2 in]);
- EN 10025 Gr. S275 nas qualidades J0 e J2 para chapas até uma espessura máxima de 40 mm (1,5 in);
- EN 10025 Gr. S355 nas qualidades J0, J2 e K2 para chapas até uma espessura máxima de 45 mm (1,75 in) (chapas inseridas espessas até uma espessura máxima de 50 mm [2 in]);
- Chapas produzidas e testadas de acordo com os requisitos de um padrão nacional reconhecido e dentro das limitações mecânicas e químicas de um dos tipos listados na Tabela 2 são aceitáveis quando aprovadas pelo comprador. Os requerimentos deste grupo não se aplicam às especificações ASTM, CSA, ISO e EN listadas anteriormente. Para os propósitos da norma API 650 (2016), um padrão nacional é um padrão que foi sancionado pelo governo do país do qual ele se origina.

A espessura e temperatura de projeto das chapas do costado, chapas de reforço do costado, chapas inseridas do costado, chapas do fundo, chapas usadas para o pescoço de bocal e boca de visita, flange de bocais, flanges cegos e tampa de bocas de visita devem estar em concordância com a Figura 14, indicando ou não a necessidade de teste de impacto (API 650, 2016).

As chapas com espessura maior que 40 mm (1,5 in), devem ser de aço acalmado, fabricadas com a técnica de grão fino e testadas, obrigatoriamente, ao impacto, de acordo com a norma API 650. Elas devem ser normalizadas ou temperadas e revenidas (API 650, 2016).

Segundo a API 650 (2016), aço efervescente e aço capeado não são permitidos, além de ferro fundido ser proibido de ser usado em qualquer parte do tanque sob pressão ou qualquer

parte ligada ao tanque por solda. Além disso, essa norma classifica os materiais em 8 grupos, conforme indicado na Tabela 3.



NOTE 1 The Group II and Group V lines coincide at thicknesses less than 13 mm.

NOTE 2 The Group III and Group IIIA lines coincide at thicknesses less than 13 mm.

NOTE 3 The materials in each group are listed in Table 4.4a and Table 4.4b.

NOTE 4 Deleted.

NOTE 5 Use the Group IIA and Group VIA curves for pipe and flanges (see 4.5.4.2 and 4.5.4.3).

NOTE 6 Linear equations provided in Table 4.3a can be used to calculate Design Metal Temperature (DMT) for each API material group and the thickness range.

Figura 14 - Temperatura mínima de projeto admissível para chapas do costado de tanques de armazenamento sem realização de teste de impacto.

Fonte: Figura 4.1a da API 650 (2016)

Tabela 2: Graus aceitáveis de materiais de chapas produzidos por normas nacionais.

Grade ^b	Mechanical Properties								Chemical Composition				
	Tensile Strength ^a				Minimum Yield Strength ^c		Maximum Thickness		Maximum Percent Carbon		Maximum Percent Phosphorus and Sulfur		
	Minimum ^c		Maximum		MPa	ksi	MPa	ksi	mm	in.	Heat	Product	Heat
235 ^d	360	52	510	74	235	34	20	0.75	0.20	0.24	0.04	0.05	
250	400	58	530	77	250	36	40	1.5	0.23	0.27	0.04	0.05	
275	430	62	560	81	275	40	40	1.5	0.25	0.29	0.04	0.05	

^a The location and number of test specimens, elongation and bend tests, and acceptance criteria are to be in accordance with the appropriate national standard, ISO standard, or ASTM specification.

^b Semi-killed or fully killed quality; as rolled or TMCP (20 mm [0.75 in.] maximum when TMCP is used in place of normalized steel), or normalized.

^c Yield strength + tensile strength ≤ 0.75 , based on the minimum specified yield and tensile strength unless actual test values are required by the Purchaser.

^d Nonrimming only.

Fonte: Tabela 4.2 da API 650 (2016)

Tabela 3: Grupos de 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		A131M B	6	A573M-400		A573M-400	9
A285M C	2	A36M	5	A516M-380		A516M-380	9
A131M A		G40.21-260W		A516M-415		A516M-415	9
A36M	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						
NOTES							
1.	Most of the listed material specification numbers refer to ASTM specifications (including Grade or Class); there are, however, some exceptions: G40.21 (including Grade) is a CSA specification; Grades E275 and E355 (including Quality) are contained in ISO 630; Grades S275 and S355 (including quality) are contained in EN10025; and Grade 235, Grade 250, and Grade 275 are related to national standards (see 4.2.6).						
2.	Must be semi-killed or killed.						
3.	Thickness ≤ 20 mm.						
4.	Deleted.						
5.	Manganese content shall be 0.80 % to 1.20 % by heat analysis for thicknesses greater than 20 mm, except that for each reduction of 0.01 % below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 % manganese above the specified maximum will be permitted up to the maximum of 1.35 %. Thicknesses ≤ 20 mm shall have a manganese content of 0.80 % to 1.20 % by heat analysis.						
6.	Thickness ≤ 25 mm.						
7.	Must be killed.						
8.	Must be killed and made to fine-grain practice.						
9.	Must be normalized.						
10.	Must have chemistry (heat) modified to a maximum carbon content of 0.20 % and a maximum manganese content of 1.60 % (see 4.2.7.4).						
11.	Produced by the thermo-mechanical control process (TMCP).						
12.	See 5.7.4.6 for tests on simulated test coupons for material used in stress-relieved assemblies.						
13.	See 4.2.10 for impact test requirements (each plate-as-rolled tested).						

Fonte: Tabela 4.4a da API 650 (2016)

2.6.2 Perfis estruturais

Segundo API 650 (2016), os perfis estruturais, utilizados para a sustentação do teto fixo suportado, devem estar em conformidade com as seguintes especificações:

- ASTM A36M/A36;
- ASTM A131M/A131;
- ASTM A992M/A992;
- Aços estruturais listados na AISC, *Manual of Steel Construction*;
- CSA G40.21, Gr. 260W, 300W, 350W, 260WT, 300WT e 350WT;
- ISO 630, Gr. E275 (B, C e D);
- EN 10025, Gr. S275 (JR, J0 e J2);
- Normas nacionais reconhecidas. Aço estrutural que é produzido de acordo com essas normas e está em conformidade com os requerimentos da Tabela 2 é aceitável quando aprovado pelo comprador do tanque.

2.6.3 Tubos e forjados

Segundo a API 650 (2016), tubos, acessórios de tubulação e forjados devem estar em conformidade com a última edição de uma das especificações listadas a seguir ou de acordo com especificações nacionais equivalentes. Para tubos e acessórios de tubulação as seguintes especificações são aceitas:

- API Spec 5L, Gr. A, B e X42;
- ASTM A53M/A53, Gr. A e B;
- ASTM A106 M/A106, Gr. A e B;
- ASTM A234M/A234, Gr. WPB;
- ASTM A333M/A333, Gr. 1 e 6;
- ASTM A334M/A334, Gr. 1 e 6;
- ASTM A420M/A420, Gr. WPL6;
- ASTM A524, Gr. I e II;
- ASTM A671.

Segundo a API 650 (2016), as seguintes especificações são aceitas para forjados:

- ASTM A105M/A105;
- ASTM A181M/A181;
- ASTM A350M/A350, Gr. LF1 e LF2.

Exceto se tubulação de ASTM A671 é usada, material para bocais e bocas de visita do costado devem ser de tubo sem costura, forjado sem costura ou chapa de material especificado em 2.6.1. Quando os materiais do costado são do grupo IV, IVA, V, ou VI, tubo sem costura

deve concordar com a ASTM A106, Gr. B; ASTM A524; ASTM A333M/A333, Gr. 6; ou ASTM A334M/A334, Gr. 6 (API 650, 2016).

Materiais da tubulação feitos de acordo com ASTM A333M/A333, A334M/A334, A350M/A350 e A420, Gr. WPL6 podem ser usados em uma temperatura de projeto não menor que do teste de impacto requerido pela especificação da ASTM (API 650, 2016).

Segundo a API 650 (2016), materiais de tubos e forjados devem ser classificados nos grupos da Figura 14 como se segue:

- Grupo IIA: API Spec 5L, Graus A, B e X42; ASTM A106M/A106, Graus A e B; ASTM A53M/A53, Graus A e B; ASTM A181M/A181; ASTM A105M/A105; e A234M/A234, Grau WPB;
- Grupo VIA: ASTM A524, Graus I e II.

2.6.4 Flanges

Segundo a API 650 (2016), os flanges forjados dos tipos sobreposto, tipo anel, pescoço, integral e solto devem estar em conformidade com os requerimentos de material da ASME B16.5. Material de chapa usado para flanges de bocais devem ter propriedades físicas melhores ou iguais ao requerido pela ASME B16.5.

Para diâmetro nominal maior que NPS 24, flanges devem estar em conformidade com a ASME B16.47, Série B, e pode ser usada, sujeito à aprovação do comprador (API 650, 2016).

Segundo a N-270 (2014), flanges e luvas devem ser de aço forjado ASTM A 105. Para diâmetros de 16 in e acima, admite-se os flanges de chapa ASTM A 285 Grau C, ASTM A 515 Graus 60 e 70 ou ASTM A 516 Graus 60 e 70, desde que devidamente calculados de acordo com Apêndice 2 do ASME BPVC Seção VIII, Divisão 1.

2.7 SOBRE-ESPESSURA DE CORROSÃO

Corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente em que o material está situado, incorporada ou não a esforços mecânicos. Esse fenômeno pode acarretar elevados custos, como, por exemplo, devido a substituição do material corroído, necessidade de paralisações accidentais, perda ou contaminação do produto, e o próprio custo e manutenção dos processos de proteção (GENTIL, 1996).

A norma API 650 (2016) indica que fica a cargo do comprador do tanque de armazenamento a definição de qualquer sobre-espessura de corrosão a ser adicionada para os componentes do tanque, incluindo cada anel do costado, as chapas do teto, as chapas do fundo, os membros estruturais e os acessórios – bocais, bocas de visita e portas de limpeza.

Assim, as sobre-espessuras de corrosão dos anéis do costado devem ser determinadas em função das taxas anuais de corrosão apresentadas na Tabela 4, além de serem determinadas prevendo uma vida útil do tanque de, no mínimo, 20 anos. Para o teto e o fundo não é prática comum a adoção de sobre-espessura de corrosão, mas caso necessário, pode-se utilizar algum sistema de revestimento interno, como pintura e proteção catódica (N-270, 2014).

Segundo Barros (2017), a sobre-espessura de corrosão deve ser adotada no fundo quando o produto armazenado causar corrosão uniforme nele, caso ocorra uma corrosão localizada, deve-se utilizar algum método anticorrosivo adequado, como os mencionados anteriormente. Para o teto também há necessidade somente quando a corrosão dele for considerada uniforme, e assim, adicionar uma sobre-espessura de corrosão ao valor calculado (teto fixo autoportante) ou ao valor nominal mínimo (teto fixo suportado ou teto flutuante).

Tabela 4: Taxas Anuais de Corrosão para Aço-Carbono (mm por 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)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Metanol						

NOTA 1 Esse 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: Tabela A.2 da N-270 (2014)

Para Barros (2017), deve-se fazer um balanço econômico, entre o custo adicional do material a ser utilizado na sobre-espessura e o custo da pintura interna, quando:

- Corrosão esperada muito intensa: acima de 0,3 mm/ano;
- Sobre-espessura para corrosão superior a 6 mm.

Para os tanques de teto fixo, com o costado e componentes da estrutura de sustentação revestidos internamente, deve-se usar sobre-espessura de corrosão igual a 1 mm. Enquanto que, para esses componentes internos da estrutura que não estiverem revestidos, em contato com o produto armazenado, deve-se adicionar a sobre-espessura de corrosão definida pela taxa anual de corrosão mais crítica do anel do costado, conforme a Tabela 4, na espessura desses componentes (N-270, 2014).

2.8 PROJETO DO FUNDO

Segundo a norma N-270 (2014), os tanques de armazenamento devem ter um dos seguintes tipos de fundo:

- Fundo plano;
- Fundo cônico com declividade do centro para a periferia do tanque de, no mínimo, 1:120;
- Fundo cônico com declividade da periferia do tanque para o centro de, no mínimo, 1:100 e, no máximo, 1:25.

A N-270 (2014) recomenda que tanques com diâmetro menor ou igual a 6 m devem ter fundo plano. Em tanques maiores que 6 m de diâmetro, ela recomenda que o fundo seja tipo cônico com declividade do centro para a periferia.

Para produtos com qualidade extremamente controlada (teor de água), os tanques para seu armazenamento devem ter fundo do tipo cônico com declividade de 1:25, da periferia do tanque para o centro, além de contar com um dreno de fundo preferencialmente posicionado na sua parte central. Entre os produtos que se encaixam nesse requisito, encontra-se o Querosene de Aviação (QAV), Gasolina de Aviação (GAV) e biodiesel (B100) (N-270, 2014).

O contorno do fundo de um tanque de armazenamento, ou seja, o anel de chapas onde o primeiro anel do costado será soldado, pode ser construído a partir de dois tipos de disposição para as suas chapas:

- Chapas anulares;
- Chapas recortadas.

O arranjo do contorno do fundo com chapas anulares é obrigatório para tanques com diâmetro superior a 15 m (N-270, 2014).

Segundo a norma N-270 (2014), as chapas do fundo, excluindo as do contorno do fundo, devem ter espessura mínima de 6,3 mm e largura mínima de 1800 mm. A norma API 650 (2016) estabelece que todas as chapas do fundo devem ter espessura mínima de 6 mm (0,236 in), sem considerar qualquer sobre-espessura de corrosão, e largura mínima de 1800 mm (72 in).

As chapas centrais do fundo devem ser ligadas entre si por juntas soldadas sobrepostas simples. Esse tipo de solda deve ter um transpasse mínimo de 5 vezes a espessura da chapa mais fina da junta, ou 25 mm, qual for menor (API 650, 2016).

A norma N-270 (2014) estabelece que todas as chapas a serem utilizadas no fundo devem ter bordas aparadas, e que devem ser de aço-carbono ASTM A 283 Gr. C ou ASTM A 36.

2.8.1 Chapas anulares

A norma N-270 (2014) estabelece que a largura mínima para as chapas anulares é de 750 mm, independentemente do diâmetro do tanque, e a espessura mínima, que irá depender da espessura do primeiro anel do costado, é determinada pela Tabela 5. Apesar de especificar valores mínimos para a largura e espessura, a N-270 (2014) estabelece que os valores desses dois parâmetros devem ser calculados segundo a norma API 650 (2016), admitindo os valores mínimos apenas se os encontrados na norma americana forem menores.

As chapas anulares devem ter uma especificação do material idêntica às chapas do primeiro anel do costado (N-270, 2014).

Tabela 5: 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: Tabela A.3 da N-270 (2014)

A API 650 (2016) estabelece que chapas anulares devem ser utilizadas quando o material do 1º anel do costado for do grupo IV, IVA, V ou VI, conforme definido na Seção 2.5. A largura radial das chapas anulares é calculada pela Equação (3).

$$W_b = 2 t_b \sqrt{\frac{F_{yb}}{2 \gamma G H_{máx}}} \quad (3)$$

onde:

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

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

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

G = gravidade específica (densidade relativa) para o líquido armazenado;

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

A largura mínima das chapas anulares, estabelecida pela norma API 650 (2016), é de 600 mm (24 in) entre a parte interna do costado e qualquer junta sobreposta do restante das chapas do fundo.

A espessura para essas chapas é determinada pela Tabela 6, que só é válida para altura efetiva do produto de $H_{máx} X G \leq 23$ m (75 ft). A Figura 15 mostra um fundo composto por chapas anulares.

Tabela 6: Espessura da chapa anular do fundo.

Espessura da chapa (a) (t) do 1º anel do costado (mm)	Tensão ^(b) no 1º anel do costado (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

Fonte: Tabela 5.1a da API 650 (2016) traduzida.

- a) Espessura da chapa refere-se a espessura do costado sem considerar sobre-espessura de corrosão para condição de projeto com o produto e a espessura nominal para condição de teste hidrostático.

- b) A tensão a ser utilizada é a tensão máxima no 1º anel do costado (maior entre a tensão na condição de projeto ou na condição do teste hidrostático). A tensão na condição de projeto pode ser determinada pela Equação (4) e a tensão na condição de teste hidrostático pode ser determinado pela Equação (5).

$$\text{Tensão de projeto} = \frac{(t_d - CA)}{(t - CA)} S_d \quad (4)$$

onde:

t_{1d} = espessura do 1º anel do costado calculada para condição de projeto, [mm];

CA = sobre-espessura de corrosão, [mm];

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

t_{com} = espessura nominal comercial do 1º anel do costado, [mm].

$$\text{Tensão de teste hidrostático} = \frac{t_t}{t} S_t \quad (5)$$

onde:

t_{1t} = espessura do 1º anel do costado calculada para condição de teste hidrostático, [mm];

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

O anel de chapas anulares deve possuir uma forma circunferencial externa, mas, internamente ao costado do tanque, ela pode ter uma forma poligonal com o número de lados igual ao do número de chapas anulares, como pode ser visto na Figura 15 e Figura 16.

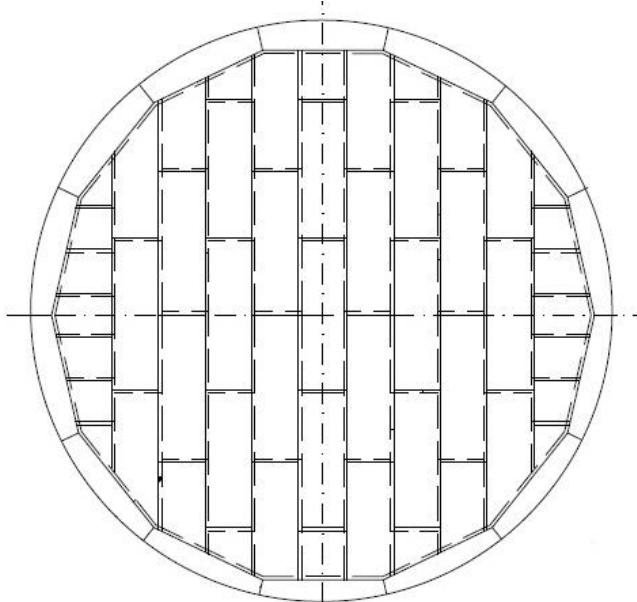


Figura 15 - Disposição típica do fundo com chapas anulares.
Fonte: Figura B.1 da N-270 (2014)



Figura 16 - Fundo de tanque com chapas anulares.
Fonte: Barros (2017)

As chapas anulares devem ser ligadas entre si por soldas de topo, com a utilização ou não de cobre-juntas, e a ligação entre as chapas anulares e as chapas centrais do fundo deve ser por juntas sobrepostas simples, sendo que o transpasse é o mesmo do definido para a ligação entre as chapas centrais. A norma N-270 (2014), recomenda que esse transpasse tenha um valor mínimo de 60 mm.

Segundo a API 650 (2016), recomenda-se que as chapas anulares tenham uma projeção de pelo menos 50 mm (2 in) de largura para o lado de fora do costada. Assim, a largura total

das chapas anulares totaliza o resultado obtido pela Equação (3) acrescido dos 50 mm e da espessura do 1º anel do costado.

2.8.2 Chapas recortadas

A norma N-270 (2014) estabelece que as chapas recortadas são uma possibilidade de uso para o contorno do fundo em tanques de armazenamento para diâmetros menores que 15 m (ver Figura 17 e Figura 18). A largura mínima para essas chapas, que tenham um lado retangular, é de 1800 mm e a espessura mínima é de 6,3 mm.

Segundo a norma API 650 (2016), as chapas recortadas podem ser usadas, no lugar das chapas anulares, se o material do 1º anel do costado for do grupo IV, IVA, V ou VI e, além disso, a tensão máxima na condição de projeto para o 1º anel do costado ser menor ou igual a 160 MPa, ou a tensão máxima na condição de teste hidrostático para o 1º anel do costado ser menor ou igual a 171 MPa, de acordo com a Equação (4) e a Equação (5), respectivamente.

Conforme a API 650 (2016), a largura mínima para as chapas recortadas deve ser de 1800 mm (72 in) e a espessura mínima deve ser de 6 mm (0,236 in). A ligação entre as chapas recortadas deve ser por meio de juntas soldadas sobrepostas simples, da mesma maneira que a ligação dessas com as chapas centrais do fundo. Também se recomenda que as chapas recortadas tenham uma projeção para fora do costado de pelo menos 50 mm.

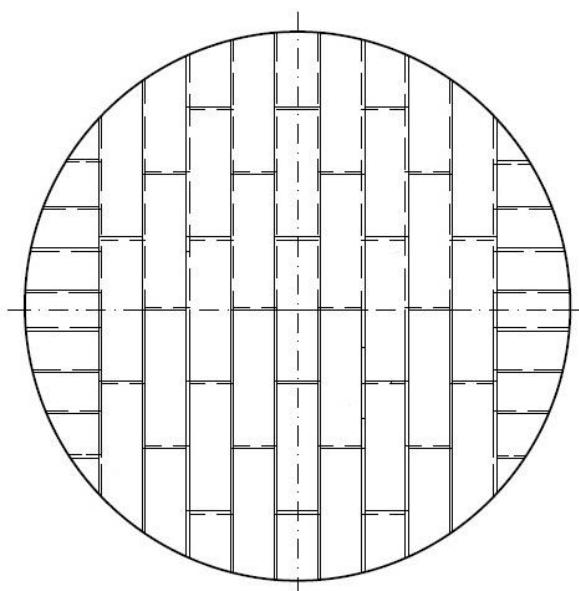


Figura 17 - Disposição típica do fundo com chapas recortadas.

Fonte: Figura B.2 da N-270 (2014)



Figura 18 - Fundo de tanque com chapas recortadas.
Fonte: Barros (2017)

2.9 PROJETO DO COSTADO

Para o projeto do costado, deve-se definir como as chapas deste serão alinhadas, já que, segundo Barros (2017), existem as seguintes possibilidades:

- Disposição simétrica: é a mais recomendada estruturalmente, mas de montagem praticamente impossível para garantir a simetria vertical (ver Figura 19a);
- Disposição com alinhamento pela face externa: é a mais recomendável esteticamente, de fácil montagem e acabamento (ver Figura 19b);
- Disposição com alinhamento pela face interna: é a disposição mais utilizada, de fácil montagem e acabamento externo regular (ver Figura 19c).

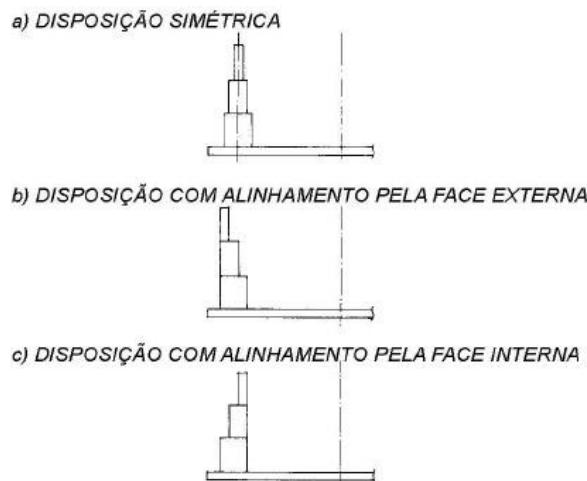


Figura 19 - Disposição das chapas do costado.
Fonte: Barros (2017)

Segundo a N-270 (2014), o alinhamento das chapas do costado deve ser pela face interna ou pela linha de centro, mas para o caso de tanques de armazenamento de teto flutuante, o alinhamento se torna obrigatório pela face interna.

A espessura requerida para o costado deve ser o maior entre a espessura de projeto dele, incluído qualquer sobre-espessura de corrosão, ou a espessura do teste hidrostático, mas não deve ser menor que a especificada pela Tabela 7 (API 650, 2016). A N-270 (2014) especifica a Tabela 8 para a definição dos valores mínimos aceitos para a espessura do costado, já considerado o valor de sobre-espessura de corrosão.

Segundo a N-270 (2014), a espessura mínima requerida para as chapas do costado menos a sobre-espessura de corrosão não deve ser menor que 2,54 mm, para qualquer anel do costado. A escolha do material para o costado deve estar subordinada à espessura nominal e à temperatura de projeto, além de estar em conformidade com uma das especificações apresentadas na Seção 2.6.1, concomitante a isto, é prática recomendada não utilizar aços com limite de resistência superior a 481 MPa ($49 \text{ kgf/mm}^2 = 69800 \text{ psi}$).

A espessura máxima para as chapas do costado dependerá da especificação do material e do método de projeto utilizado. Para o projeto, segundo o corpo de norma da API 650 (método do ponto fixo ou do ponto variável de projeto), a espessura máxima dependerá da especificação do material especificada na Seção 2.6.1. Caso o projeto esteja em conformidade com o Anexo A da API 650, a espessura máxima das chapas do costado será limitada a 13 mm (0,5 in) (API 650, 2016). Segundo Barros (2017), como os tanques são equipamentos soldados e não tratados termicamente para alívio de tensões, torna-se necessário a limitação da espessura nominal, visando, principalmente, resguardar o tanque do risco de fratura frágil.

Tabela 7: Espessura mínima das chapas do costado segundo a API 650(2016).

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 (2016)

Tabela 8: Espessura mínima das chapas do costado segundo a N-270 (2014).

Diâmetro do tanque (m)	Espessura mínima estrutural de montagem (mm)
D < 15	4,75
15 ≤ D < 36	6,30
36 ≤ D ≤ 60	8,00
D > 60	9,50
NOTA 1 A espessura 4,75 mm é aceitável dentro da mínima de 3/16" (USC) ou 5 mm (SI) do API STD 650. NOTA 2 A espessura 9,50 mm é aceitável dentro da mínima de 3/8" (USC) ou 10 mm (SI) do API STD 650.	

Fonte: Tabela A.4 da N-270 (2014)

As Tabela 7 e Tabela 8 utilizam o diâmetro nominal do tanque para especificar as espessuras mínimas das chapas do costado. Porém, as normas API 650 e N-270 diferem na definição desse termo, já que, segundo a API 650 (2016), o diâmetro nominal do tanque é definido como o diâmetro da linha de centro do primeiro anel do costado; enquanto que, para a norma N-270 (2014), o diâmetro nominal do tanque é definido como “diâmetro interno do anel inferior do costado quando todas as chapas tiverem uma linha de centro comum, ou diâmetro interno do tanque quando as chapas tiverem a face interna comum”.

As juntas verticais e horizontais do costado, formadas a partir de chapas esquadrejadas (ver Seção 2.6.1), devem ser de topo com penetração e fusão completas, além de soldadas pelos dois lados. Ademais, as juntas verticais em anéis de costado adjacentes não devem estar alinhadas, mas devem estar afastadas uma em relação a outra de, no mínimo, 5 vezes a espessura da chapa mais grossa entre os anéis considerados (API 650, 2016).

A API 65 (2016) apresenta os seguintes métodos para o dimensionamento do costado de tanques de armazenamento:

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

A partir dessas alternativas, a norma N-270 (2014) especifica o critério a ser adotado no cálculo das espessuras do costado de acordo com esta sequência:

- a) API 650 Anexo A, método do ponto fixo de projeto, com eficiência de junta igual a 0,85;
- b) Caso a espessura determinada pelo critério anterior for superior a 13 mm (0,5 in), deve-se adotar para o cálculo a API 650 corpo de norma e método do ponto variável de projeto.

