



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO TENÓRIO BRITO DE BARROS

**PROJETO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UM TANQUE DE
ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO**

Recife
2018

GUSTAVO TENÓRIO BRITO DE BARROS

**PROJETO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UM TANQUE DE
ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Me. Luiz Adeildo da Silva Júnior

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B277p Barros, Gustavo Tenório Brito de.
 Projeto e análise por elementos finitos de um tanque de armazenamento
 atmosférico / Gustavo Tenório Brito de Barros. - 2018.
 89 folhas, il., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Me. Luiz Adeildo da Silva Júnior.
 TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.
 Inclui Referências e Anexo.

 1. Engenharia Mecânica. 2. Tanques de armazenamento. 3. API 650.
 4. ANSYS. 5. Método dos elementos finitos. I. Silva Júnior, Luiz
 Adeildo da. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-428



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2**

Aos nove dias do mês novembro do ano de dois mil e dezoito, às 15:00, no bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **PROJETO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO**, elaborado pelo aluno Gustavo Tenório Brito de Barros, matrícula 102.958.054-55, composta pelos professores Luiz Adeildo da Silva Júnior (Orientador), Nadège Sophie Bouchonneau da Silva (examinador 1) e Marcus Costa de Araújo (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela aprovação do candidato, atribuindo-lhe à monografia a média 8,5 (oito, cinco), julgando-o apto à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof(a). Luiz Adeildo da Silva Júnior - Nota:
DEMEC/UFPE

Assinatura:

Examinador 1: Prof(a). Nadège Sophie Bouchonneau da Silva - Nota:
DEMEC/UFPE

Assinatura:

Examinador 2r: Prof(a). Marcus Costa de Araújo - DEMEC/UFPE Nota:

Assinatura:

Recife, 09 de Novembro de 2018

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC2

AGRADECIMENTOS

Sou grato à minha família e à minha namorada pela nossa forte união e pelo inestimável apoio prestado, que me deram impulso para seguir durante os anos deste curso.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, pelo valioso patrimônio do conhecimento.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, por tudo que me ensinaram nesse período de estágio.

Ao meu orientador Luiz Adeildo da Silva Júnior, por estar sempre a disposição me ajudando no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, a todos os meus amigos de curso, que sofreram e comemoraram comigo, e estiveram presentes em todos os momentos.

RESUMO

Os tanques atmosféricos de armazenamento são equipamentos instalados em plantas de processo, comumente utilizados para estocagem de petróleo e seus derivados. Ao redor do mundo, a maioria destes equipamentos são fabricados e montados por meio da norma internacional API 650. Neste trabalho, os principais passos para a elaboração do projeto de um tanque de armazenamento são abordados. A partir deste projeto, foi realizada a modelagem em 3D do equipamento por meio dos *softwares NX Unigraphics e Discovery Spaceclaim*. Com base no modelo 3D criado, uma série de análises por meio do Método dos Elementos Finitos foram feitas utilizando o *software ANSYS*. Essas análises tiveram como objetivo identificar as regiões com maior concentração de tensões e avaliar o comportamento do equipamento com base no que foi definido pelas normas de projeto. Pôde-se concluir que os métodos determinados por norma, apesar de garantirem certa confiabilidade, trazem uma maior robustez para os componentes estruturais do tanque. Recomendações foram propostas para mitigar futuras falhas e deformações que possam ocorrer no futuro.

Palavras-chave: Tanques de armazenamento. API 650. ANSYS. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Steel storage tanks are equipment located in process plants, commonly used for storage of oil and its derivatives. Around the world, most of these equipments are designed, manufactured and erected according the international standard API 650. In this paper, the main steps for the elaboration of the design of a steel storage tank are discussed. From this project, the 3D modeling of the tank was carried out using the software Discovery Spaceclaim. Based on the 3D model created, a series of analyzes using the Finite Element Method were conducted on ANSYS applications. The aim of these analyzes was to identify the regions with the highest stress concentration and to evaluate the behavior of the equipment based on what was defined by the design standards. It can be concluded that the methods determined by standards, although guaranteeing certain reliability, make the structural components of the tank stronger. Recommendations have been proposed to mitigate future failures and deformations that may occur in the future.

Keywords: Steel storage tanks. API 650. ANSYS. Finite element method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Arranjo do fundo com chapas anulares	19
Figura 2 –	Arranjo do fundo com chapas recortadas	20
Figura 3 –	Tipos de disposição costado	27
Figura 4 –	Estrutura do tanque com bacia de contenção, onde a análise simplificada do teto pode ser aplicada	29
Figura 5 –	Seção transversal da viga utilizada e da pétala	31
Figura 6 –	Seção transversal da coroa	32
Figura 7 –	Seção transversal de duas variações de conexão do costado ao teto	35
Gráfico 1 –	Tensão-deformação	41
Gráfico 2 –	Qualidade dos elementos Análise I	52
Gráfico 3 –	Curva de convergência da Análise I	53
Gráfico 4 –	Curva de convergência da Análise II	55
Gráfico 5 –	Qualidade dos elementos Análise II	56
Figura 8 –	Brecha entre componentes de elemento casca	57
Figura 9 –	Sobreposição das chapas no lençol central	59
Figura 10 –	Planificação do fundo	60
Figura 11 –	Sobreposição das chapas do lençol central com as chapas anulares	60
Figura 12 –	Planificação do costado	61
Figura 13 –	Planificação das chapas do teto	62
Figura 14 –	Planificação da estrutura do teto	63
Figura 15 –	Conexão do costado com a estrutura do teto	64
Figura 16 –	Anel central do teto	64
Figura 17 –	Visão geral do modelo em 3D do tanque em estudo	65
Figura 18 –	Visão geral do modelo 3D utilizado na Análise I	66
Figura 19 –	Visão geral da malha gerada na Análise I	67
Figura 20 –	Detalhe do refinamento da malha gerada na Análise I	67
Figura 21 –	Condições de contorno e carregamento para a Análise I ..	68
Figura 22 –	Deformação direcional do costado em mm	70
Figura 23 –	Tensão equivalente de Von Mises	71

Figura 24 –	Tensão equivalente Von Mises no primeiro anel do costado	71
Figura 25 –	Visão geral do modelo 3D utilizado na Análise II	73
Figura 26 –	Detalhe 1 da malha gerada para Análise II	74
Figura 27 –	Detalhe 2 da malha gerada para Análise II	74
Figura 28 –	Condições de contorno e carregamento para a Análise II .	75
Figura 29 –	Deformação total	77
Figura 30 –	Tensão equivalente de Von Mises em toda a estrutura	77
Figura 31 –	Tensão equivalente de Von Mises nas vigas radiais	78
Figura 32 –	Tensão equivalente de Von Mises na chapa do teto	79
Figura 33 –	Tensão equivalente de Von Mises no anel central	79
Figura 34 –	Tensão cisalhante na estrutura	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tabela A.1 da N-270 - Recomendações de Tipos Usuais de Tanques	16
Tabela 2 –	Espessura mínima das chapas anulares	20
Tabela 3 –	Tabela para análise do resultado da Equação 6	24
Tabela 4 –	Espessura mínima das chapas do costado	26
Tabela 5 –	Tamanho mínimo da cantoneira de topo	28
Tabela 6 –	Tipos de elementos na criação de malha	38
Tabela 7 –	Tipos de solucionadores	42
Tabela 8 –	Dados de projeto	44
Tabela 9 –	Resumo dos materiais escolhidos	44
Tabela 10 –	Propriedades mecânicas do aço ASTM A283 Gr. C	45
Tabela 11 –	Propriedades mecânicas do aço EN 10025 S275 JR	45
Tabela 12 –	Espessuras do costado	46
Tabela 13 –	Análises realizadas no ANSYS	49
Tabela 14 –	Tabela de convergência da Análise I	52
Tabela 15 –	Tabela de convergência da Análise II	54
Tabela 16 –	Resumo geral das condições de contorno	56
Tabela 17 –	Configurações da CPU	58
Tabela 18 –	Valores para planificação do costado	61
Tabela 19 –	Descrição das condições de contorno e carregamento	68
Tabela 20 –	Resumo das simulações da Análise I	69
Tabela 21 –	Espessuras de cada anel do costado em cada simulação.	69
Tabela 22 –	Deformação direcional máxima do costado	70
Tabela 23 –	Tensões equivalentes de Von Mises máximas de cada anel do costado para cada simulação	72
Tabela 24 –	Comparação entre as tensões de Von Mises obtidas e a tensão admissível do material	72
Tabela 25 –	Descrição das condições de contorno e carregamento	75
Tabela 26 –	Resumo das simulações da Análise II	76
Tabela 27 –	Resultados da Análise II	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO PRINCIPAL	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	15
2.1	PROJETO DE TANQUES	15
2.1.1	Dimensões do tanque	17
2.1.2	Materiais de construção	17
2.1.2.1	Chapas	17
2.1.2.2	Perfis estruturais	18
2.1.3	Projeto do fundo	18
2.1.4	Projeto do costado	21
2.1.4.1	<i>One-Foot Method</i>	21
2.1.4.2	<i>Variable-Point-Design Method</i>	22
2.1.4.3	Análise estática	25
2.1.4.4	Espessuras limites	25
2.1.4.5	Disposição das chapas do costado	26
2.1.4.6	Cantoneira de topo no costado	27
2.1.5	Projeto do teto	28
2.1.5.1	Espessura da chapa do teto	28
2.1.5.2	Estrutura do teto.....	28
2.1.5.3	Coroa (anel central)	32
2.1.5.4	Anéis poligonais	34
2.1.5.5	Anel de compressão na junção do costado ao teto	34
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	36
2.2.1	Breve história do MEF	36
2.2.2	Passos básicos no MEF	37
2.2.3	Malha	37
2.2.3.1	Tipos de elementos	38
2.2.3.2	Tamanho dos elementos	39
2.2.4	Matriz de rigidez	40

2.2.5	Análise linear estática	41
2.2.5.1	Solucionadores lineares estáticos	50
3	METODOLOGIA	43
3.1	PROJETO EM ESTUDO	43
3.2	TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE GASOLINA COM TETO FIXO E TETO FLUTUANTE INTERNO	43
3.2.1	Dados de projeto	43
3.2.2	Materiais de construção	44
3.2.3	Projeto do fundo	45
3.2.4	Projeto do costado	46
3.2.5	Projeto do teto	47
3.3	ANÁLISE ESTRUTURAL POR ELEMENTOS FINITOS	48
3.3.1	Preparação do modelo 3D para análise pelo Método dos Elementos Finitos	50
3.3.1.1	Simplificação do modelo para a Análise I	50
3.3.1.2	Simplificação do modelo para a Análise II	50
3.3.2	Estudo de convergência de malha	51
3.3.2.1	Estudo de malha para a Análise I	51
3.3.2.2	Estudo de malha para a Análise II	53
3.3.3	Condições de contorno e carregamento	56
3.4	CONFIGURAÇÃO DA CPU	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	PROJETO DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO EM ESTUDO.....	59
4.2	ANÁLISE I	65
4.3	ANÁLISE II	73
5	CONCLUSÃO	81
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	ANEXO A – CÁLCULO DO TETO	86

1 INTRODUÇÃO

Terminais de petróleo e combustíveis líquidos são uma parte muito importante para a indústria e a economia mundial. Espalhados por todo o globo, os terminais têm como principais funções receber, enviar e armazenar biocombustíveis, petróleo e derivados líquidos. A capacidade de um terminal depende principalmente dos seus tanques de armazenamento, que são equipamentos estáticos, atmosféricos, cilíndricos, de fabricação soldada e construídos com chapas de aço carbono.

Em sua grande maioria, os tanques utilizados são projetados e instalados de acordo com a norma API 650 – *Welded Steel Tanks for Oil Storage* do *American Petroleum Institute*. No Brasil, é utilizada também a NBR 7821 – Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (BARROS, 2014).

Os métodos convencionais de desenvolvimento do projeto na área de tanques atmosféricos são cada vez mais acompanhados, ou inteiramente substituídos, por técnicas de simulação modernas, como a análise por elementos finitos. Eles são aplicados desde a execução do projeto do tanque, com destaque para a identificação de regiões com alta concentração de tensões, montagem dos equipamentos, propriedades físicas, etc.

Os tanques de armazenamento são equipamentos que demandam um grande investimento de capital para ser construído e, dependendo do produto a ser estocado, pode representar um grande risco ao meio ambiente, as instalações e aos trabalhadores.

Por esses e outros fatores, para uma maior segurança, além do gerenciamento de riscos necessário, é extremamente importante atender não somente os requisitos definidos pelas normas reguladoras mais usuais de projeto como também os resultados obtidos através destas análises.

Já difundida e utilizada em larga escala nas grandes indústrias, a análise por elementos finitos é uma simulação de algum fenômeno físico utilizando como base o Método dos Elementos Finitos. O MEF é considerado como uma importante ferramenta para executar cálculos que na prática seriam muito difíceis ou até mesmo impossíveis de serem resolvidos de forma analítica. A maioria dos *softwares*

disponíveis hoje em dia que permitem a realização dessas análises apresenta um nível de desenvolvimento que possibilita a sua utilização por grande parte dos engenheiros projetistas. Isto acontece, pois, através de interfaces gráficas mais intuitivas, os engenheiros de projeto terminam focando mais na interpretação dos resultados do que no desenvolvimento do método numérico em si. Ou seja, diante de um problema qualquer a ser analisado, torna-se mais acessível ao projetista a obtenção de resultados plausíveis, mesmo quando se desconhece as características do método numérico que está sendo utilizado (AZEVEDO, 2003).

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Projetar e analisar estruturalmente um tanque de armazenamento atmosférico por meio da API 650 e outras normas complementares.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar a norma API 650 e normas complementares necessárias para o projeto do tanque;
- b) Especificar o tipo de tanque de armazenamento a ser projetado em função do produto a ser estocado;
- c) Elaborar desenhos de configuração e distribuição das chapas em 2D do fundo, do costado e do teto do tanque;
- d) Criar modelo 3D do tanque simplificado para análise por elementos finitos;
- e) Realizar uma análise estrutural estática do modelo com o auxílio do *software* ANSYS;
- f) Interpretar os resultados obtidos através da análise por elementos finitos e comparar com os valores calculados conforme as normas utilizadas;
- g) Sugerir possíveis mudanças e refinamento no projeto do tanque a partir do que foi estudado.

1.4 JUSTIFICATIVA

Como já mencionado, a norma utilizada no projeto da maioria dos tanques de armazenamento é a API 650. As equações de projeto que a norma traz são

baseadas em suposições simplificadas, mostrando modelos de análise de tensão que somente podem ser utilizados para carregamentos e geometrias previamente conhecidos. Por outro lado, métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos trazem modelos geométricos mais complexos e carregamentos mais próximos da realidade, acarretando em resultados mais precisos e confiáveis.

Devido a vários fatores, tais como não levar em consideração parâmetros mais detalhados, por conta das diferentes incertezas nas equações de projeto definidas na API 650, que afetam a robustez e a estabilidade do tanque, estes equipamentos tendem a sofrer com falhas e deformações inesperadas (OSKOU EI & NAGHANI, 2014).

No ano de 2016, por exemplo, foi realizado um mapeamento na China de acidentes com incêndio e explosão na indústria petroquímica. Foram contabilizados 435 incidentes, ocorridos entre 1951 e 2013, sendo 23% desses em áreas de estocagem de combustíveis e 18% causados exclusivamente por problemas no projeto e na construção dos tanques (ZHOU, 2016).

Diante destas informações, estudar e comparar o comportamento estrutural de um tanque utilizando tanto os resultados das equações de projeto da norma API 650 como os resultados de uma análise estrutural estática seria muito útil na avaliação de soluções para aumentar a vida útil dos tanques.

Algumas das principais vantagens destas análises podem ser citadas: simulações precisas de componentes com geometria complexa, que demandariam um maior tempo para serem feitas matematicamente; identificação rápida de áreas com maior concentração de tensões; previsão do comportamento dos materiais especificados; facilidade de modificações.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 PROJETO DE TANQUES

Como já citado, no Brasil, a norma regulamentadora para a fabricação de tanques de armazenamento é a ABNT NBR 7821 – Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Outra norma técnica brasileira muito utilizada é a N-270 – Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico, elaborada pela Petrobras. Mas é a norma americana, a API 650 – *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, a mais utilizada e difundida pela indústria.

Inicialmente publicada em 1961, pela *American Petroleum Institute*, a norma API 650 é baseada em todo o conhecimento e experiência acumulados por compradores e fabricantes de tanques de armazenamento. A norma é totalmente voltada para os tanques feitos de aço, soldados, para vários tamanhos e capacidades e que operam com pressões internas inferiores a 17,2 kPa e temperaturas inferiores a 93 °C. Através dos seus requisitos mínimos, a norma tem como principal objetivo facilitar o projeto, a fabricação, a montagem e a aquisição de tanques de armazenamento na indústria do petróleo (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013).

Segundo Barros (2010), os tanques de armazenamento são classificados de acordo com o tipo de teto adotado no projeto, que podem ser:

- a) Tanques de teto fixo: São tetos ligados à parte superior do costado. Podem ser autoportantes ou suportados por uma estrutura interna de perfis metálicos;
- b) Tanques de teto móvel: São tetos que se movimentam externo ao costado, dependendo da pressão de seu espaço de vapor;
- c) Tanques de teto com diafragma flexível: Neste caso, o tanque possui teto fixo com um teto interno flutuante se movimentando em função da pressão de seu espaço de vapor.
- d) Tanques de teto flutuante: Os tetos estão sustentados diretamente na superfície do líquido estocado, no qual flutuam de acordo com o enchimento ou esvaziamento do tanque.

A partir dos tipos de tanques descritos, a norma N-270 exibe uma tabela de recomendações em relação a que tipo de teto usar em função do produto que será armazenado no tanque.

Tabela 1 - Tabela A.1 da N-270 - 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.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F; — tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Gasolina de Aviação (GAV).	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F; — tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Álcool etílico hidratado. Metanol.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Biodiesel.	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; — tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 "Annex" F.
Álcool etílico anidro.	— tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Óleo diesel classes I e II.	— tanque atmosférico de teto flutuante externo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Querosene de Aviação (QAV).	— tanque atmosférico de teto fixo; — tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Produtos da faixa de querosene ou mais pesados, tais como: a) nafta pesada; b) querosene; c) óleo diesel classe III; d) resíduo de vácuo; e) diesel do FCC ("cycle-oil"); f) óleo combustível; g) resíduos ("slop"); h) óleo lubrificante; i) "flushing-oil"; j) asfalto e cimento asfáltico; k) lastro de navio.	— tanque atmosférico de teto fixo.
Água bruta.	— tanque sem teto.

NOTA 1 A seleção de um tanque atmosférico de teto flutuante (interno ou externo) está condicionada à pressão de vapor do produto (evitar deformação do teto). 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.

Produto armazenado	Tipo de tanque (selecionado conforme o projeto)
NOTA 2 A utilização de teto flutuante externo está condicionada à possibilidade de construção da escada de acesso ao teto (ver 19.1). NOTA 3 As classes I, II e III do óleo diesel são dadas pela ABNT NBR 17505-1. NOTA 4 Os tanques de GAV, QAV e biodiesel não devem utilizar internos de cobre e zinco ou ligas desses elementos. NOTA 5 Um sistema de recuperação de vapor pode ser usado em tanques atmosféricos de teto fixo, inclusive como alternativa a tanques atmosféricos de teto flutuante, em função de um estudo técnico, econômico e ambiental. NOTA 6 Para produtos que se degradam por oxidação ou umidade (exemplo: biodiesel, parafinas, entre outros) deve ser analisada a necessidade de um sistema de inertização. NOTA 7 Teto fixo geodésico e cobertura geodésica de teto flutuante são permitidos quando justificados economicamente.	

Fonte: (PETROBRAS, 2014)

2.1.1 Dimensões do tanque

As principais dimensões do tanque são o diâmetro e sua altura. Em consequência da enorme quantidade de variáveis que se relacionam, a literatura sugere algumas relações (BARROS, 2014):

a) Tanques de pequena e média capacidade: $D \sim H$

b) Tanques de grande capacidade: $D \sim \frac{8}{3}H$

onde, D é o diâmetro e H é a altura.

Um aspecto relevante para análise, quanto a altura, é a definição em função dos tamanhos comerciais disponíveis das chapas que serão utilizadas no costado (BARROS, 2014).

2.1.2 Materiais de construção

2.1.2.1 Chapas

As chapas utilizadas para a montagem do tanque de armazenamento, que podem ser de bordas universais ou aparadas, vêm geralmente de uma usina siderúrgica. Em função da espessura, é definido que, quando maior ou igual a 6,35 mm, as chapas são consideradas grossas. Quando inferior a 6,35 mm, são consideradas chapas finas (BARROS, 2014).

A norma N-270 afirma que as chapas comerciais produzidas no Brasil devem ter as seguintes dimensões (PETROBRAS, 2014):

- a) Chapas de espessura de 4,75 mm (chapas finas laminadas a quente) podem ser de 1500 mm de altura por 6000 mm de comprimento ou 1800 mm de altura por 6000 mm de comprimento;
- b) Chapas de espessura de 6,30 e acima (chapas grossas laminadas a quente) possuem 2440 mm de altura por 12000 mm comprimento.

2.1.2.2 Perfis estruturais

A API 650 especifica que os perfis estruturais devem estar de acordo com (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013):

- a) ASTM A36M/36;
- b) ASTM A131M/A131;
- c) ASTM A992M/A992;
- d) Aços estruturais listados na AISC, *Manual of Steel Construction*;
- e) CSA G40.21, Grau 260W(38W), 300W(44W), 350W(50W), 260WT(38WT), 300WT(44WT), e 350WT(50WT);
- f) ISO 630, Grau E275, Qualidades B, C e D;
- g) EN10025, Grau S275, Qualidades JR, JO e J2;
- h) Padrões nacionais reconhecidos.

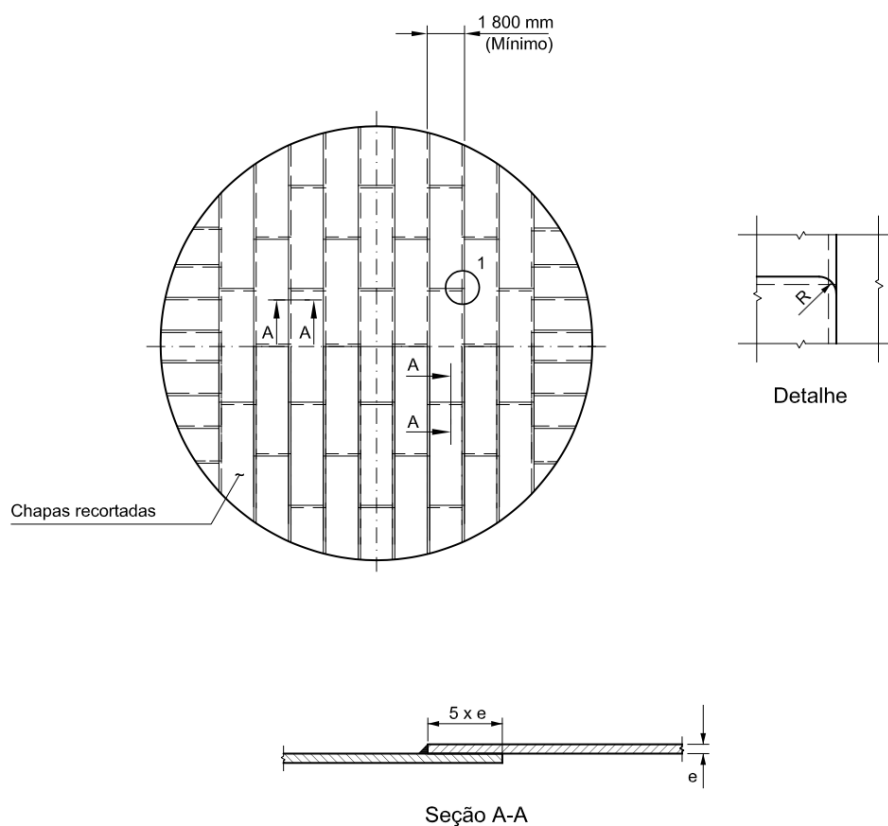
2.1.3 Projeto do fundo

De acordo com a norma N-270 (PETROBRAS, 2014), os fundos dos tanques podem ser:

- a) fundo plano;
- b) fundo cônico com declividade para a periferia de, no mínimo, 1:120;
- c) fundo cônico com declividade para o centro de, no mínimo, 1:100 e, no máximo, 1:25.

O arranjo das chapas no fundo pode ser feito de duas maneiras: com a presença de chapas anulares, ou com chapas recortadas. É importante destacar que, em ambos os casos, as bordas das chapas devem ser aparadas (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013).

Figura 2 - Arranjo do fundo com chapas recortadas



Fonte: (PETROBRAS, 2014)

A API 650 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) afirma que as chapas anulares devem ter um comprimento radial que garanta, no mínimo, uma distância de 600 mm entre o interior do costado e a qualquer junta de solda no restante do fundo. Além disso, a norma expõe uma tabela para espessura mínima de acordo com a espessura do primeiro anel do costado e da sua tensão:

Tabela 2 - Espessura mínima das chapas anulares

Espessura da chapa (e) do primeiro anel do costado (mm)	Tensão no primeiro anel do costado (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$e \leq 19$	6,0	6,0	7,0	9,0
$19 < e \leq 25$	6,0	7,0	10,0	11,0
$25 < e \leq 32$	6,0	9,0	12,0	14,0
$32 < e \leq 40$	8,0	11,0	14,0	17,0
$40 < e \leq 45$	9,0	13,0	16,0	19,0

Fonte: (PETROBRAS, 2014)

Quanto as chapas do lençol central, devem ser obedecidos os requisitos mínimos de espessura de 6,35 mm e largura de 1800 mm. No caso de sobreposição de três chapas no fundo do tanque, deve ser obedecida uma distância de 300 mm (PETROBRAS, 2014):

- a) entre si;
- b) a partir do costado do tanque;
- c) a partir da junta de topo da chapa anular;
- d) a partir da solda da chapa anular com as chapas centrais do fundo.

2.1.4 Projeto do costado

Para o cálculo das espessuras do costado em tanques de médio a grande porte, são disponibilizados pela API 650 três alternativas (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013):

- a) *One-Foot Method* (Ponto Fixo de Projeto);
- b) *Variable-Design-Point Method* (Método do Ponto Variável de Projeto);
- c) Análise elástica.

2.1.4.1 *One-Foot Method*

O cálculo da espessura pelo método do Ponto Fixo de Projeto se dá pelo ponto de projeto a 0,3 m acima da parte inferior de cada anel do costado. Esse método não deve ser aplicado quando o diâmetro do tanque em questão ultrapassar 61 m. Seguem abaixo as equações utilizadas para a espessura do costado para a condição de projeto e de teste hidrostático, respectivamente:

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

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

onde,

t_d = espessura do costado para projeto, em mm;

t_t = espessura do costado para teste hidrostático, em mm;

D = diâmetro nominal do tanque, em m;

H = altura do líquido de projeto, em m;

G = gravidade específica do líquido armazenado;

CA = corrosão admissível da chapa do costado, em mm;

S_d = tensão admissível para projeto, em MPa;

S_t = tensão admissível para teste hidrostático, em MPa;

2.1.4.2 Variable-Design-Point Method

O método do ponto variável de projeto permite uma redução na espessura da chapa do costado e no peso total do material, facilitando a construção de tanques maiores dentro da limitação de máxima espessura da chapa. Este método, diferente do *One-Foot Method*, consiste na utilização de um ponto variável para cada anel do costado, resultando em tensões circunferenciais no costado bem mais próximas da máxima tensão admissível de projeto (BARROS, 2014).

Esse método só poderá ser usado quando a relação a seguir for verdade:

$$\frac{L}{H} \leq \frac{1000}{6} \quad (3)$$

onde,

$L = (500 Dt)^{0,5}$, em mm;

D = diâmetro nominal do tanque, em m;

H = altura do líquido de projeto, em m;

t = é a espessura, sem considerar a corrosão, do primeiro anel, em mm;

Sendo válida a relação, o próximo passo será calcular a espessura do primeiro anel. Para isso, serão calculados valores preliminares de t_{pd} e t_{pt} para as condições de projeto e teste hidrostático, respectivamente, com as Equações 1 e 2 do *One-Foot Method*. Em seguida, a espessura do primeiro anel será calculada para condição de projeto, t_{1d} , e para condição do teste hidrostático, t_{1t} .

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

$$t_{1t} = 1,06 - \left(\frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{H}{S_t}} \right) \left(\frac{4,9HD}{S_t} \right) \quad (5)$$

onde,

t_d = espessura do costado para projeto, em mm;

t_t = espessura do costado para teste hidrostático, em mm;

D = diâmetro nominal do tanque, em m;

H = altura do líquido de projeto, em m;

G = gravidade específica do líquido armazenado;

CA = corrosão admissível da chapa do costado, em mm;

S_d = tensão admissível para projeto, em MPa;

S_t = tensão admissível para teste hidrostático, em MPa;

O próximo passo é calcular a espessura do segundo anel para as condições de projeto e de teste hidrostático. Mas antes, é necessário encontrar o resultado da relação abaixo:

$$\frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} \quad (6)$$

onde,

h_1 = altura do anel do tanque, em mm;

t_1 = espessura definida do primeiro anel, em mm;

r = raio nominal do tanque, em m;

A partir do resultado da relação, uma análise deverá ser feita, em função da Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela para análise do resultado da Equação 6

$\frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} \leq 1,375$	$\longrightarrow$	$t_2 = t_1$
$\frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} \geq 2,625$	$\longrightarrow$	$t_2 = t_{2a}$
$1,375 < \frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} < 2,625$	$\longrightarrow$	$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25\sqrt{rt_1}} \right]$

Fonte: (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013)

onde,

t_2 = espessura mínima do segundo anel, em mm;

t_{2a} = espessura do segundo anel calculada de acordo com o processo de cálculo da espessura de um anel superior que será visto a seguir, em mm;

Para calcular a espessura dos demais anéis para ambas as condições, um valor preliminar t_u para o anel imediatamente superior deverá ser determinado utilizando as Equações 1 e 2, e seguidamente a distância x do ponto variável de projeto da extremidade inferior do anel em questão, usando o menor dos valores obtidos das três equações seguintes:

$$x_1 = 0,61\sqrt{rt_u} + 320CH \quad (7)$$

$$x_2 = 1000CH \quad (8)$$

$$x_3 = 1,22\sqrt{rt_u} \quad (9)$$

onde,

t_u = espessura preliminar calculada para o anel em questão, em mm;

$$C = \frac{\sqrt{K}(K-1)}{1+K\sqrt{K}};$$

$$K = \frac{t_l}{t_u};$$

t_l = espessura do anel imediatamente inferior, em mm, para a condição que estiver sendo considerada;

H = altura do líquido de projeto, em m;

A espessura mínima t_x para os anéis superiores deverá ser então computada para a condição de projeto, t_{xd} , e para a condição de teste hidrostático, t_{xt} , utilizando o menor valor de x obtido pelas Equações 7, 8 e 9.

$$t_{xd} = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right) G}{S_d} + CA \quad (10)$$

$$t_{xt} = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right)}{S_t} \quad (11)$$

Feito o cálculo de t_x , utilizar o valor computado substituindo-o por t_u repetidamente através das Equações 7, 8, 9, 10 e 11, até que haja uma diferença pequena entre os valores calculados em sequência (repetir este método iterativo três vezes já é o suficiente, na maioria dos casos). Quanto mais iterações, mais exata a localização do ponto variável de projeto e consequentemente resultarão em uma espessura de costado mais precisa.

2.1.4.3 Análise elástica

Para tanques de armazenamento onde a relação apresentada na Equação 3 não é válida, a definição das espessuras do costado devem ser baseadas em uma análise elástica que seja compatível com as tensões admissíveis do material a ser utilizado (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013).

A norma, portanto, não especifica como deve ser realizada essa análise, somente fornece instruções de como devem ser definidas as condições de contorno na base do costado (AZZUNI & GUZEY, 2015).

2.1.4.4 Espessuras limites

De acordo com Barros (2014), devido a requisitos de montagem, a espessura do costado não pode ser inferior a um valor já pré-estabelecido por norma. Por esse motivo, não é necessário adicionar a sobreespessura de corrosão a este valor

mínimo. A norma API 650 expõe uma tabela com os valores mínimos de espessura do costado de acordo com o diâmetro nominal do tanque.

Tabela 4 - Espessura mínima das chapas do costado

Diâmetro nominal do tanque (m)	Espessura nominal da chapa (mm)
$D < 15$	4,75
$15 \leq D < 36$	6,35
$36 \leq D < 60$	7,94
$D > 60$	9,53

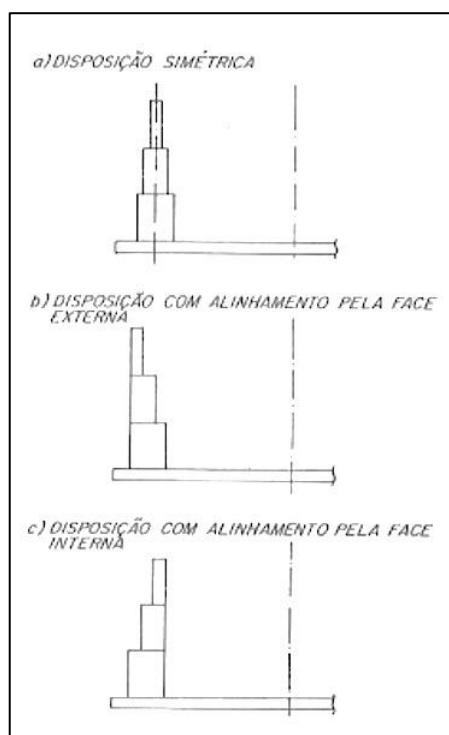
Fonte: (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013)

2.1.4.5 Disposição das chapas do costado

Quanto ao alinhamento das chapas do costado, existem três possibilidades (BARROS, 2014):

- a) disposição simétrica: estruturalmente mais rígido, porém de montagem complexa;
- b) disposição com alinhamento da face externa: melhor opção em termos de estética, é de fácil montagem e bom acabamento;
- c) disposição com alinhamento da face interna: é o arranjo mais usual na prática, de fácil montagem e acabamento regular. Esta disposição é necessária no caso de tanques com teto flutuante interno.

Figura 3 – Tipos de disposição costado



Fonte: (BARROS, 2014)

2.1.4.6 Cantoneira de topo no costado

De acordo com (BARROS, 2014), todos os tanques devem ter um reforço adequado na parte superior do costado. A N-270 especifica que a cantoneira de topo do costado deve ser soldada de topo na chapa superior do costado, com fusão completa e penetração total.

Para melhorar as condições de solda, no caso de tanques com tetos autoportantes, as chapas do teto podem ser apoiadas na aba superior da cantoneira, ver Figura 7. A adição da cantoneira de topo garante mais rigidez ao último anel do tanque, desempenhando importante função na área de conexão do teto ao costado. A norma API 650 mostra, ainda, uma tabela com os tamanhos mínimos de cantoneira que deve ser adotada em alguns tipos de tanques.

Tabela 5 – Tamanho mínimo da cantoneira de topo

Diâmetro do tanque (m)	Tamanho mínimo da cantoneira de topo (mm)
$D \leq 11$	50 x 50 x 5
$11 < D \leq 18$	50 x 50 x 6
$D > 18$	75 x 75 x 10

Fonte: (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013)

2.1.5 Projeto do teto

2.1.5.1 Espessura da chapa do teto

A espessura nominal mínima das chapas do teto é de 4,75 mm, sendo recomendável, sempre que possível, adotar esta espessura. Segundo a N-270, o material das chapas do teto deve ser o aço carbono ASTM A 1011 Gr. 33, ASTM A 283 Gr. C ou ASTM A 36, com largura mínima de 1500 mm (PETROBRAS, 2014).

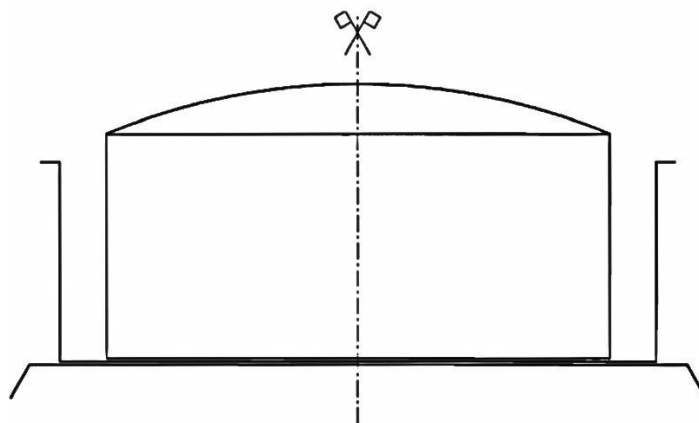
2.1.5.2 Estrutura do teto

De acordo com a norma EN1993-4-2 – *Design of steel structures* (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2007), a análise simplificada a seguir só poderá ser aplicada se o tanque em estudo satisfizer as seguintes condições:

- a) a estrutura do tanque é conforme mostrada na Figura 4;
- b) as únicas ações internas são as da pressão hidrostática do fluido e pressão de vapor;
- c) a altura do líquido de projeto não deve ultrapassar a altura do costado;
- d) as seguintes cargas podem ser desprezadas: cargas induzidas termicamente, cargas sísmicas, cargas resultantes de assentamentos ou conexões irregulares e cargas de emergência;
- e) nenhum anel do costado possui espessura menor do que o seu superior;
- f) o valor de projeto da tensão no costado é menor que 435 MPa;
- g) para um teto em domo, o raio de curvatura está entre 0,8 e 1,5 vezes o tamanho do diâmetro do tanque;
- h) a declividade do fundo não é superior a 1:100;

- i) o fundo é totalmente suportado ou suportado por vigas paralelas próximas;
- j) a pressão interna característica não é inferior a -8,5 mbar e nem superior a 60 mbar;
- k) o número de cargas cíclicas é tal que não há o risco de falha por fadiga.

Figura 4 - Estrutura do tanque com bacia de contenção, onde a análise simplificada do teto pode ser aplicada



Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2007)

Inicialmente, de acordo com a norma *Tankanlagen 960 – Richtlinie für die Herstellung von Flachbodentanks mit besonderen Anforderungen* (VDTÜV, 2002), deve-se aplicar, a partir do perfil escolhido, a seguinte relação para constatar se é possível ou não a sua utilização:

$$I_y \geq \frac{\gamma_M \cdot N_{II,d} \cdot r^2}{\pi^2 \cdot E} \quad (12)$$

sendo,

I_y = momento de inércia do perfil em questão, em cm⁴;

γ_M = coeficiente de segurança definido no projeto;

r = raio do tanque, em cm;

$N_{II,d}$ = maior força normal de segunda ordem na viga, em N.