Segundo a N-270 (2014), o valor da espessura nominal adotado pode ser menor que o valor calculado por um dos métodos apresentados nessa seção, quando a diferença entre os dois valores for inferior ao menor valor entre:

- 0,1 mm;
- 1% da espessura nominal a ser adotada.

Todos os tanques devem ter uma cantoneira de reforço soldada de topo na chapa superior do costado, com fusão completa e penetração total, e dimensões mínimas estabelecidas pela Tabela 9. Além disso, a cantoneira deve ter a aba voltada para o lado interno nos tanques de teto fixo e flutuante interno, mas os tanques de teto flutuante externo devem ter a aba da cantoneira de topo voltada para o lado externo (N-270, 2014).

Tabela 9: Dimensões mínimas das cantoneiras de topo dos costados.

Tank Diameter (D)	Minimum Top Angle Size ^a (mm)	Minimum Top Angle Size ^a (in.)
$D \leq 11 \text{ m}, (D \leq 35 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 5$	$2 \times 2 \times \frac{3}{16}$
$11 \text{ m} < D \leq 18 \text{ m}, (35 \text{ ft} < D \leq 60 \text{ ft})$	$50 \times 50 \times 6$	$2 \times 2 \times \frac{1}{4}$
$D > 18 \text{ m}, (D > 60 \text{ ft})$	$75 \times 75 \times 10$	$3 \times 3 \times \frac{3}{8}$

^a Approximate equivalent sizes may be used to accommodate local availability of materials.

Fonte: API 650 (2016)

2.9.1 Tensões admissíveis

A máxima tensão admissível para a condição de projeto (S_d) deve estar em conformidade com a Tabela 10 ou Tabela 11. A espessura da chapa, sem considerar a sobre-espessura de corrosão, deve ser usada no cálculo. A tensão admissível para a condição de projeto deve ser dois terços do limite de escoamento ou dois quintos do limite de resistência, o que for menor (API 650, 2016).

A máxima tensão admissível para a condição de teste hidrostático (S_t) deve estar em conformidade com a Tabela 10 ou Tabela 11. A espessura nominal da chapa deve ser usada no cálculo. A tensão admissível para a condição de teste hidrostático deve ser três quartos do limite de escoamento ou três sétimos do limite de resistência, o que for menor (API 650, 2016).

O Anexo A da API 650 permite um método alternativo para o projeto do costado com uma tensão admissível fixa de 145 MPa (21000 lbf/in²) e um fator de eficiência de junta de 0,85 ou 0,7. No entanto, este modelo só pode ser usado para tanques com espessura do costado menor ou igual a 13 mm (1/2 in) (API 650, 2016).

Tabela 10: 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_t 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	$t \leq 65$ $65 < t \leq 100$	345 310	485 ^a 450 ^b	194 180	208 193
A537M	2	$t \leq 65$ $65 < t \leq 100$	415 380	550 ^a 515 ^b	220 206	236 221
A633M	C, D	$t \leq 65$ $65 < t \leq 100$	345 315	485 ^a 450 ^b	194 180	208 193
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: Tabela 5.2a da API 650 (2016)

**Tabela 11: Tensões admissíveis de materiais permitidos para chapas do costado
(continuação da Tabela 10).**

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_t 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	$t \leq 65$ $65 < t \leq 100$	350 320	450 ^a 450 ^a	180 180	193 193
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, A678M, 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: Tabela 5.2a da API 650(2016)

2.9.2 API 650 Anexo A

O Anexo A da API 650 estabelece requerimentos para tanques montados em campo de capacidade relativamente pequena, nos quais os componentes tencionados têm uma espessura nominal não maior que 13 mm (1/2 in). Estes componentes incluem o costado, chapas de reforço, chapas de reforço do costado para as portas de limpeza, conexões do tipo sem ressalto e chapas do fundo soldadas ao costado. Esse anexo é limitado para temperatura de metal de projeto acima de -30 °C, ou acima de -40 °C quando o material usado for acalmado e fabricado com a técnica de grão fino.

Para os componentes tencionados, materiais dos Grupos I e II (ver Tabela 3) podem ser usados na temperatura de projeto de -30 °C ou mais quente, mas não precisam estar em conformidade com os requerimentos de tenacidade previstos pela 4.2.9 e 9.2.2 da API 650 (2016) e Figura 14. Materiais dos Grupos III e III-A podem ser usados em uma temperatura de projeto de -40 °C ou mais quente e devem estar em conformidade com os requerimentos de teste de impacto estabelecidos pela 9.2.2 da API 650 (2016).

O projeto do costado pelo Anexo A estabelece que a tensão máxima de tração, antes do fator de eficiência da junta ser aplicado, deve ser de 145 MPa (21000 lbf/in.²), além das tensões serem consideradas na suposição que o tanque está cheio de água (gravidade específica = 1) ou de líquido a ser estocado, caso esse seja mais pesado que a água.

A tensão em cada anel do costado deve ser considerada a 300 mm (12 in) acima da linha de centro da junta horizontal inferior do anel em questão. O fator de eficiência de junta deve ser de 0,85, sendo realizada uma inspeção radiográfica da solda conforme A.5.3 da API 650 (2016), ou 0,7, caso essa inspeção não seja considerada. No entanto, a norma N-270 (2014) estabelece que o cálculo do costado pelo Anexo A da API 650 tenha o fator eficiência como 0,85, o que implica na realização da inspeção radiográfica.

As espessuras nominais das chapas do costado não devem ser menores que os valores calculados pela Equação (6). Além disso, devem ser maiores que os valores listados na Tabela 7 ou Tabela 8.

$$t_n = \frac{4,9D(H-0,3)G}{145 E_j} + CA \quad (6)$$

onde:

t_n = espessura nominal, [mm];

H = nível de líquido de projeto, ou seja, é a altura do fundo do anel, que está sendo considerado, até o topo do costado incluindo a cantoneira no topo, caso exista, [m];

G = gravidade específica (densidade relativa) para o líquido armazenado, não menor que 1,0, para a Equação (6);

E = fator de eficiência da junta.

O anexo A da API 650 (2016) não requer a utilização de anéis de contraventamento intermediários. Porém, a norma N-270 (2014) exige o teste pelo método do costado fictício, descrito em 2.11.2.4, para saber a necessidade ou não.

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

O método do ponto variável de projeto é um método iterativo de cálculo, que utiliza, para cada anel do costado, um ponto variável de projeto, o que resulta em tensões calculadas relativamente mais próximas às tensões circunferenciais reais do costado.

Esse método normalmente fornece uma redução nas espessuras dos anéis do costado e no peso total de material, mas, o mais importante, é o seu potencial de permitir a construção de tanques de maiores diâmetros dentro da limitação de espessura máxima de chapa.

O método do ponto variável de projeto pode ser usado se a proporção dada pela Equação (8) for verdadeira.

$$L = (500 D t)^{0,5} \quad (7)$$

$$\frac{L}{H_{\max}} \leq \frac{1000}{6} \quad (8)$$

onde:

L = parâmetro simbolizado pela Equação (8), [mm];

t = espessura corroída do 1º anel do costado, ou seja, é a espessura nominal menos qualquer sobre-espessura de corrosão, [mm].

Os cálculos das espessuras do costado devem ser feitos para condições de projeto e de teste hidrostático, de forma independente e para todos os anéis do costado. A espessura requerida para cada anel deve ser o maior valor entre a espessura sob condição de projeto mais qualquer sobre-espessura de corrosão e a espessura sob condição de teste hidrostático. No

entanto, a espessura encontrada não poderá ser menor do que a espessura apresentada na Tabela 7 ou Tabela 8. Quando um valor maior de espessura for utilizado para algum anel do costado, esse valor pode ser usado em cálculos subsequentes para espessuras do costado de anéis superiores.

Para calcular as espessuras do primeiro anel do costado, deve-se, primeiro, calcular um valor preliminar para a condição de projeto, pela Equação (9)(63), e para condição de teste hidrostático, pela Equação (10).

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

$$t_{pt} = \frac{4,9D(H-0,3)}{S_t} \quad (10)$$

onde:

t_{pd} = espessura preliminar do 1º anel para condição de projeto, [mm];

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

O cálculo da espessura do 1º anel do costado para a condição de projeto é realizado pela Equação (11), e para a condição de teste hidrostático pela Equação (12).

$$t_{1d} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}} \right) \left(\frac{4,9HDG}{S_d} \right) + CA \quad (11)$$

$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{H}{S_t}} \right) \left(\frac{4,9HD}{S_t} \right) \quad (12)$$

As espessuras calculadas pelas Equações (11) e (12) não precisam ser maiores que os valores preliminares calculados pelas Equações (9) e (10). Assim, a espessura nominal mínima requerida para o primeiro anel do costado será o maior valor entre t_{1d} e t_{1t} .

Para o cálculo das espessuras do segundo anel do costado para as condições de projeto e teste hidrostático, o valor da relação a seguir deve ser calculado:

$$\frac{h_1}{(rt_1)^{0,5}} \quad (13)$$

onde:

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

r = raio nominal do tanque, [mm];

t_1 = espessura corroída do 1º anel do costado usado para o cálculo da espessura do 2º anel pela condição de projeto. A espessura do 1º anel calculada para condição de teste hidrostático deve ser usada para o cálculo da espessura do 2º anel, [mm].

Se o valor da Equação (14) for menor ou igual a 1,375:

$$t_2 = t_1 \quad (14)$$

onde:

t_2 = espessura mínima requerida para o 2º anel do costado, ou seja, o maior valor entre o calculado pela condição de projeto ou condição de teste hidrostático, [mm].

Se o valor da Equação (14) for maior ou igual a 2,625:

$$t_2 = t_{2a} \quad (15)$$

onde:

t_{2a} = espessura corroída do 2º anel do costado, [mm].

Se o valor da Equação (14) for maior que 1,375 e menor que 2,625:

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25(rt_1)^{0,5}} \right] \quad (16)$$

Para o cálculo de t_{2a} , utiliza-se o método dos anéis superiores descrito a seguir em ambas as condições. Porém, este método faz necessário determinar um valor preliminar da espessura corroída (t_u) que deve ser calculado usando a Equação (17) para condição de projeto e a Equação (18) para condição de teste hidrostático.

$$t_{ud} = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d} \quad (17)$$

$$t_{ut} = \frac{4,9D(H-0,3)}{S_t} \quad (18)$$

onde:

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

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

Após a determinação dos valores preliminares, deve-se calcular as distâncias x_i do ponto variável de projeto a partir do fundo do anel em análise.

$$K = \frac{t_L}{t_u} \quad (19)$$

$$C = \frac{[K^{0,5}(K-1)]}{(1+K^{1,5})} \quad (20)$$

$$x_1 = 0,61(rt_u)^{0,5} + 320CH \quad (21)$$

$$x_2 = 1000CH \quad (22)$$

$$x_3 = 1,22(rt_u)^{0,5} \quad (23)$$

onde:

K = parâmetro adimensional simbolizado pela Equação (19);

C = parâmetro adimensional simbolizado pela Equação (20);

t_u = espessura corroída do anel superior que está em análise, para as condições de projeto e teste hidrostático, [mm];

t_L = espessura corroída do anel inferior ao anel em análise, para as condições de projeto e teste hidrostático, [mm].

A espessura mínima para os anéis superiores deve ser calculada para ambas as condições, usando o menor valor de x encontrado pelas Equações (21), (22) e (23).

$$t_{dx} = \frac{4,9D\left(H - \frac{x}{1000}\right)G}{S_d} + CA \quad (24)$$

$$t_{tx} = \frac{4,9D\left(H - \frac{x}{1000}\right)}{S_t} \quad (25)$$

onde:

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

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

x = menor valor determinado entre x_1 , x_2 e x_3 .

Os passos descritos da Equação (19) até a Equação (25) devem ser repetidos, assumindo t_x como t_u até se ter uma diferença pequena entre os valores calculados de t_x em sucessão (a repetição dos passos duas vezes normalmente é suficiente). A repetição dos passos proporciona uma localização mais exata do ponto de projeto para o anel sendo considerado e, consequentemente, uma precisão maior na espessura do costado.

O método dos anéis superiores, descrito anteriormente, deve ser usado para o cálculo da espessura do terceiro anel em diante.

2.10 PROJETO DO TETO FIXO CÔNICO

Todos os tipos de teto e estruturas de sustentação devem ser projetados para suportar o peso próprio do teto (peso das chapas e/ou da estrutura de sustentação) mais uma sobrecarga correspondente a uma carga viva no teto de, no mínimo, 981 N/m² (100 kgf/m²), segundo a N-270 (2014). De acordo com a API 650 (2016), o valor da sobrecarga é de 1 kPa (20 lb/ft²) na área horizontal projetada do teto, e não deve ser menor que 0,72 kPa.

A N-270 (2014) recomenda que o material do teto deve ser de aço carbono ASTM A 1011 Gr. 33, ASTM A 283 Gr. C ou ASTM A 36, com espessura mínima de 4,75 mm e largura mínima de 1500 mm. Segundo Barros (2017), a especificação ASTM A 283 Gr. C normalmente é utilizada para chapas de aço carbono do teto, com espessura igual ou superior a 6,3 mm (1/4 in) e largura mínima de 2440 mm. Para a API 650 (2016), as chapas do teto devem ter 5 mm (3/16 in) de espessura mínima.

A soldagem das chapas do teto deve ser feita com junta sobreposta simples, com o cordão de solda externo ao teto, e no sentido da melhor drenagem das águas pluviais. O transpasse mínimo, após a soldagem, deve ser o menor entre 25 mm ou 5 vezes a espessura nominal da chapa mais fina (N-270, 2014). A solda deve ser de ângulo integral, ou seja, o tamanho da solda é igual a espessura das chapas do teto, além de ser contínua por toda junta (API 650, 2016).

Segundo a N-270 (2014), sempre que possível, o teto deve ser soldado a cantoneira de topo do costado de maneira a formar uma ligação de baixa resistência mecânica. A ligação frágil entre o costado e o teto deve estar em conformidade com as especificações apresentadas em 5.10.2.6 da API 650 (2016). Nesse caso, não há necessidade de dispositivos de emergência para proteção contra sobrepressão serem instalados. Caso contrário, esses dispositivos devem ser projetados segundo requisitos da norma ISO 28300.

2.10.1 Cargas sobre o teto

As cargas atuantes no teto podem ser combinadas em várias formas expressas em 5.2.2 da API 650 (2016). Porém, para o dimensionamento do teto fixo e sua estrutura de sustentação, em Barros (2017), foi selecionada a forma 5.2.2(e) da API 650 (2016), que deve ser o maior valor entre a Equação (26) e a Equação (27).

$$Q_1 = D_L + L_r + F_{pe}P_e \quad (26)$$

$$Q_2 = D_L + 0,4L_r + P_e \quad (27)$$

$$Q = \text{máximo}(Q_1; Q_2) \quad (28)$$

onde:

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

Q_1 = forma 1 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [kgf/m²];

Q_2 = forma 2 da carga total considerada uniformemente distribuída sobre o teto, [kgf/m²];

D_L = carga morta, ou seja, peso próprio do teto, que inclui o peso das chapas e da estrutura de sustentação, [kgf/m²];

L_r = carga viva do teto, ou seja, sobrecarga correspondente a uma carga viva. Pela N-270 (2014), o valor a ser considerado é de 100 kgf/m² (981 N/m²), [kgf/m²];

P_e = pressão externa de projeto, que, segundo a seção 2.5.2, deve estar limitado a 0,25kPa (25,4 kgf/m), [kgf/m²];

F_{pe} = fator de combinação da pressão externa que é definido como a razão da pressão de operação normal externa para a pressão externa de projeto, com valor mínimo de 0,4 (para Barros (2017), $F_{pe} = 0,4$).

2.10.2 Teto fixo cônico suportado

Em um tanque de armazenamento de teto fixo cônico suportado, a função da estrutura de sustentação do teto é, basicamente, de sustentação das chapas do teto, portanto, deve ser minimizado qualquer esforço proveniente de soldagem, recalque e dilatação térmica. A estrutura de sustentação é constituída, basicamente, por (ver Figura 20):

- Vigas radiais;
- Vigas transversais;
- Colunas.

As chapas do teto devem ser montadas na estrutura de sustentação com uma declividade do centro para periferia de, no mínimo, 1:16, devendo esse ser o valor adotado sempre que possível. A declividade máxima permitida é de 1:6 (N-270, 2014).

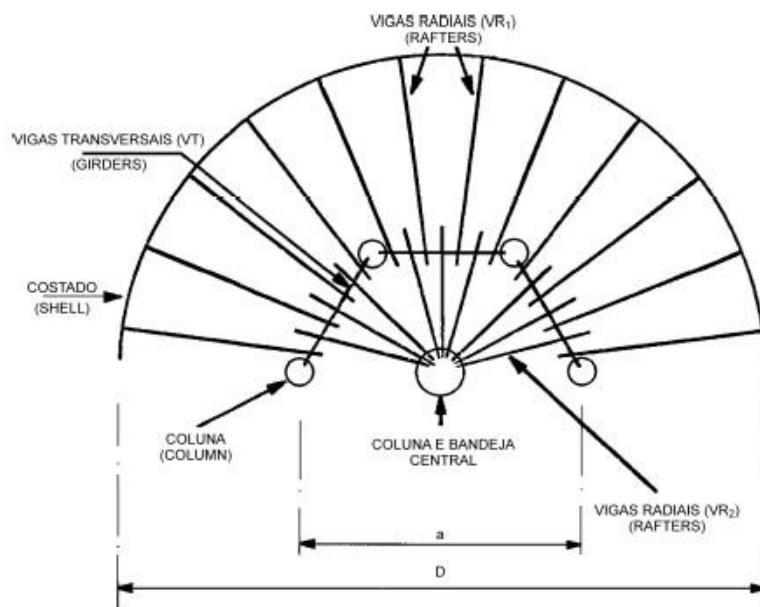


Figura 20 - Componentes da estrutura de sustentação de um teto fixo cônico.
Fonte: Barros (2017)

Os materiais admissíveis a serem utilizados na construção de uma estrutura de sustentação para teto fixo devem estar em conformidade com uma das especificações apresentadas em 2.6.2. No entanto, Barros (2017) recomenda que os perfis que serão utilizados devem ser de aço carbono, qualidade estrutural ASTM A 36.

Os perfis, utilizados na construção de uma estrutura de sustentação, devem ter espessura de alma igual ou maior que 6,35 mm, segundo a N-270 (2014). Já a API 650 (2016) considera que todos os componentes estruturais devem ter uma espessura nominal mínima de 4,3 mm (0,17 in), e uma espessura corroída mínima de 2,4 mm (0,094 in), exceto que a espessura nominal mínima não deve ser menor que 6 mm (0,236 in) para colunas que, por projeto, normalmente resistem a forças axiais de compressão.

Segundo a API 650 (2016), as chapas do teto não devem ser fixadas aos membros de sustentação, a não ser que seja aprovada pelo comprador. De acordo com a N-270 (2014), as ligações das vigas radiais com o costado devem ser sempre aparafusadas com furos oblíquos, além de sempre precisarem ser contraventadas (ver Figura 21). Além disso, as vigas radiais não devem ser soldadas com a coroa central (coluna e bandeja central, ver Figura 20). Ademais, essa norma também estipula que qualquer viga só pode ser engastada em uma das suas extremidades.

As vigas radiais e transversais normalmente são feitas de perfis laminados, de seções em I, H e U ou, mais raramente, construídas a partir de chapas. Os perfis laminados são fornecidos comercialmente com comprimentos de 6, 9 e 12 m (BARROS, 2017).

As colunas devem ser tubulares ou feitas de perfis compostos, e devem ser firmemente soldadas sobre sapatas de perfis. Na região de apoio delas, devem ser soldadas ao fundo, em toda periferia, chapas de reforço de 19 mm de espessura, da mesma especificação do material do fundo, e elas devem ser guiadas por cantoneiras soldadas sobre as chapas de reforço do fundo (N-270, 2014).



Figura 21 - Ligação das vigas radiais com o costado.

Fonte: Barros (2017)

2.10.2.1 Dimensionamento das vigas

O dimensionamento das vigas radiais e transversais é realizado analisando-se flexão, cisalhamento, flecha, flambagem da alma e flambagem da mesa. No entanto, os passos apresentados a seguir para o dimensionamento delas consideraram apenas os três primeiros, já que normalmente são os principais (BARROS, 2017).

Assim, inicialmente, deve-se calcular o número mínimo de vigas radiais, pela Equação (29), que calcula o espaçamento máximo tolerado entre as vigas (API 650, 2016). Segundo Barros (2017), valores práticos para esse espaçamento são de $0,6\pi$ m (2π ft), para as vigas radiais do anel externo (VR_1), e de 1,7 m, para as vigas radiais intermediárias (VR_2).

$$b = t_r \sqrt{\frac{1,5F_{yr}}{Q}} \leq 21000 \text{ mm (84 in)} \quad (29)$$

onde:

b = espaçamento máxima admissível entre as vigas radiais, medido circunferencialmente entre os centros delas, [mm];

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

t_r = espessura corroída do teto, [mm].

a) Flexão das vigas:

As vigas serão consideradas submetidas a um carregamento uniformemente distribuído, com as extremidades livres e bi-apoiadas. Além disso, a declividade do teto também será desprezada e, na primeira sequência dos cálculos, o peso próprio das vigas também será, o que influenciará no termo D_L das Equações (26) e (27) (BARROS, 2017).

O número mínimo de vigas radiais externas (VR_1) é calculado pela Equação (30). Porém, para se alcançar configurações simétricas, facilitando o projeto, fabricação e montagem dos tanques de armazenamento, é prática utilizar-se de um número de vigas radiais múltiplo do número de lados do polígono de sustentação formado pelas vigas transversais (BARROS, 2017).

$$N_1 \geq \frac{\pi D}{b} \quad (30)$$

onde:

N_1 = número mínimo de vigas radiais externas (VR_1).

Após a determinação do número de vigas radiais, calcula-se, pela Equação (31), a carga por unidade de comprimento da viga em que esta está submetida. Esse resultado permite a determinação do momento fletor máximo em que a viga está exposta, pela Equação (32). Essa equação considera que a viga é bi-apoiada com uma carga uniformemente distribuída, e o momento fletor máximo acontece no meio do vão (BARROS, 2017).

$$q_{vr1} = \frac{Q(\pi/4)(D^2 - a^2)}{N_1 L_{vr}} \quad (31)$$

$$M = \frac{q L^2}{8} \quad (32)$$

onde:

q_{vr1} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga externa (VR_1), [kgf/m];

a = diâmetro do círculo formado pelas colunas intermediárias (ver Figura 20), [m];

L_{vr} = comprimento da viga radial, [m];

M = momento fletor máximo, [kgf.m].

Por fim, determina-se o módulo de resistência pela Equação (33). Com isso, seleciona-se um perfil com módulo de resistência maior ou igual que o calculado anteriormente. Assim, após todos os passos terem sido cumpridos, deve-se repetir a sequência de cálculos, considerando-se o peso próprio do perfil selecionado no termo D_L das Equações (26) e (27) (BARROS, 2017).

$$W = \frac{100 M}{\sigma_a} \quad (33)$$

onde:

W = módulo de resistência, [cm³];

σ_a = tensão admissível do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar 1540 kgf/cm² (22000 psi), [kgf/cm²].

Para vigas radiais intermediárias (VR₂), o procedimento é análogo ao anterior, mas a Equação (30) é substituída pela Equação (34) e a Equação(31) pela Equação (35) (BARROS, 2017).

$$N_2 = \frac{\pi a}{1,7} \quad (34)$$

$$q_{vr2} = \frac{Q(\pi/4)a^2}{N_2 L_{vr}} \quad (35)$$

onde:

N_2 = número mínimo de vigas radiais intermediárias (VR₂);

q_{vr2} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga intermediária (VR₂), [kgf/m].

Para vigas transversais (VT), o procedimento é análogo ao realizado para as vigas radiais, mas, novamente, a Equação (31) é substituída pela a Equação (36), e as Equações (30) e (34) não são aplicáveis para o procedimento das vigas transversais. As vigas radiais constituem uma série de cargas localizadas sobre as vigas transversais, mas, na prática, o carregamento pode ser considerado uniformemente distribuído nessas, caso se tenha quatro ou mais vigas radiais sendo suportadas por cada uma delas (BARROS, 2017).

$$q_{vt} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{L_t} \quad (36)$$

onde:

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

L_t = comprimento da viga transversal (VT), [m];

q_{vt} = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga transversal, [kgf/m].

b) Cisalhamento:

As vigas radiais (VR_1 e VR_2) e transversais (VT) foram consideradas como tendo um carregamento uniformemente distribuído e sendo bi-apoiadas nas suas extremidades. Assim, o perfil selecionado, a partir da análise por flexão, deve ser verificado ao cisalhamento para todos os tipos de vigas da estrutura de sustentação, segundo a Equação (38).

$$F_c = \frac{q L}{2} \quad (37)$$

$$\tau = \frac{F_c}{A_{alma}} \leq \tau_a \quad (38)$$

onde:

q = carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento sobre uma viga, [kgf/m];

F_c = cortante máximo, que para viga com carregamento uniformemente distribuído e bi-apoiada é igual a reação no apoio, [kgf];

τ = tensão cisalhante, [kgf/cm²];

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

τ_a = tensão admissível ao cisalhamento do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar 910 kgf/cm² (13000 psi), [kgf/cm²].

c) Flecha:

A deflexão máxima ocorre no meio do vão da viga bi-apoiada e de carregamento uniforme, que pode ser determinado pela Equação (39). Esta deve ser aplicada em todos os tipos de viga da estrutura de sustentação. Segundo a N-270 (2014), as flechas nas vigas radiais (VR_1 e VR_2) e transversais (VT) devem ser limitadas ao valor de $L_v/200$.

$$\delta = \frac{5 q L^4}{384 EI} \leq \frac{L_v}{200} \quad (39)$$

onde:

δ = deflexão máxima, [cm];

E = módulo de elasticidade do material, que para qualidade estrutural ASTM A 36 considerar $2,1 \times 10^6$ kgf/cm² (30×10^6 psi), [kgf/cm²];

I = momento de inércia da seção transversal do perfil, [cm⁴];

L_v = comprimento da viga em questão, [m].

2.10.2.2 Dimensionamento das colunas

O dimensionamento das colunas deve ser feito quanto à flambagem, supondo que a coluna é bi-rotulada nos extremos, ou seja, o comprimento efetivo da coluna, que poderá sofrer flambagem, será o próprio comprimento real da coluna (ver Equação (40)) (BARROS, 2017).

Segundo a API 650 (2017), o índice de esbeltez para colunas não deve exceder 180. Assim, deve-se calcular, pela Equação (42), o raio de giração mínimo possível para o perfil da coluna.

$$L_e = L_c \quad (40)$$

$$L_c = H + \frac{D-a}{2D_r} - \frac{D-a}{2D_b} \quad (41)$$

$$r_{\min} = \frac{100L_c}{180} \quad (42)$$

onde:

L_e = comprimento efetivo da coluna, [m];

L_c = comprimento real da coluna, [m];

r_{\min} = raio de giração mínimo possível para o perfil da coluna, [cm];

D_r = declividade do teto;

D_b = declividade do fundo.