Para calcular a maior força axial de projeto na viga, $N_{II,d}$, é necessário primeiramente, através das três equações a seguir, definir a carga distribuída máxima

de projeto que será aplicada a viga, onde o maior valor para $p_{Ri,d}$ deverá ser adotado.

$$p_{Ri,d} = 1,5 \cdot q_s \quad (13)$$

$$p_{Ri,d} = q_{H,d} - q_b \quad (14)$$

$$p_{Ri,d} = 0,5 \cdot q_{H,d} \quad (15)$$

onde,

q_b = carga referente a pressão de flambagem, em N/m²;

q_s = carga distribuída devido a neve, em N/m²;

$q_{H,d}$ = maior valor de combinação de cargas, em N/m².

Adotado o maior valor de $p_{Ri,d}$, o próximo passo é calcular a força axial na viga que se dá por:

$$N_{P,d} = 0,375 \cdot \frac{r}{h_D} \cdot \frac{p_{Ri,d} \cdot \pi \cdot r^2}{n} \quad (16)$$

sendo,

h_D = altura do teto, em m;

n = número de vigas adotadas.

E, logo em seguida, é calculado o valor da força axial referente ao valor de projeto do próprio peso da viga, $G_{Ri,d}$:

$$N_{G,d} = (0,513 - 0,375) \cdot \frac{r}{h_D} \cdot G_{Ri,d} \quad (17)$$

Finalmente, é possível então obter a força axial de segunda ordem, $N_{II,d}$:

$$N_{II,d} = (N_{P,d} + N_{G,d}) \left[1 + 0,075 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

Seguidamente, deverá ser calculado o momento fletor nas vigas:

$$M_{I,d} = f_M \cdot r \cdot \frac{p_{Ri,d} \cdot \pi \cdot r^2}{n} \quad (19)$$

com,

$f_M = 0,0375 + 0,00075 \cdot p_{Ri,d}$ (Nesta relação, $p_{Ri,d}$ deve estar em kN/m², desta forma, mantendo f_M adimensional)

Para encontrar o momento de segunda ordem na viga, é necessário determinar primeiramente o fator de carga ε :

$$\varepsilon = \gamma_M \cdot N_{II,d} \cdot \frac{(0,6 \cdot r)^2}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} \quad (20)$$

Momento de segunda ordem:

$$M_{II,d} = \frac{M_{I,d}}{1 - \varepsilon} \quad (21)$$

Por fim, para garantir a segurança, é aplicada a seguinte relação:

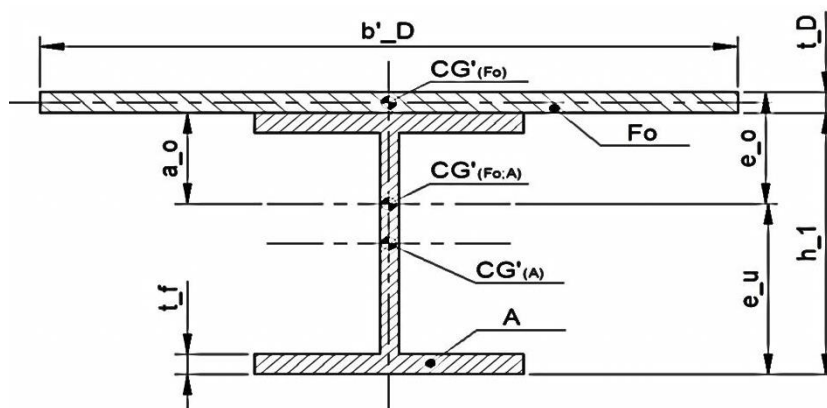
$$\frac{\frac{N_{II,d}}{A} \pm \frac{M_{II,d}}{W_y}}{\frac{f_{y,k}}{\gamma_M}} \leq 1 \quad (22)$$

onde,

A = somatório da área da seção da viga e da área da seção da pétala;

W_y = módulo de resistência da viga e da pétala.

Figura 5 – Seção transversal da viga utilizada e da pétala



Fonte: O Autor com base em (VDTÜV, 2002)

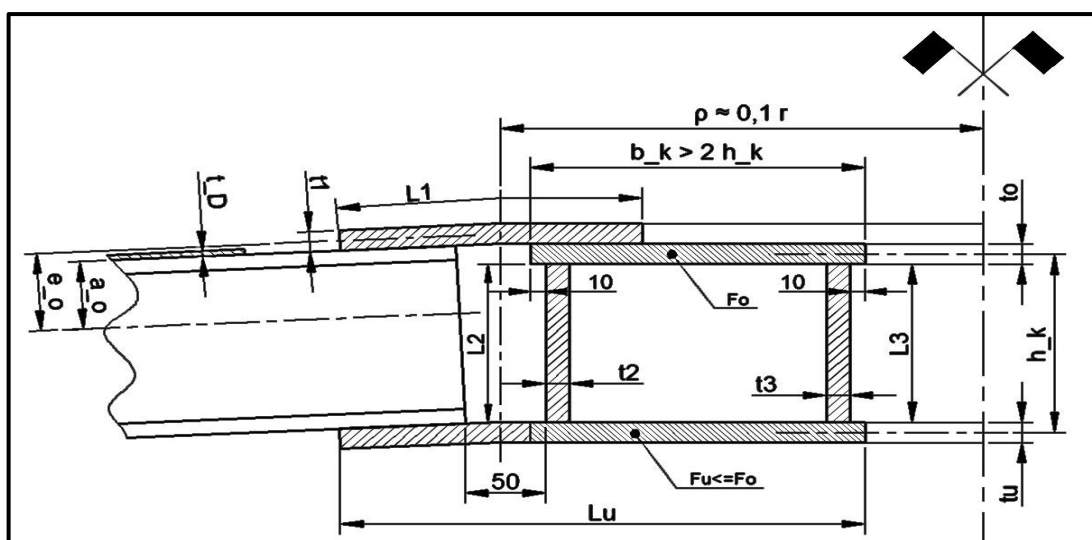
2.1.5.3 Coroa (anel central)

Para o cálculo da coroa no centro da estrutura do teto, as seguintes condições devem ser obedecidas:

$$b_k \geq 2h_k \quad (23)$$

$$F_o \geq F_u \quad (24)$$

Figura 6 – Seção transversal da coroa



Fonte: O Autor com base em (VDTÜV, 2002)

Além disso, a relação a seguir deve se aplicar:

$$h_k^2 \frac{F_o \cdot F_u}{F_o + F_u} \geq I_y \frac{n}{2\pi} \quad (25)$$

Em seguida, é calculado o momento de segunda ordem com base no da viga radial:

$$M_{K,II} = \left(1 - \frac{\rho}{r}\right) M_{II,d} \quad (26)$$

A força horizontal na parte inferior da coroa será obtida através do momento de segunda ordem encontrado acima e da força normal da viga radial:

$$H_{u,d} = \frac{e_o}{h_k} N_{II,d} + \frac{M_{K,II,d}}{h_k} \quad (27)$$

O momento fletor na parte inferior da coroa será determinado através da força horizontal calculada:

$$M_{u,d} = \left[\frac{n}{\pi} - \frac{1}{\tan \frac{180^\circ}{n}} \right] \cdot H_{u,d} \cdot \rho \cdot 0,5 \quad (28)$$

Para encontrar o módulo de resistência e a força no próprio anel, respectivamente, utilizar as seguintes equações:

$$W_U = \frac{F_u \cdot b_k}{6} \quad (29)$$

$$R_{u,d} = \frac{H_{u,d}}{2 \cdot \frac{\pi}{n}} \quad (30)$$

Por fim, para certificar a segurança da coroa, uma última relação deve ser aplicada:

$$\frac{\frac{R_{u,d}}{F_u} + \frac{M_{u,d}}{W_u}}{\sigma_{adm}} \leq 1 \quad (31)$$

onde,

b_k = comprimento do flange da coroa, ver Figura 5;

h_k = distância entre a parte superior e inferior do anel, ver Figura 5;

F_o = área da parte superior da coroa, ver Figura 5;

F_u = área da parte inferior da coroa, ver Figura 5;

$\rho \approx 0,1r$;

e_o = distância entre a linha de centro da viga radial e a parte superior da coroa, ver Figura 5.

2.1.5.4 Anéis poligonais

Se as chapas do teto estiverem somente apoiadas aos perfis de sustentação, será necessário o uso de vigas poligonais de reforço. Para tanques de tetos apoiados com diâmetro maior que 25 m, é recomendado o uso de no mínimo quatro anéis poligonais.

2.1.5.5 Anel de compressão na junção do costado ao teto

Tanto a norma API 650 como a EN1993-4-2 mostram que para se ter sustentação na área da conexão do costado ao teto, esta área precisa ser igual ou superior ao resultado da Equação 32.

$$A_{ff} \leq \frac{p_{Ri,d} \cdot D^2}{8 \cdot 0,6 \cdot F_d \cdot \tan \alpha} \quad (32)$$

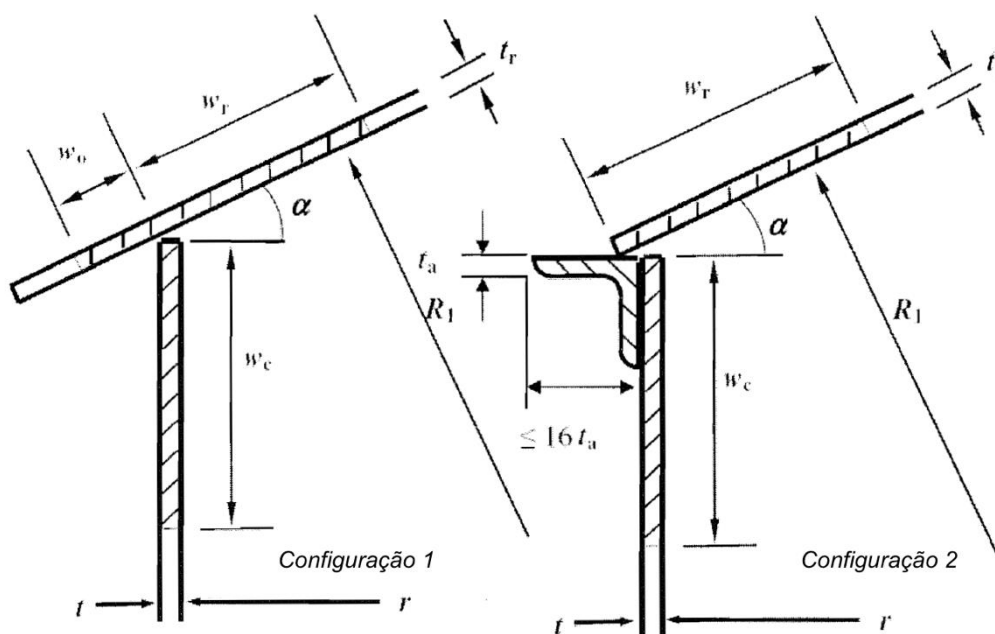
onde,

F_d = menor tensão de escoamento dos materiais presentes, em MPa;

α = ângulo de inclinação do teto, ver Figura 7;

Essa área, por sua vez, pode ser definida de diversas formas, dependendo do tipo de configuração que será usado no último anel do costado. A figura a seguir mostra, de acordo com (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2007), duas variações dessa junção e sua área de participação:

Figura 7 – Seção transversal de duas variações de conexão do costado ao teto



Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2007)

sendo:

t_a = espessura da cantoneira;

t_r = espessura da chapa do teto;

t = espessura do costado;

R_1 = raio de curvatura do teto;

r = raio interno do tanque;

$w_r = 0,6\sqrt{R_1 \cdot t_r}$ = máxima largura da participação do teto na área da junção;

$w_c = 0,6\sqrt{r \cdot t}$ = máxima largura da participação do costado na área da junção;

$w_o \leq 16t_r$ = máxima largura da participação do restante da chapa do teto na área da junção, no caso da não utilização de cantoneira.

É importante ressaltar que esta relação só é válida quando a separação entre as vigas radiais na região de conexão com o costado é menor que 3,25 m, e quando

a carga distribuída máxima age de cima para baixo, os momentos fletores no anel podem ser ignorados.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico para resolver problemas físicos regidos por uma equação diferencial ou um teorema de energia. Existem duas características que o distinguem dos outros procedimentos numéricos:

- a) O método utiliza uma formulação integral para gerar um sistema de equações algébricas;
- b) O método utiliza funções suaves contínuas por partes para aproximação da quantidade ou quantidades desconhecidas.

Aplicações do MEF em problemas de resistência dos materiais são extensas. Essas aplicações incluem problemas de elasticidade, análise de chapas, flambagem de estruturas, vibrações contínuas, comportamento elastoplástico e análise viscoelástica (SEGERLIND, 1984).

2.2.1 Breve história do MEF

A origem do MEF moderno se deu por volta do início do século XX, quando alguns estudiosos aproximaram e modelaram elásticos contínuos usando barras elásticas equivalentes discretas. De toda forma, *Courant* (1943) foi acreditado como a primeira pessoa a desenvolver o MEF. Em um *paper* publicado no início dos anos 40, *Courant* usou uma interpolação polinomial por partes sobre sub-regiões triangulares para investigar problemas de torsão.

O próximo significativo passo na utilização do MEF foi tomado pela *Boeing* nos anos 50, quando utilizaram elementos triangulares de tensão para modelar as asas de seus aviões. Mas só em 1960 que *Clough* fez o termo Método dos Elementos Finitos se tornar popular. Durante os anos 60, estudiosos começaram a aplicar o MEF em outras áreas da engenharia, como transmissão de calor e problemas de fluxo de infiltração. *Zienkiewicz* e *Cheung*, em 1967, escreveram o primeiro livro totalmente voltado para o estudo do MEF (MOAVENI, 1999).

A partir dos anos 70, os primeiros pacotes de *software* mais utilizados atualmente foram lançados comercialmente, o MEF começou a ser difundido e

utilizado em diversas áreas da engenharia, incluindo estudos não estruturais, como por exemplo: comportamento de fluidos, termomecânica e eletromagnetismo.

2.2.2 Passos básicos no MEF

Os passos básicos envolvidos em qualquer análise por elementos finitos consistem no seguinte: (MOAVENI, 1999)

a) Pré-processamento

- Dividir o todo em partes com menor complexidade; isto é, criação da malha, subdividir o problema em nós e elementos.
- Assumir uma função de forma para representar o comportamento físico do elemento;
- Desenvolver equações para um elemento;
- Reunir os elementos presentes no problema. Construir a matriz de rigidez global.
- Aplicar condições de contorno, condições iniciais, e cargas.

b) Solução

- Solucionar um conjunto de equações algébricas lineares e não lineares simultaneamente a fim de obter os resultados nos nós, como por exemplo, valores de deslocamento em diferentes nós.

c) Pós-processamento

- Obter outras informações importantes, como o valor das principais tensões, fluxos de calor, etc.

No geral, existem algumas abordagens para a formulação da matriz de rigidez do problema, sendo os principais: Método direto, Método variacional e Método de resíduos ponderados. Sendo este último, o mais usado atualmente em *softwares* comerciais.

2.2.3 Malha

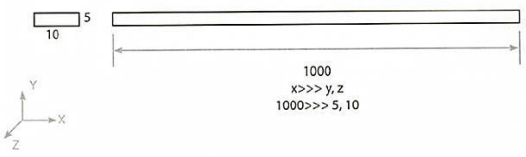
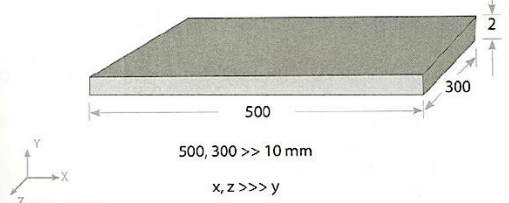
Como já mencionado, a análise por elementos finitos tem como principal objetivo realizar cálculos em um número finito de pontos e logo em seguida

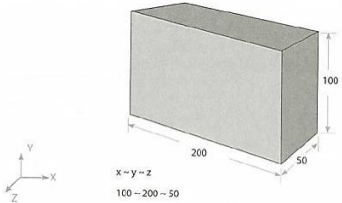
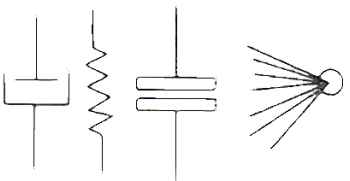
interpolarm estes resultados para o corpo como um todo. Qualquer objeto contínuo terá infinitos graus de liberdade e é impossível resolver qualquer problema nesse formato. O MEF reduz o número de graus de liberdade de infinito para uma quantidade finita com a ajuda da discretização, através da criação da malha (nós e elementos) (GOKHALE, 2008).

2.2.3.1 Tipos de elementos

Para uma análise de elementos finitos, o *software* necessitará de todas as três dimensões. Não será possível realizar os cálculos até que a geometria esteja totalmente definida completamente a partir de nós e elementos. A geometria pode ser categorizada como 1-D, 2-D e 3-D, baseado nas dimensões dominantes e o tipo de elemento selecionado. A tabela a seguir resume todos os tipos de elementos utilizados na maioria das análises (GOKHALE, 2008):

Tabela 6 – Tipos de elementos na criação de malha

Elemento 1-D	Elemento 2-D
	
Uma das dimensões é muito maior que as outras duas. Forma do elemento: <i>line</i>. Dados adicionais do usuário: as duas dimensões restantes. Tipo de elemento: viga, barra, tubo, etc. Aplicações práticas: eixos longos, vigas, elementos de conexão, etc.	Duas das dimensões são muito maiores que a terceira restante. Forma do elemento: <i>quadrangle</i>, <i>triangle</i>. Dados adicionais do usuário: única dimensão restante. Tipo de elemento: casca, chapa, membrana, tensão no plano, etc. Aplicações práticas: chapas metálicas, componentes plásticos, etc.

Elemento 3-D	Outros
	
Todas as dimensões são comparáveis. Forma do elemento: <i>tetra, penta, hex, pyramid.</i> Dados adicionais do usuário: nenhum. Tipo de elemento: sólido. Aplicações práticas: caixa de transmissão, bloco de motor, virabrequim, etc.	Massa: Elemento de ponto, massa concentrada no centro de gravidade do componente. Mola: rigidez translacional e rotacional. Amortecedor: coeficiente de amortecimento. Gap: distância do <i>gap</i>, rigidez, fricção. Rígido: <i>RBE2, RBE3.</i> Solda.

Fonte: (GOKHALE, 2008)

2.2.3.2 Tamanho dos elementos

De acordo com Gokhale (2008), para decidir o tamanho do elemento na malha, três pontos precisam ser analisados:

- Experiência com problemas similares;
- Tipo de análise: Uma análise estática linear pode ser facilmente realizada com uma malha com alta quantidade de nós e elementos, já uma análise não linear, CFD ou dinâmica consumiria muito tempo. Nesses casos, manter o controle no número de nós e elementos é necessário.
- Configuração do *hardware* e capacidade da placa de vídeo. É importante saber o limite da quantidade de nós e elementos que podem ser utilizados na análise de forma satisfatória com a configuração disponível.

Uma prática muito utilizada é, na primeira tentativa, utilizar a malha com as configurações padrões de tamanho, observar os resultados e logo em seguida, analisar quais são as áreas concentradoras de tensão refazendo a malha com elementos menores nessas zonas localizadas. Comparar os resultados da

simulação original e os novos resultados e continuar este processo até alcançar um valor de convergência (5 a 10% de diferença no máximo valor de tensão) (GOKHALE, 2008).

2.2.4 Matriz de rigidez

Rigidez é basicamente a força necessária para produzir o deslocamento de um dado ponto. A rigidez depende tanto da geometria como das propriedades do material do objeto em estudo, e é uma propriedade muito importante no caso de uma análise estrutural (GOKHALE, 2008).

A equação para uma análise linear estática de uma estrutura é

$$\{F\} = [K]\{D\} \quad (33)$$

onde,

$\{F\}$ = vetor das forças generalizadas do sistema;

$[K]$ = matriz de rigidez do sistema;

$\{D\}$ = vetor dos deslocamentos do sistema.