Então, deve-se selecionar, preliminarmente, uma associação de perfis ou um tubo que será utilizado como coluna, de tal forma que:

$$r_{adot} \geq r_{mín} \quad (43)$$

onde:

r_{adot} = raio de giração adotado do perfil selecionado para coluna, [cm].

Portanto, deve-se calcular o índice de esbeltez do perfil adotado pela Equação (44).

$$\lambda = \frac{L_c}{r_{adot}} \quad (44)$$

onde:

λ = índice de esbeltez do perfil adotado.

Após a determinação do índice de esbeltez do perfil ser calculado, deve-se, primeiro, calcular o fator de segurança, pela Equação (45), que possibilitará a determinação da tensão admissível à compressão nas colunas, sem que haja risco a flambagem:

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{\lambda}{350} - \frac{\lambda^3}{18300000} \quad (45)$$

onde:

FS = fator de segurança.

Para $\lambda \leq 120$:

$$\sigma_{adm} = \left[1 - \frac{\lambda^2}{34700} \right] \left[\frac{33000y}{FS} \right] \quad (46)$$

onde:

σ_{adm} = máxima tensão admissível à compressão nas colunas, [psi];

y = fator dependente do tipo de perfil selecionado para a coluna.

Para $120 < \lambda \leq 131,7$:

$$\sigma_{adm} = \frac{\left[1 - \frac{\lambda^2}{34700} \right] \left[\frac{33000y}{FS} \right]}{1,6 - \frac{\lambda}{200}} \quad (47)$$

Para $\lambda > 131,7$:

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{149000000y}{\lambda^2 \left[1,6 - \frac{\lambda}{200} \right]} \quad (48)$$

O fator y será igual a 1, caso uma das seguintes opções seja verdadeira:

- Para seções estruturais;
- Para seções tubulares em que a relação dada pela Equação (49) seja verdadeira.

$$\frac{t_{\text{tub}}}{R_o} \geq 0,015 \quad (49)$$

onde:

t_{tub} = espessura da seção tubular, sendo 1/4 in o valor mínimo aceitável, [in];

R_o = raio externo da seção tubular, [in].

O fator y será calculado pela Equação (51) para seções tubulares em que a relação dada pela Equação (50) seja verdadeira.

$$\frac{t_{\text{tub}}}{R_o} < 0,015 \quad (50)$$

$$y = \left[\frac{200}{3} \left(\frac{t_{\text{tub}}}{R_o} \right) \right] \left[2 - \frac{200}{3} \left(\frac{t_{\text{tub}}}{R_o} \right) \right] \quad (51)$$

Deve-se verificar as cargas atuantes nas colunas intermediárias e na coluna central (ver Figura 22). Para a coluna intermediária, primeiro, calcula-se as reações de apoio das vigas transversais à esquerda e à direita da coluna. Então, a carga atuante sobre a coluna intermediária pode ser calculada pela Equação (52). Assim, pela Equação (53), calcula-se a tensão de compressão atuante na coluna intermediária.

$$P_{ci} = Q_E + Q_D \quad (52)$$

$$\sigma_{ci} = \frac{P_{ci}}{A_c} \quad (53)$$

onde:

Q_E = reação de apoio da viga transversal na coluna intermediária à esquerda, [kgf];

Q_D = reação de apoio da viga transversal na coluna intermediária à direita, [kgf];

σ_{ci} = tensão de compressão na coluna intermediária, [psi];

P_{ci} = carga atuando sobre a coluna intermediária, [kgf];

A_c = área da seção transversal da coluna, [in²].

Para a coluna central, primeiro, calcula-se as reações de apoio das vigas radiais sobre ela. Então, a carga atuante sobre a coluna central pode ser calculada pela Equação (54). Assim, pela Equação (55), calcula-se a tensão de compressão atuante na coluna central.

$$P_{cc} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (54)$$

$$\sigma_{cc} = \frac{P_{cc}}{A_c} \quad (55)$$

onde:

σ_{cc} = tensão de compressão na coluna central, [psi];

P_{cc} = carga atuando sobre a coluna central, [kgf].

A associação de perfis ou o tubo escolhido, preliminarmente, não apresentará risco de flambagem caso a Equação (56), para as colunas intermediárias, ou a Equação (57), para a coluna central, sejam verdadeiras.

$$\sigma_{ci} \leq \sigma_{adm} \quad (56)$$

$$\sigma_{cc} \leq \sigma_{adm} \quad (57)$$

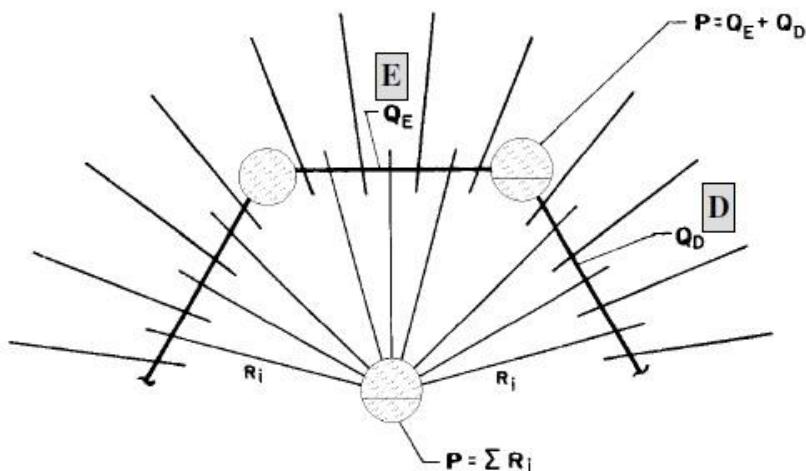


Figura 22 - Cargas sobre as colunas.
Fonte: Barros (2017)

2.10.3 Teto fixo cônico autoportante

Conforme exposto em 2.1.1, os tetos autoportantes são recomendados para tanques de até 6 m de diâmetro.

Os tetos autoportantes, cujas chapas são reforçadas por perfis soldados a elas, não precisam estar em conformidade aos requerimentos de espessura mínima, mas a espessura nominal das chapas do teto não deve ser menor que 5 mm (3/16 in) (API 650, 2016).

Segundo a API 650 (2016), o teto fixo cônico autoportante deve conformar com as Equações (58) e (59).

$$\theta \leq 37^\circ (D_r = 9:12); \quad (58)$$

$$\theta \geq 9,5^\circ (D_r = 2:12). \quad (59)$$

onde:

θ = ângulo entre o teto cônico e a horizontal, [graus].

No entanto, conforme a norma N-270 (2014), a declividade máxima permitida para o teto cônico de um tanque é 1:6, que é a declividade mínima permitida para tanques de teto cônico autoportante, de acordo com API 650 (2016) (ver Equação (59)). Portanto, a declividade do teto de 1:6, deve ser aplicada quando o teto fixo cônico autoportante for selecionado.

A espessura nominal das chapas do teto deve ser calculada pela Equação (60), mas não deve ser menor que 5 mm. A espessura corroída, ou seja, a espessura nominal menos qualquer sobre-espessura de corrosão, não deve ser mais que 13 mm (API 650, 2016).

$$t_{ra} = \frac{D}{4,8 \operatorname{sen}\theta} \sqrt{\frac{Q}{2,2}} + CA \quad (60)$$

onde:

t_{ra} = espessura nominal das chapas do teto autoportante, não menor que 5 mm, [mm].

A área da seção da cantoneira de topo, ou seja, na junção entre o costado e o teto, deve ser igual ou maior que o calculado pela Equação (62).

$$F_a = 0,6F_{yj} \quad (61)$$

$$A_r = \frac{Q D^2}{8F_a \tan\theta} \quad (62)$$

onde:

F_a = mínima tensão de tração admissível para o material na junta entre o teto e o costado, [MPa];

F_{yj} = limite de escoamento mínimo da junta entre o teto e costado na máxima temperatura de projeto, [MPa];

A_r = área da seção da cantoneira de topo, [mm^2].

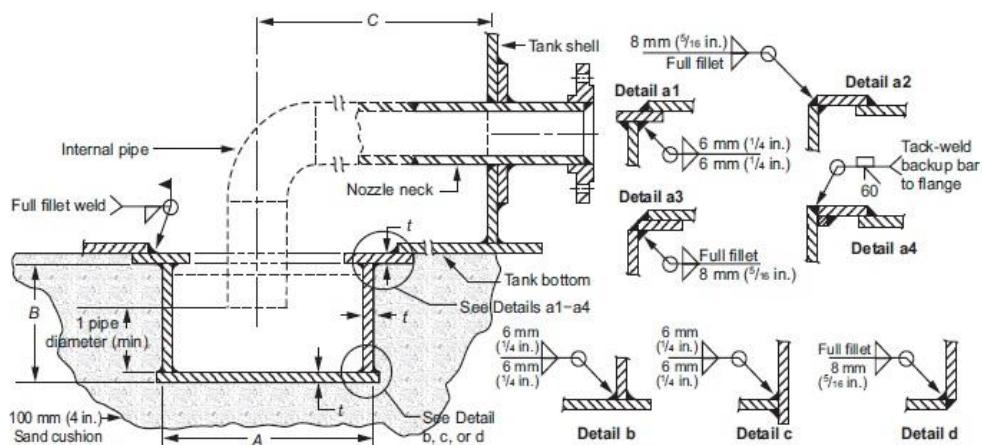
2.11 ACESSÓRIOS

2.11.1 Acessórios para o fundo

Na região do fundo do tanque de armazenamento encontra-se, basicamente, o sistema de drenagem do fundo, sendo o dreno sifão ou dreno com bacia o mais recomendado (ver Figura 23). A sua construção deve estar em conformidade com a Figura 24 e a Tabela 12, que não definem o diâmetro do dreno, que será determinado pela norma N-270 (2014).



Figura 23 - Dreno de fundo do tipo com bacia.
Fonte: Barros (2017)



NOTE The erection procedure shall be performed by one of the following methods or by an alternate design approved by a Storage Tank Engineer:

- For sumps being placed in the foundation before bottom placement, the sump shall be placed in position with at least 100 mm (4 in.) of thoroughly compacted sand, or other suitable fill material, around the sump. The sump then shall be welded to the bottom.
- For sumps being placed in the foundation after bottom placement, sufficient bottom plate shall be removed to allow for the sump to be placed in position with at least 100 mm (4 in.) of thoroughly compacted sand, or other suitable fill material, around the sump. The sump shall then be welded to the bottom.

Figura 24 - Dreno de fundo do tipo dreno com bacia.
Fonte: Figura 5.21 da API 650 (2016)

Tabela 12: Dimensões do dreno de fundo do tipo com bacia.

NPS	Diameter of Sump mm <i>A</i>	Depth of Sump mm <i>B</i>	Distance from Center Pipe to Shell m <i>C</i>	Thickness of Plates in Sump mm <i>t</i>	Minimum Internal Pipe Thickness mm	Minimum Nozzle Neck Thickness mm
2	610	300	1.1	8	5.54	5.54
3	910	450	1.5	10	6.35	7.62
4	1220	600	2.1	10	6.35	8.56
6	1520	900	2.6	11	6.35	10.97

Fonte: Tabela 5.16a da API 650 (2016)

Segundo a N-270 (2014), os tanques com fundo com cimento do centro para periferia devem ter drenos de fundo, do tipo dreno com bacia, igualmente espaçados ao longo da periferia, totalizando uma quantidade de drenos a partir da Tabela 13, que também define o seu diâmetro. Para tanques de derivados de petróleo e álcool, admite-se a utilização de um dos drenos como bocal de saída secundário para esvaziamento total do tanque, devendo estar locado próximo ao bocal de saída do produto, e ter diâmetro conforme a Tabela 14.

Tabela 13: Drenos de fundo dos tanques.

Diâmetro do tanque (m)	Drenos de fundo para produto claro (inclusive diesel)		Drenos de fundo para demais produtos	
	Qt.	Dimensão mm (in)	Qt.	Dimensão mm (in)
D ≤ 6	1	75 (3)	1	75 (3)
6 < D ≤ 10	1	75 (3)	1	150 (6)
10 < D ≤ 18	2	75 (3)	2	150 (6)
18 < D ≤ 27	3	75 (3)	3	150 (6)
27 < D ≤ 43	4	75 (3)	4	150 (6)
43 < D ≤ 55	5	75 (3)	5	150 (6)
55 < D ≤ 90	6	75 (3)	6	150 (6)
D > 90	2)	75 (3)	2)	150 (6)

NOTA 1 As dimensões são nominais; para as demais dimensões seguir a API STD 650.
 NOTA 2 Para tanque com diâmetro acima de 90 m, a quantidade de drenos de fundo deve ser definida no projeto básico.

Fonte: Tabela A.7 da N-270 (2014)

Tabela 14: Diâmetro do bocal secundário.

Diâmetro do bocal de saída de produto	Diâmetro do bocal de saída secundário
Até 4"	Igual ao diâmetro do bocal de saída de produto
6"	4"
8"	6"
10" a 18"	8"
20" a 30"	10"
≥ 32"	12"

Fonte: Tabela A.8 da N-270 (2014)

Segundo a N-270 (2014), os tanques com fundo com cimento da periferia para o centro devem ter um dreno no centro do fundo, do tipo dreno com bacia, de diâmetro segundo a Tabela 13. Para tanques de derivados de petróleo e álcool, admite-se a utilização deste dreno como bocal secundário, devendo estar locado próximo ao bocal de saída do produto em, aproximadamente, 1 m, e ter diâmetro conforme a Tabela 14.

2.11.2 Acessórios do costado

O costado deve apresentar uma variedade de acessórios para garantir o pleno funcionamento de um tanque de armazenamento, como:

- Bocais;
- Bocas de visita;
- Porta de limpeza;
- Plataformas;
- Passadiços;
- Escadas;
- Anéis de contraventamento;
- Anéis de contraventamento intermediário.

Para o propósito deste trabalho, falar-se-á apenas dos acessórios que entram no escopo deste trabalho.

2.11.2.1 Bocais

Segundo Barros (2017), os bocais que se encontram no costado dos tanques possuem uma variedade de finalidades a que se destinam (ver Figura 25), entre elas:

- Movimentação de produto;
- Sistema de drenagem (dreno de fundo e dreno de teto flutuante);
- Sistema de aquecimento (entrada de vapor e saída de condensado);
- Sistema de combate a incêndio (câmara de espuma);
- Misturadores, limpeza com vapor etc.



Figura 25 - Exemplo de bocal de movimentação de carga.
Fonte: Barros (2017)

O diâmetro nominal de um bocal de movimentação produto, normalmente, é calculado adotando-se uma velocidade de escoamento recomendada de 1 m/s para os hidrocarbonetos (BARROS, 2017).

Os flanges dos bocais devem ser do tipo sobreposto ou pescoço, de classe de pressão 150, ou igual a classe de pressão da tubulação interligada, caso seja maior. Para derivado escuro, é recomendado um bocal para entrada e saída do produto com prolongamento interno do tubo de movimentação de carga de até um 1/3 do diâmetro do tanque, visando minimizar a formação de borra (N-270, 2014).

Aberturas no costado de tanques maiores que o requerido para acomodar um flange NPS 2 devem ser reforçados. Logo, isso deve ser aplicado, quando necessário, para bocais e bocas de visita sendo que, a seção transversal mínima requerida não deve ser menor que o produto do diâmetro vertical da abertura cortada no costado e a espessura nominal da chapa, mas quando os cálculos são feitos para a espessura máxima requerida considerando todas as condições de carregamento do projeto e do teste hidrostático, a espessura requerida pode ser usada no lugar da espessura nominal da chapa para o cálculo da seção transversal (API 650, 2016).

A N-270 (2014) recomenda que para os bocais de diâmetro menor ou igual a 10 in deve se usar tubos de uma das seguintes especificações:

- API 5L Gr. A/B;
- ASTM A 106 Gr. A e B.

E para diâmetro maior que 10 in, usar uma das seguintes opções:

- a) Tubos com costura, de chapa:
 - ASTM A 285 Gr. C;
 - ASTM A 516 Gr. 60/70;
 - ASTM A 515 Gr. 60/70;
- b) Tubos de especificação API 5L Gr. B.

Segundo a N-270 (2014), a locação dos bocais no costado do tanque deve ser estabelecida de forma que não haja interferência entre o bocal e o reforço com as juntas soldadas do costado, e entre os flanges de bocais adjacentes. Além disso, deve ser respeitada uma distância mínima entre as linhas de centro dos bocais adjacentes de uma vez e meia a média dos diâmetros externos dos bocais. Também se recomenda que o bocal de saída de produto deve ser do tipo baixo, ou seja, as chapas de reforço formam 90° com o fundo do tanque (ver Figura 26).



Figura 26 - Bocal do tipo baixo.
Fonte: Barros (2017)

2.11.2.2 Bocas de visita

A quantidade e o diâmetro das bocas de visita, conforme ilustrado na Figura 27, podem ser determinados pela Tabela 15. Elas devem ser orientadas na direção dos ventos predominantes no local de construção do tanque de forma a facilitar o arejamento desse, e caso esse tenha mais do que uma boca de visita, elas devem estar localizadas igualmente espaçadas ao longo da circunferência do tanque. Esses dois pormenores que determinam a locação das bocas de visita no tanque podem ser deslocados para se evitar interferência com juntas soldadas ou componentes do costado do tanque (N-270, 2014).

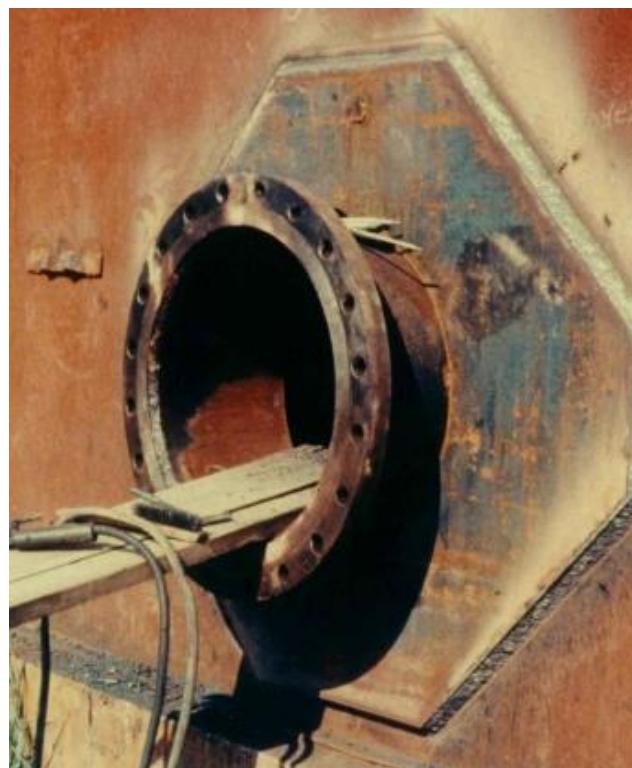


Figura 27 - Exemplo de boca de visita.
Fonte: Barros (2017)

Tabela 15: Quantidades e dimensões de bocas de visita e portas de limpeza dos tanques.

Diâmetro do tanque (m)	Bocas de visita						Portas de limpeza	
	Costado		Teto fixo		Teto flutuante interno e externo			
	Qty.	Dimensão mm (in)	Qty.	Dimensão mm (in)	Qty.	Dimensão mm (in)	Qty.	Dimensões mm (in)
D ≤ 6	1	600 (24)	1	600 (24)	1	900 (36)	1	600 x 600 (24 x 24)
6 < D ≤ 10	1	600 (24)	1	600 (24)	1	900 (36)	1	600 x 600 (24 x 24)
10 < D ≤ 18	1	600 (24)	2	600 (24)	2	900 (36)	1	900 x 1200 (36 x 48)
18 < D ≤ 27	2	600 (24)	2	600 (24)	2	900 (36)	1	1200 x 1200 (48 x 48)
27 < D ≤ 43	4	600 (24)	2	600 (24)	4	900 (36)	2	1200 x 1200 (48 x 48)
43 < D ≤ 55	5	600 (24)	3	600 (24)	5	900 (36)	2	1200 x 1200 (48 x 48)
55 < D ≤ 90	6	600 (24)	4	600 (24)	6	900 (36)	3	1200 x 1200 (48 x 48)
D > 90	2)	600 (24)	2)	600 (24)	2)	900 (36)	2)	1200 x 1200 (48 x 48)

NOTA 1 As dimensões são nominais; para as demais dimensões seguir a API STD 650.

NOTA 2 Para tanque com diâmetro acima de 90 m, a quantidade de bocas de visita e portas de limpeza deve ser definida no projeto básico.

NOTA 3 As bocas de visita do teto flutuante (interno ou externo) são para acesso ao interior do tanque.

Fonte: Tabela A.6 da N-270 (2014)

Como exposto em 2.11.2.1, as bocas de visita podem precisar ser reforçadas, e concomitantemente a isso, a chapa de reforço deve vir com um furo indicador de 6 mm de

diâmetro, para detecção de vazamento através de soldas internas. Ele deve estar localizado na linha de centro horizontal e deve ser aberta para atmosfera (API 650, 2016).

A N-270 (2014) indica que, as bocas de visita devem ser construídas de chapas de mesma especificação usada no costado. Além disso, a sobre-espessura de corrosão especificada para o primeiro anel do costado deve ser considerada em todas as partes da boca de visita em contato com o produto.

2.11.2.3 Portas de limpeza

As portas de limpeza devem ser de construção soldada e do tipo rente ao fundo (ver Figura 28). De acordo com o diâmetro do tanque onde ela será construída, adota-se a quantidade e dimensões indicadas na Tabela 15 (N-270, 2014).

Para locação desses acessórios, deve-se levar em consideração a direção dos ventos predominantes no local de construção do tanque de armazenamento, de forma que, se houver duas ou mais portas de limpeza, duas delas devem estar diametralmente opostas e na direção dos ventos predominantes. No caso de haver apenas uma, deve haver uma boca de visita locada diametralmente oposta a porta de limpeza, e novamente devem estar orientadas na direção dos ventos predominantes (N-270, 2014).



Figura 28 - Exemplo de porta de limpeza.
Fonte: Barros (2017)

A abertura da porta de limpeza deve ser retangular, com os vértices superiores abaulados. Quando o material do costado é do grupo I, II, III ou IIIA, a largura ou altura da

porta de limpeza não deve exceder 1200 mm (48 in); quando o material do costado é do grupo IV, IVA, V ou VI, a altura máxima é 900 mm (36 in) (API 650, 2016).

A abertura reforçada deve ser completamente pré-montada na chapa do costado, e esta unidade completa deve ser sofrer tratamento térmico de alívio de tensões. A espessura nominal da chapa do costado na montagem com a porta de limpeza deve ser, no mínimo, tão espessa quanto as chapas do costado adjacentes no primeiro anel do costado, incluindo a sobre-espessura de corrosão. A espessura nominal da chapa de reforço do costado e da chapa do pescoço deve ser, ao mínimo, a espessura da chapa do costado onde a porta de limpeza foi montada (API 650, 2016).

2.11.2.4 Anéis de contraventamento

Tanques abertos (sem teto ou de teto flutuante externo) devem ser providos de anéis de contraventamento para garantir a sua circularidade quando expostos ao carregamento do vento. Eles devem ser localizados próximo ou no topo do último anel do costado, preferencialmente no lado externo do tanque (API 650, 2016).

Além de anéis de contraventamento no topo de tanques abertos, deve-se verificar a necessidade de anéis de contraventamento intermediário no costado de tanques de armazenamento, que independe da forma do teto e do critério de projeto adotado para o costado (ver Figura 29). Esses acessórios têm como objetivo manter a circularidade ao longo do costado do tanque, quando esse estiver vazio e sujeito a cargas simultâneas de vento e vácuo (BARROS, 2017).



Figura 29 - Tanque com anéis de contraventamento.

Fonte: Barros (2017)

O anel de contraventamento pode ser feito de perfis estruturais, seções de chapa ou combinações desses elementos montados por solda. A periferia do anel de contraventamento pode ser circular ou poligonal (API 650, 2016).

Como o propósito deste trabalho são tanques de teto fixo, apenas a necessidade de ter os anéis de contraventamento intermediário será analisada. Caso seja necessário, definir-se-á a quantidade e a localização deles no costado dos tanques.

Pela API 650 (2016), a altura máxima não reforçada do costado deve ser calculada como se segue:

$$H_1 = 9,47t_f \sqrt{\left(\frac{t_f}{D}\right)^3} \left(\frac{190}{V}\right)^2 \quad (63)$$

onde:

H_1 = máxima altura do costado não reforçado, [m];

t_f = espessura nominal do anel do costado mais fino, [mm];

V = velocidade do vento de projeto, considerando uma rajada de 3 segundo, [km/h].

Segundo a norma N-270 (2014), os anéis de contraventamento devem ser dimensionados utilizando a velocidade máxima de vento local de 100 km/h, ou valor superior caso haja histórico no local em que o tanque de armazenamento será construído.

Após a determinação da altura máxima não reforçada do tanque, H_1 , deve-se calcular a altura do costado transformado (API 650, 2016):

- a) Com a Equação (64), deve-se mudar a largura real de cada anel do costado em uma largura transposta dele, tendo a espessura do último anel:

$$W_{tr} = W_r \sqrt{\left(\frac{t_f}{t_t}\right)^5} \quad (64)$$

onde:

W_{tr} = largura transposta de cada anel do costado, [mm];

W_r = largura real de cada anel do costado, [mm];

t_t = espessura nominal do anel do costado para qual a largura transposta está sendo calculada, [mm].

- b) Soma-se as larguras transpostas dos anéis. Esta soma resultará a altura do costado transformado.

Se a altura do costado transformado for maior que a máxima altura do costado não reforçado, H_1 , um anel de contraventamento intermediário será requerido. Assim, para uma estabilidade igual acima e abaixo do anel de contraventamento, este deve estar localizado na meia altura do costado transformado. A localização no costado real se dá no mesmo anel e mesma posição relativa que ele ocupa no costado transformado, usando a relação de espessura da Equação (64) ou aplicando-se uma regra de três (API 650, 2016).

Outra localização para o anel de contraventamento pode ser utilizada, desde que a altura do costado não reforçado no costado transformado não exceda o valor de H_1 calculado. Isso se torna importante já que o anel de contraventamento intermediário não pode ser instalado dentre 150 mm (6 in) de uma junta horizontal no costado. Caso a localização preliminar seja dentre este valor, o anel de contraventamento intermediário deve ser fixado preferencialmente a 150 mm abaixo da junta horizontal, desde que a altura máxima não reforçada não seja excedida (API 650, 2016).

De acordo com a API 650 (2016), se metade da altura do costado transformado exceder a altura máxima H_1 , um segundo anel de contraventamento intermediário deverá ser utilizado para reduzir a altura não reforçada do costado para uma altura menor que a máxima.