Propriedades da matriz de rigidez:

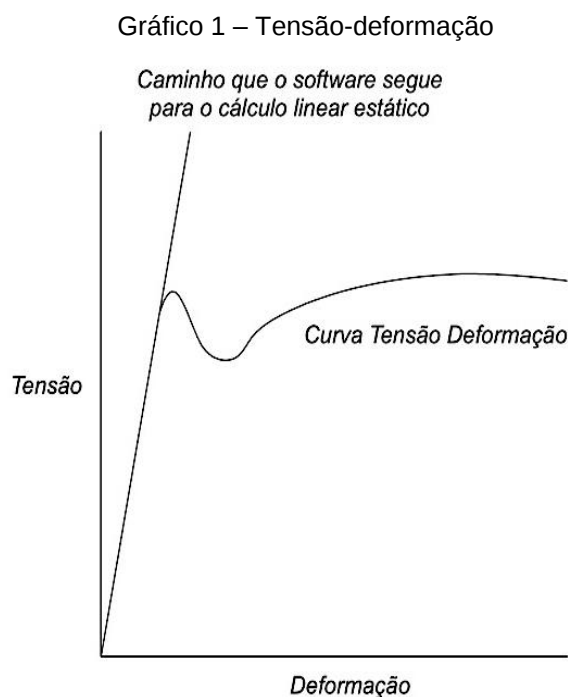
- a) A sua ordem indica a quantidade de graus de liberdade do sistema;
- b) Quando a matriz de rigidez é singular, isso significa que a estrutura está sem restrições e com movimento de corpo rígido;
- c) Cada coluna da matriz de rigidez é um conjunto de equilíbrio de forças nodais necessárias para produzir o respectivo grau de liberdade unitário;
- d) Quando a matriz de rigidez é simétrica, isso significa que a força é diretamente proporcional ao deslocamento;
- e) Os termos diagonais da matriz de rigidez são sempre positivos, ou seja, uma força na direção esquerda não poderá causar um deslocamento na direção direita. Termos na diagonal serão zero ou negativos somente quando a estrutura for instável.

2.2.5 Análise linear estática

Como o nome já diz, a análise é linear e se comporta através da função $\sigma = \varepsilon \cdot E$, passando pela origem. E , o Módulo de Elasticidade, é a inclinação da curva e por isso, uma constante. Na prática, depois de ultrapassar o ponto da tensão de escoamento, o comportamento do material segue por uma curva não-linear, mas o *software* continua na mesma reta. Ou seja, se certa estrutura quebra em duas partes depois de cruzar o valor de tensão última, no programa ele será mostrado inteiro, porém com uma zona de cor vermelha no local da falha. Então cabe ao usuário avaliar se o componente passa pelos critérios de segurança estabelecidos ou se a estrutura irá falhar (GOKHALE, 2008).

Existem duas condições para a análise estática:

- a) Força constante durante todo o tempo (*dead weight*);
- b) Condição de equilíbrio, $\sum Forças = 0$, $\sum Momentos = 0$.



Fonte: (GOKHALE, 2008)

2.2.5.1 Solucionadores lineares estáticos

A Tabela 7 sumariza as principais propriedades dos tipos de solucionadores nessa análise.

Tabela 7 – Tipos de solucionadores

Direto	Iterativo
Baseado na solução matemática da equação: $\{F\} = [K]\{D\}$.	Baseado em assumir um valor variável até que a equação seguinte seja satisfeita: $\{F\} - [K]\{D\} = 0$.
Solução garantida.	Solução não garantida.
Tipos de elementos: casca, barra, sólido e a combinação de diferentes elementos.	Tipos de elementos: recomendado para elementos tetraédricos.

Fonte: (GOKHALE, 2008)

3 METODOLOGIA

Tendo sido apresentadas, em linhas gerais, os embasamentos teóricos pertinentes para a realização deste projeto, esta seção propõe-se a descrever como foram tomadas as decisões relativas as dimensões e condições de projeto do tanque, e posteriormente, a sua análise estrutural por elementos finitos.

3.1 PROJETO EM ESTUDO

O projeto do tanque em estudo neste trabalho foi desenvolvido pelo autor concomitantemente com a *EMYPRO*, empresa de construção mecânica que fica situada na região metropolitana do Recife. Este trabalho foi solicitado por uma empresa multinacional de armazenamento de grânéis líquidos localizada no Porto de Suape.

O tanque de gasolina foi projetado conforme as normas N-270, NBR 7821, *Tankanlagen 960* e, principalmente, a API 650. Para os desenhos 2D, foi utilizado o software AutoCAD 2017, e para a modelagem 3D, o *NX Unigraphics* e o *Discovery Spaceclaim*. Para os cálculos analíticos foram desenvolvidas planilhas no *Microsoft Excel*.

3.2 TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE GASOLINA COM TETO FIXO E TETO FLUTUANTE INTERNO

A definição do tanque se deu pela Tabela 1 da norma N-270 que indica recomendações a cerca do tipo de tanque a ser utilizado de acordo com o produto que será armazenado. Desta forma, foi definido que o tanque será de teto fixo com teto flutuante interno.

3.2.1 Dados de projeto

Devido ao histórico e experiência da *EMYPRO* com projetos desse tipo, alguns dados foram definidos por questões usuais e por algumas condições

solicitadas pelo cliente. A seguir é apresentada a Tabela 8 com os dados que serviram como ponto de partida do projeto:

Tabela 8 – Dados de projeto

Tipo:	Tanque de teto fixo com teto flutuante interno
Diâmetro do tanque:	28,630 m
Altura do tanque:	21,960 m
Capacidade total:	14,137 m ³
Número de anéis:	9
Produto armazenado:	Gasolina
Densidade relativa do produto:	0,76
Densidade relativa de projeto:	1
Pressão de operação:	1 atm
Pressão de projeto:	150 mmca / -25,4 mmca
Temperatura de operação:	28 °C
Temperatura de projeto:	80 °C
Corrosão admissível:	1 mm

Fonte: O Autor

3.2.2 Materiais de construção

Um dos fatores de grande influência na construção do tanque é a escolha do aço para sua construção. Neste caso, onde é sabido que o tanque de armazenamento irá operar com hidrocarbonetos, os materiais foram definidos conforme as tabelas disponibilizadas pela API 650, tanto para as chapas quanto para os perfis estruturais.

A Tabela 9 mostra um resumo dos materiais que foram escolhidos e onde serão utilizados. As Tabelas 10 e 11 exibem as principais propriedades mecânicas de cada um deles.

Tabela 9 – Resumo dos materiais escolhidos

Componente	Componente	Material escolhido
Fundo	Chapas do lençol central	ASTM A283 Gr. C
	Chapas anulares	ASTM A283 Gr. C
Costado	Chapas do costado	ASTM A283 Gr. C
	Cantoneira do topo	EN 10025 Gr. S275 JR
Teto	Chapas do teto	ASTM A283 Gr. C
	Perfis estruturais	EN 10025 Gr. S275 JR

Fonte: O Autor

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A283 Gr. C

ASTM A283 Gr. C	
Tensão Última (S_u)	380-515 MPa
Tensão de Escoamento (S_y)	205 MPa
Tensão Admissível (S_{adm})	137 MPa
Elongação mínima, % 200 mm	22
Elongação mínima, % 50 mm	25

Fonte: (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013)

Tabela 11 – Propriedades mecânicas do aço EN 10025 S275 JR

EN 10025 S275 JR	
Tensão Última (S_u)	410-560 MPa
Tensão de Escoamento (S_y)	205 MPa
Tensão Admissível (S_{adm})	137 MPa
Elongação mínima, %	23

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)

3.2.3 Projeto do fundo

O fundo foi projetado conforme as normas API 650 e a N-270. A declividade adotada é voltada para o centro, com o valor máximo permitido por norma de 1:25. Quanto ao arranjo das chapas, foi definido que serão utilizadas chapas anulares.

De acordo com a Tabela 2, a espessura mínima permitida para as chapas anulares, neste caso, seria de 6 mm, pois a tensão no primeiro anel do costado é de 137 MPa e sua espessura é de 23 mm, como será mostrado no próximo tópico. Porém, de forma conservativa, uma espessura de 9,5 mm foi utilizada. Quanto as chapas do lençol central, foram adotadas chapas comerciais de 6,35 mm de espessura, valor mínimo estabelecido pela norma.

Em relação aos arranjos e disposições dos elementos do fundo, todos foram projetados conforme as práticas recomendadas expostas nas Figuras 1 e 2 retiradas da norma N-270 da Petrobras.

3.2.4 Projeto do costado

As espessuras das chapas do costado foram calculadas e definidas apenas através dos dois métodos descritos nos tópicos 2.1.4.1 e 2.1.4.2 e de condições solicitadas pelo cliente. De forma mais conservativa, para efeito de cálculo, a altura máxima do líquido adotada será igual a altura do tanque, 21,96 m. Quanto a corrosão admissível, tanto para o costado como para o restante do tanque, o valor definido foi de 1 mm. Dado os dados de entrada: $D = 28,63$ m; $H = 21,96$ m; $G = 1,0$; $CA = 1$ mm; $S_d = 137$ MPa; $S_t = 154$ MPa, foram obtidos os valores da Tabela 12:

Tabela 12 – Espessuras do costado

	One-Foot Method (mm)	Variable- Design- Point Method (mm)	Espessuras sugeridas conforme API 650 (mm)	Espessuras definidas pela EMYPRO (mm)
Anel 1	23,18	23,18	24,00	23,00
Anel 2	20,68	20,33	21,00	20,00
Anel 3	18,18	17,88	18,00	18,00
Anel 4	15,68	15,42	16,00	15,00
Anel 5	13,19	12,98	13,00	12,50
Anel 6	10,69	10,53	11,00	10,00
Anel 7	8,19	8,10	9,00	8,00
Anel 8	5,69	5,67	6,35	8,00
Anel 9	3,19	3,27	6,35	8,00

Fonte: O Autor

É possível observar que a divergência entre os métodos para tanques de médio porte é bastante sutil. Essa diferença iria se acentuar no caso de tanques com diâmetro maior ou igual a 60 m, onde o *One-Foot Method* iria resultar em espessuras mais conservadoras e consequentemente uma maior taxa de aço para o equipamento.

Como já citado, a norma API 650 determina que a espessura mínima da chapa no costado deve ser de 6,35 mm para tanques de diâmetro maior ou igual a 15 m e menor que 36 m. Desta forma, temos os valores mostrados na terceira coluna da Tabela 9. Quanto à empresa *EMYPRO*, a definição das espessuras foi feita com base no cálculo por meio do *Variable-Design-Point Method* juntamente

com as opções de chapa disponibilizadas no mercado. É importante citar que algumas das espessuras definidas pela *EMYPRO* são menores que as encontradas nos cálculos da API 650. Para este caso, isto não seria um problema, visto que foi utilizada uma altura de líquido de 21,96 m, situação esta que não iria ocorrer na realidade, adicionando, portanto, uma maior margem de segurança ao costado. Mais adiante serão vistas análises comparativas de cada caso através do Método dos Elementos Finitos.

Em relação a sua geometria, o costado foi projetado atendendo todas as especificações recomendadas pela norma N-270. A disposição das chapas foi feita com alinhamento pela face interna. Para a planificação do costado, o tanque foi desenvolvido a partir do diâmetro médio considerando um espaçamento de 3 mm para as soldas.

A cantoneira de topo do costado selecionada tem 4" x 7/16" (102 mm x 11 mm) conferindo maior rigidez para a parte superior do último anel do costado. A configuração adotada para a cantoneira foi a Configuração 2 exibida na Figura 7 no ponto 2.1.5.5.

3.2.5 Projeto do teto

O projeto do teto pode ser dividido em duas partes: chapas e estrutura. O dimensionamento das chapas foi feito conforme a norma N-270. A espessura adotada foi a mínima permitida por norma, igual a 4,75 mm.

O fator de curvatura adotado no teto foi de 1,2 vezes o diâmetro do tanque, maior valor permitido por norma. O teto é autoportante e sua estrutura de sustentação é composta de vigas radiais soldadas a um anel central conforme presente em (VDTÜV, 2002).

Como supracitado em 2.1.5.4, devido ao tamanho do diâmetro do tanque, se faz necessário também a utilização de quatro anéis de sustentação que têm a função de dar maior rigidez às vigas radiais.

A norma *Tankanlagen 960* mostra uma análise facilitada para a construção do teto, afirmando que o estudo de confiabilidade não precisa ser realizado para toda a estrutura, mas somente para as vigas radiais e o anel central sob a influência de combinações de cargas simplificadas. Esta análise consiste em várias equações de

validação definidas através de experiências prévias de fabricantes, operadores e centros de testes.

Para as vigas radiais, a empresa *EMYPRO* definiu que a espessura mínima da alma do perfil a ser utilizado seria de 5,5 mm. Esta definição foi baseada na norma API 650, que recomenda, para membros estruturais, uma espessura mínima nominal de 4,3 mm, e uma espessura mínima corroída de 2,4 mm. Na próxima seção, serão mostradas algumas análises por meio de elementos finitos, mostrando a relevância do valor da espessura do perfil na sustentação do teto.

O perfil da viga radial selecionado foi um perfil laminado tipo I conforme a DIN 1025-5, o IPE 160 R. O seu dimensionamento foi feito através das Equações 12 até 22, previamente citadas na fundamentação teórica. Logo em seguida, foram definidas as espessuras da coroa e postas para avaliação através das equações em 2.1.5.3. O memorial de cálculo para a estrutura do teto pode ser encontrado no Anexo A.

Quanto aos perfis dos anéis poligonais, para os dois mais afastados do costado, o perfil selecionado foi o perfil UPN 80, e para os mais próximos do costado, o perfil selecionado foi o perfil UPN 100, conforme (BRITISH STANDARD, 2000).

Por fim, foi realizada a verificação do anel de compressão da junção do costado e teto através da Equação 32, garantindo assim a rigidez necessária para a sustentação do teto.

3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL POR ELEMENTOS FINITOS

A análise estrutural por elementos finitos foi feita através do *software ANSYS*, por meio do pacote *Static Structural*. O *ANSYS* é um programa de computador de elementos finitos e é capaz de realizar análises estáticas, dinâmicas, de transmissão de calor, de escoamento de fluidos, e eletromagnetismo. Atualmente, é possível encontrar o *software ANSYS* em uso em diversas áreas da engenharia, incluindo a indústria aeroespacial, automotiva, eletrônica e nuclear. (MOAVENI, 1999)

Para a correção, simplificação e ajuste da geometria dos componentes analisados, foi utilizado o *Discovery Spaceclaim*, que faz parte do conjunto de aplicativos oferecidos pelo próprio *ANSYS*. Este *software* é baseado no conceito de

modelagem direta, onde são utilizadas ferramentas intuitivas de fácil aprendizado e alto potencial de modelagem.

É importante ressaltar que o pacote *Static Structural* se trata de uma análise linear estática, onde, após definida a geometria do elemento, é necessário construir a malha que mais se adapte ao estudo, determinar as condições de contorno e por fim, extrair os resultados relevantes para análise.

Foram feitas duas análises dos componentes do tanque com elementos de malha e condições de contorno variadas. Estas análises serão divididas da seguinte maneira:

Tabela 13 – Análises realizadas no ANSYS

Análises	Componentes em estudo	Tipo de elemento	Foco
Análise I	Fundo e costado	Casca	- Tensões no costado e no fundo; - Influência dos métodos de definição das espessuras das chapas do costado; - Teste hidrostático.
Análise II	Estrutura do teto	Casca	- Sustentação e rigidez da estrutura; - Influência da corrosão;

Fonte: O Autor

É possível notar que para todas as análises, a geometria foi simplificada a uma superfície 2D, ou seja, transformada em um elemento de casca. Este tipo de elemento requer o *input* do usuário para a dimensão que corresponde a espessura do objeto. Isto foi feito com o intuito de facilitar as variações da análise, reduzir as interferências e geometrias complexas que podem ser observadas em um elemento 3D, e conseqüentemente, minimizar o esforço computacional, visto que o tanque é um equipamento de grande porte.

3.3.1 Preparação do modelo 3D para análise pelo Método dos Elementos Finitos

Um dos principais objetivos da elaboração do modelo em 3D é a possibilidade de visualização de forma geral do equipamento para posterior adequação às análises que serão realizadas. Para todas as análises, esta adequação foi feita através do *software Discovery Spaceclaim*. Por se tratar de um equipamento de grande porte, a preparação dos modelos foi feita com base na quantidade de elementos que seriam gerados pelo ANSYS, os componentes que seriam analisados e a complexidade da geometria.

3.3.1.1 Simplificação do modelo para a Análise I

Como o foco da Análise I é o estudo do costado, para menor exigência computacional, todo o teto foi removido da análise por dois motivos: a influência do teto nas tensões equivalentes máximas do costado não é tão significativa; menor quantidade de elementos a serem gerados. Outra medida adotada foi a simplificação do arranjo do fundo, todas as chapas do lençol central e anulares foram substituídas por uma única chapa uniforme de espessura de 6,35 e 9,5 mm, respectivamente. O mesmo se aplicou para o costado, as oito chapas que compõem cada anel foram transformadas em uma única.

Como a espessura é muito menor do que as outras duas dimensões de cada componente, foram gerados então elementos de casca, onde ficou a critério do autor fazer o *input* da terceira dimensão restante. Desta forma, diminuindo de maneira significativa o tempo de duração de cada simulação.

3.3.1.2 Simplificação do modelo para a Análise II

Por se tratar de um equipamento de grande porte, tornou-se inviável a realização de qualquer tipo de simulação da estrutura do tanque por completo. A solução adotada para isso foi a utilização do recurso de simetria cíclica do próprio *Workbench* do ANSYS.

Este recurso reduz significativamente o tempo computacional e exibe uma análise da estrutura inteira, utilizando somente uma fatia do componente. Como a

estrutura do tanque é totalmente simétrica, o tanque foi dividido em 52 partes iguais, mesmo número de vigas radiais, e somente uma foi necessária para a realização das simulações.

Apesar da redução significativa de elementos para processamento, ainda se fez necessária a transformação dos elementos em elementos do tipo casca e a junção das pétalas do teto em uma única chapa conformada.

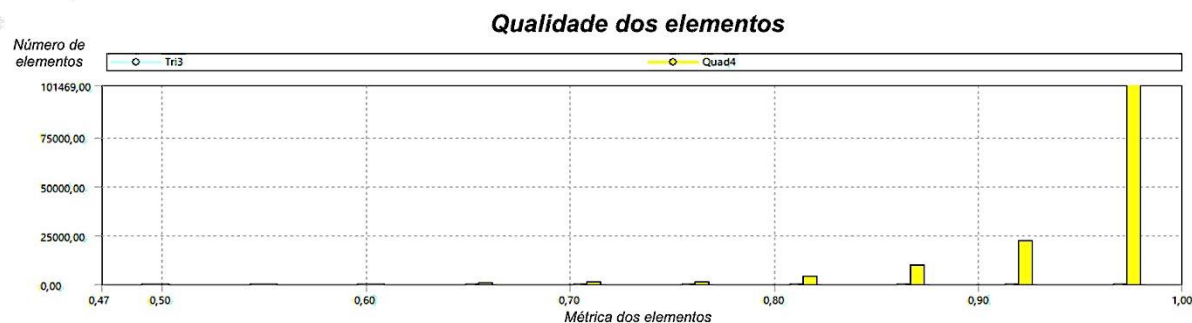
3.3.2 Estudo de convergência de malha

No Método dos Elementos Finitos, a precisão da análise dependerá integralmente da quantidade de nós, de elementos, do tamanho e dos tipos de elemento da malha. É necessário, então, um estudo rigoroso sobre a sua criação para que se tenha resultados satisfatórios e convergentes. É fácil perceber que quanto menor o tamanho do elemento de malha, maior será a precisão do resultado. Mas não se deve levar somente isso em conta, o ideal é encontrar um balanço entre o esforço computacional exigido e a qualidade dos resultados. Baseado nisso, foram realizados os estudos de malha para as duas análises supracitadas.

3.3.2.1 Estudo de malha para a Análise I

Para a Análise I, o método de controle usado foi o *Quad Dominant*, onde são gerados, em sua grande maioria, elementos da forma *quadrangle*. Pois apesar do objeto em estudo ser de grande porte, a sua geometria é simples e simétrica. A partir disso, foi selecionada a função de tamanho *Curvature* para realizar a criação da malha, devido a sua melhor adaptação à geometria, e consequentemente, maior velocidade de processamento. Esta função disponibiliza como parâmetros: o ângulo normal de curvatura; o tamanho das arestas do elemento; o tamanho máximo das faces do elemento; e a taxa de crescimento. Depois de gerada a malha, é possível, no próprio ANSYS, realizar uma verificação da qualidade dos elementos gerados, também como a sua quantidade de acordo com a forma. O Gráfico 2 mostra como é demonstrada esta verificação a partir do que foi definido para a análise.

Gráfico 2 - Qualidade dos elementos Análise I



Fonte: O Autor

Através do gráfico, é possível notar que a quantidade de elementos *triangle* é irrisória, isso ocorre devido ao método de controle utilizado. Pode-se considerar também que a qualidade da malha está satisfatória, visto que mais de 95% dos elementos se encontram entre 80% a 100% de sua métrica. Isso quer dizer que a maioria dos elementos se aproxima de um cubo perfeito.

Os mesmos critérios e definições foram usados para todas as variações da Análise I. Desta maneira, para ilustrar este tópico, todos os resultados aqui presentes foram retirados da simulação adotando o valor de espessura corroída do costado calculado através do *One-Foot-Method*.

O estudo da malha foi guiado pelos sucessivos resultados encontrados através da manipulação dos valores da menor aresta e do maior tamanho de face dos elementos. Esses resultados estão exibidos na tabela a seguir:

Tabela 14 – Tabela de convergência da Análise I

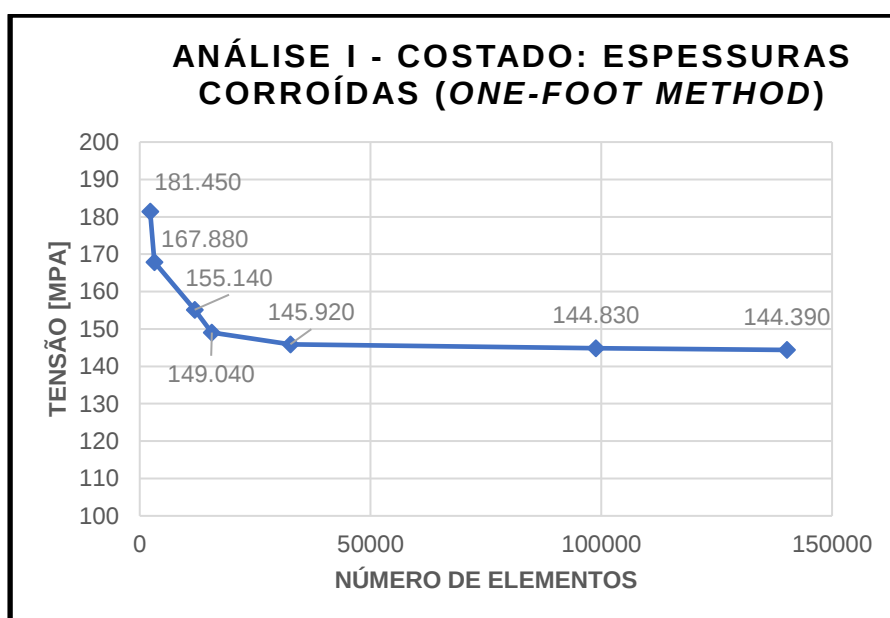
Análise I – Espessuras corroídas calculadas através do <i>One-Foot-Method</i>					
#	Mín. aresta [mm]	Máx. face [mm]	Tensão Máx. [MPa]	Divergência	Nº Elementos
1	120	1200	181,450	-	2254
2	100	1000	167,880	-7,48%	3162
3	50	500	155,140	-7,59%	11902
4	42,5	425	149,040	-3,93%	15621
5	42,5 (Ref. 1)	425 (Ref. 1)	145,920	-2,09%	32648
6	42,5 (Ref. 2)	425 (Ref. 2)	144,830	-0,75%	98828
7	42,5 (Ref. 3)	425 (Ref. 3)	144,390	-0,30%	140198

Fonte: O Autor

A Tabela 11 mostra que, a partir da simulação de número 3, o tamanho mínimo das arestas do elemento e o tamanho máximo das faces do elemento não sofreram mais alterações. Isso ocorreu devido ao fato de que a divergência em relação à simulação anterior atingiu 3,93%, sendo, portanto, um valor satisfatório para a avaliação da convergência. Em seguida, foi aplicado um Refinamento (Ref.), outro método de controle, nas regiões com maior concentração de tensões. Este método possui três níveis de refinamento, representados do número 1 ao 3, e atua basicamente na redução do tamanho mínimo dos elementos.

Por meio da Tabela 11 foi plotado então o gráfico a seguir:

Gráfico 3 – Curva de convergência da Análise I



Fonte: O Autor

Todos os outros parâmetros não citados foram configurados como *Default* ou *Program Controlled*, isto é, o próprio *software* realizou a definição de forma automática.

3.3.2.2 Estudo de malha para a Análise II

Para a Análise II, o método de controle utilizado para geração da malha foi o mesmo utilizado para a Análise I, o *Quad Dominant*. Embora seja mais fácil, em termos de esforço computacional, utilizar elementos triangulares para a geração da malha, no caso de análises gerais onde existe um alto gradiente de deformação, é

necessária uma quantidade muito maior de elementos para poder alcançar um resultado preciso. Isso se dá pelo fato de que o *triangle* é um elemento de maior simplicidade em comparação ao *quadrangle*.

A tabela abaixo exhibe o passo a passo realizado para encontrar um ponto satisfatório de convergência para a análise em estudo através do método de controle *Curvature*, onde a cada simulação foram feitas modificações nos valores de menor aresta e maior tamanho de face dos elementos:

Tabela 15 – Tabela de convergência da Análise II

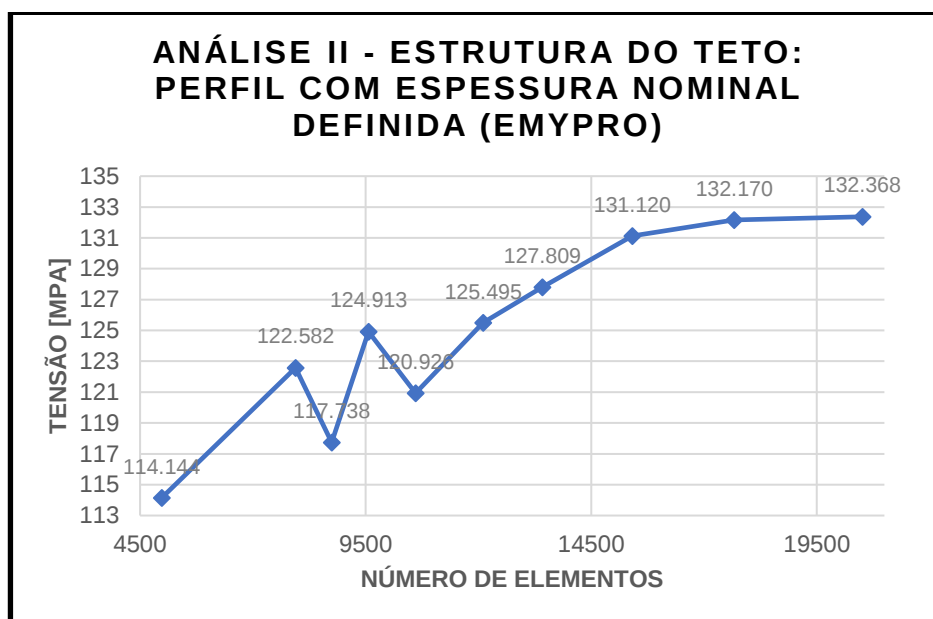
Análise II – Estrutura do teto: Perfil com espessura nominal definida (EMYPRO)					
#	Mín. aresta [mm]	Máx. face [mm]	Tensão Máx. [MPa]	Divergência	Nº Elementos
1	<i>Default</i>	<i>Default</i>	114,144	-	4978
2	20	100	122,582	7,39%	7947
3	19	95	117,738	3,95%	8746
4	18	90	124,913	6,09%	9566
5	17	85	120,926	-3,19%	10606
6	16	80	125,495	3,78%	12107
7	15	75	127,809	1,84%	13419
8	14	70	131,120	2,59%	15411
9	13	65	132,170	0,80%	17670
10	12	60	132,368	0,15%	20509

Fonte: O Autor

Neste caso, a partir do segundo resultado já foi atingido um valor razoável de divergência. Portanto, não se fez necessário nenhum recurso de refinamento adicional, somente a variação do tamanho do elemento através dos critérios disponibilizados pelo método de controle.

Por meio da Tabela 12, foi plotado então o gráfico a seguir:

Gráfico 4 – Curva de convergência da Análise II



Fonte: O Autor

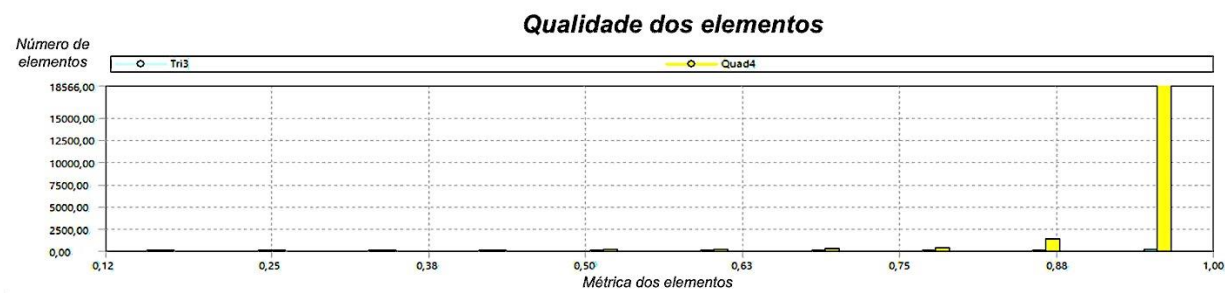
Como já mostrado, para esta análise, fez-se necessário o uso de um recurso de simetria cilíndrica. Este recurso foi utilizado considerando o esforço computacional que seria dedicado ao estudo, visto que a estrutura do tanque é composta de:

- 52 vigas radiais de perfil IPE 160 R;
- 4 anéis poligonais, totalizando 104 vigas de perfil UPN 100 e 104 vigas de perfil UPN 80;
- 104 chapas de 10 mm para conexão ao costado;
- coroa central de fixação das vigas radiais;
- anel central conforme (VDTÜV, 2002);
- tampo no formato de “chapéu chinês” feito através de chapa de 6,35 mm de espessura.

Desta forma, é possível perceber que a utilização do método de controle *Quad Dominant* se fez necessária, pois a simulação conseguiu atingir um valor satisfatório de convergência com uma quantidade razoável de elementos.

Por fim, foi realizada a verificação da qualidade dos elementos da malha através do gráfico gerado automaticamente pelo próprio *ANSYS*.

Gráfico 5 - Qualidade dos elementos Análise II



Fonte: O Autor

3.3.3 Condições de contorno e carregamento

Ainda no pré-processamento, o próximo passo é determinar as condições iniciais, as condições de contorno, os contatos entre componentes e as cargas a serem aplicadas na análise. Nas duas análises realizadas neste trabalho, as condições de contorno e carregamento foram estabelecidas de forma variada, em razão dos diferentes componentes que foram estudados e o próprio foco da análise.

A Tabela 13 apresenta um resumo geral simplificado das condições de contorno e carregamento utilizadas em cada análise:

Tabela 16 – Resumo geral das condições de contorno

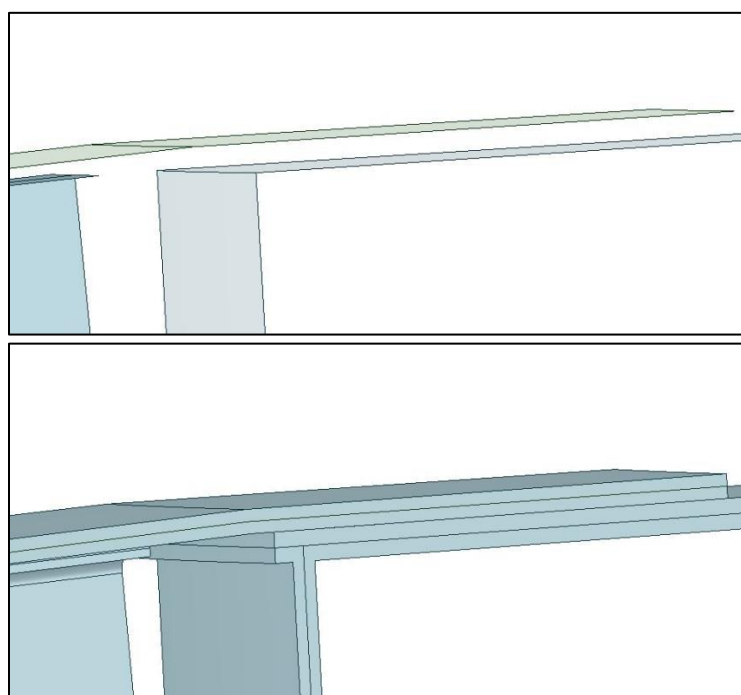
Análise I	Análise II
- Apoio fixo no fundo do tanque; - Aceleração da gravidade; - Pressão hidrostática aplicada ao fundo e o costado com altura de 21,96 m; - Peso total do teto aplicado ao último anel do costado;	- Apoio fixo no fundo do tanque; - Aceleração da gravidade; - Pressão dinâmica sobre o teto considerada, 827,19 N/m²; - Diferença da pressão de sobrecarga de uso e da pressão de flambagem, aproximadamente 383 N/m²; - Distribuição de massa de 12.400 kg sobre a superfície exterior do teto do tanque, correspondente a uma aproximação do peso das estruturas que serão posteriormente adicionadas, como: bocais, válvulas, guarda corpo e passarelas, etc.

Fonte: O Autor

Na Análise II, nenhuma influência por parte da pressão interna do tanque foi considerada. Esta medida foi adotada com o propósito de realizar a análise na situação mais crítica possível.

Como já supracitado, em todas as análises foram utilizados elementos do tipo casca. E foi através do *software Discovery Spaceclaim* que o elemento sólido foi transformado em um elemento de superfície. O método usado pelo *software* é a extração de uma superfície média do componente, deixando para que o usuário faça o *input* da dimensão restante, neste caso, a espessura. À vista disso, é possível perceber que em alguns casos, após a criação do elemento casca, também será criada, como consequência, uma brecha entre os componentes. A Figura 8 exemplifica um desses casos.

Figura 8 – Brecha entre componentes de elemento casca



Fonte: O Autor

O ANSYS se encarrega de, automaticamente, estabelecer um contato do tipo *bonded* entre esses componentes a partir de certa tolerância que pode ser modificada posteriormente pelo usuário. Este tipo de contato foi aplicado em todas as simulações realizadas, a maior parte foi gerada automaticamente pelo próprio *software* e o restante foi configurado manualmente para uma maior adaptação à realidade. Com o uso desse tipo de contato, é possível obter resultados mais

rapidamente e com menos esforço computacional, já que este não apresenta problemas de convergência. É ideal para análises rápidas de montagens de grande porte, que é o caso deste trabalho.

3.4 CONFIGURAÇÃO DA CPU

Um fator que deve sempre ser levado em conta é o esforço computacional necessário para a modelagem e a realização das análises mencionadas. Neste trabalho, a configuração da CPU utilizada para atingir os resultados que serão abordados na próxima seção, se encontra na Tabela 17.

Tabela 17 – Configurações da CPU

Especificações	
Sistema operacional:	<i>Windows® 10 64-bit</i>
Processador:	<i>Intel® Core(TM) i7-8700K @ 3.70 GHz</i>
Memória:	<i>16GB de RAM</i>
Armazenamento:	<i>250GB SSD, 1TB HDD</i>
Placa de vídeo:	<i>NVIDIA® GeForce GTX 970 4GB DDR5</i>

Fonte: O Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

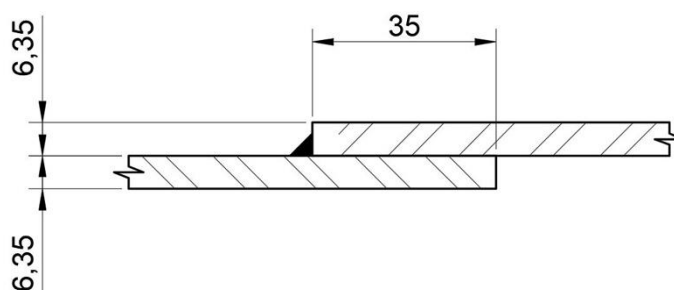
Nesta seção será mostrado como ficou definido o projeto do tanque conforme o que foi abordado na metodologia, assim como os resultados das análises e a sua relevância para o estudo. A interpretação dos resultados se baseou principalmente nas verificações que foram realizadas quanto à integridade estrutural dos componentes e nas análises comparativas a respeito da influência da utilização de componentes com especificações diferentes.

4.1 PROJETO DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO EM ESTUDO

Primeiramente, foram confeccionados desenhos técnicos em 2D por meio do *software AutoCAD LT 2017*. Todos os arranjos e componentes do tanque foram baseados no que foi abordado na seção 2 deste trabalho, conforme as normas N-270, NBR 7821, *Tankanlagen 960* e, principalmente, a API 650.