O módulo de resistência mínimo requerido pelo anel de contraventamento deve ser determinado pela Equação (65).

$$Z = \frac{D^2 h_{ac}}{17} \left(\frac{V}{190} \right)^2 \quad (65)$$

onde:

Z = módulo de resistência mínimo requerido, [cm³];

h_{ac} = distância vertical entre o anel de contraventamento intermediário e a cantoneira no topo do costado, [m].

Segundo a N-270 (2014), os anéis de contraventamento intermediário devem ser dimensionados em conformidade com a norma BSI BS EN 14015. A norma BSI BS EN 14015 (2005) recomenda a utilização dos perfis constantes – cantoneira – da Tabela 16 para a seleção do tamanho do anel de contraventamento intermediário.

Tabela 16: Dimensões do anel de contraventamento intermediário.

Diâmetro do tanque (m)	Anel de contraventamento intermediário (mm)
$D \leq 20$	100 x 65 x 8
$20 < D \leq 36$	120 x 80 x 10
$36 < D \leq 48$	150 x 90 x 10
$D > 48$	200 x 100 x 12

Fonte: BSI BS EN 14015 (2005)

2.11.3 Acessórios do teto

O teto deve apresentar uma variedade de acessórios para garantir o pleno funcionamento de um tanque de armazenamento, como:

- Bocais;
- Bocas de visita;
- Dispositivos de proteção contra a sobre ou subpressão interna;
- Escotilha de medição;
- Guarda-corpo;
- Drenos do teto flutuante externo;
- Escada do teto flutuante externo;
- Selo do teto flutuante;
- Guia antirrotacional do teto flutuante.

Para o propósito deste trabalho, falar-se-á apenas dos acessórios que entram no escopo deste trabalho.

2.11.3.1 Bocais

Os bocais no teto são costumeiramente utilizados para conexão de acessórios no teto, podendo ser flangeados ou rosqueados (BARROS, 2017).

2.11.3.2 Bocas de visita

Segundo Barros (2017), todos os tanques de armazenamento devem possuir pelo menos uma boca de visita no teto, independentemente do tipo do desse, objetivando uma das seguintes finalidades durante os trabalhos de limpeza e manutenção:

- Ventilação;
- Iluminação;
- Acesso eventual ao interior do equipamento.

Nos tanques de teto fixo, as bocas de visita no teto (ver Figura 30) devem ficar igualmente espaçadas ao longo de uma circunferência próxima à periferia do teto, evitando-se causar interferência em vigas ou juntas soldadas. A quantidade e tamanho desses acessórios devem estar em concordância com a Tabela 15 (N-270, 2014).

A N-270 (2014) indica que as bocas de visita devem ser sempre reforçadas, conforme a API 650, e construídas de materiais com a mesma especificação usada no teto. Além disso, caso seja especificado sobre-espessura de corrosão para o teto, este valor deve ser acrescido em todas as partes da boca de visita em contato com o vapor do produto.



Figura 30 - Exemplo de boca de visita no teto fixo.
Fonte: Barros (2017)

3 PROGRAMA TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Após a aplicação da parte teórica, apresentada no capítulo anterior, para o desenvolvimento do programa com objetivo de automatizar o projeto básico de tanques de armazenamento de teto cônico fixo, com enfoque na utilização acadêmica, este capítulo irá abordar a entrada de dados no programa e como os resultados são fornecidos.

3.1 ENTRADA DE DADOS

Para a entrada de dados no PTA, faz-se necessário que o usuário do programa tenha decidido as propriedades que o tanque, que se deseja projetar, irá ter. Ao inicializar aquilo, aparecerá o primeiro formulário (ver Figura 31), onde deve-se entrar com os seguintes dados:

1. Identificação do tanque, ou seja, a Tag do tanque (opcional);
2. O nome do produto armazenado (opcional);
3. Densidade relativa do produto;
4. Diâmetro nominal do tanque em metros;
5. Altura nominal do tanque em metros;
6. O número de anéis do costado. Dado necessário, pois depende da largura das chapas que o usuário tem à disposição para serem utilizadas na sua construção.
7. Velocidade do vento em km/h, para verificação quanto a necessidade de anéis de contraventamento intermediário.



Figura 31 - Primeira aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento.
Fonte: Autor

Após os dados serem corretamente inseridos, passa-se para a próxima página, na qual deve-se entrar com dados para a realização do projeto do fundo do tanque (ver Figura 32). As informações necessárias são:

1. O tipo de fundo que se deseja utilizar. Caso o diâmetro seja inferior a 6 m, irá aparecer uma mensagem na tela alertando que a norma N-270 (2014) recomenda a utilização de fundo plano para esses tanques, como pode ser visto na Figura 33;
2. A declividade do fundo, que deve ser escrita como: “1:25”;
3. O tipo de contorno do fundo. Caso o diâmetro seja superior a 15 m e o contorno escolhido seja de chapas recortadas, uma mensagem irá aparecer na tela alertando que a norma N-270 (2014) proíbe o uso desse tipo de contorno em tanques maiores que 15 m, como pode ser visto na Figura 34.
4. O material do fundo com duas opções: ASTM A283M Gr. C e ASTM A36M;
5. A opção de se adotar, e quantos milímetros, ou não adotar sobre-espessura de corrosão para as chapas do fundo.

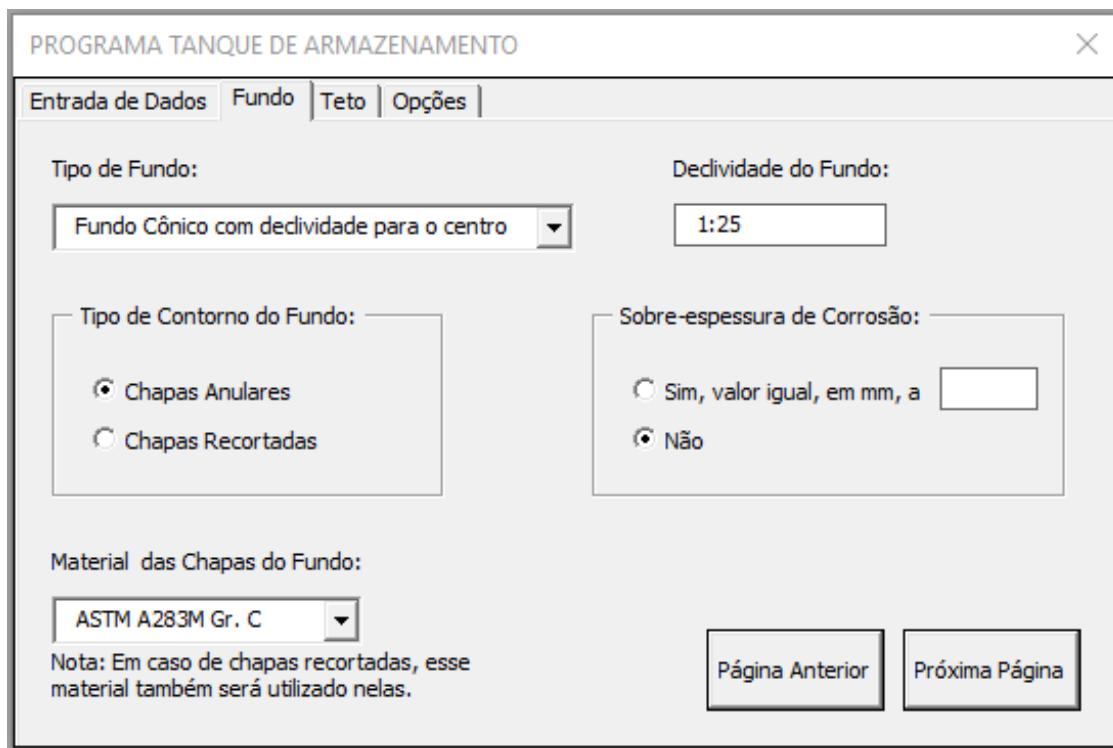


Figura 32 - Segunda aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento, focada no projeto do fundo.

Fonte: Autor

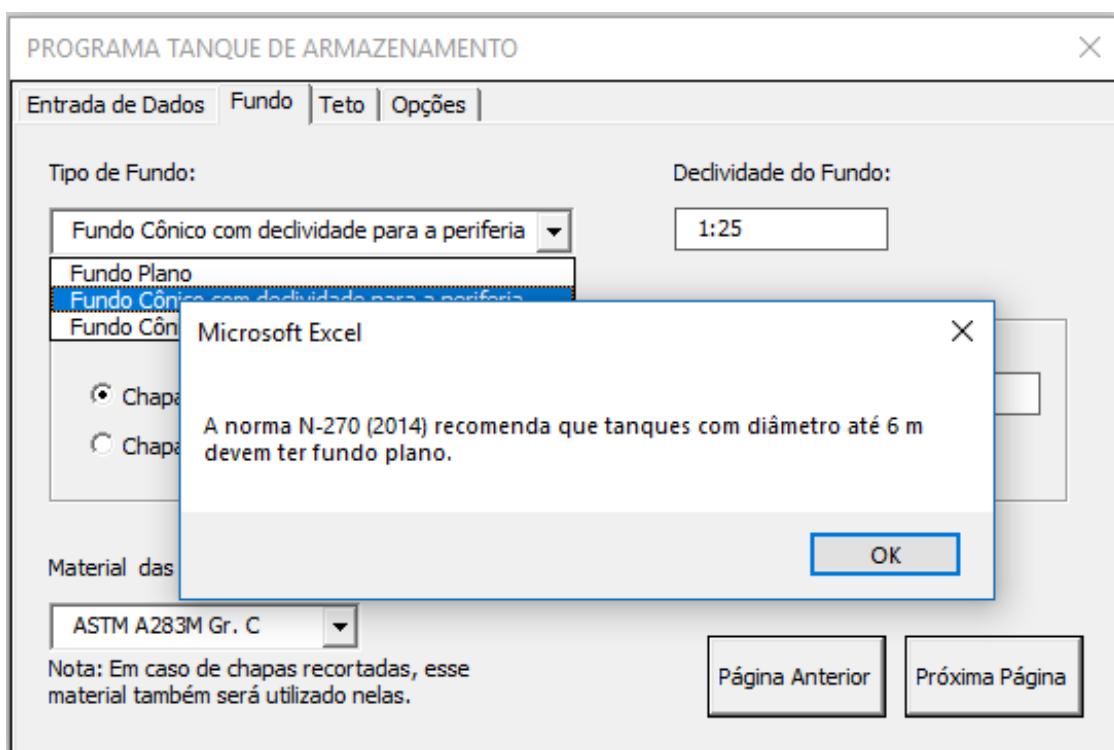


Figura 33 - Mensagem alertando quanto ao tipo de fundo a ser utilizado quando o diâmetro tem até 6 m.

Fonte: Autor

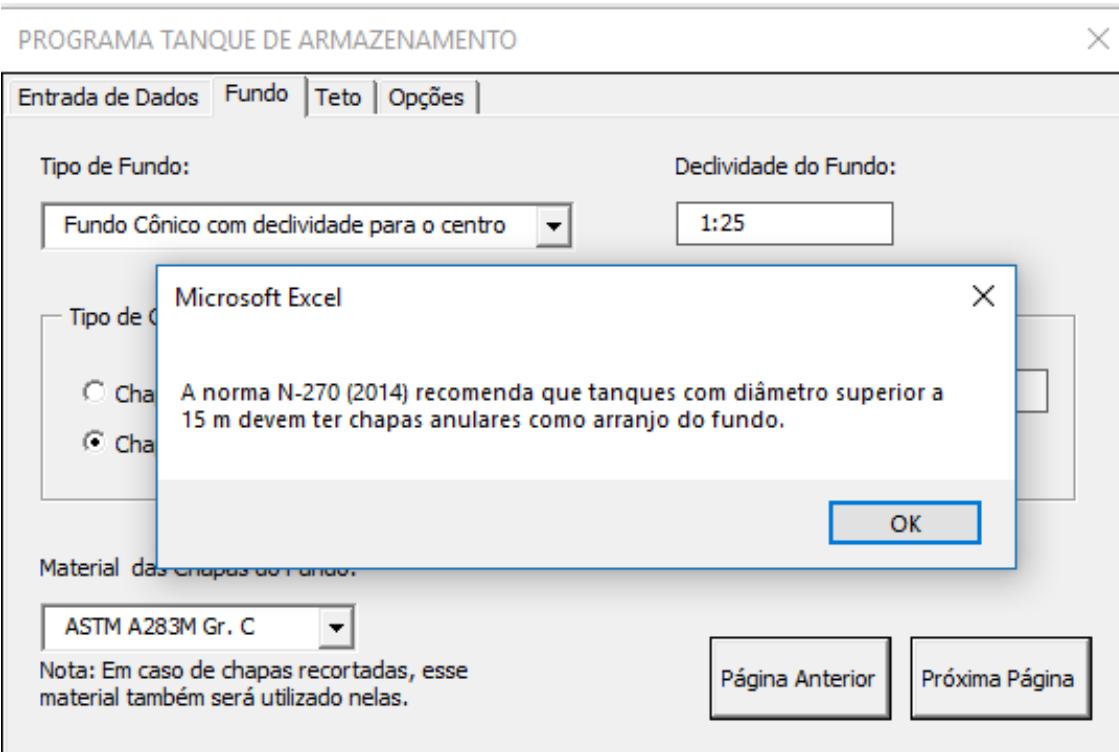


Figura 34 - Mensagem alertando a proibição de chapas recortadas quando o diâmetro é maior que 15 m.

Fonte: Autor

A próxima aba se destina a entrada de dados para o projeto do teto (ver Figura 35), que necessita dos seguintes dados:

1. O tipo de teto fixo cônico que se deseja utilizar. Caso o diâmetro do tanque seja inferior a 6 m e o teto selecionado seja o teto suportado, uma mensagem irá aparecer na tela alertando que a norma N-270 (2014) recomenda a utilização de teto autoportante para esse tanque, como pode ser visto Figura 36;
2. A declividade do teto, que deve ser escrita como: “1:16”;
3. Material para as chapas do teto com três opções: ASTM A1011M Gr. 33, ASTM A283M Gr. C e ASTM A36M;
4. A opção de se adotar, e quantos milímetros, ou não adotar sobre-espessura de corrosão para as chapas do teto.

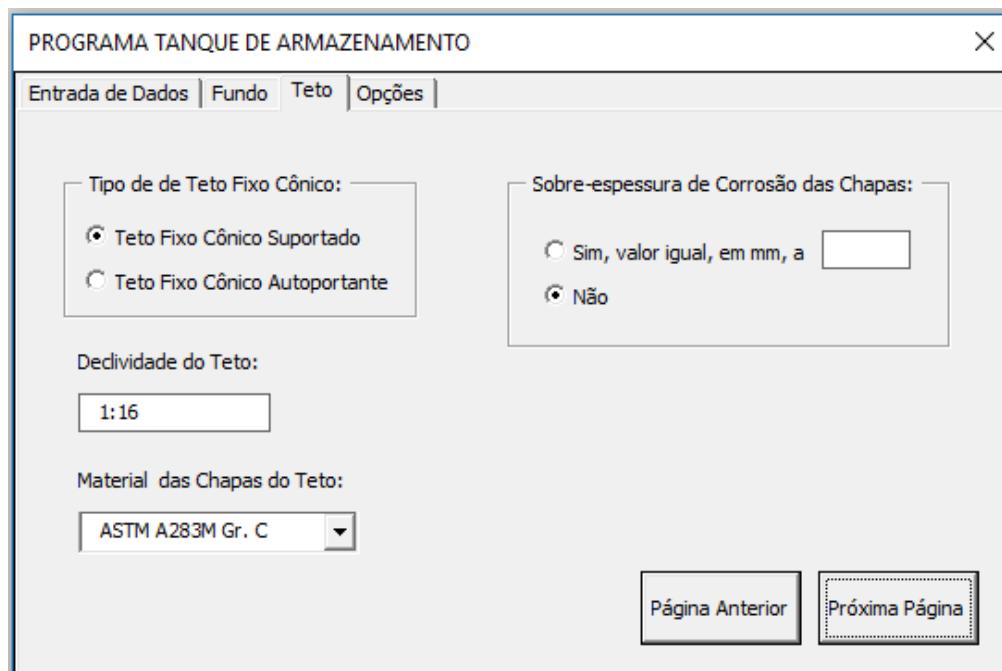


Figura 35 - Terceira aba de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento, focada no projeto do teto.

Fonte: Autor

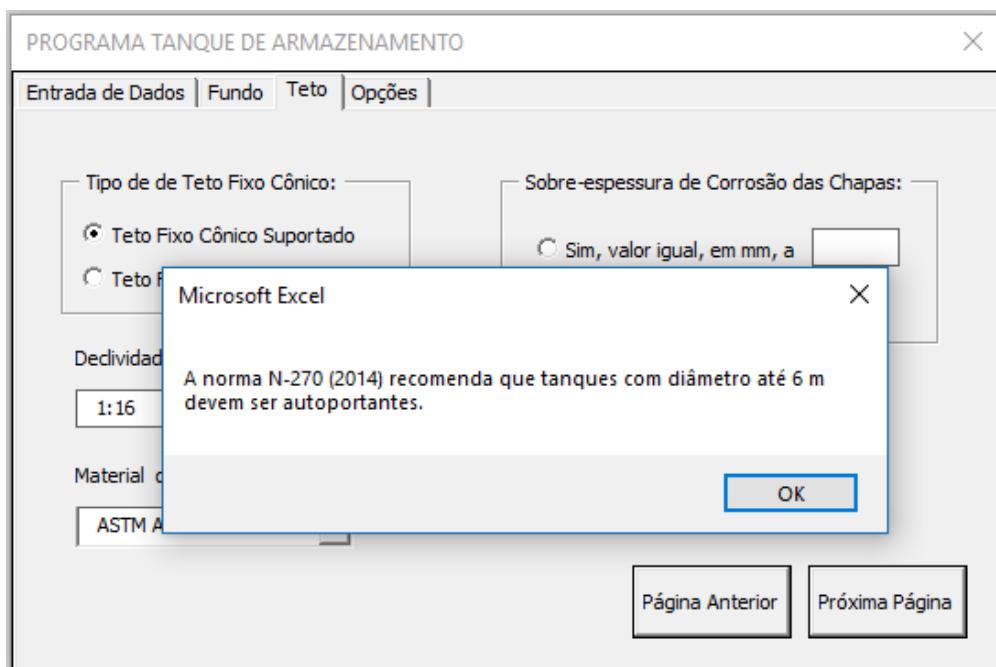


Figura 36 - Mensagem alertando quanto ao tipo de teto a ser utilizado quando o diâmetro tem até 6 m.

Fonte: Autor

A última aba do formulário dá três opções para o usuário, além de permitir que esse possa gerar um relatório em PDF ao final do dimensionamento do tanque feito pelo programa (ver Figura 37). A primeira corresponde ao avanço do projeto, a segunda corresponde à limpeza de todos os dados do formulário e a terceira simplesmente fecha o formulário. Caso a opção de teto suportado esteja marcada quando o botão “Avançar” for clicado, surgirá um novo formulário para a entrada dos dados para o projeto da estrutura de sustentação, como pode ser visto na Figura 38.

Caso o tipo de teto selecionado seja o autoportante e a declividade seja diferente de 1:6 quando o botão “Avançar” for selecionado, uma mensagem irá aparecer na tela informando ao usuário que, segundo a N-270 (2014), a declividade máxima permitida para o teto cônicoo de um tanque é 1:6, que é a declividade mínima permitida para tanques de teto cônicoo autoportante, de acordo com API 650 (2016). Assim, para o projeto de tanques de teto fixo cônicoo autoportante a declividade do teto deve ser de 1:6, e este valor será o utilizado para o projeto do teto.

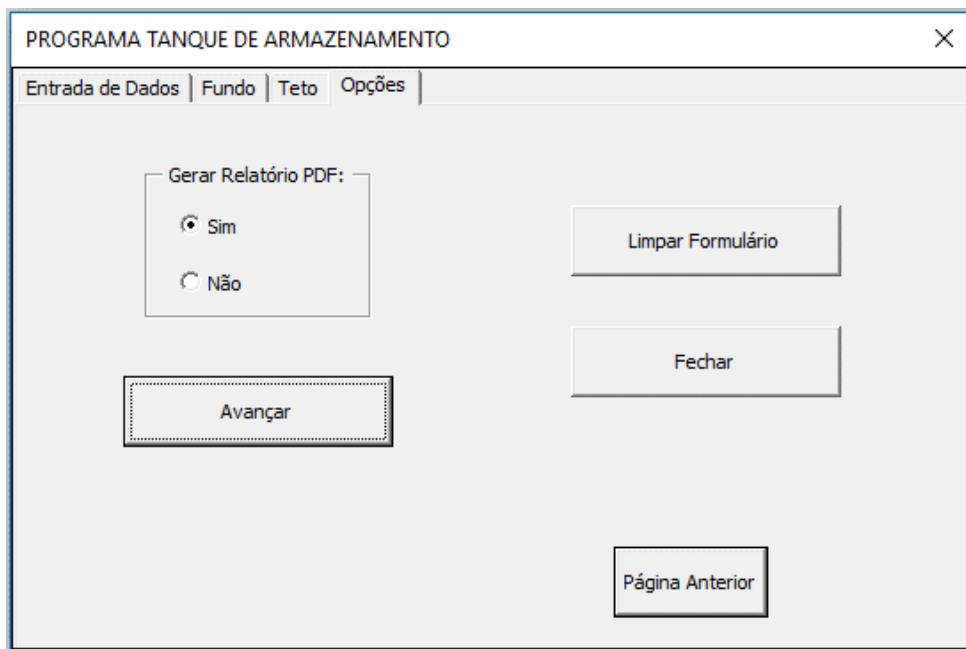


Figura 37 - Última aba do formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento.
Fonte: Autor

Quando o formulário de entrada de dados para a estrutura de sustentação aparecer na tela (ver Figura 38), deve-se entrar com as seguintes informações:

1. O número de círculos de vigas radiais que o usuário deseja para o tanque, ou seja, é a quantidade de círculos de colunas que se deseja para o tanque, sem considerar a coluna central;
2. Material para a estrutura de sustentação, que é lista de opções descrita em 2.6.2;
3. A opção de se adotar, e quantos milímetros, ou não adotar sobre-espessura de corrosão para os perfis estruturais;
4. As opções possíveis de perfis estruturais para as vigas radiais e transversais, além das colunas.

PROGRAMA TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Estrutura de Sustentação do Teto Fixo

Número de Círculos de Vigas Radiais:

Sobre-espessura de Corrosão da Estrutura:

Sim, valor igual, em mm, a

Não

Material da Estrutura de Sustentação:

ASTM A36M

Tipo de Perfil Vigas Radiais:

Perfil H

Perfil I

Perfil U

Tipo de Perfil Vigas Transversais:

Perfil H

Perfil I

Perfil U

Tipo de Perfil Colunas:

Perfil Duplo U

Perfil Tubular

Avançar Limpar Formulário Fechar

Figura 38 - Formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento para o projeto da estrutura de sustentação.
Fonte: Autor

Após o completo preenchimento do formulário para o projeto da estrutura de sustentação, o botão “Avançar” pode ser selecionado para o avanço do projeto. Caso o material selecionado não seja o ASTM A36M, que é a opção recomendada por Barros (2017), aparecerá um novo formulário, como pode ser visto na Figura 39, em que deve-se entrar com parâmetros referentes ao material, entre eles:

1. Tensão admissível em kgf/cm²;
2. Tensão admissível ao cisalhamento em kgf/cm²;
3. Módulo de elasticidade em kgf/cm².

PROGRAMA TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Material dos Perfis Estruturais é: ASTM A131M

Tensão Admissível (kgf/cm²):

Tensão Admissível ao Cisalhamento (kgf/cm²):

Módulo de Elasticidade (kgf/cm²):

Avançar Limpar Fechar

Figura 39 - Formulário de entrada de dados do Programa Tanques de Armazenamento para o material da estrutura de sustentação.
Fonte: Autor

Assim que todas as informações básicas do tanque forem inseridas no programa, pelo usuário, será criada uma nova aba no Excel onde deve-se entrar com alguns dados sobre o costado e, caso o teto selecionado seja o suportado, alguns dados referentes à estrutura de sustentação, como pode ser visto na Figura 40.

ENTRADA DE DADOS					
Identificação: TQ-01 Produto: Gasolina A Densidade: 0,76 Diâmetro (m): 28,366 Altura (m): 14,64 Número de Anéis: 6					
Anel	Largura (m)	Especificação do Material	Sobre-espessura de Corrosão (mm)	Círculo de Vigas Radiais	Raio de Colocação das Colunas (m)
N 1	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	0	14,18
N 2	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	1	6
N 3	2,44	ASTM A283M Gr. C	1		
N 4	2,44	ASTM A283M Gr. C	1		
N 5	2,44	ASTM A283M Gr. C	1		
N 6	2,44	ASTM A283M Gr. C	1		

Figura 40 - Entrada de dados para o projeto do costado e estrutura de sustentação.
Fonte: Autor

3.2 EXECUÇÃO E RESULTADOS

Após todos os dados, mencionados no item 3.1, forem inseridos no PTA, finalmente pode-se executar o programa. Ele oferece três opções: a primeira corresponde ao dimensionamento apenas do costado; a segunda corresponde ao dimensionamento apenas do teto; e a terceira opção corresponde ao dimensionamento do tanque inteiro, ou seja, é realizado o projeto do costado, do teto (autoportante ou suportado), do fundo e a verificação quanto a necessidade de anel de contraventamento intermediário, que caso necessário, também será dimensionado.

Os códigos, referentes a execução do projeto pelo PTA, estão discriminados no Apêndice 1. Além disso, nas Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44 estão apresentado os resultados obtidos para o tanque de armazenamento TQ-01, que teve os dados de entrada apresentados na Figura 31, dados gerais, na Figura 32, dados do fundo, na Figura 35, dados do teto, na Figura 38, dados da estrutura de sustentação, e na Figura 40, dados do costado.

DIMENSIONAMENTO DO COSTADO

Norma do Projeto:	API 650 Corpo de Norma
Método do Projeto:	Ponto Variável de Projeto
Identificação:	TQ-01
Produto:	Gasolina A
Densidade:	0,76
Diâmetro (m):	28,366
Altura (m):	14,64
Capacidade (m³):	9251,82
Número de Anéis:	6

Anel	Largura (m)	Especificação do Material	Sobre-espessura de Corrosão (mm)	Espessuras (mm)			
				Projeto	Teste	Requerida	Comercial
N 1	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	12,53	13,46	13,46	13,49
N 2	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	10,07	10,58	10,58	11,11
N 3	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	8,22	8,43	8,43	8,73
N 4	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	6,38	6,28	6,38	7,14
N 5	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	4,55	4,14	6,30	6,35
N 6	2,44	ASTM A283M Gr. C	1	2,73	2,02	6,30	6,35

Figura 41 - Projeto do costado para o tanque TQ-01.

Fonte: Autor

DIMENSIONAMENTO DO TETO E SUA ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO

Identificação:	TQ-01
Produto:	Gasolina A
Densidade:	0,76
Diâmetro (m):	28,366
Altura (m):	14,64
Tipo de Teto:	Teto Fixo Cônico Suportado
Declividade do Teto:	1:16
Sobrecarga no Teto (kgf/m²):	100
Material das Chapas do Teto:	ASTM A283M Gr. C
Espessura das Chapas do Teto (mm):	4,75

Elemento Estrutural	Quantidade	Comprimento Considerado	Especificação do Material	Especificação do Perfil Calculado	Módulo de Resistência / Raio de Giração	Sobre-espessura de Corrosão (mm)
Vigas Radiais 1	48	8,20	ASTM A36M	U 8" x 20,5	147,5 cm³	1
Vigas Radiais 2	24	6,00	ASTM A36M	U 6" x 15,62	82,9 cm³	1
Vigas Transversais 1	8	4,59	ASTM A36M	W 250 x 44,8	538,2 cm³	1
Colunas Intermediárias 1	8	15,48	ASTM A36M	DN 10" SCH 160	87 mm	1
Colunas Central	1	16,09	ASTM A36M	DN 10" SCH 100	90,3 mm	1

Figura 42 - Projeto do teto suportado para o tanque TQ-01.

Fonte: Autor

DIMENSIONAMENTO DO FUNDO

Identificação:	TQ-01
Produto:	Gasolina A
Densidade Considerada:	
Diâmetro (m):	28,366
Altura (m):	14,64
Declividade do Fundo:	1:25
	Fundo Cônico
Tipo de Fundo:	com declividade para o centro
Declividade do Fundo:	Chapas Anulares

Item	Material	Espessura Mínima (mm)	Largura Mínima (m)
Chapas Anulares	ASTM A283M Gr. C	9,5	0,75
Demais Chapas do Fundo	ASTM A283M Gr. C	6,3	1,8

Figura 43 - Projeto do fundo para o tanque TQ-01.
Fonte: Autor

DIMENSIONAMENTO DO ANEL DE CONTRAVENTAMENTO

Identificação:	TQ-01
Produto:	Gasolina A
Densidade:	0,76
Diâmetro (m):	28,366
Altura (m):	14,64
Velocidade do vento de projeto (km/h):	100
Velocidade máxima do vento (km/h):	133,77
Espessura de Referência (mm):	5,35
Contraventamento Intermediário:	Não Necessário
Número de Contraventamentos:	0

Altura máxima não reforçada (m):	14,98
----------------------------------	-------

Anel	Largura (m)	Espessura (mm)	Sobre-espessura de Corrosão (mm)	Largura Fictícia (m)
N 1	2,44	13,49	1	0,293
N 2	2,44	11,11	1	0,497
N 3	2,44	8,73	1	0,972
N 4	2,44	7,14	1	1,729
N 5	2,44	6,35	1	2,440
N 6	2,44	6,35	1	2,440
				8,372

Figura 44 - Verificação quanto a necessidade de anel de contraventamento intermediário para o tanque TQ-01.
Fonte: Autor

4 ANÁLISE DO TANQUE TQ-01

O tanque TQ-01 (28,366 m de diâmetro e 14,64 m de altura), projetado pelo Programa Tanque de Armazenamento e com resultados que podem ser encontrados na Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44, deve ser analisado para validação do programa.

A análise numérica é feita pelo Método dos Elementos Finitos (FEM), com a utilização do *software Solidworks* 2016. Ela foi separa em duas etapas, a primeira se concentra na validação das chapas do costado dimensionadas pela norma API 650 (2016) (ver item 2.9), enquanto que a segunda se concentra na validação da estrutura de sustentação de um teto fixo cônicos (ver item 2.10).

4.1 ANÁLISE DAS CHAPAS DO COSTADO

O modelo geométrico do tanque foi feito por modelagem 3D no *Solidworks* 2016, como pode ser visto na Figura 45 e Figura 46.

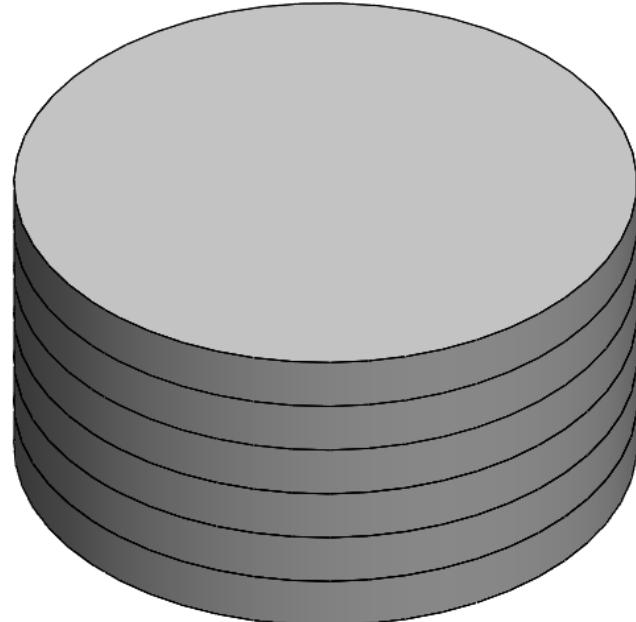


Figura 45 - Modelo 3D do tanque TQ-01.
Fonte: Autor

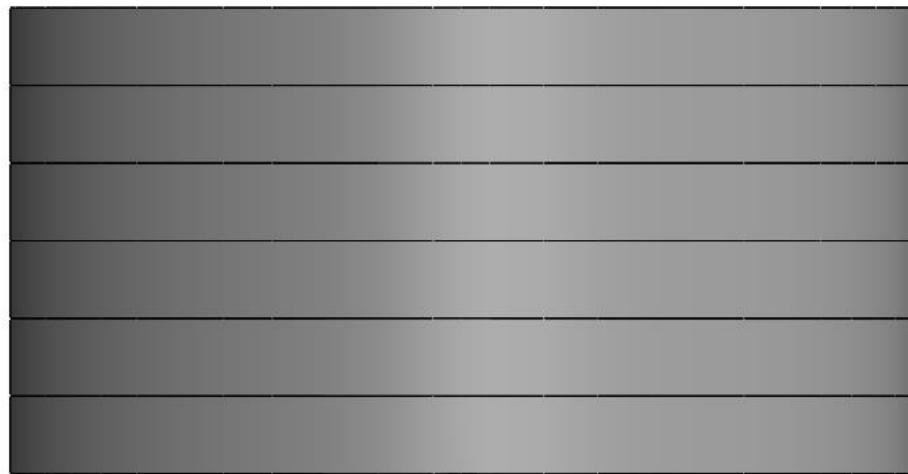


Figura 46 - Vista frontal do tanque TQ-01.
Fonte: Autor

Como os tanques atmosféricos possuem as suas dimensões principais muito elevadas, inclusive o tanque TQ-01, decidiu-se por fazer uma análise estática utilizando uma simplificação 2D, de simetria axial, onde o plano XY foi tomado como o plano de seção e o eixo Y como eixo de simetria, ou seja, foi utilizado um elemento plano axissimétrico, como pode ser visto na Figura 47. Essa simplificação se fez necessário devido à enorme exigência computacional necessária para uma análise de tanque inteiro.

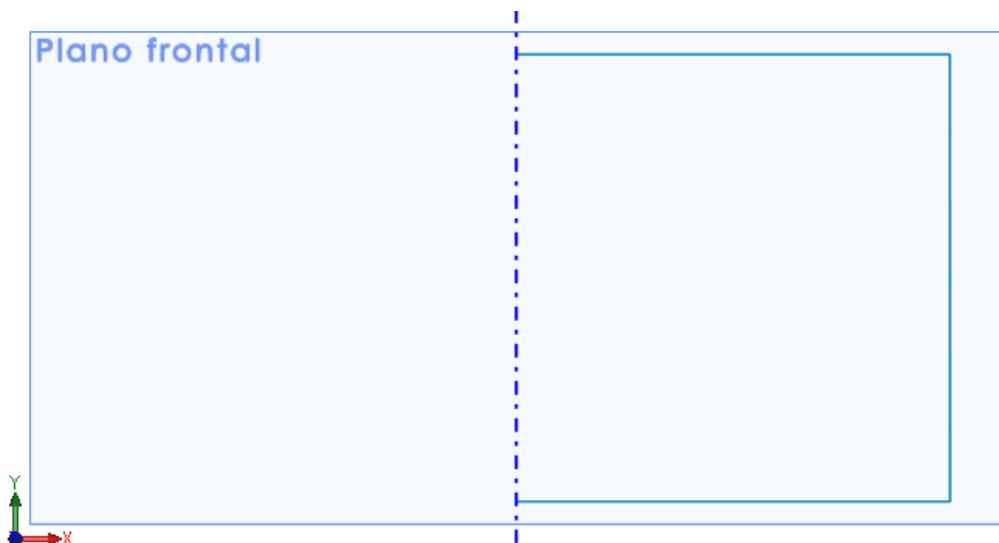


Figura 47 - Vista frontal da simplificação 2D
Fonte: Autor

Para as condições de contorno foram aplicadas geometria fixa no fundo do tanque, ou seja, foi considerado que ele está engastado na sua base, e a condição de rolagem no teto do tanque, com o objetivo de simular a estrutura de sustentação do teto, uma vez que essa condição

de contorno restringe o movimento da aresta selecionada ao longo da direção normal ao plano em que ela se encontra (ver Figura 48).

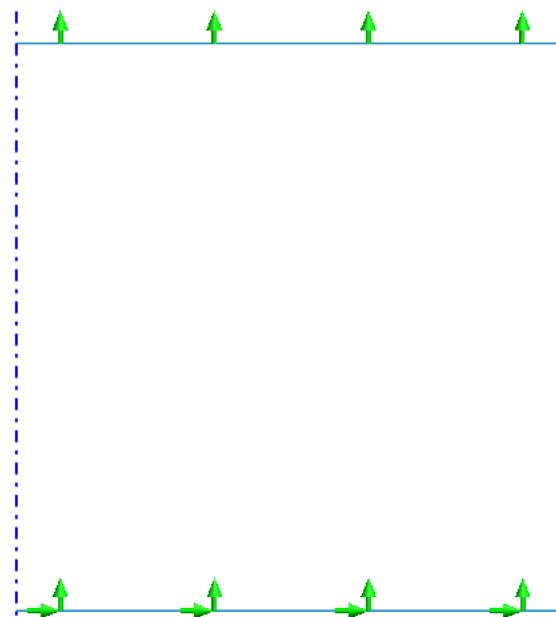


Figura 48 - Condições de contorno aplicadas ao modelo simplificado do tanque.

Fonte: Autor

O tanque TQ-01 foi projetado para o armazenamento de Gasolina A, que segundo a FISIPQ (2013) possui uma densidade relativa de 0,76. Assim, utilizou-se o parâmetro de pressão para aplicar a pressão hidrostática no interior do tanque. Esse parâmetro de carga externa possui a limitação de não poder ser distribuído de maneira não uniforme, como acontece na realidade com a pressão hidrostática, por isso, em cada anel do costado aplicou-se a maior pressão que seria aplicado nele, ou seja, a pressão do fundo de cada anel. A partir da Equação (66), pode-se calcular a pressão a ser aplicada em cada um desses, conforme exposta na Tabela 17. O modelo para simulação, com as condições de contorno e de cargas aplicadas, pode ser visto na Figura 49.

$$P_h = 1000 \times G \times H \times g \quad (66)$$

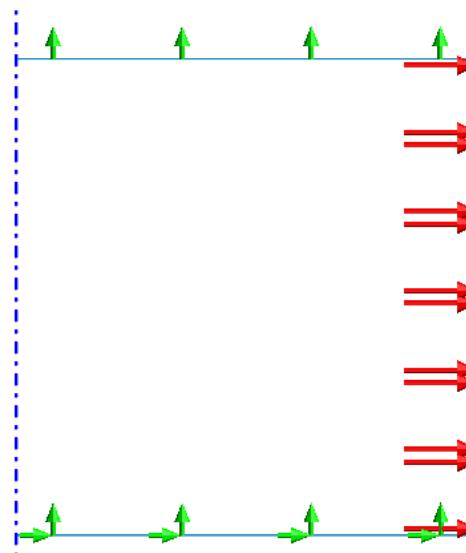
onde:

P_h = pressão hidrostática, [Pa];

g = aceleração da gravidade, [m/s^2].

Tabela 17: Pressão hidrostática aplica em cada anel do costado.

Anel do costado	Pressão Hidrostática (Pa)
1º	109.150
2º	90.958
3º	72.767
4º	54.575
5º	36.383
6º	18.192

Fonte: Autor**Figura 49 - Cargas e condições de contorno aplicadas ao modelo simplificado do tanque.**
Fonte: Autor

No *Solidworks 2016* não é possível mudar o tipo de elemento, estando disponível apenas o elemento 2D de forma triangular parabólica (6 nós e 2 faces). Foram realizados estudos em 10 malhas diferentes, cada uma com número de elementos maior que a anterior, até que os resultados de tensão de Von Mises e de deslocamento resultante convergissem. A malha gerada na interseção do primeiro com o segundo anel pode ser vista em detalhes na Figura 50.



Figura 50 – Malha de 4828 elementos gerada para a simulação do tanque.
Fonte: Autor

O material utilizado foi o ASTM A 283M Grau C de propriedades apresentadas na Tabela 18. Os resultados obtidos nas análises, provenientes do estudo de convergência de malha, podem ser visto na Tabela 19, e o gráfico de convergência de malha para tensão, na Figura 51, e para o deslocamento, na Figura 52.

Tabela 18: Propriedades do aço ASTM A 283M Grau C.

Limite de escoamento	205 MPa
Resistência a tração	380 MPa
Módulo Elástico	190 GPa
Módulo de Cisalhamento	80 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3

Fonte: Autor

Tabela 19: Resultados do estudo de convergência.

Número de elementos	Tensão máx. de Von Mises (MPa)	Diferença relativa	Deslocamento em X (mm)	Diferença relativa
1872	154,22	-	8,5513	-
2080	157,69	2,25%	8,551	-0,00351%

2316	161,2	2,23%	8,5495	-0,01754%
2571	164,21	1,87%	8,5491	-0,00468%
2853	167,11	1,77%	8,549	-0,00117%
3172	169,78	1,60%	8,5489	-0,00117%
3521	172,12	1,38%	8,5488	-0,00117%
3912	174,13	1,17%	8,5486	-0,00234%
4343	175,57	0,83%	8,5486	0,00000%
4828	176,88	0,75%	8,5486	0,00000%

Fonte: Autor

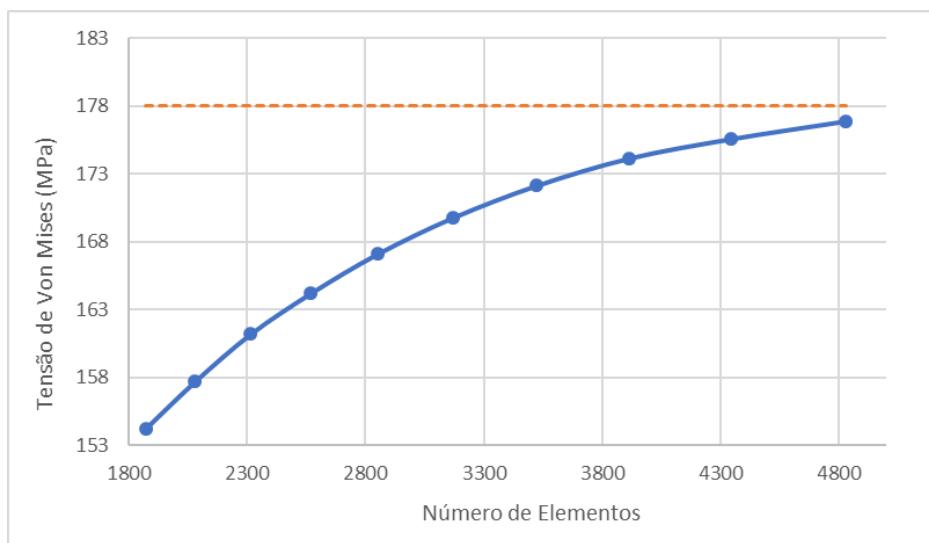


Figura 51 - Gráfico tensão de Von Mises versus número de elementos.
Fonte: Autor

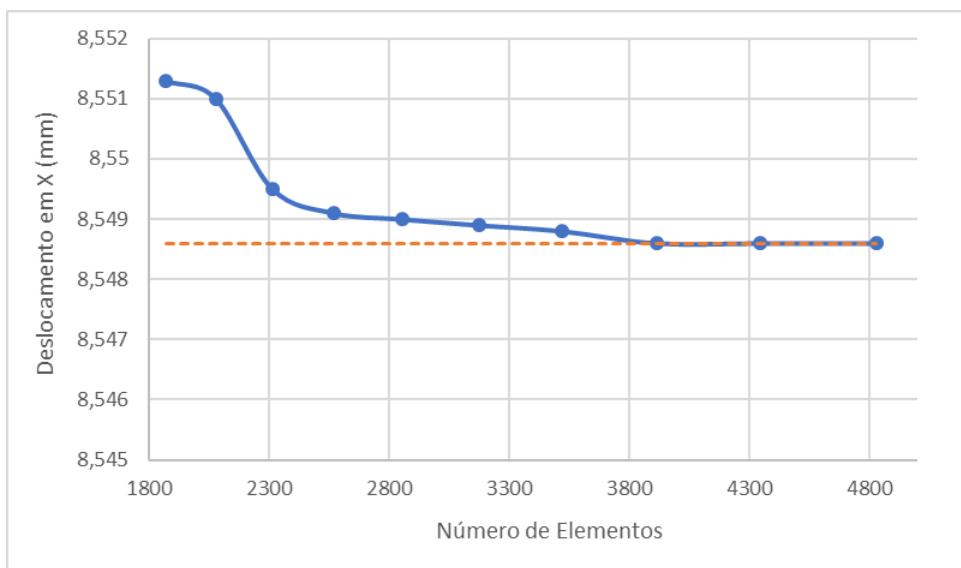


Figura 52 – Gráfico deslocamento na direção X versus número de elementos.

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o tanque não irá falhar devido à pressão hidrostática, uma vez que a maior tensão de Von Mises obtida pela análise não ultrapassou o limite de escoamento do material (ver Tabela 18).

A simulação convergiu de maneira assintótica para todas as grandezas medidas e o resultado final demonstrou que não seria necessário um refino excessivo da malha, já que a diferença relativa entre a primeira e a segunda análise foi menor que 3%, chegando a menos que 1%, para a tensão de Von Mises, e chegando a 0% de diferença para o deslocamento com 9 estudos realizados.

4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO DO TETO

A análise da estrutura de sustentação do teto foi feita a partir da simulação de cada um dos elementos estruturais principais, dimensionados a partir do PTA (ver Figura 42). Os valores dos esforços também foram obtidos a partir do programa, apesar de não ser um dado de saída.

Uma análise separa para cada elemento é possível devido à simetria na estrutura ser um parâmetro considerado no dimensionamento, conforme item 2.10. Assim, para validação da estrutura, os seguintes elementos estruturais devem ser analisados:

- Viga radial 1 (U 8" x 20,5);
- Viga radial 2 (U 6" x 15,62);
- Viga transversal (W 250 x 44,8);
- Coluna intermediária (Tubo 10" Sch 160);

- Coluna central (Tubo 10" Sch 100).

Esses componentes são de aço ASTM A 36M, de propriedades apresentadas na Tabela 20. As análises, pelo Método dos Elementos Finitos, foram feitas utilizando o *software Solidworks 2016*, nas quais os elementos utilizados foram do tipo viga (uniaxial e 6 graus de liberdade para cada nó).

Tabela 20: Propriedades do aço ASTM A 36M.

Limite de escoamento	250 MPa
Resistência a tração	400 MPa
Módulo Elástico	200 GPa
Módulo de Cisalhamento	79,3 GPa
Coeficiente de Poisson	0,26

Fonte: Autor

4.2.1 Análise das vigas

Para que a análise estática de cada uma das vigas fosse feita, primeiramente, foi necessário fazer a modelagem 3D de cada perfil estrutural escolhido para as vigas (ver Figura 53, Figura 54 e Figura 55).

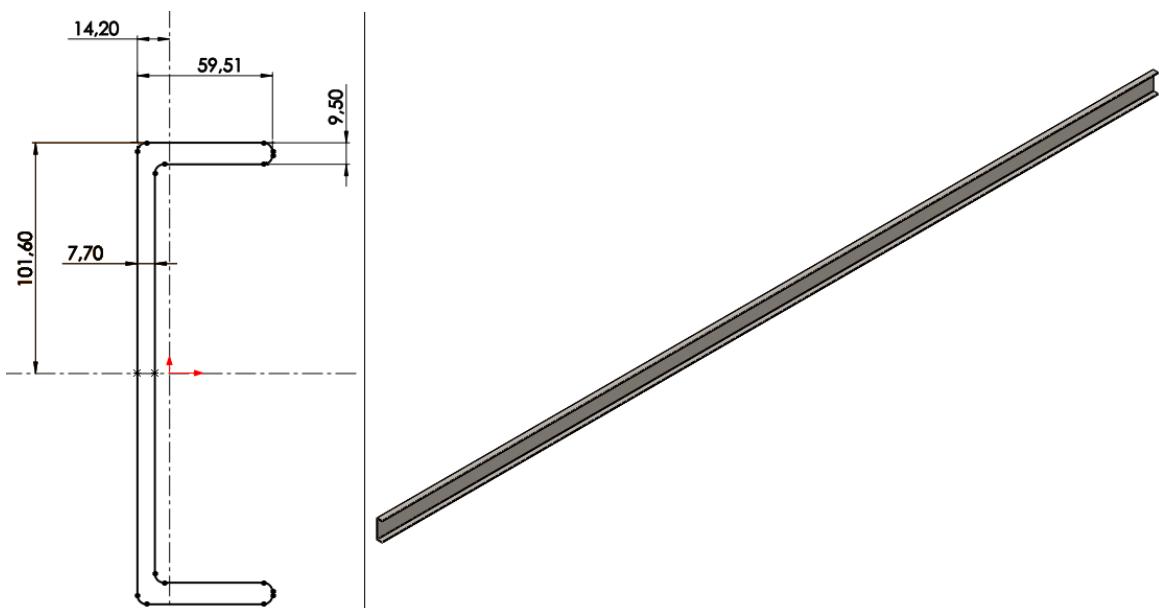


Figura 53 - Viga radial 1, perfil U 8" x 20,5.
Fonte: Autor

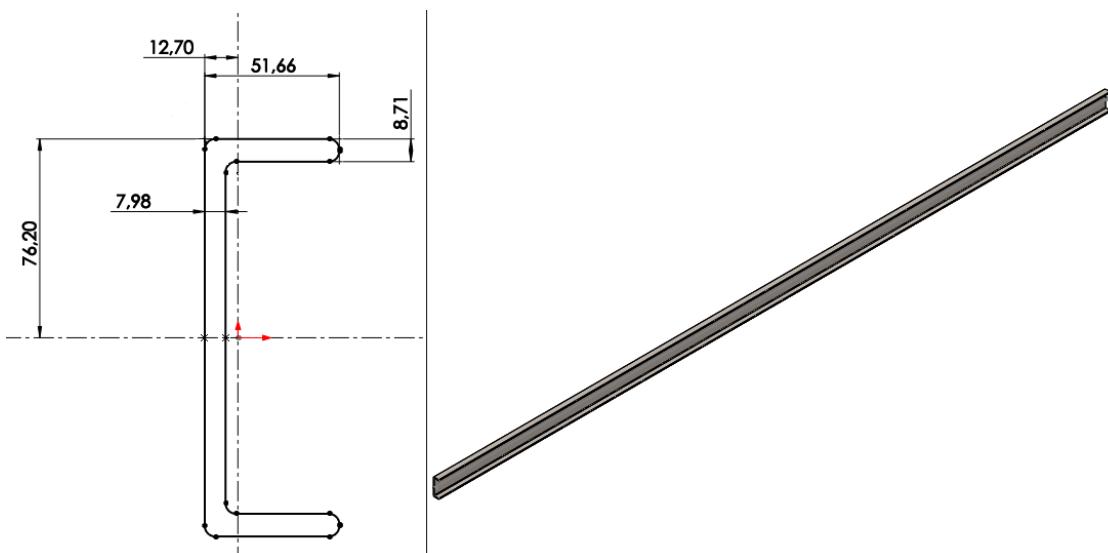


Figura 54 - Viga radial 2, perfil U 6" x 15,62.

Fonte: Autor

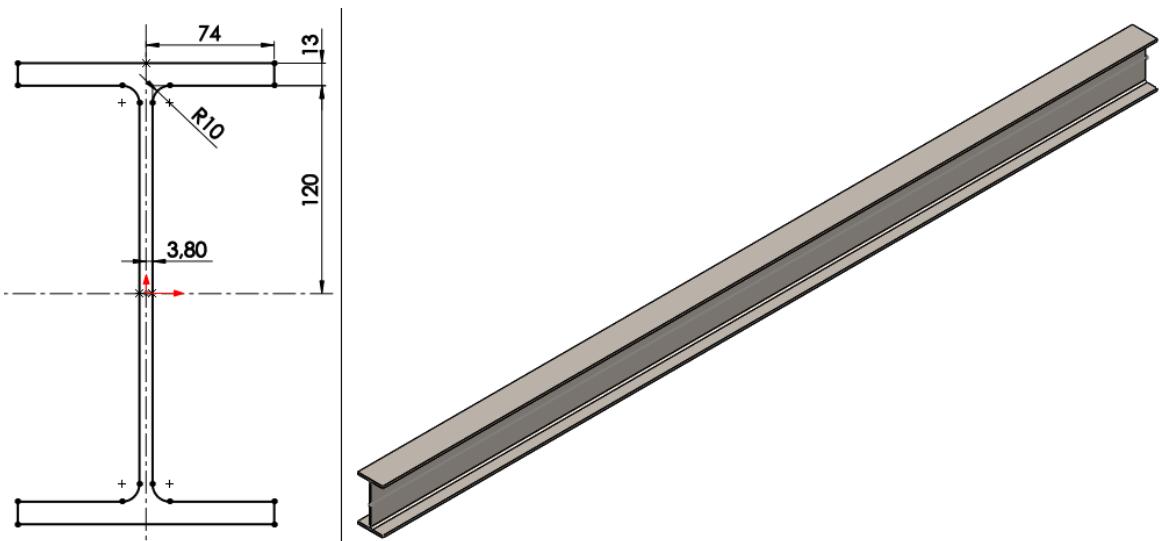


Figura 55 - Viga transversal, perfil W 250 x 44,8.

Fonte: Autor

Como o dimensionamento das vigas as considerou como estando bi-apoiadas, utilizou-se como condição de contorno a restrição imóvel (sem translação) nos nós extremos, ou seja, essa restrição define todos graus de liberdade translacionais como zero.

Em cada análise, aplicou-se como carga externa o parâmetro de força do *software*, que corresponde a uma força distribuída ao longo da viga. Os valores das forças distribuídas foram obtidos a partir do item 2.10.2.1, e estão discriminados, por tipo de viga, na Tabela 21.