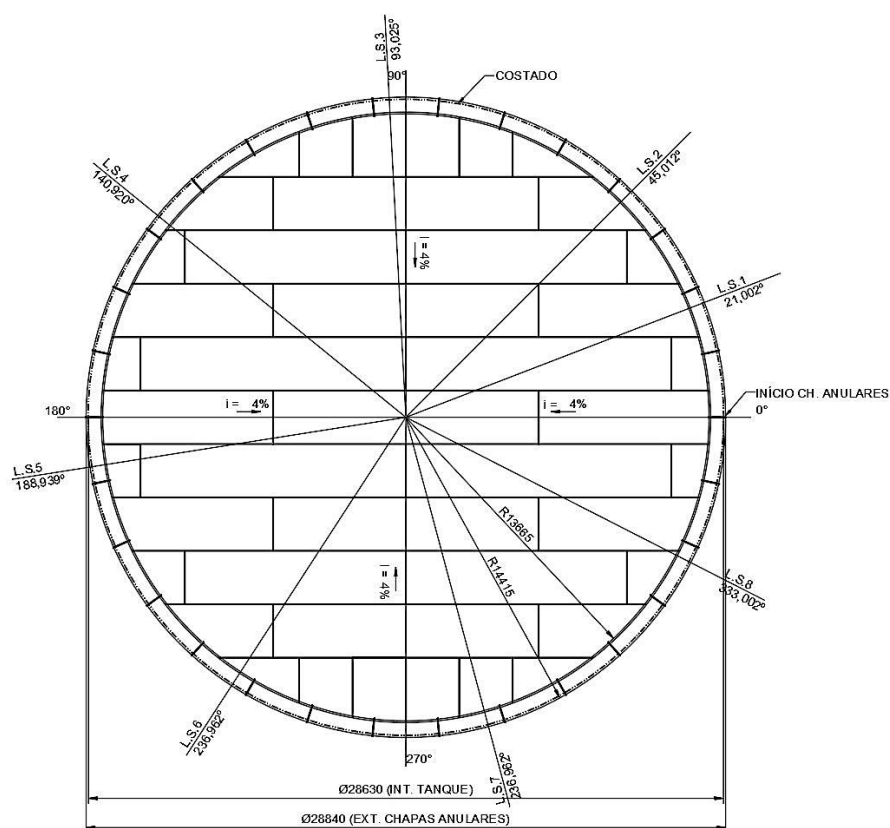
A Figura 10 mostra a planificação do fundo, assim como a configuração das chapas anulares e a posição das linhas de solda do primeiro anel do costado. No lençol central foram utilizadas chapas de 12000 mm por 2400 mm, valores comerciais utilizados no Brasil. A sobreposição das chapas nesta região se deu como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Sobreposição das chapas no lençol central



Fonte: O Autor

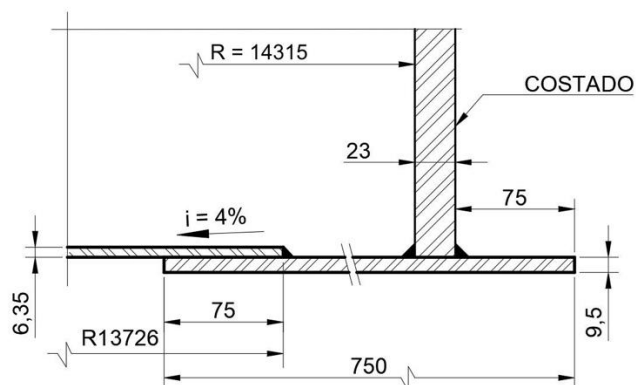
Figura 10 – Planificação do fundo



Fonte: O Autor

A Figura 11 demonstra como foi estabelecida a junção das chapas anulares com as chapas do lençol central. É importante perceber que apesar da declividade do fundo ser voltada para o centro, a configuração adotada foi a utilizada para o caso oposto, a declividade voltada para a periferia do tanque. Isso foi definido em razão da facilidade de montagem, que é significativamente maior neste caso.

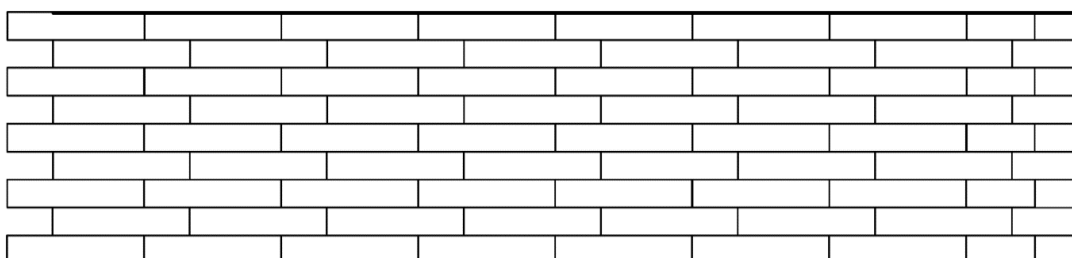
Figura 11 – Sobreposição das chapas do lençol central com as chapas anulares



Fonte: O Autor

Depois de realizado o desenho do fundo do tanque, foi feito então o desenho da planificação do costado. Cada anel foi desenvolvido a partir do seu raio médio, de acordo com a espessura da chapa, como mostra a Tabela 18. Da mesma forma que no projeto do fundo, as chapas utilizadas também foram de 12000 mm por 2440 mm. O distanciamento entre as linhas de solda horizontais das chapas do costado de um anel para o próximo foi adotado conforme a norma N-270, ou seja, um terço do comprimento da chapa, que, neste caso, foi de 4000 mm. Para as soldas verticais e horizontais das chapas do costado, foi utilizado um espaçamento de 3 mm.

Figura 12 – Planificação do costado



Fonte: O Autor

Tabela 18 – Valores para planificação do costado

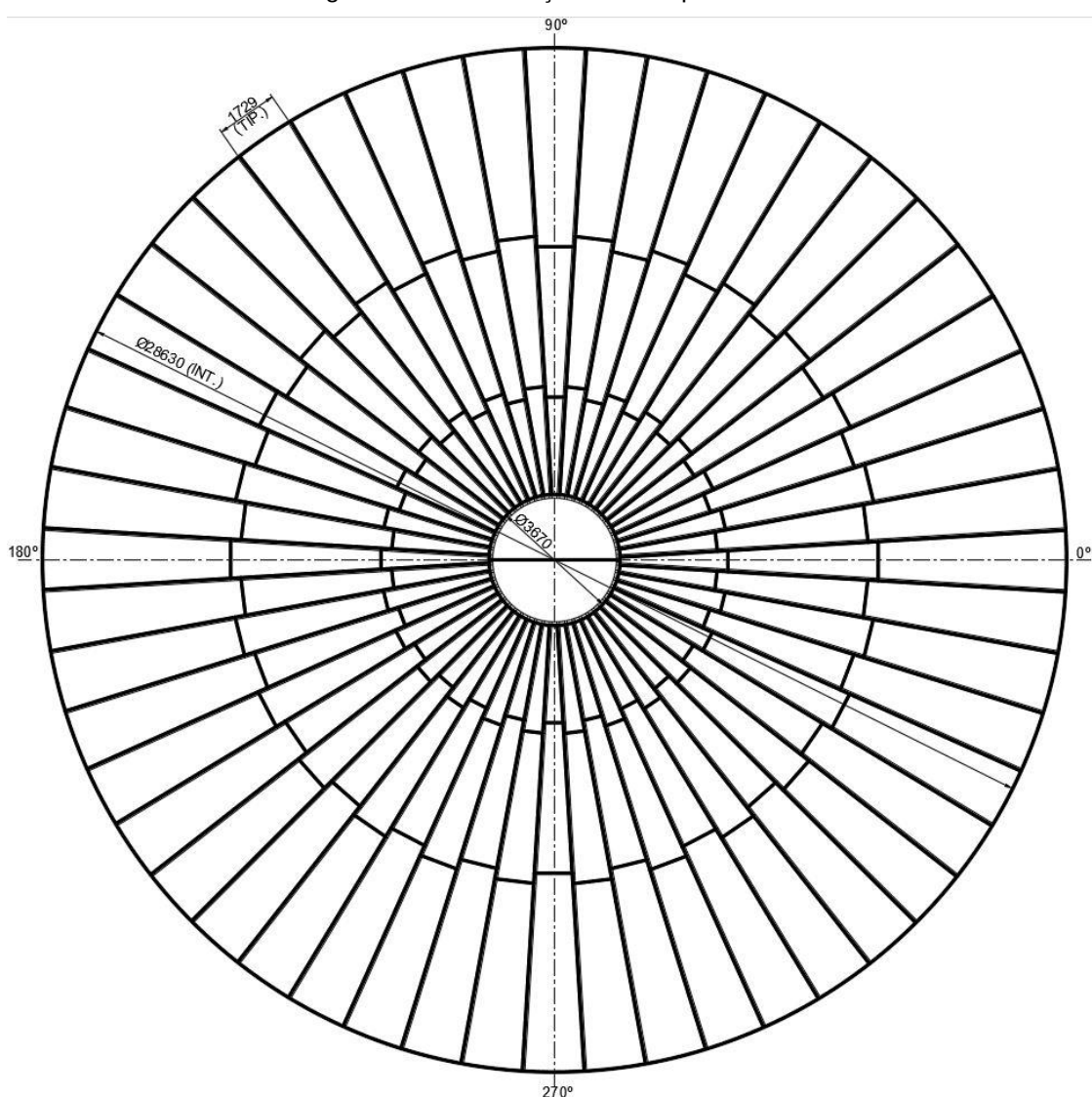
Anel	Descrição	Comprimento aprox. (mm)
1	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5992 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	90016
2	7 chapas de 12000 + 1 chapa de 5983 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	90007
3	7 chapas de 12000 + 1 chapa de 5976 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	90000
4	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5967 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89991
5	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5959 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89983
6	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5951 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89975
7	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5945 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89969
8	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5945 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89969
9	7 chapas de 12000 mm + 1 chapa de 5945 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	89969
Cantoneira de topo	7 canton. de 12000 mm + 1 canton. de 6046 mm + 8 espaçamentos de solda de 3 mm	90046

Fonte: O Autor

O teto flutuante interno escolhido foi o *single wiper seal*, que tem o objetivo de combater a perda por evaporação do tanque e reduzir a emissão de compostos orgânicos voláteis durante a estocagem.

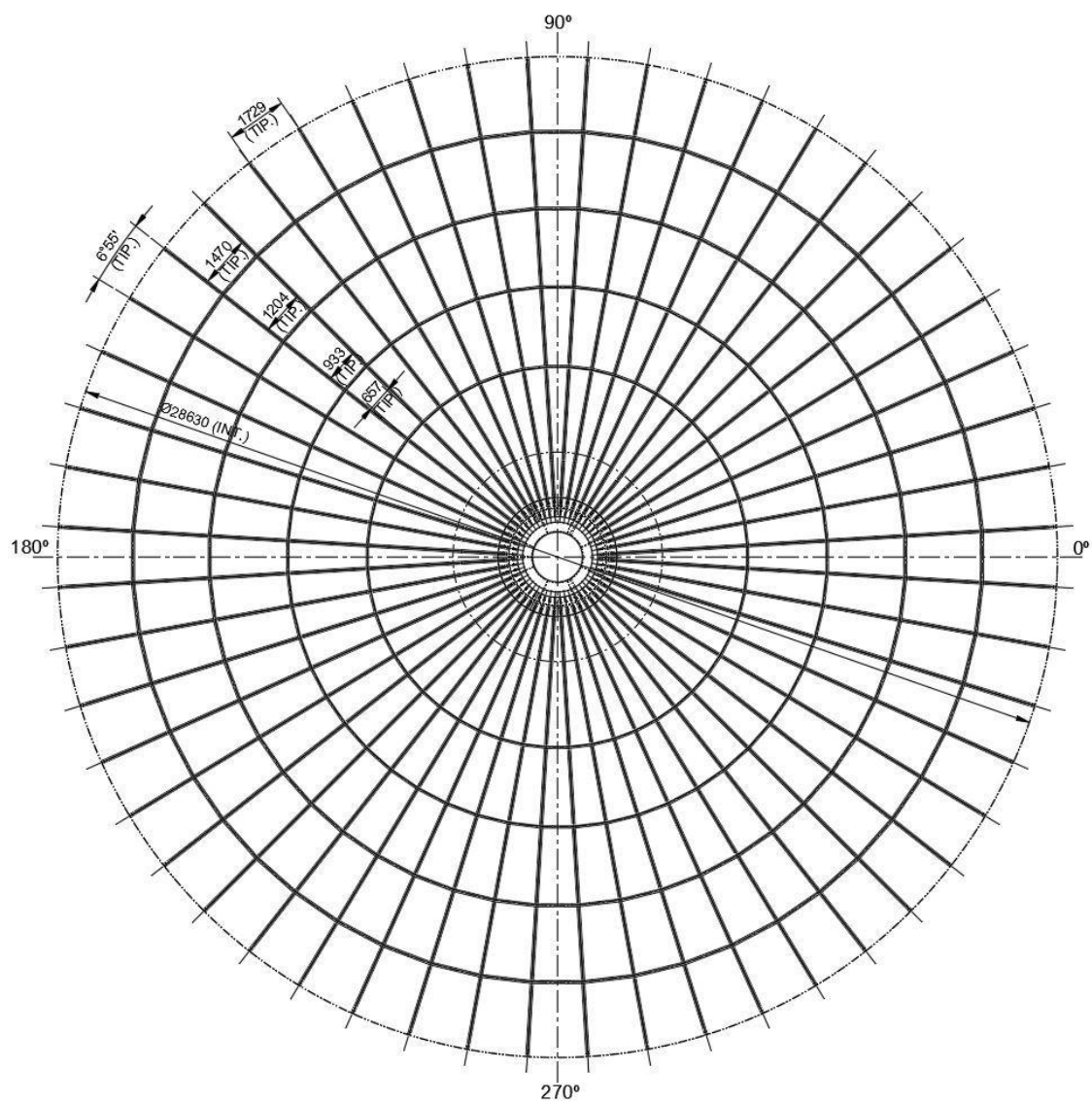
Em respeito ao teto do tanque, foram realizados dois desenhos de planificação: um para a estrutura e outro para as chapas. Neste segundo, também foram utilizadas chapas de 12000 mm por 2440 mm. A estrutura do tanque foi realizada conforme as normas API 650 e *Tankanlagen 960*.

Figura 13 – Planificação das chapas do teto



Fonte: O Autor

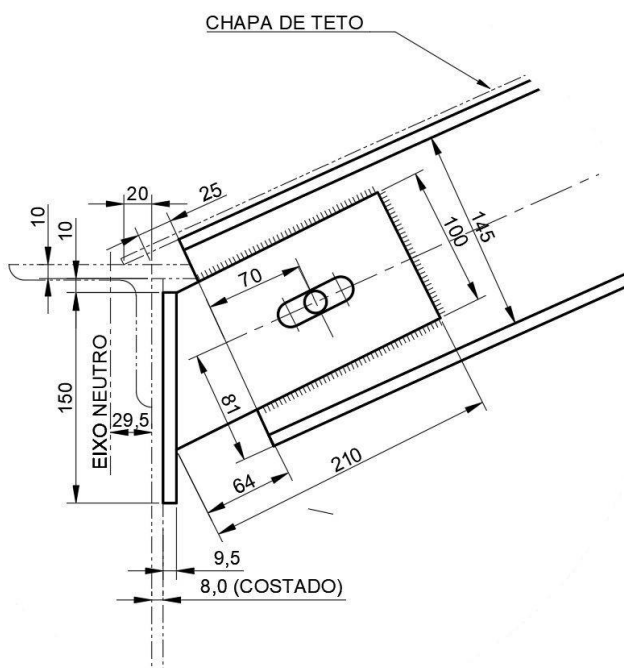
Figura 14 – Planificação da estrutura do teto



Fonte: O Autor

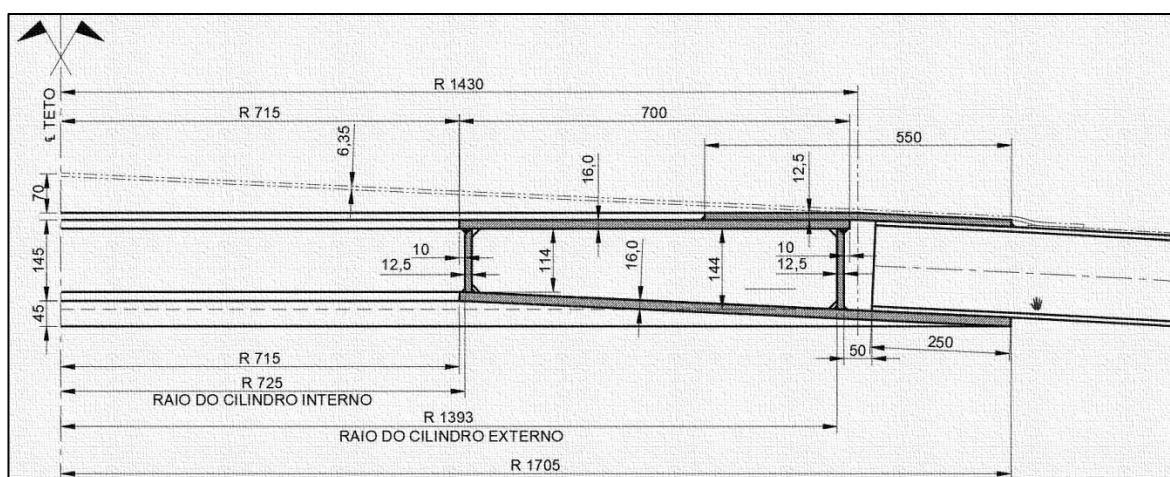
Os detalhes do anel central e da conexão do costado com a estrutura do teto podem ser visualizados nas figuras a seguir:

Figura 15 – Conexão do costado com a estrutura do teto



Fonte: O Autor

Figura 16 – Anel central do teto



Fonte: O Autor

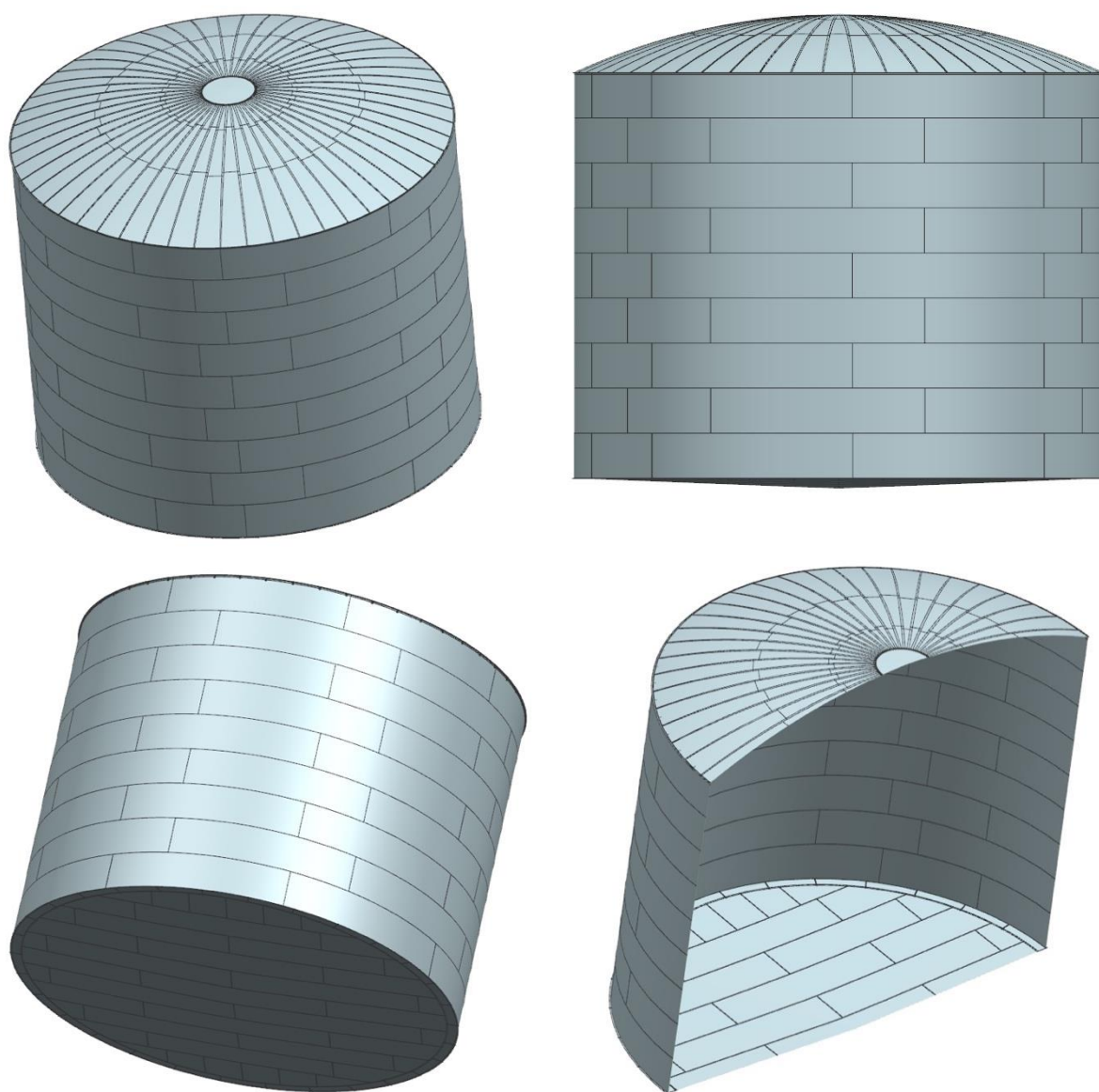
A conexão do costado com a estrutura do teto foi feita através de duas chapas de 9,5 mm de espessura. Nas vigas radiais foram realizados furos oblongos para possibilitar a conexão, como diz a norma N-270 da Petrobras. As chapas do

teto foram soldadas sobre a cantoneira de topo, fornecendo assim, maior rigidez para a estrutura.