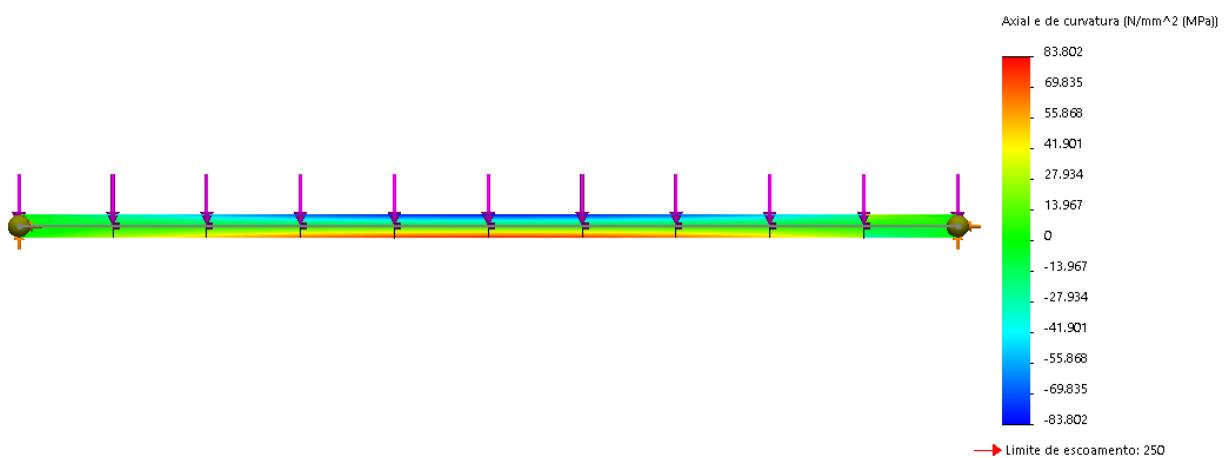
Tabela 21: Esforços sobre as vigas.

Tipo de viga	Força distribuída (kgf/m)
Viga radial 1	144,93
Viga radial 2	86,39
Viga transversal	1.273,49

Fonte: Autor

As simulações, para cada viga, consistiram em análises de convergência de malha, nas quais foram realizadas 9 simulações, cada uma com um número maior de elementos tipo viga, até que os resultados convergissem.

Para a viga radial 1, a última malha gerada contém 10 elementos, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 56, para a tensão axial da viga, e na Figura 57, para o deslocamento na direção do esforço aplicado. Também é possível observar as condições de contorno aplicadas nos nós externos.

**Figura 56 - Resultado de tensão axial para a VR1 com 10 elementos.****Fonte: Autor**

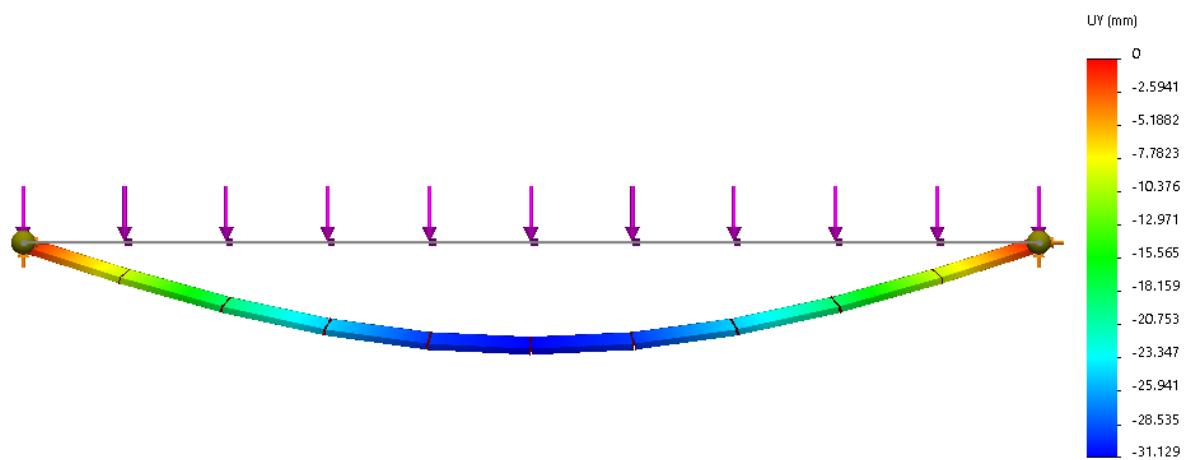


Figura 57 - Resultado do deslocamento em Y para VR1 com 10 elementos.
Fonte: Autor

Os resultados obtidos para todas as malhas estão apresentados na Tabela 22, e o gráfico de convergência de malha para tensão, na Figura 58, e para o deslocamento, na Figura 59.

Tabela 22: Resultados do estudo de convergência para viga radial 1.

Número de elementos	Tensão Axial (MPa)	Diferença relativa	Deslocamento em Y (mm)	Diferença relativa
2	83,802	-	-31,129	-
3	74,491	-11,11%	-27,1	-12,94%
4	83,802	12,50%	-31,129	14,87%
5	80,45	-4,00%	-29,662	-4,71%
6	83,802	4,17%	-31,129	4,95%
7	82,092	-2,04%	-30,379	-2,41%
8	83,802	2,08%	-31,129	2,47%
9	82,767	-1,24%	-30,675	-1,46%
10	83,802	1,25%	-31,129	1,48%

Fonte: Autor

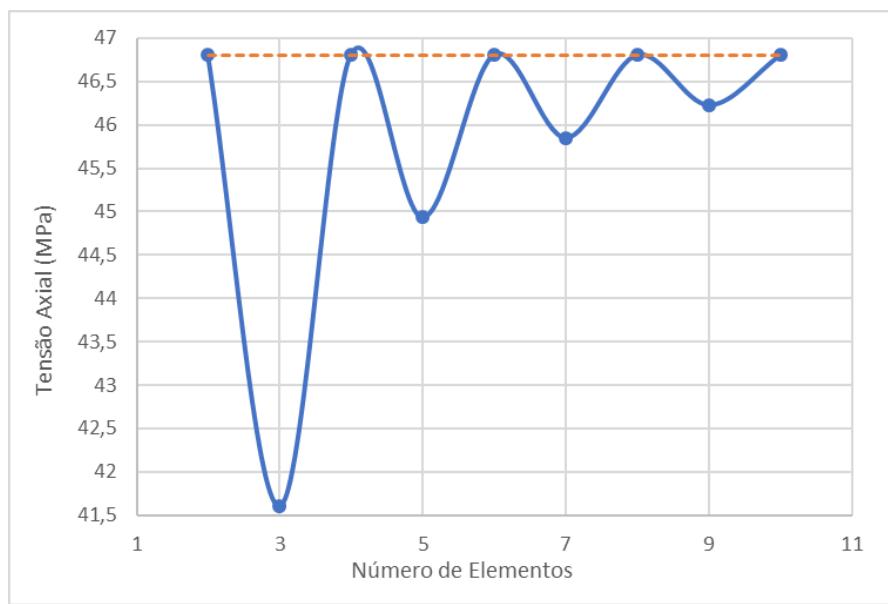


Figura 58 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para a VR1.
Fonte: Autor

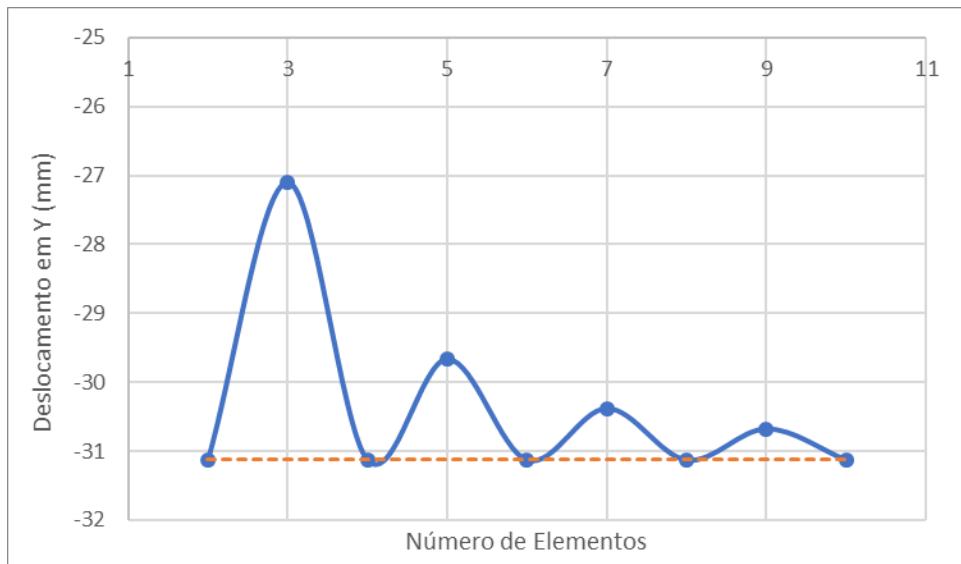


Figura 59 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número de elementos para a VR1.
Fonte: Autor

Para a viga radial 2, a última malha gerado também contém 10 elementos, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 60, para a tensão axial da viga, e na Figura 61, para o deslocamento na direção do esforço aplicado.

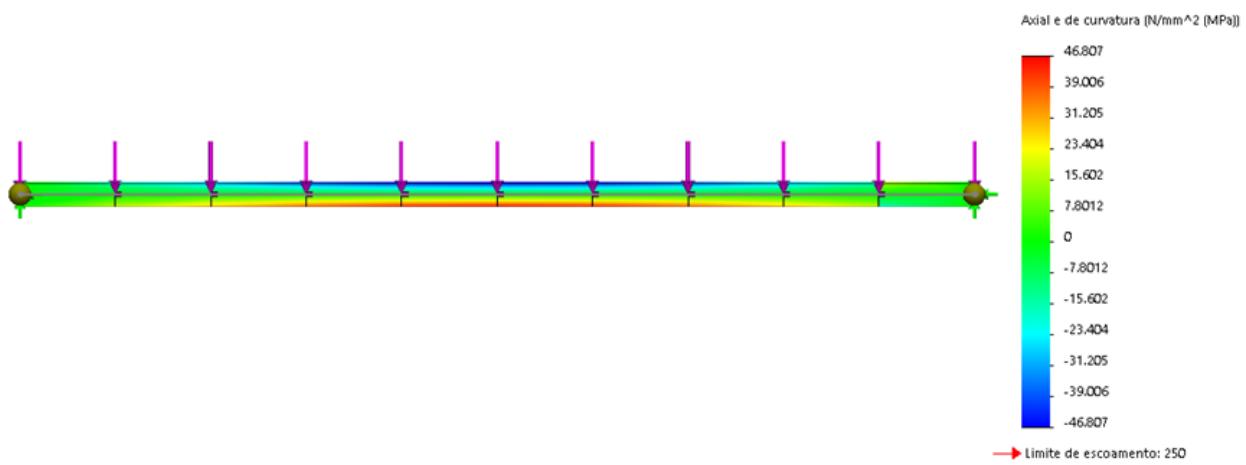


Figura 60 - Resultado de tensão para a VR2 com 10 elementos.
Fonte: Autor

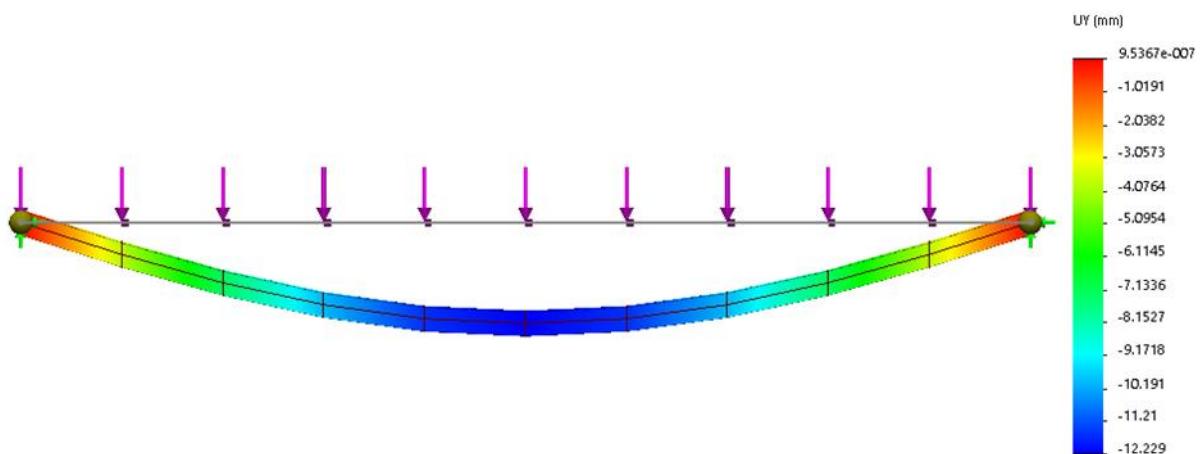


Figura 61 - Resultado do deslocamento em Y para VR2 com 10 elementos.
Fonte: Autor

Os resultados obtidos para todas as malhas estão apresentados na Tabela 23, e o gráfico de convergência de malha para tensão, na Figura 62, e para o deslocamento, na Figura 63.

Tabela 23: Resultados do estudo de convergência para viga radial 2.

Número de elementos	Tensão Axial (MPa)	Diferença relativa	Deslocamento em Y (mm)	Diferença relativa
2	46,807	-	-12,229	-
3	41,606	-11,11%	-10,643	-12,97%
4	46,807	12,50%	-12,229	14,90%
5	44,935	-4,00%	-11,651	-4,73%

6	46,807	4,17%	-12,229	4,96%
7	45,852	-2,04%	-11,933	-2,42%
8	46,807	2,08%	-12,229	2,48%
9	46,229	-1,23%	-12,05	-1,46%
10	46,807	1,25%	-12,229	1,49%

Fonte: Autor

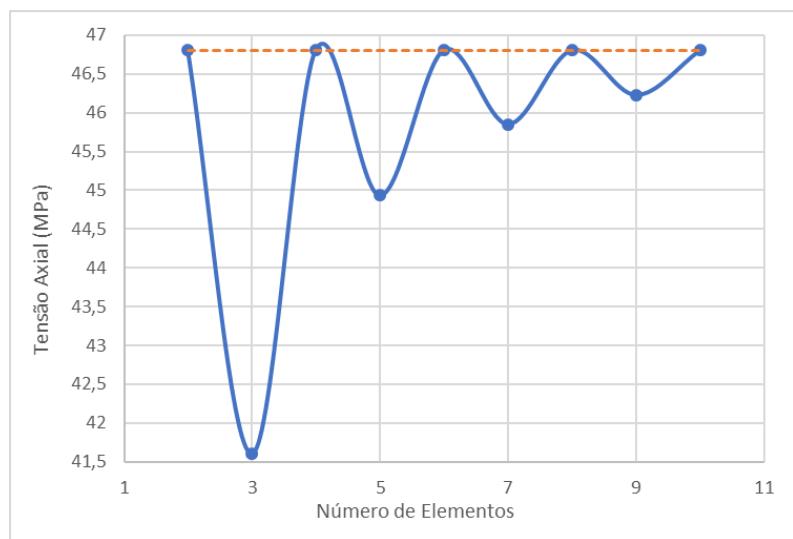


Figura 62 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para a VR2.
Fonte: Autor

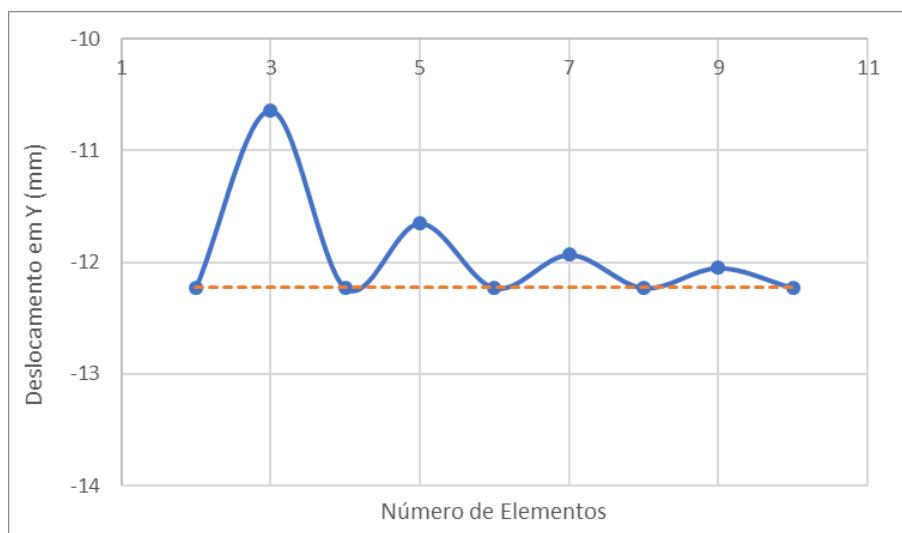


Figura 63 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número elementos para a VR2.
Fonte: Autor

Para a viga transversal, a última malha gerado também contém 10 elementos, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 64, para a tensão axial da viga, e na Figura 65, para o deslocamento na direção do esforço aplicado.

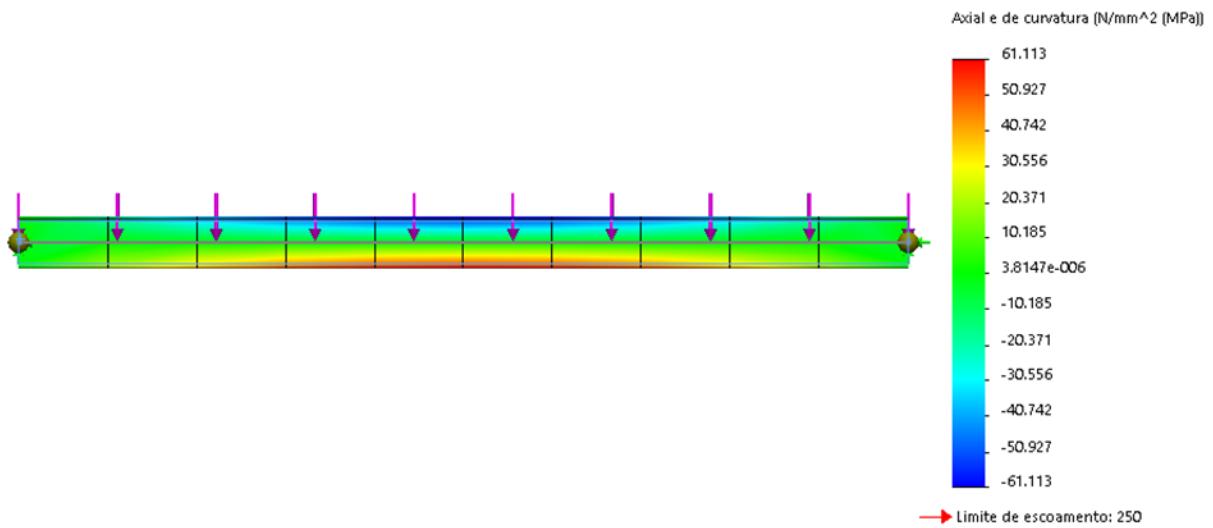


Figura 64 - Resultado de tensão para a VT com 10 elementos.
Fonte: Autor

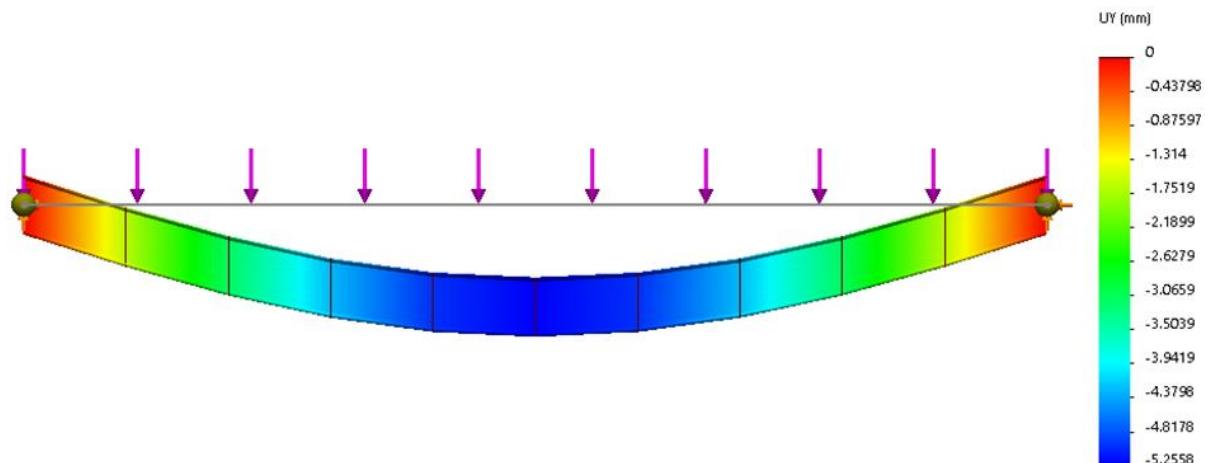


Figura 65 - Resultado do deslocamento em Y para VT com 10 elementos.
Fonte: Autor

Os resultados obtidos para todas as malhas podem ser vistos na Tabela 24, e o gráfico de convergência de malha para tensão, na Figura 66, e para o deslocamento, na Figura 67.

Tabela 24: Resultados do estudo de convergência para viga transversal.

Número de elementos	Tensão Axial (MPa)	Diferença relativa	Deslocamento em Y (mm)	Diferença relativa

2	61,113	-	-5,2558	-
3	54,32	-11,12%	-4,5722	-13,01%
4	61,113	12,51%	-5,2558	14,95%
5	58,668	-4,00%	-5,0068	-4,74%
6	61,113	4,17%	-5,2558	4,97%
7	59,865	-2,04%	-5,1284	-2,42%
8	61,113	2,08%	-5,2558	2,48%
9	60,358	-1,24%	-5,1786	-1,47%
10	61,113	1,25%	-5,2558	1,49%

Fonte: Autor

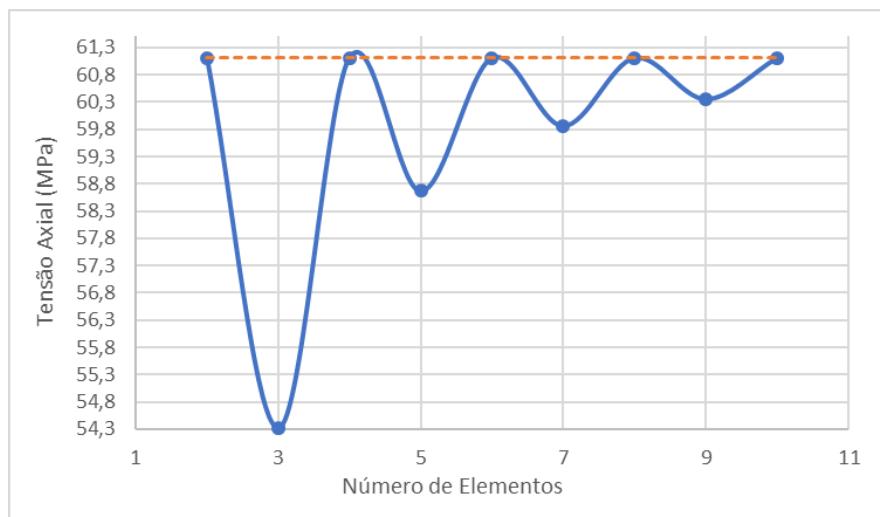


Figura 66 - Gráfico tensão axial versus número de elementos para VT.
Fonte: Autor

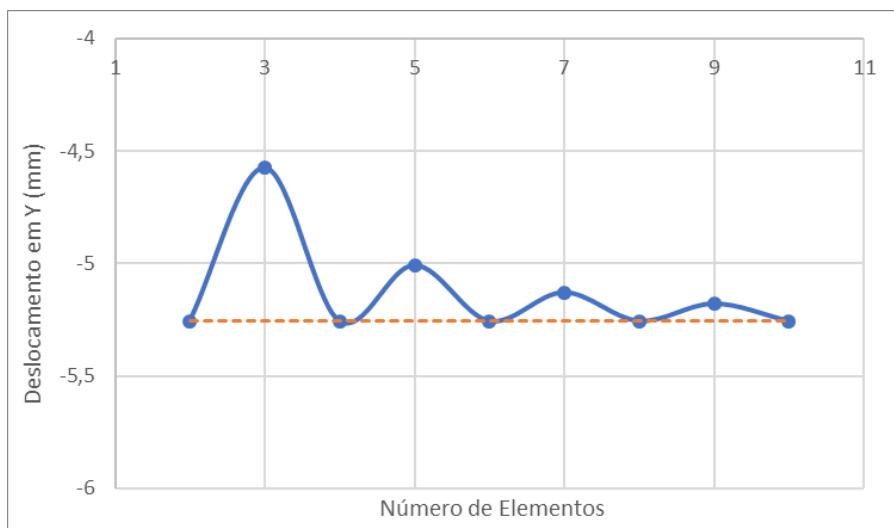


Figura 67 - Gráfico deslocamento na direção Y versus número de elementos para VT.
Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que as vigas que compõem a estrutura de sustentação não irão falhar devido ao esforço aplicado ao longo do seu comprimento, uma vez que o maior valor de tensão axial para cada caso, obtida pelo FEM, não ultrapassou o limite de escoamento do material (ver Tabela 20).

As simulações convergiram variando ao longo da solução exata para a tensão axial e para o deslocamento em Y. Apesar da diferença relativa entre duas análises em sequência não ter chegado a 0%, os três casos mostram uma tendência de convergir para os valores de tensão axial e deslocamento em Y obtidos com apenas dois elementos.

Assim, conclui-se que para as vigas de outras estruturas que se deseja analisar, uma simulação com apenas dois elementos será suficiente.

4.2.2 Análise das colunas

Para que a análise de cada uma das colunas fosse feita, primeiramente, foi necessário fazer a modelagem 3D de cada perfil estrutural escolhido para elas. As dimensões, do tubo escolhido para a coluna intermediária, podem ser vistas na Figura 68, e para a coluna central na Figura 69.

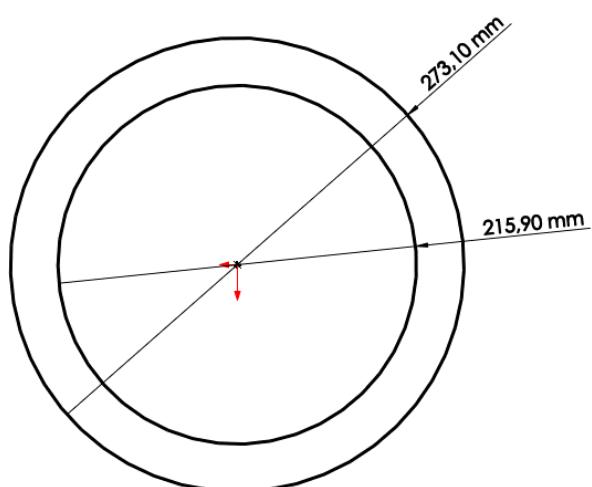


Figura 68 - Coluna intermediária, DN 10” Sch 160.
Fonte: Autor

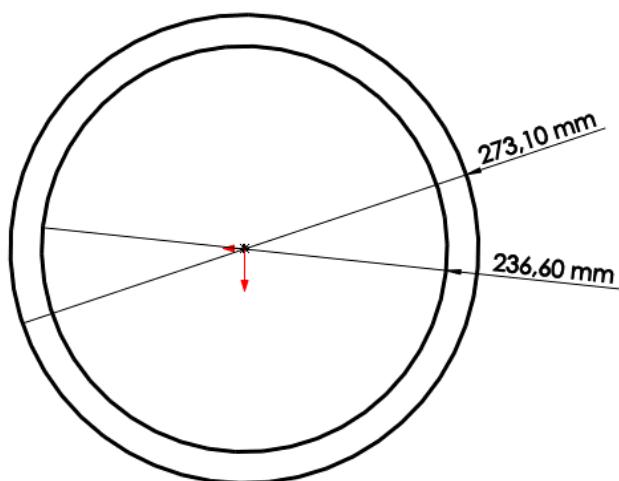


Figura 69 - Coluna central, DN 10” Sch 100.
Fonte: Autor

Diferentemente do que se fez para as vigas, analisou-se as colunas através de uma análise de flambagem, também no *software Solidworks 2016*. Devido a simplicidade da geometria, adotou-se elementos do tipo viga para a simulação pelo Método dos Elementos Finitos. Como condição de contorno, utilizou-se geometria fixa na extremidade inferior das colunas (engastamento na base).

Em cada análise, aplicou-se no nó superior das colunas o parâmetro de força do *software*, que quando aplicado apenas no nó do elemento caracteriza-se como uma força concentrada. Os valores das forças foram obtidos a partir do item 2.10.2.2, e estão discriminados, por tipo de coluna, na Tabela 25.

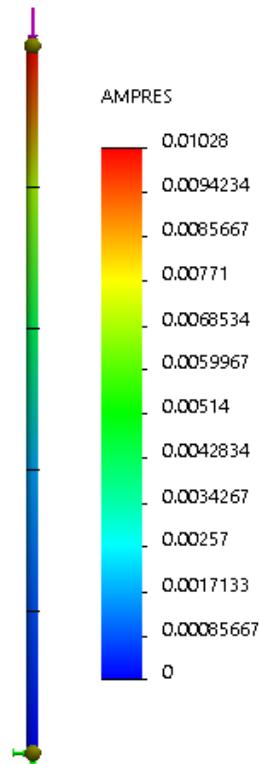
Tabela 25: Esforços sobre as colunas.

Tipo de coluna	Força concentrada (kgf)
Coluna intermediária	12.107,73
Coluna central	9.445,95

Fonte: Autor

As simulações, para cada coluna, consistiram em análises de convergência de malha, nas quais foram realizadas 6 simulações, cada uma com um número maior de elementos tipo viga, até que os resultados convergissem.

Para a coluna intermediária, a última malha gerado contém 6 elementos, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 70, para a amplitude resultante (em radianos). Também é possível observar a restrição aplicada no nó inferior e o esforço no nó superior. O fator de segurança da flambagem, calculado pelo *Solidwors 2016*, foi de 2,885.

**Figura 70 - Resultado da amplitude resultante (radianos) para a coluna intermediária com 6 elementos.****Fonte: Autor**

Os resultados obtidos para todas as malhas podem ser vistos na Tabela 26, e o gráfico de convergência de malha para a amplitude resultante, na Figura 71, e para o fator de segurança da flambagem, na Figura 72.

Tabela 26: Resultados do estudo de convergência para coluna intermediária.

Número de elementos	Amplitude resultante (rad)	Amplitude resultante (grau)	Diferença relativa	Fator de Segurança	Diferença relativa
1	0,010363	0,59376	-	2,9068	-
2	0,010285	0,58929	-0,75%	2,8865	-0,70%
3	0,010281	0,58906	-0,04%	2,8853	-0,04%
4	0,01028	0,589	-0,01%	2,8851	-0,01%
5	0,01028	0,589	0,00%	2,885	0,00%
6	0,01028	0,589	0,00%	2,885	0,00%

Fonte: Autor

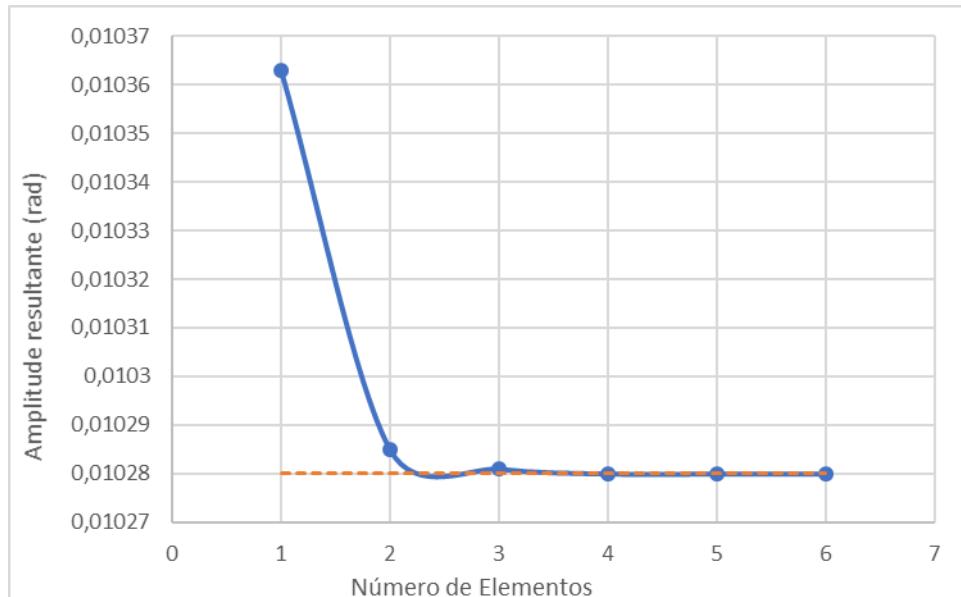


Figura 71 - Gráfico amplitude resultante versus número de elementos para a coluna intermediária.

Fonte: Autor

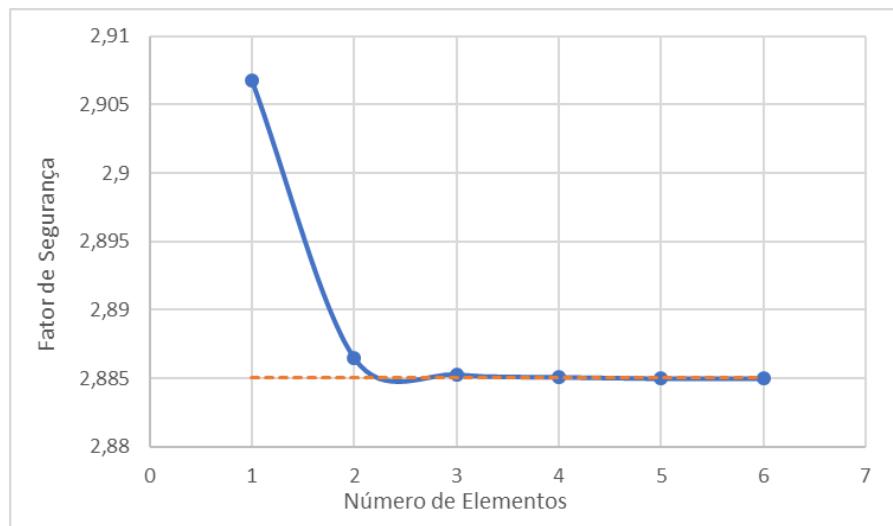


Figura 72 - Gráfico fator de segurança da flambagem versus número de elementos para a coluna intermediária.

Fonte: Autor

Para a coluna central, a última malha gerada contém 6 elementos, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 73, para a amplitude resultante (em radianos). O fator de segurança da flambagem, calculado pelo *Solidwors 2016*, foi de 2,4526.

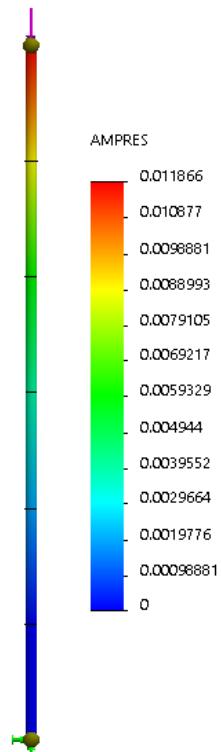


Figura 73 - Resultado da amplitude resultante (radianos) para a coluna central com 6 elementos.

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para todas as malhas podem ser vistos na Tabela 27, e o gráfico de convergência de malha para a amplitude resultante, na Figura 74, e para o fator de segurança da flambagem, na Figura 75.

Tabela 27: Resultados do estudo de convergência para coluna central.

Número de elementos	Amplitude resultante (rad)	Amplitude resultante (grau)	Diferença relativa	Fator de Segurança	Diferença relativa
1	0,011961	0,68532	-	2,4711	-
2	0,011872	0,68022	-0,74%	2,4538	-0,70%
3	0,011867	0,67993	-0,04%	2,4528	-0,04%
4	0,011866	0,67987	-0,01%	2,4527	0,00%
5	0,011866	0,67987	0,00%	2,4526	0,00%
6	0,011866	0,67987	0,00%	2,4526	0,00%

Fonte: Autor

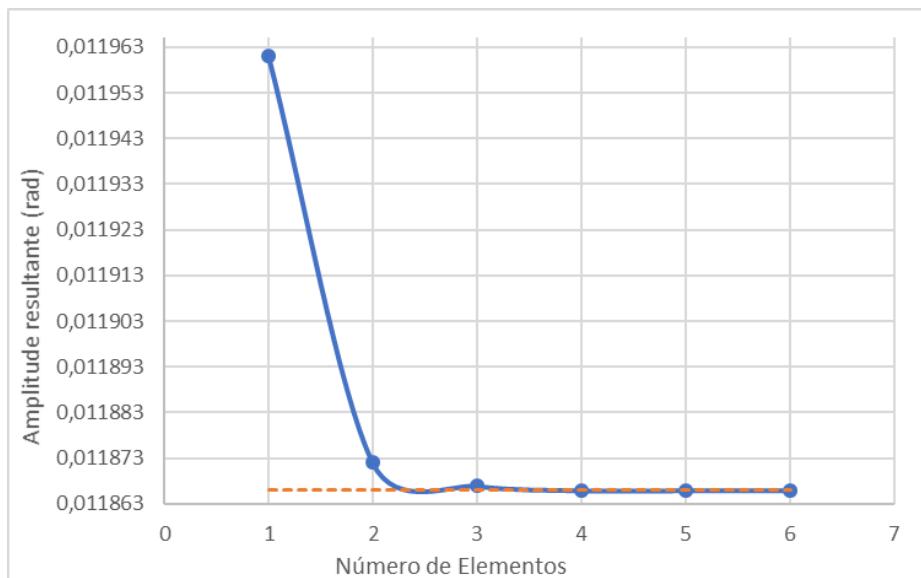


Figura 74 - Gráfico amplitude resultante versus número de elementos para a coluna central.

Fonte: Autor

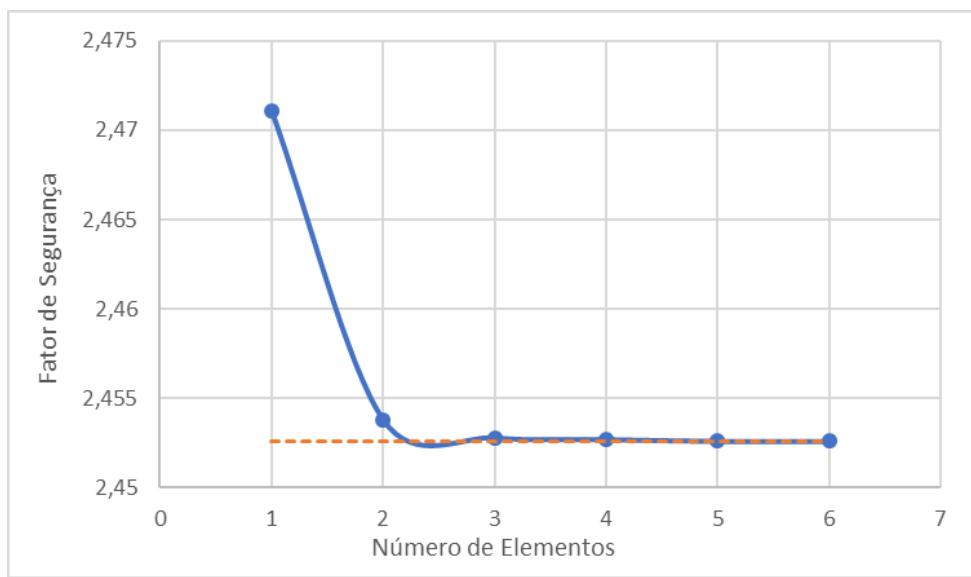


Figura 75 - Gráfico fator de segurança da flambagem versus número de elementos para a coluna central.
Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que as colunas que compõem a estrutura de sustentação não irão falhar devido ao esforço concentrado no topo delas, uma vez que o valor do fator de segurança da flambagem, obtida pelo FEM, foi bem maior do que 1.

As simulações convergiram de maneira assintótica para todas as grandezas medidas, e o resultado final demonstrou que não é necessário um refino excessivo da malha. Isso decorre da diferença relativa entre a primeira e a segunda análise ser menor que 1%, chegando a 0% com apenas 5 estudos realizados, para ambas grandezas medidas.

Assim, conclui-se que para as colunas de outras estruturas que se deseja analisar, uma simulação com apenas cinco elementos será suficiente.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O dimensionamento de tanques de armazenamento atmosféricos tem sido uma das tarefas mais exigentes dentro do projeto de novas áreas de armazenamento, devido ao seu elevado nível de detalhamento. Isso se torna cada vez mais frequente, diante de investimentos bilionários em novas unidades operacionais e refinarias, em consequência do crescimento de 4,2% na produção brasileira de petróleo em 2017, segundo dados da ANP (2018).

Assim, o aumento na demanda faz com que o projeto básico de tanques – projeto convencional (segundo normas nacionais e internacionais) e material de fabricação nacional –, que são construídos em uma vasta faixa de capacidades, desde 16 m³ até aproximadamente 95.400 m³, necessite atender de forma rápida e eficiente a demanda existente.

Dessa forma, o *software* de código aberto desenvolvido neste trabalho vem somar ao leque de ferramentas de dimensionamento de tanques atmosféricos, cilíndricos, verticais, não enterrados, soldados, de teto fixo cônicos, projetados segundo as normas API 650 e N-270, focado no atendimento à demanda de um programa de baixo custo que facilite pesquisas nas universidades sobre esses tanques.

Por isso, o Programa Tanque de Armazenamento (PTA) foi desenvolvido em *Visual Basic for Applications* (VBA), de maneira a permitir que o maior número de pessoas tenha acesso a ele, já que Excel é um programa bastante comum e popular.

Com o programa desenvolvido, parte-se para o objetivo secundário que foi o desenvolvimento de uma modelagem apropriada para analisar, através do Método de Elementos Finitos, o tanque de armazenamento atmosférico, TQ-01, projetados pelo PTA. Essa análise servirá para a validação do *software* desenvolvido.

A partir dos resultados obtidos nas análises, conclui-se que tanto a estrutura de sustentação, quanto o dimensionamento das chapas do costado, alcançaram o objetivo de não falhar, validando, dessa maneira, o Programa Tanque de Armazenamento desenvolvido neste trabalho, que era o objetivo principal desse.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal com a criação do Programa Tanque de Armazenamento (PTA) foi desenvolver um programa em código aberto que pudesse sofrer alterações e adaptações de

acordo com a necessidade de futuros usuários, e, assim, evitar que estudantes e pesquisadores, em universidades, tenham de começar um código do zero para realizar o projeto básico de tanques de armazenamento de teto fixo.

Assim, tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, para tornar o PTA o mais completo possível para a realização de projetos básicos de tanques de armazenamento de teto fixo, recomenda-se:

- Desenvolvimento de um módulo para verificação quanto a necessidade de ancoragem do tanque, conforme estipulado pela N-270 (2014);
- Desenvolvimento de um módulo para a determinação da quantidade e o dimensionamento de acessórios de tanques de armazenamento, como bocais e bocas de visita;
- Desenvolvimento de um módulo para realizar análises de elementos finitos nas vigas e colunas, da estrutura de sustentação, no próprio programa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: Agência Brasileira De Normas Técnicas, setembro 2010. NBR 6122.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: Agência Brasileira De Normas Técnicas, abril 1983. NBR 7821.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Welded tanks for oil storage*. 12 ed. Washington: American Petroleum Institute, março 2013. Adendo 2, jan. 2016. API STD 650.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2018*. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

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

BP ENERGY OUTLOOK 2018. 8., 2018. Disponível em: <bp.com/energyoutlook>. Acesso em: 13 out. 2018.

BRASIL. Lei nº 13.263/2016, de 23 de março de 2016. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília. DF, n. 57, p. 1, 24 março 2016. Seção 1.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *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*. London: British Standards Institution, nov. 2004. Retificação 1, fev. 2005. BSI BS EN 14015.

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

CARDOSO, Luiz Cláudio dos Santos. *Logística do petróleo: transporte e armazenamento*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

CLARKE, James S. *New rules prevent tank failures*. Houston: Hydrocarbon Processing p. 92-94, maio 1971.

DALE, Spencer; FATTOUH, Bassam. *Peak oil demand and long-run oil price*. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/bp-peak-oil-demand-and-long-run-oil-prices.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2018.

GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

PETROBRAS. ENGENHARIA. CONTEC. *Projeto de tanque de armazenamento atmosférico*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. ENGENHARIA. NORTEC, maio 2014. N-270f.

PETROBRAS. ENGENHARIA. CONTEC. *Montagem de Tanque de Armazenamento*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. ENGENHARIA. NORTEC, abril 2014. N-271b.

PETROBRAS. ENGENHARIA. CONTEC. *Medição de Recalque de Fundações no Teste Hidrostático de Equipamentos*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. ENGENHARIA. NORTEC, julho 2015. N-1807e.

PETROBRAS. ENGENHARIA. CONTEC. *Tratamento de Superfície de Base de Tanque*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. ENGENHARIA. NORTEC, abril 2013. N-1822c.

PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. *Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – Gasolina A*. Rio de Janeiro: Petrobras, 22 maio 2013.

NOVAES, Antonio Galvão. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

7 APÊNDICES

7.1 APÊNDICE 1

7.1.1 Código para o projeto do costado

Option Explicit

Sub Projeto_Costado()

Dim ii As Integer, jj As Integer, numaneis As Integer, uL As Integer, cont As Integer, linhaA As Integer, linhain As Integer

Dim Hmax As Single, h As Single, D As Single, G As Single, E As Single, CA As Single, tmin As Single, tn As Single

Dim Tabela As Range

Application.ScreenUpdating = False

G = shtDados.Cells(4, 2)

D = shtDados.Cells(5, 2)

Hmax = shtDados.Cells(6, 2)

numaneis = shtDados.Cells(7, 2)

E = 0.85

G = WorksheetFunction.Max(G, 1)

Select Case D

Case Is < 15

 tmin = 4.75

Case Is < 36

 tmin = 6.3

Case Is < 60

 tmin = 8

Case Is > 60

 tmin = 9.5

End Select

```

linhaA = 16
linhain = 11
cont = 0
h = Hmax

```

```

uL = shtOutputCostadoA.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 2
shtOutputCostadoA.Range("B" & linhaA + 1 & ":H" & uL).Clear

```

For ii = 1 To numaneis

```

uL = shtOutputCostadoA.Cells(Rows.Count, 6).End(xlUp).Row + 1
CA = shtInputCostado.Cells(linhain + ii, 5)
tn = (4.9 * D * (h - 0.3) * G) / (145 * E) + CA
shtOutputCostadoA.Cells(uL, 6) = tn
shtOutputCostadoA.Cells(uL, 6).NumberFormat = "0.00"
If tn > tmin Then
    shtOutputCostadoA.Cells(uL, 7) = tn
Else
    shtOutputCostadoA.Cells(uL, 7) = tmin
End If
shtOutputCostadoA.Cells(uL, 7).NumberFormat = "0.00"
h = Hmax - ii * shtInputCostado.Cells(linhain + ii, 3)
If shtOutputCostadoA.Cells(uL, 6) > 13 Then
    shtOutputCostadoA.Range("F" & linhaA + 1 & ":G" & uL).ClearContents
    Call MetodoPontoVariavel(tmin)
    Exit For
End If
cont = cont + 1

```

Next ii

If cont = numaneis Then

```

shtOutputCostadoA.Visible = True
shtOutputCostadoA.Activate

shtOutputCostadoA.Cells(8, 5) = G
shtOutputCostadoA.Cells(11, 5) = (3.14159265358979 * Hmax * D ^ 2) / 4
shtOutputCostadoA.Cells(12, 5) = E

uL = shtInputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
shtInputCostado.Range("B" & linhain + 1 & ":E" & uL).Copy
shtOutputCostadoA.Range("B" & linhaA + 1).PasteSpecial xlValues
Application.CutCopyMode = False

'Determinação da espessura comercial
uL = shtOutputCostadoA.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
For ii = linhaA + 1 To uL
    For jj = 3 To 46
        If     shtOutputCostadoA.Cells(ii,      7)      >      shtBanco.Cells(jj,      "R")      And
shtOutputCostadoA.Cells(ii, 7) <= shtBanco.Cells(jj + 1, "R") Then
            shtOutputCostadoA.Cells(ii, 8) = shtBanco.Cells(jj + 1, "R")
        End If
    Next jj
Next ii

uL = shtOutputCostadoA.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
Set Tabela = shtOutputCostadoA.Range("B" & linhaA + 1 & ":H" & uL)
Call FormatarTabela(Tabela)

shtOutputCostadoA.Cells(1, 1).Select

shtDados.Range("E1") = 0

End If

```

End Sub

Sub MetodoPontoVariavel(tmin As Single)

Dim ii As Integer, jj As Integer, kk As Integer, cont As Integer, uL As Integer, linhapv As Integer, linhain As Integer

Dim Hmax As Single, h As Single, D As Single, G As Single, CA As Single, numaneis As Integer, S As Integer

Dim t1 As Single, t2a As Single, tu As Single, tL As Single, tx As Single

Dim H1 As Single, r As Single, L As Single, relacao As Single, tol As Single, erro As Single

Dim K As Single, C As Single, x1 As Single, x2 As Single, x3 As Single, x As Single

Dim Tabela As Range

shtOutputCostado.Visible = True

shtOutputCostado.Activate

G = shtDados.Cells(4, 2)

D = shtDados.Cells(5, 2)

r = (D / 2) * 10 ^ 3

Hmax = shtDados.Cells(6, 2)

numaneis = shtDados.Cells(7, 2)

linhain = 11

linhapv = 15

tol = 0.01

uL = shtOutputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 2

shtOutputCostado.Range("B" & linhapv + 1 & ":I" & uL).Clear

'Para condição de projeto e teste hidrostático

For kk = 1 To 2

h = Hmax

For ii = 1 To numaneis

```

uL = shtBanco.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
For jj = 2 To uL
    If shtBanco.Cells(jj, 1) = shtInputCostado.Cells(ii + linhain, 4) Then
        S = shtBanco.Cells(jj, kk + 4)
        Exit For
    End If
Next jj
If kk = 1 Then
    CA = shtInputCostado.Cells(ii + linhain, 5)
Else
    CA = 0
End If
'Cálculo da espessura do primeiro anel
If ii = 1 Then
    tx = (1.06 - ((0.0696 * D) / h) * Sqr((h * G) / S)) * ((4.9 * h * D * G) / S) + CA
    t1 = tx - CA
    L = Sqr((500 * D * t1))
    If (L / Hmax) > (1000 / 6) Then
        MsgBox "O método do ponto variável de projeto não pode ser usado, já que a proporção de 5.6.4.1 da API 650 (2016) não é satisfeita. "
    End If
End If
'Método dos anéis superiores
'Cálculo das espessuras dos anéis superiores, além do t2a
If ii <> 1 Then
    tu = (4.9 * D * (h - 0.3) * G) / S
    Do
        K = tL / tu
        C = (Sqr(K) * (K - 1)) / (1 + K ^ (1.5))
        x1 = 0.61 * (Sqr(r * tu)) + 320 * C * h
        x2 = 1000 * C * h
        x3 = 1.22 * Sqr(r * tu)
        x = WorksheetFunction.Min(x1, x2, x3)
    Loop Until x = tL
End If

```

```

tx = (4.9 * D * (h - (x / 1000)) * G) / S
erro = Abs(tu - tx)
tu = tx
Loop While erro > tol
tx = tx + CA
End If
'Cálculo da espessura do segundo anel
If ii = 2 Then
    H1 = shtInputCostado.Cells(linhain + 1, 3) * 10 ^ 3
    relacao = H1 / (Sqr(r * t1))
    t2a = tx - CA
    Select Case relacao
        Case Is <= 1.375
            tx = t1 + CA
        Case Is >= 2.625
            tx = t2a + CA
        Case Else
            tx = t2a + (t1 - t2a) * (2.1 - (relacao / 1.25)) + CA
    End Select
End If
shtOutputCostado.Cells(linhapv + ii, 5 + kk) = tx
shtOutputCostado.Cells(linhapv + ii, 5 + kk).NumberFormat = "0.00"
tL = tx - CA
h = Hmax - ii * shtInputCostado.Cells(linhain + ii, 3)
Next ii
G = 1
Next kk

uL = shtInputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
shtInputCostado.Range("B" & linhain + 1 & ":E" & uL).Copy
shtOutputCostado.Range("B" & linhapv + 1).PasteSpecial xlValues
Application.CutCopyMode = False

```

```

'Determinação da espessura requerida
uL = shtOutputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
For ii = linhapv + 1 To uL
    If      shtOutputCostado.Cells(ii,      6)      >      shtOutputCostado.Cells(ii,      7)      And
shtOutputCostado.Cells(ii, 6) > tmin Then
        shtOutputCostado.Cells(ii, 8) = shtOutputCostado.Cells(ii, 6)
    ElseIf    shtOutputCostado.Cells(ii,      7)      >      shtOutputCostado.Cells(ii,      6)      And
shtOutputCostado.Cells(ii, 7) > tmin Then
        shtOutputCostado.Cells(ii, 8) = shtOutputCostado.Cells(ii, 7)
    ElseIf shtOutputCostado.Cells(ii, 6) < tmin And shtOutputCostado.Cells(ii, 7) < tmin Then
        shtOutputCostado.Cells(ii, 8) = tmin
    End If
    shtOutputCostado.Cells(ii, 8).NumberFormat = "0.00"
Next ii

'Determinação da espessura comercial
uL = shtOutputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
For ii = linhapv + 1 To uL
    For jj = 3 To 46
        If shtOutputCostado.Cells(ii, 8) > shtBanco.Cells(jj, "R") And shtOutputCostado.Cells(ii,
8) <= shtBanco.Cells(jj + 1, "R") Then
            shtOutputCostado.Cells(ii, 9) = shtBanco.Cells(jj + 1, "R")
        End If
    Next jj
Next ii

Set Tabela = shtOutputCostado.Range("B" & linhapv + 1 & ":I" & uL)
Call FormatarTabela(Tabela)
shtOutputCostado.Cells(11, 5) = (3.14159265358979 * Hmax * D ^ 2) / 4
shtOutputCostado.Cells(1, 1).Select
shtDados.Range("E1") = 1

End Sub

```

7.1.2 Código para o projeto do teto

Option Explicit

Sub Projeto_Teto()

Dim DL As Single, Lr As Integer, Pe As Single, Q As Single, Q1 As Single, Gmat As Integer,
Fyr As Long, aux As Single, ang As Single, pi As Single

Dim b As Single, N As Integer, L As Single, perfil As String, Wreq As Single, Wadot As Single,
ppestr As Single, area As Single

Dim tn As Single, CA As Single, numcircvugas As Integer, D As Single, Hmax As Single, qv
As Single, M As Single, I As Single

Dim ii As Integer, jj As Integer, kk As Integer, uL As Integer, uL2 As Integer, linhatetosup As
Integer, deubom As Boolean

Dim S As Single, Sc As Single, E As Single, cont As Integer, quociente As Single, declteto As
Integer, declfundo As Integer

Dim lambda As Single, r As Single, FS As Single, ttub As Single, Rtub As Single, y As Single,
tensao As Single

Dim vetVT() As Integer, vetN() As Integer, vetR() As Single, vetP() As Single, vetPVT() As
Single, Tabela As Range

Application.ScreenUpdating = False

linhatetosup = 15

Hmax = shtDados.Cells(6, 2)

D = shtDados.Cells(5, 2)

numcircvugas = shtDados.Cells(20, 2)

pi = 3.14159265358979

Gmat = 7850 'Densidade do material em kgf/m³

DL = tn * (10 ^ (-3)) * Gmat

Lr = 100

Pe = 25

```

Q = DL + Lr + 0.4 * Pe
Q1 = DL + 0.4 * Lr + Pe
Q = WorksheetFunction.Max(Q, Q1)

```

Select Case shtDados.Range("B17")

Case Is = "ASTM A1011M Gr. 33"

Fyr = 33400

Case Is = "ASTM A283M Gr. C"

Fyr = 30000

Case Is = "ASTM A36M"

Fyr = 36000

End Select

If shtDados.Cells(15, 2) = "" Then

declteto = InputBox("Entrar com o valor da declividade do teto?")