Para o chapéu chinês, que repousa sobre a estrutura do anel central, como já citado, foi adotada uma chapa de espessura de 6,35 mm.

A partir do que foi mostrado nas Figuras 9 a 15, foi possível criar o modelo 3D do tanque de armazenamento com o *software NX Unigraphics 11.0*. Este consegue importar os arquivos produzidos pelo *AutoCAD LT 2017*, desta forma facilitando a sua criação.

Figura 17 – Visão geral do modelo em 3D do tanque em estudo

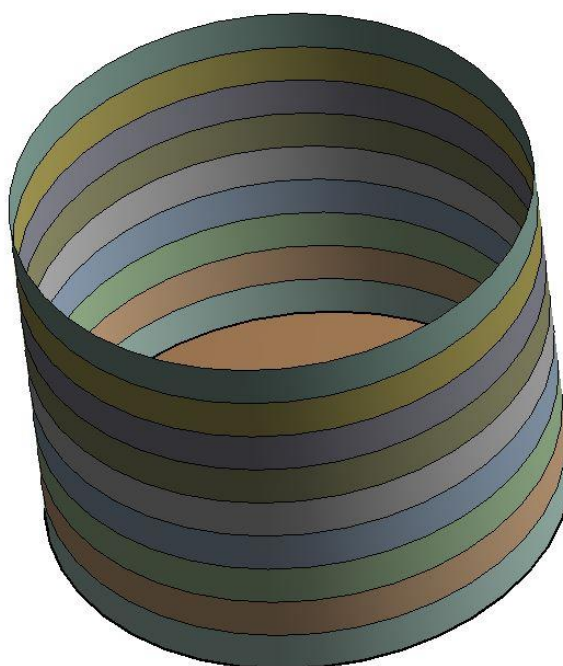


Fonte: O Autor

4.2 ANÁLISE I

Conforme explanado na metodologia, o modelo simplificado para simulação da Análise I consiste, basicamente, no fundo e costado do tanque, totalizando 10 componentes, constante da figura abaixo:

Figura 18 – Visão geral do modelo 3D utilizado na Análise I



Fonte: O Autor

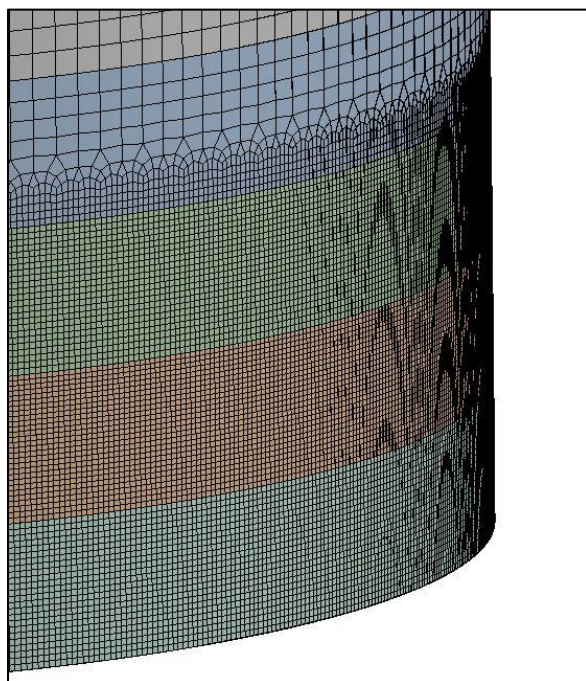
Em seguida, foi realizada a geração da malha, em conjunto com algumas técnicas de refinamento, de acordo com o ponto 3.3.1.1 do presente trabalho. O resultado após a geração pode ser observado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Visão geral da malha gerada na Análise I



Fonte: O Autor

Figura 20 – Detalhe do refinamento da malha gerada na Análise I

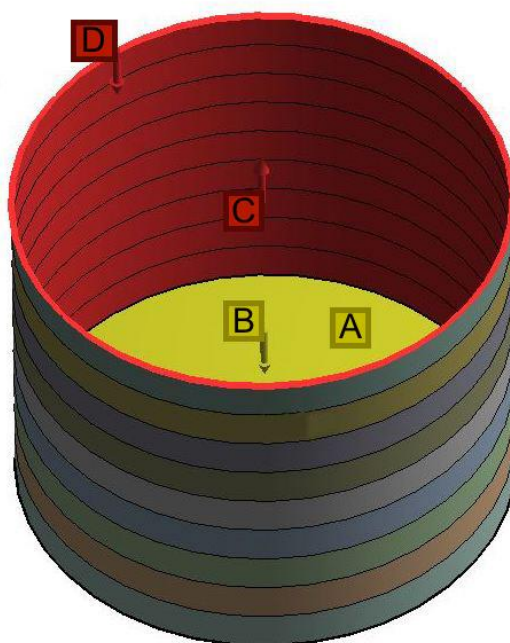


Fonte: O Autor

As condições de contorno e carregamento foram aplicadas visando a situação mais similar aos cálculos de espessura utilizados para o costado, ou seja, a influência do vento foi desconsiderada, assim como as pressões de sobrecarga e

sucção. A Figura 21 mostra os locais de aplicação das condições, e, mais abaixo, uma tabela com sua descrição.

Figura 21 – Condições de contorno e carregamento para a Análise I



Fonte: O Autor

Tabela 19 – Descrição das condições de contorno e carregamento

Condição de contorno	Descrição
A	Fixação do fundo
B	Aceleração da gravidade
C	Pressão hidrostática (altura de líquido = 21,96 m)
D	Peso do teto (aprox. 550 kN)

Fonte: O Autor

A título de ilustração, destaquem-se as Figuras 22, 23 e 24, as quais correspondem aos resultados do deslocamento direcional, à tensão equivalente de Von Mises do costado, e à tensão equivalente de Von Mises no primeiro anel, respectivamente, da simulação 8, descrita na Tabela 20. Os valores das espessuras podem ser visualizados na Tabela 21.

O principal foco é realizar uma comparação quanto aos valores de espessuras calculados e adotados, levando em consideração, também, a corrosão admissível. Portanto, no total, foram realizadas oito simulações. Através do recurso

de *Parameter Set* do ANSYS, as espessuras dos anéis do costado foram definidas como *input* principal. Desta forma, segue o resumo na tabela a seguir:

Tabela 20 – Resumo das simulações da Análise I

Simulação	Descrição
1	Costado com espessura calculada através do <i>One-Foot Method</i>
2	Costado com espessura calculada através do <i>One-Foot Method</i> corroída
3	Costado com espessura calculada através do <i>Variable-Design-Point Method</i>
4	Costado com espessura calculada através do <i>Variable-Design-Point Method</i> corroída
5	Costado com espessura sugerida pela API 650
6	Costado com espessura sugerida pela API 650 corroída
7	Costado com espessura adotada pela <i>EMYPRO</i>
8	Costado com espessura adotada pela <i>EMYPRO</i> corroída

Fonte: O Autor

Tabela 21 – Espessuras de cada anel do costado em cada simulação, valores em mm

		Simulações							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Anéis do costado	1	23,18	22,18	23,18	22,18	24,00	23,00	23,00	22,00
	2	20,68	19,68	20,33	19,33	21,00	22,00	20,00	19,00
	3	18,18	17,18	17,88	16,88	18,00	17,00	18,00	17,00
	4	15,68	14,68	15,42	14,42	16,00	15,00	15,00	14,00
	5	13,19	12,19	12,98	11,98	13,00	12,00	12,50	11,50
	6	10,69	9,69	10,53	9,53	11,00	10,00	10,00	9,00
	7	8,19	7,19	8,10	7,10	9,00	8,00	8,00	7,00
	8	5,69	4,69	5,67	4,67	6,35	5,35	8,00	7,00
	9	3,19	2,19	3,27	2,27	6,35	5,35	8,00	7,00

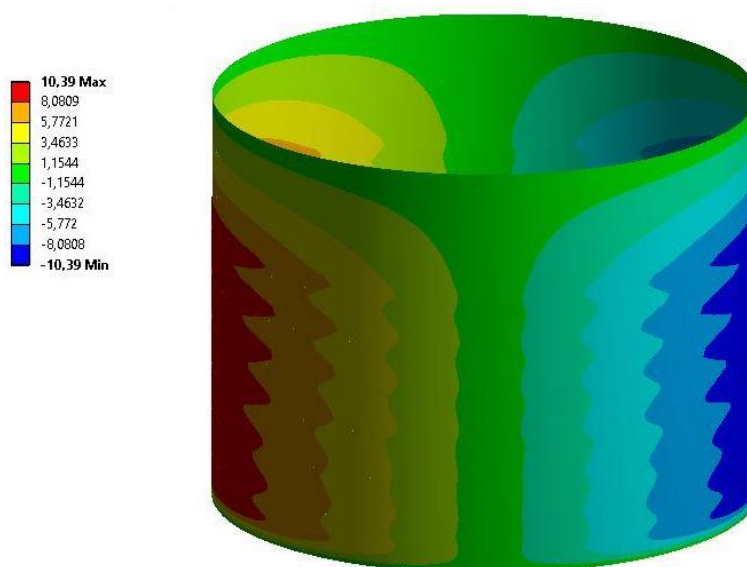
Fonte: O Autor

Por meio da Tabela 21, é possível notar que os valores definidos pela *EMYPRO* para as espessuras do costado são os de valores menos conservadores, com exceção dos três últimos anéis. Esta medida foi tomada para criar mais rigidez na região superior do costado, visto que este é um tanque que possui teto flutuante interno e uma estrutura robusta de suportes. Como já citada na Metodologia, a

decisão de adotar espessuras menores que as calculadas pela API 650, neste caso, não seria um problema, pois existe uma margem de segurança adicional por considerar a altura de líquido igual a 21,96 m.

Quanto à deformação direcional do costado, representado na Figura 22 e resumido na Tabela 22, era de se esperar que a simulação 8 fosse obter o resultado de maior valor, 10,39 mm. Este valor foi medido no sexto anel do costado, diferente de todas as outras simulações, que tiveram os seus valores de deformação máxima identificados no primeiro anel do costado. Isto se deu, pois, o valor adotado para a espessura do sexto anel pela *EMYPRO* possui a maior discrepância em relação a todos os outros calculados pelos métodos da API 650.

Figura 22 – Deformação direcional do costado em mm



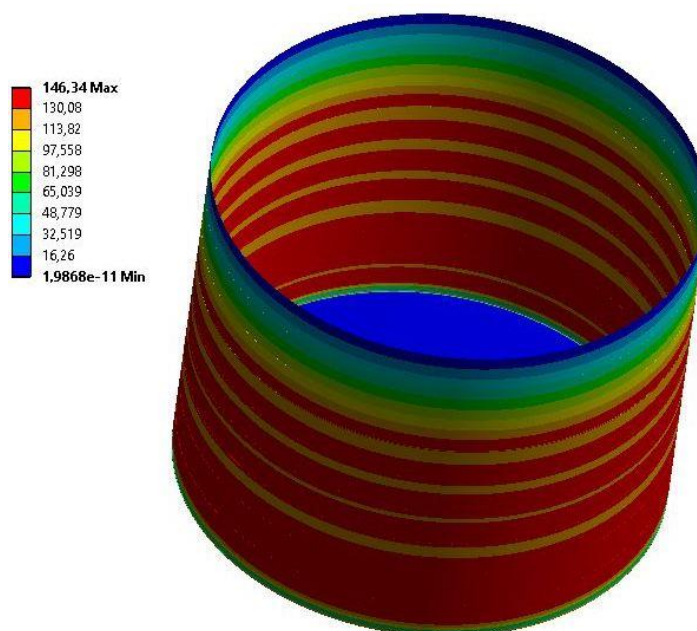
Fonte: O Autor

Tabela 22 – Deformação direcional máxima do costado

Simulações	Deformação direcional máxima (mm)	
	1	9,42
	2	9,86
	3	9,42
	4	9,87
	5	9,23
	6	9,78
	7	9,51
	8	10,39

Fonte: O Autor

Figura 23 – Tensão equivalente de Von Mises



Fonte: O Autor

Da mesma maneira que a deformação direcional, o valor máximo de tensão na simulação 8 também foi identificado no sexto anel do costado, 146,34 MPa. Isso mostra que poderia ser de interesse uma nova avaliação para a definição das espessuras do costado por parte da *EMYPRO* ou a instalação de um anel de rigidez. O estudo em (OSKOU EI & NAGHANI, 2014) mostra que a inserção de anéis de rigidez tipo caixa em pontos de alta deformação pode acarretar num aumento de 72% na resistência à flambagem do tanque, aumentando a vida útil do costado.

Figura 24 – Tensão equivalente Von Mises no primeiro anel do costado



Fonte: O Autor

A maior tensão no fundo apresentada pela Tabela 23 se dá na simulação 5. O que faz sentido, pois nesta simulação foram adotadas espessuras maiores que as demais, acarretando em um costado mais pesado, e, portanto, uma maior concentração de tensão na periferia do fundo do tanque.

Tabela 23 – Tensões equivalentes de *Von Mises* máximas de cada anel do costado para cada simulação, valores em MPa

		Simulações							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Anéis do costado	1	138,12	144,39	138,07	144,34	133,29	139,14	139,19	145,55
	2	129,46	136,14	131,72	138,64	127,46	133,93	133,95	141,11
	3	128,89	136,45	131,08	138,91	130,17	137,91	130,36	138,08
	4	128,79	137,68	130,98	140,18	126,09	134,58	134,92	144,68
	5	125,38	135,73	127,44	138,16	126,98	137,65	132,41	144,01
	6	122,90	135,70	124,81	138,04	119,64	131,71	131,55	146,34
	7	119,04	135,86	120,41	137,65	108,37	122,08	122,24	140,05
	8	111,97	136,64	112,40	137,28	100,17	119,43	86,33	98,63
	9	93,78	139,45	91,39	134,23	54,58	64,72	43,34	49,53
Fundo		84,21	82,80	84,21	82,79	85,20	83,97	83,99	82,53

Fonte: O Autor

Tabela 24 – Comparação entre as tensões de *Von Mises* obtidas e a tensão admissível do material

		Simulações							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Anéis do costado	1	0,82%	5,39%	0,78%	5,36%	-2,71%	1,56%	1,60%	6,24%
	2	-5,50%	-0,63%	-3,85%	1,20%	-6,96%	-2,24%	-2,23%	3,00%
	3	-5,92%	-0,40%	-4,32%	1,39%	-4,99%	0,66%	-4,85%	0,79%
	4	-5,99%	0,50%	-4,39%	2,32%	-7,96%	-1,77%	-1,52%	5,61%
	5	-8,48%	-0,93%	-6,98%	0,85%	-7,31%	0,47%	-3,35%	5,12%
	6	-10,29%	-0,95%	-8,90%	0,76%	-12,67%	-3,86%	-3,98%	6,82%
	7	-13,11%	-0,83%	-12,11%	0,47%	-20,90%	-10,89%	-10,77%	2,23%
	8	-18,27%	-0,26%	-17,96%	0,20%	-26,88%	-12,82%	-36,99%	-28,01%
	9	-31,55%	1,79%	-33,29%	-2,02%	-60,16%	-52,76%	-68,36%	-63,85%
Fundo		-38,53%	-39,56%	-38,53%	-39,57%	-37,81%	-38,71%	-38,69%	-39,76%

Fonte: O Autor

A Tabela 23 confirma que a utilização do *Variable-Design-Point Method* para o caso de um tanque de pequeno ou médio porte não se faz tão necessária, pois é possível alcançar resultados satisfatórios somente com o uso do *One-Foot Method*. Como já supracitado, a diferença entre os resultados obtidos pelos dois métodos iria se acentuar quanto maiores fossem as dimensões principais do tanque em estudo.

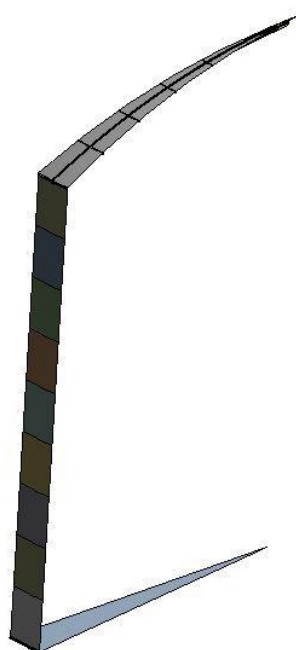
A Tabela 24 traz uma comparação mais clara das tensões obtidas nas simulações e da tensão admissível do aço carbono ASTM A283 Gr. C, 137 MPa. É exibido que as tensões registradas são de 0,20% a 6,82% maiores que o valor de tensão admissível do material. Analisando somente o primeiro anel do costado, onde, na maioria das simulações, foram encontrados os maiores valores de tensão, esta taxa fica entre 0,78% e 6,24%.

De acordo com (AZZUNI & GUZEY, 2015), é mais comum que as situações de sobrecarga se apresentem no primeiro anel do costado. Isso ocorre devido à forma como os métodos são formulados. A definição da espessura do primeiro anel é feita sem a consideração das influências dos anéis superiores. Desta forma, em tanques mais altos, as forças transferidas dos anéis superiores se acumulam e ocasionam um aumento da tensão total presente no primeiro anel.