End If

If shtDados.Cells(9, 2) = "" Then

declfundo = InputBox("Entrar com o valor da declividade do fundo?")

End If

If shtDados.Range("B14") = "Teto Fixo Cônico Suportado" Then

shtTetoSup.Visible = True

shtTetoSup.Activate

uL = shtTetoSup.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1

shtTetoSup.Range("B" & linhatetosup + 1 & ":G" & uL).Clear

If shtDados.Range("B16") = 0 Then

tn = 4.75

Else

tn = 5 + shtDados.Range("B16")

End If

shtTetoSup.Range("E13") = tn

'Propriedades do material dos perfis estruturais

If shtDados.Range("B19") = "ASTM A36M" Then

S = 1540

Sc = 910

E = 2100000

Else

S = shtDados.Range("B23")

Sc = shtDados.Range("B24")

E = shtDados.Range("B25")

End If

b = (tn - CA) * Sqr((1.5 * Fyr) / (Q * 0.00142233))

b = WorksheetFunction.Min(b, 2100)

b = b * 10 ^ (-3)

'Armazena o posicionamento das colunas

ReDim vetR(numcircvugas + 1)

For ii = 1 To numcircvugas + 1

vetR(ii) = shtInputCostado.Cells(11 + ii, "H")

Next ii

'Armazena o número de vigas transversais (não usar vetVT(numcircvugas))

ReDim vetVT(numcircvugas)

'Armazena o número de vigas radiais

ReDim vetN(numcircvugas)

'Determinação do número de vigas radiais e transversais

For ii = 1 To numcircvugas

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, 2) = "Vigas Radiais " & ii

N = pi * 2 * vetR(ii) / b

'Número mínimo de lados do polígono formado pelas vigas transversais

cont = 8

```

quociente = N / cont
Do While quociente >= 10
    cont = cont + 1
    quociente = N / cont
Loop
N = WorksheetFunction.RoundUp(quociente, 0) * cont
shtTetoSup.Cells(linhaltetosup + ii, 3) = N
vetVT(ii) = cont
vetN(ii) = N
If ii <> 1 Then
    If (vetN(ii) Mod vetVT(ii - 1) <> 0) Then
        cont = vetVT(ii - 1) + 1
        Do While (vetN(ii) Mod cont <> 0) Or (vetN(ii - 1) Mod cont <> 0)
            cont = cont + 1
            If cont = vetN(ii) Then
                vetN(ii) = vetN(ii) + 1
                cont = vetVT(ii - 1)
                Do While vetN(ii) Mod cont <> 0
                    vetN(ii) = vetN(ii) + 1
                Loop
                shtTetoSup.Cells(linhaltetosup + ii, 3) = vetN(ii)
            End If
            Loop
            vetVT(ii - 1) = cont
        End If
    End If
    b = 1.7
Next ii

```

```

'Armazena o peso de cada viga radial (kgf)
ReDim vetP(numcircvugas)
'Dimensionar vigas radiais
perfil = shtDados.Range("B21")

```

For ii = 1 To numcircvugas

L = WorksheetFunction.RoundUp(vetR(ii) - vetR(ii + 1), 1)

qv = (Q * pi * (vetR(ii) ^ 2 - vetR(ii + 1) ^ 2)) / (vetN(ii) * L)

ppestr = 0

For kk = 1 To 2

qv = qv + ppestr

M = qv * L ^ 2 / 8

Wreq = 100 * M / S

If kk = 1 Or Wreq > Wadot Then

uL = Sheets(perfil).Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row

For jj = 3 To uL

If Sheets(perfil).Cells(jj, "E") > Wreq And Sheets(perfil).Cells(jj, "J") > (6.35 +

shtDados.Cells(18, 2)) Then

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, "F") = Sheets(perfil).Cells(jj, 1)

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, "G") = Sheets(perfil).Cells(jj, "E") & " cm³"

Wadot = Sheets(perfil).Cells(jj, "E")

ppestr = Sheets(perfil).Cells(jj, "B")

area = Sheets(perfil).Cells(jj, "C")

I = Sheets(perfil).Cells(jj, "D")

Exit For

End If

Next jj

End If

Next kk

'Verificação quanto ao cisalhamento

aux = (qv * L / 2) / area

If aux > Sc Then

MsgBox "Deu merda"

End If

'Verificação quanto à flecha

aux = (5 * qv * L ^ 4) / (384 * E * I)

If aux > L / 200 Then

MsgBox "Deu merda"

End If

vetP(ii) = L * qv

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, 4) = L

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, 5) = shtDados.Range("B19")

shtTetoSup.Cells(linhatetosup + ii, 8) = shtDados.Range("B18")

Next ii

'Armazena a carga atuante na viga transversal (kgf)

ReDim vetPVT(numcircvgas - 1)

'Dimensionar vigas transversais

perfil = shtDados.Range("B22")

uL = shtTetoSup.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row

For ii = 1 To numcircvgas - 1

shtTetoSup.Cells(uL + ii, 2) = "Vigas Transversais " & ii

shtTetoSup.Cells(uL + ii, 3) = vetVT(ii)

ang = 360 / vetVT(ii) * pi / 180

L = Sqr(2 * (shtInputCostado.Cells(12 + ii, "H") ^ 2) - 2 * (shtInputCostado.Cells(12 + ii, "H") ^ 2) * Cos(ang))

qv = (vetP(ii + 1) * vetN(ii + 1) / vetVT(ii) / 2 + vetP(ii) * vetN(ii) / vetVT(ii) / 2) / L

ppestr = 0

For kk = 1 To 2

qv = qv + ppestr

M = qv * L ^ 2 / 8

Wreq = 100 * M / S

If kk = 1 Or Wreq > Wadot Then

uL2 = Sheets(perfil).Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row

For jj = 3 To uL2

If Sheets(perfil).Cells(jj, "E") > Wreq And Sheets(perfil).Cells(jj, "J") > (6.35 + shtDados.Cells(18, 2)) Then

shtTetoSup.Cells(uL + ii, "F") = Sheets(perfil).Cells(jj, 1)

shtTetoSup.Cells(uL + ii, "G") = Sheets(perfil).Cells(jj, "E") & " cm³"

Wadot = Sheets(perfil).Cells(jj, "E")

ppestr = Sheets(perfil).Cells(jj, "B")

```

area = Sheets(perfil).Cells(jj, "C")
I = Sheets(perfil).Cells(jj, "D")
Exit For
End If
Next jj
End If
Next kk
vetPVT(ii) = 2 * qv * L
'Verificação quanto ao cisalhamento
aux = (qv * L / 2) / area
If aux > Sc Then
    MsgBox "Deu merda"
End If
'Verificação quanto à flecha
aux = (5 * qv * L ^ 4) / (384 * E * I)
If aux > L / 200 Then
    MsgBox "Deu merda"
End If
shtTetoSup.Cells(uL + ii, 4) = L
shtTetoSup.Cells(uL + ii, 5) = shtDados.Range("B19")
shtTetoSup.Cells(uL + ii, 8) = shtDados.Range("B18")
Next ii

'Dimensionar colunas
perfil = shtDados.Range("B23")
uL = shtTetoSup.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
For ii = 1 To numcirevugas
    If ii <> numcirevugas Then
        shtTetoSup.Cells(uL + ii, 2) = "Colunas Intermediárias " & ii
        shtTetoSup.Cells(uL + ii, 3) = vetVT(ii)
    Else
        shtTetoSup.Cells(uL + ii, 2) = "Colunas Central"
        shtTetoSup.Cells(uL + ii, 3) = 1
    End If
Next ii

```

```

End If

declteto = Right(shtDados.Cells(15, 2), InStr(1, shtDados.Cells(15, 2), ":", 1))
If shtDados.Range("B8") = "Fundo Cônico com declividade para o centro" Then
    declfundoo = Right(shtDados.Cells(9, 2), InStr(1, shtDados.Cells(9, 2), ":", 1))
    declfundoo = (-1) * declfundoo
ElseIf shtDados.Range("B8") = "Fundo Cônico com declividade para a periferia" Then
    declfundoo = Right(shtDados.Cells(9, 2), InStr(1, shtDados.Cells(9, 2), ":", 1))
ElseIf shtDados.Range("B8") = "Fundo Plano" Then
    L = Hmax + (vetR(ii) - vetR(ii + 1)) / declteto
End If

'Comprimento das colunas
L = Hmax + (vetR(1) - vetR(ii + 1)) / declteto - (vetR(1) - vetR(ii + 1)) / declfundoo
shtTetoSup.Cells(uL + ii, 4) = L
L = L * 10 ^ 3

'Raio de giração mínimo
r = L / 180
jj = 3

uL2 = Sheets(perfil).Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
'Loop até que encontre o perfil que não flambe
deubom = False
Do While deubom = False
    For jj = jj To uL2
        If Sheets(perfil).Cells(jj, "C") > r Then
            lambda = L / Sheets(perfil).Cells(jj, "C")
            shtTetoSup.Cells(uL + ii, "F") = Sheets(perfil).Cells(jj, 1)
            If perfil = "Perfil Tubular" Then
                ttub = Sheets(perfil).Cells(jj, "F")
                Rtub = Sheets(perfil).Cells(jj, "E") / 2
                area = Sheets(perfil).Cells(jj, "D")
            End If
        Exit For
    End If
Next jj

```

```

'Cálculo do fator de segurança
FS = 5 / 3 + lambda / 350 + (lambda ^ 3) / 18300000
Select Case perfil
Case Is = "Perfil Tubular"
    If ttub / Rtub >= 0.015 Then
        y = 1
    Else
        y = (200 / 3) * (ttub / Rtub) * (2 - (200 / 3) * (ttub / Rtub))
    End If
Case Is = "Perfil Duplo U"
    y = 1
End Select
'Calculo da tensão máxima admissível (psi)
Select Case lambda
Case Is <= 120
    aux = (1 - (lambda ^ 2) / 34700) * (33000 * y / FS)
Case Is > 131.7
    aux = 149000000 * y / ((lambda ^ 2) * (1.6 - lambda / 200))
Case Else
    aux = (1 - (lambda ^ 2) / 34700) * (33000 * y / FS) / (1.6 - lambda / 200)
End Select
If ii <> numcircvugas Then
    tensao = (vetPVT(ii) / area) * 2.20462 'Transformar de kgf/in2 para psi
Else
    tensao = (vetN(numcircvugas) * vetP(numcircvugas) / 2) / area * 2.20462
End If
'Verificação quanto a flambagem
If tensao < aux Then
    deubom = True
    shtTetoSup.Cells(uL + ii, "G") = Sheets(perfil).Cells(jj, "C") & " mm"
End If
Loop
shtTetoSup.Cells(uL + ii, 5) = shtDados.Range("B19")

```

shtTetoSup.Cells(uL + ii, 8) = shtDados.Range("B18")

Next ii

uL = shtTetoSup.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row

For ii = linhatetosup + 1 To uL

shtTetoSup.Cells(ii, 4).NumberFormat = "0.00"

Next ii

Set Tabela = Range("B" & linhatetosup + 1 & ":H" & uL)

Call FormatarTabela(Tabela)

ElseIf shtDados.Range("B14") = "Teto Fixo Cônico Autoportante" Then

shtTetoAuto.Visible = True

shtTetoAuto.Activate

shtTetoAuto.Range("D14:E14").ClearContents

Q = Q * 0.00980665

tn = D / (4.8 * Sin(0.16515)) * Sqr(Q / 2.2)

If tn > 13 Then

MsgBox "O projeto do tanque de teto fixo cônico autoportante não pode ser executado, já que a espessura corroída das chapas do teto são maiores que 13 mm."

shtTetoAuto.Visible = False

Exit Sub

End If

tn = tn + shtDados.Range("B16")

tn = WorksheetFunction.Max(tn, 5)

shtTetoAuto.Cells(14, "D") = tn

shtTetoAuto.Cells(14, "D").NumberFormat = "0.00"

shtTetoAuto.Cells(14, "E") = (Q * D ^ 2) / (4.8 * Fyr * Tan(0.16515))

shtTetoAuto.Cells(14, "E").NumberFormat = "0.00"

shtDados.Range("E2") = "Sim"

End If

End Sub

7.1.3 Código para o projeto do fundo

Option Explicit

Sub Projeto_Fundo()

Dim t1com As Single, t1req As Single, CA As Single, t1dt As Single, tb As Single, Wb As Single

Dim tensao As Single, tensao0 As Single, tensaomax As Single, G As Single, Hmax As Single

Dim S As Integer, ii As Integer, jj As Integer, uL As Integer, Fyb As Integer

Dim mat1anel As String, grupomat As String

Dim costado As Byte, aux As Boolean, Tabela As Range

shtFundo.Range("B14:E15").Clear

shtFundo.Visible = True

shtFundo.Activate

'Verificação pela API 650 (2016) quanto a necessidade de chapas anulares

'Determinar Tensão de Projeto e Tensão de Teste Hisdrostático

costado = shtDados.Range("E1")

mat1anel = shtInputCostado.Range("D12")

CA = shtInputCostado.Range("E12")

uL = shtBanco.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row

For jj = 1 To 2

 tensao0 = tensao

 If jj = 2 Then

 CA = 0

 End If

 If costado = 0 Then

 If jj = 1 Then

 t1req = shtOutputCostadoA.Range("G17")

 t1com = shtOutputCostadoA.Range("H17")

 If shtOutputCostadoA.Range("H17") = "" Then

MsgBox "Os valores das espessuras comerciais devem ser especificados na coluna correspondente."

Exit Sub

End If

End If

S = 145

tensao = ((t1req - CA) / (t1com - CA)) * S

Else

If jj = 1 Then

t1req = shtOutputCostado.Range("H16")

t1com = shtOutputCostado.Range("I16")

If shtOutputCostado.Range("I16") = "" Then

MsgBox "Os valores das espessuras comerciais devem ser especificados na coluna correspondente."

Exit Sub

End If

End If

For ii = 2 To uL

If shtBanco.Cells(ii, 1) = mat1anel Then

S = shtBanco.Cells(ii, 4 + jj)

grupomat = shtBanco.Cells(ii, "G")

Exit For

End If

Next ii

t1dt = shtOutputCostado.Cells(16, 5 + jj)

tensao = ((t1dt - CA) / (t1com - CA)) * S

End If

Next jj

tensaomax = WorksheetFunction.Max(tensao, tensao0)

CA = shtDados.Range("B11")

If shtDados.Range("B10") = "Chapas Anulares" Then

mat1anel = shtInputCostado.Range("D12")

```

'CA estipulado para as chapas do fundo
Hmax = shtDados.Range("B6")
G = shtDados.Range("B4")
If G * Hmax <= 23 Then
    G = WorksheetFunction.Min(G, 1)
'Determinar espessura das chapas anulares pela tabela da API 650 no Banco de Dados
For ii = 3 To 7
    If t1com <= shtBanco.Cells(ii, "H") Then
        For jj = 9 To 12
            If tensaomax <= shtBanco.Cells(2, jj) Then
                tb = shtBanco.Cells(ii, jj) + CA
                aux = True
                Exit For
            End If
        Next jj
    End If
    If aux = True Then Exit For
Next ii
uL = shtBanco.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
For ii = 1 To uL
    If mat1anel = shtBanco.Cells(ii, 1) And shtBanco.Cells(ii, 2) = "" Then
        Fyb = shtBanco.Cells(ii, 3)
    ElseIf mat1anel = shtBanco.Cells(ii, 1) And shtBanco.Cells(ii, 2) <> "" Then
        If shtBanco.Cells(ii, 2) <= t1com Then
            Fyb = shtBanco.Cells(ii, 3)
        End If
    ElseIf uL = ii And shtBanco.Cells(ii + 1, 1) <> "" Then
        MsgBox "Rever material utilizado para o costado, já que ele não se adequa as
        características da " _
        & "Tabela 5.2 da API 650 (2016) e com a recomendação que o material do 1º anel do
        costado seja" _
        & " o mesmo que o material das chapas anulares, segundo a N-270 (2014)."
    Exit Sub

```

```

End If

Next ii

'Cálculo da larura mínima das chapas pela API 650
Wb = 2 * tb * Sqr(Fyb / (2 * 0.00981 * G * Hmax))
Wb = WorksheetFunction.Max(Wb, 600)
Wb = Wb + 50 + t1com
Wb = WorksheetFunction.Max(Wb, 750)

Else
    MsgBox "Modelo presente nas Tabelas 5.1a e 5.1b, da norma API 650, não pode ser
    empregado para o cálculo da " _
        & "espessura das chapas anulares, logo este valor será determinado pelo máximo entre os
    valores mínimos entre" _
        & "as normas API 650 (2016) e N-270 (2014)."
    tb = CA

End If

'Verificação da epessura mínima pela N-270
tb = tb - CA

For ii = 3 To 6
    If t1com <= shtBanco.Cells(ii, "M") And shtDados.Range("B8") = "Fundo Cônico com
    declividade para a periferia" Then
        If tb < shtBanco.Cells(ii, "N") Then
            tb = shtBanco.Cells(ii, "N")
            Exit For
        End If
    ElseIf t1com <= shtBanco.Cells(ii, "M") And shtDados.Range("B8") = "Fundo Cônico
    com declividade para o centro" Then
        If tb < shtBanco.Cells(ii, "O") Then
            tb = shtBanco.Cells(ii, "O")
            Exit For
        End If
    ElseIf shtDados.Range("B8") = "Fundo Plano" Then
        End If
    Next ii

```

```

uL = shtFundo.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1
shtFundo.Cells(uL, 2) = "Chapas Anulares"
shtFundo.Cells(uL, 3) = mat1anel
shtFundo.Cells(uL, 4) = tb + CA
Wb = Wb * 10 ^ (-3)
shtFundo.Cells(uL, 5) = Wb

ElseIf shtDados.Range("B10") = "Chapas Recortadas" Then
    If grupomat = "IV" Or grupomat = "IVA" Or grupomat = "V" Or grupomat = "VI" Then
        If tensao0 > 160 Or tensao > 171 Then
            MsgBox "Segundo a API 650 (2016), não foi possível a utilização de materiais dos grupos IV, IVA, V ou VI " _
                & "para o 1º anel do costado ao mesmo tempo que chapas recortadas para o contorno do fundo, devido as " _
                & "tensões de projeto e de teste hidrostático serem maiores que as tensões permissíveis pela dada norma."
        Exit Sub
    End If
End If

uL = shtFundo.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1
shtFundo.Cells(uL, 2) = "Chapas Recortadas"
shtFundo.Cells(uL, 3) = shtDados.Range("B12")
shtFundo.Cells(uL, 4) = 6.3 + CA
shtFundo.Cells(uL, 5) = 1.8

End If

uL = shtFundo.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1
shtFundo.Cells(uL, 2) = "Demais Chapas do Fundo"
shtFundo.Cells(uL, 3) = shtDados.Range("B12")
shtFundo.Cells(uL, 4) = 6.3 + CA
shtFundo.Cells(uL, 5) = 1.8

Set Tabela = shtFundo.Range("B14:E15")
Call FormatarTabela(Tabela)
End Sub

```

7.1.4 Código para o projeto do anel de contraventamento intermediário

Option Explicit

```
Sub Projeto_AnelContraventamento()
```

```
Dim numaneis As Integer, uL As Integer, ii As Integer, jj As Integer, numcontr As Integer,  
linhacontr As Integer
```

```
Dim tf As Single, tr As Single, razao As Single, Wtr As Single, W As Single, H1 As Single, Z  
As Single
```

```
Dim xreal As Single, xfic As Single, aux As Single
```

```
Dim D As Single, Hmax As Single, V As Single
```

```
Dim Tabela As Range, costado As Byte, perfil As String
```

```
shtContraventamento.Visible = True
```

```
shtContraventamento.Activate
```

```
D = shtDados.Cells(5, 2)
```

```
Hmax = shtDados.Cells(6, 2)
```

```
numaneis = shtDados.Cells(7, 2)
```

```
V = shtDados.Cells(13, 2)
```

```
costado = shtDados.Range("E1")
```

```
linhacontr = 17
```

```
uL = shtContraventamento.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1
```

```
shtContraventamento.Range("B" & linhacontr + 1 & ":F" & uL).Clear
```

```
shtContraventamento.Range("E12:E15").ClearContents
```

```
uL = shtInputCostado.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
```

```
shtInputCostado.Range("B12:E" & uL).Copy
```

```
shtContraventamento.Range("B" & linhacontr + 1).PasteSpecial
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
uL = shtContraventamento.Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
```

shtContraventamento.Range("D" & linhacontr + 1 & ":D" & uL).Clear

If costado = 0 Then

 uL = shtOutputCostadoA.Cells(Rows.Count, 8).End(xlUp).Row

 If uL = 16 Then

 MsgBox "Os valores das espessuras comerciais devem ser especificados na coluna correspondente."

 Exit Sub

 End If

 shtOutputCostadoA.Range("H17:H" & uL).Copy

 shtContraventamento.Range("D" & linhacontr + 1).PasteSpecial

 Application.CutCopyMode = False

ElseIf costado = 1 Then

 uL = shtOutputCostado.Cells(Rows.Count, 8).End(xlUp).Row

 If uL = 17 Then

 MsgBox "Os valores das espessuras comerciais devem ser especificados na coluna correspondente."

 Exit Sub

 End If

 shtOutputCostado.Range("I16:I" & uL).Copy

 shtContraventamento.Range("D" & linhacontr + 1).PasteSpecial

 Application.CutCopyMode = False

End If

shtContraventamento.Visible = True

shtContraventamento.Activate

Cells(1, 1).Select

uL = Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row

tf = Cells(uL, 4) - Cells(uL, 5)

For ii = numaneis To 1 Step -1

 tr = Cells(uL - ii + 1, 4) - Cells(uL - ii + 1, 5)

 W = Cells(uL - ii + 1, 3)

```

razao = (tf / tr) ^ 5
Wtr = W * Sqr(razao)
Cells(uL - ii + 1, 6) = Wtr
Cells(uL - ii + 1, 6).NumberFormat = "0.000"

```

Next ii

```

Wtr = WorksheetFunction.Sum(Range("F17:F" & uL))
Cells(uL + 1, 6) = Wtr
Cells(uL + 1, 6).NumberFormat = "0.000"

```

'Cálculo da altura máxima não reforçada do costado

```

razao = (tf / D) ^ 1.5
H1 = 9.47 * tf * razao * ((190 / V) ^ 2)
Range("E15") = H1
Range("E15").NumberFormat = "0.00"

```

```

Set Tabela = Range("F17:F" & uL + 1)
Call FormatarTabela(Tabela)

```

If H1 > Wtr Then

```

Range("E12") = "Não Necessário"
numcontr = 0
ElseIf H1 < Wtr Then
    numcontr = WorksheetFunction.RoundDown((Wtr / H1), 0)
    Range("E12") = "Necessário"

```

'Criar tabela nova

```

Cells(uL + 3, 2) = "Perfil"
Cells(uL + 3, 3) = "Segmento do Costado"
Cells(uL + 3, 4) = "Dimensões do Perfil (mm)"
Cells(uL + 3, 5) = "Distância ao topo do segmento considerado (m)"
Cells(uL + 3, 6) = "Módulo de Resistência Mínimo (cm3)"
Range("B" & uL + 3 & ":F" & uL + 3).Font.Color = RGB(255, 255, 255)
Range("B" & uL + 3 & ":F" & uL + 3).Font.Bold = True

```

```

Range("B" & uL + 3 & ":F" & uL + 3).Interior.Color = RGB(64, 64, 64)
Range("C" & uL + 3 & ":F" & uL + 3).WrapText = True

```

'Selecionar o perfil adequado para o Anel de Contraventamento (BSI BS EN 14015, 2005)

Select Case D

Case Is <= 20

```
perfil = "100 x 65 x 8"
```

Case Is <= 36

```
perfil = "120 x 80 x 10"
```

Case Is <= 48

```
perfil = "150 x 90 x 10"
```

Case Else

```
perfil = "200 x 100 x 12"
```

End Select

For jj = 1 To numcontr

```
xfic = jj * (Wtr / (numcontr + 1))
```

For ii = 18 To 17 + numaneis

```
aux = aux + Cells(ii, "F")
```

If aux > xfic Then

'Distância real a partir do topo do anel

```
xreal = (Cells(ii, "C") * (aux - xfic)) / Cells(ii, "F")
```

Exit For

End If

Next ii

```
uL = Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Row + 1
```

```
Cells(uL, 2) = "P" & jj
```

```
Cells(uL, 3) = Cells(ii, 2)
```

```
Cells(uL, 4) = perfil
```

```
Cells(uL, 5) = xreal
```

```
Cells(uL, 5).NumberFormat = "0.000"
```

$$Z = ((D^2 * xfic) / 17) * (V / 190)^2$$

```
Cells(uL, 6) = Z
Cells(uL, 6).NumberFormat = "0.00"
Next jj
End If

Cells(10, 5) = ((H1 * V ^ 2) / Wtr) ^ 0.5
Cells(11, 5) = tf
Cells(13, 5) = numcontr

Set Tabela = Range("B" & uL - numcontr & ":F" & uL)
Call FormatarTabela(Tabela)

End Sub
```