4.3 ANÁLISE II

O modelo simplificado para a Análise II, como supracitado, corresponde a 1/52 do equipamento. Todos os componentes são formados por elementos de casca. A Figura 25 mostra uma visão geral do modelo:

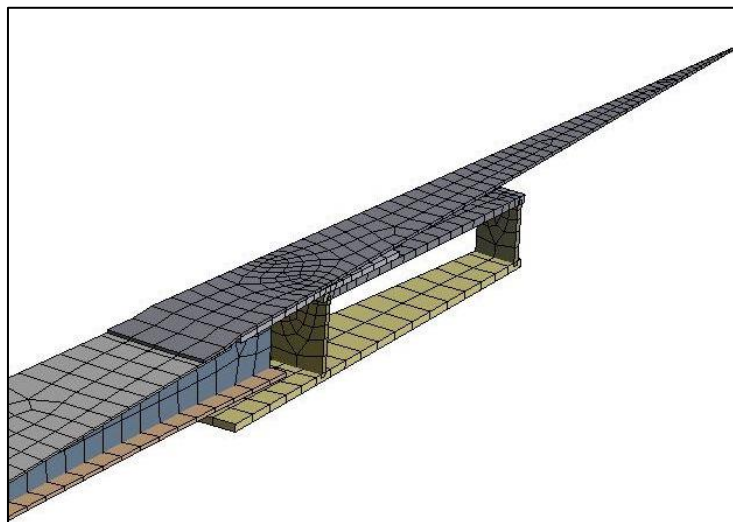
Figura 25 – Visão geral do modelo 3D utilizado na Análise II



Fonte: O Autor

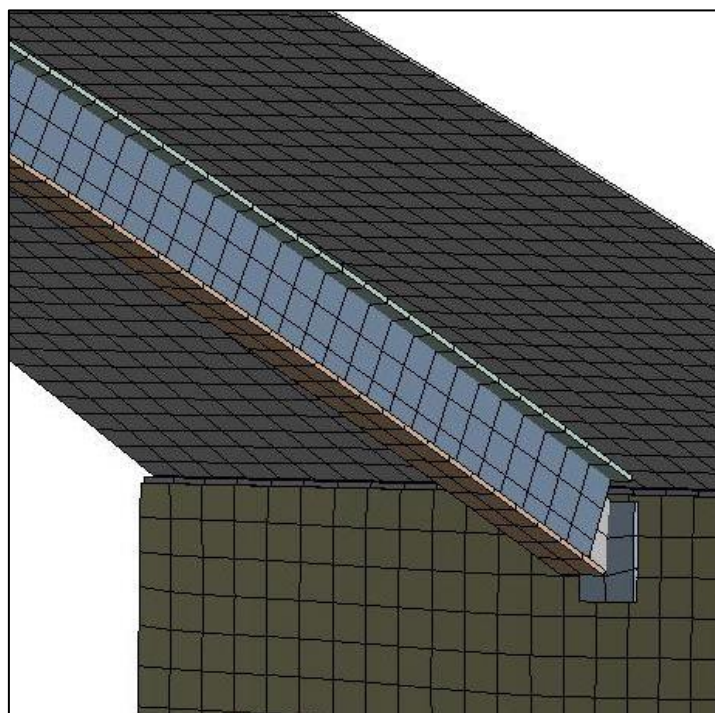
O próximo passo foi a geração da malha, realizada de acordo com o estudo no ponto 3.3.1.2. Depois de gerada, a malha se comportou conforme os detalhes apresentados nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Detalhe 1 da malha gerada para Análise II



Fonte: O Autor

Figura 27 – Detalhe 2 da malha gerada para Análise II

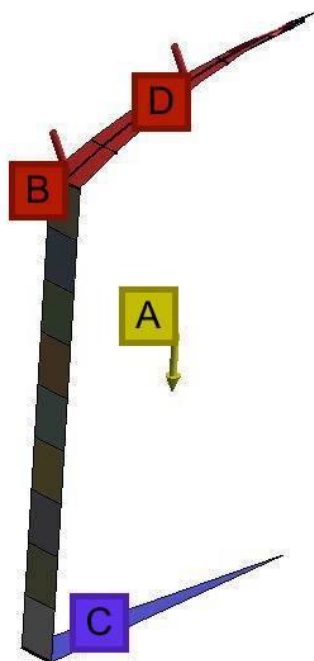


Fonte: O Autor

Quanto às condições de contorno, tudo o que foi definido para este caso está resumido na Tabela 21, e na Figura 28, o seu respectivo local de aplicação. As

condições B e C não foram aplicadas ao costado, pois o valor das tensões resultantes é irrelevante para esta análise.

Figura 28 – Condições de contorno e carregamento para a Análise II



Fonte: O Autor

Tabela 25 – Descrição das condições de contorno e carregamento

Condição de contorno	Descrição
A	Aceleração da gravidade
B	Distribuição de massa de 282 kg
C	Fixação do fundo
D	Pressão de 1210,19 N/m ²

Fonte: O Autor

A norma *Tankanlagen 960*, como já mencionada anteriormente, tem a função de facilitar a definição dos componentes da estrutura do teto a partir de simples validações de esforços. Ou seja, não se tem uma referência, em termos de valores, de como será o desempenho das vigas radiais, dos anéis de reforço e da coroa central.

Esta análise foi realizada justamente com o propósito de averiguar como se daria este comportamento a partir da deformação máxima, das tensões equivalentes de *Von Mises* e da tensão de cisalhamento presentes na estrutura.

Para a Análise II, foram executadas duas simulações:

Tabela 26 – Resumo das simulações da Análise II

Simulação	Descrição
1	Estrutura do teto com espessura nominal definida (<i>EMYPRO</i>)
2	Estrutura do teto com espessura corroída (CA = 1 mm)

Fonte: O Autor

Os resultados das simulações foram resumidos na Tabela 23, exibindo valores de tensão não somente para a estrutura completa, mas também para os principais componentes da estrutura do teto.

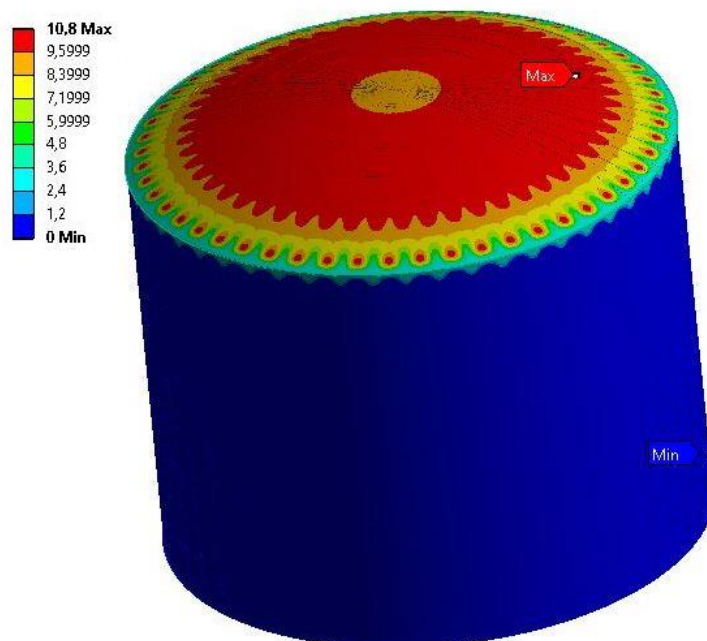
Para fins de ilustração, as Figuras 29 a 34 exibem a deformação total, as tensões equivalentes na estrutura completa, nas vigas radiais, no anel central, e também a tensão cisalhante no tanque, para o caso da simulação 1.

Tabela 27 – Resultados da Análise II

	Simulação	
	1	2
Deformação total [mm]	10,80	15,33
Tensão <i>Von Mises</i> (vigas radiais) [MPa]	35,16	52,51
Tensão <i>Von Mises</i> (chapa do teto) [MPa]	132,37	147,53
Tensão <i>Von Mises</i> (anel central) [MPa]	5,09	5,53
Tensão <i>Von Mises</i> (anel de reforço 1) [MPa]	18,08	21,83
Tensão <i>Von Mises</i> (anel de reforço 2) [MPa]	9,34	11,86
Tensão <i>Von Mises</i> (anel de reforço 3) [MPa]	8,47	11,05
Tensão <i>Von Mises</i> (anel de reforço 4) [MPa]	5,99	7,35
Tensão cisalhante [MPa]	69,08	74,34

Fonte: O Autor

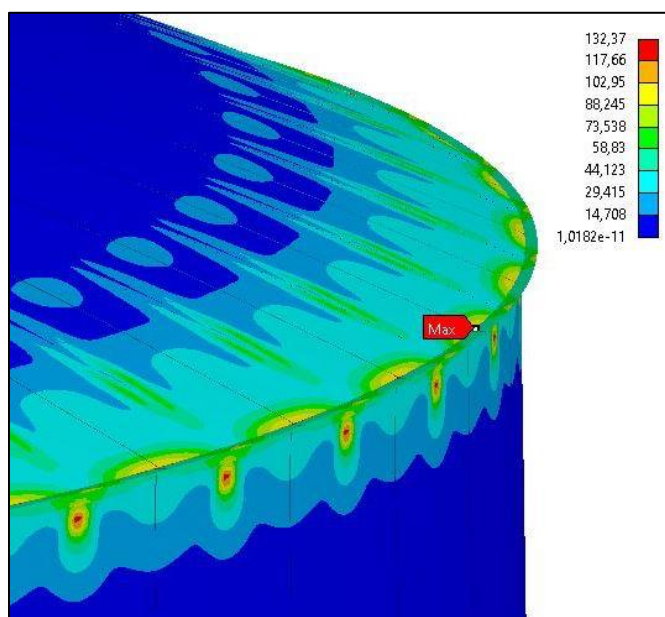
Figura 29 – Deformação total



Fonte: O Autor

De um modo geral, a estrutura apresentou valores de tensão baixos – resultado esse já esperado. Embora seja pertinente a realização de um novo estudo para a utilização de perfis diferentes, que ainda garantam a segurança e reduzam os custos, é importante mencionar que durante a montagem eles são submetidos a tensões muito maiores do que no estado em que se encontram no presente estudo.

Figura 30 – Tensão equivalente de Von Mises em toda a estrutura

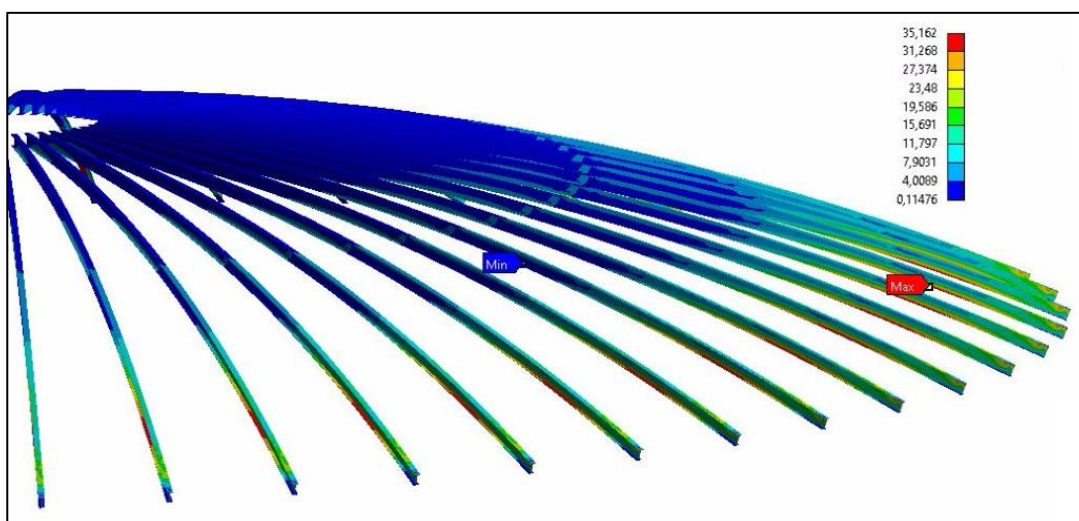


Fonte: O Autor

Apesar da tensão na chapa do teto, já corroída, ter ultrapassado o valor de tensão admissível do material ASTM A 283 Gr. C, faz-se necessário apontar que esta situação está caracterizada como a mais crítica possível. Isso ocorre pois leva-se em consideração que o tanque não tem influência da pressão interna e irá suportar aproximadamente 12.400 kg de maneira uniformemente distribuída. Como já mencionado, esta carga corresponde às estruturas que serão instaladas no teto como bocais, guarda-corpo, válvulas e outros equipamentos.

Outro ponto que contribui para este resultado é que, neste caso, a chapa do teto foi tratada como sendo um elemento inteiriço e não como uma junção de várias pétalas como mostra o projeto do tanque nas Figuras 13 e 17. Esta simplificação na geometria foi realizada com o objetivo de facilitar o processamento da análise.

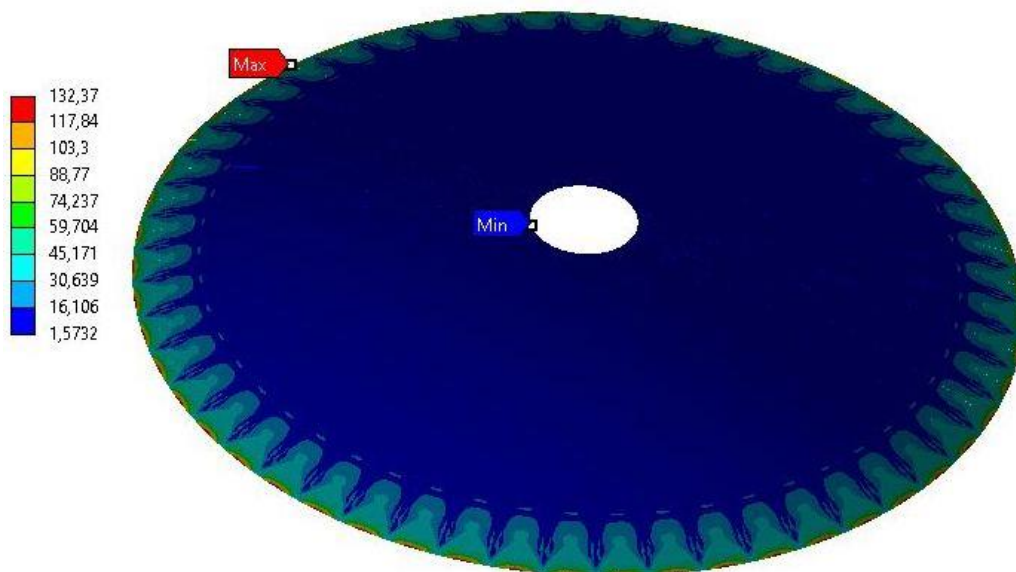
Figura 31 – Tensão equivalente de *Von Mises* nas vigas radiais



Fonte: O Autor

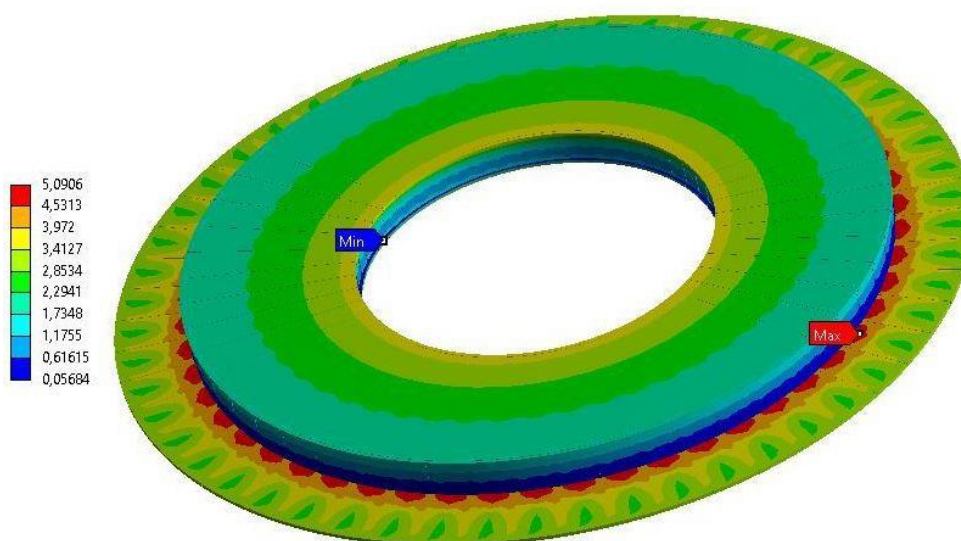
Uma das características que contribuíram para que o perfil IPE 160 R fosse escolhido foi o fato de este possuir espessura nominal de alma maior do que 5,5 mm. Devido a corrosão, ficou estabelecido que este valor fosse o mínimo para as vigas radiais.

Figura 32 – Tensão equivalente de *Von Mises* na chapa do teto



Fonte: O Autor

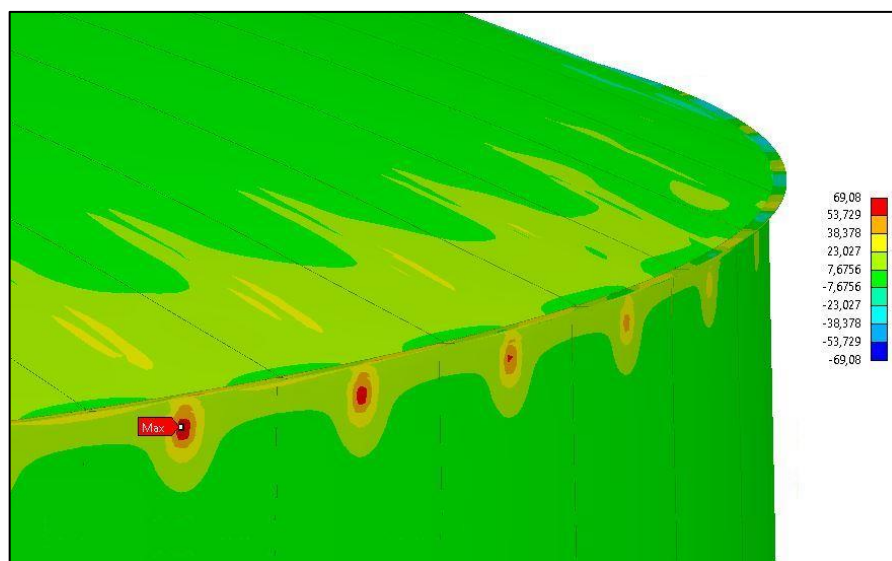
Figura 33 – Tensão equivalente de *Von Mises* no anel central



Fonte: O Autor

O anel central foi o componente da estrutura que apresentou o menor valor de tensão, o que era mais provável. Ele está sendo suportado por todas as 52 vigas radiais e está interligado à elas através da chapa inferior, que possui 16 mm de espessura.

Figura 34 – Tensão cisalhante na estrutura



Fonte: O Autor

O valor mais alto de tensão cisalhante se deu nos pontos de conexão da estrutura do teto com o costado, o que já era esperado por conta da geometria do teto. No entanto, o valor se mostrou baixo, ainda mais pelo fato de terem sido utilizadas chapas de espessura maior para o último anel do costado em comparação ao que foi calculado por meio da API 650.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e a análise estrutural estática dos principais componentes de um tanque de armazenamento atmosférico com base em simulações realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos.

As comparações realizadas com os componentes com sua espessura inicial e com sua espessura já corroída tiveram o intuito de identificar as regiões que apresentam uma maior concentração de tensões. O impacto da corrosão acarretou num aumento, em média, de 9,4% nas tensões presentes nas chapas do tanque, tanto no teto como no costado.

As análises realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos reafirmaram que os métodos disponibilizados, tanto pela API 650 como a *Tankanlagen 960*, garantem certa confiabilidade para as estruturas projetadas, mas não prevêm possíveis sobrecargas que podem acarretar em uma falha ou deformação futura.

No caso dos métodos utilizados da API 650 para o cálculo das espessuras dos anéis do costado, tanto o método *One-Foot-Method* como o *Variable-Design-Point Method* apresentaram sobrecargas nos anéis do costado, principalmente no primeiro. Isso só confirma o que foi apontado em (AZZUNI & GUZEY, 2015): apesar de o tanque atender a relação presente na Equação 3, que a API 650 classifica como sendo um tanque em que o *Variable-Design-Point Method* pode ser utilizado, uma análise linear também é de extrema importância.

Quanto à norma *Tankanlagen 960*, o seu método se mostrou extremamente conservador, acarretando em peças mais robustas e uma maior taxa de aço para a estrutura do teto. No entanto, para o calculista, ela oferece um alto grau de confiabilidade e rapidez.

A partir destas observações, é possível avaliar modificações a serem realizadas no projeto com o objetivo de mitigar problemas futuros durante a operação do tanque de armazenamento em estudo. Como por exemplo: definir uma espessura maior para a chapa do teto; realizar nova definição das espessuras dos anéis do costado com base no que foi mostrado nas simulações; implantação de anéis de rigidez nos pontos de maior deformidade do costado; utilizar perfis na

estrutura do teto que sejam menos robustos, e conseqüentemente de menor custo, e que ainda assim garantam a confiabilidade necessária.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, as sugestões propostas para trabalhos adotando o mesmo tema:

- a) Aprofundamento do projeto, contemplando maiores detalhes do tanque como: bocais, sistema de combate a incêndio, estruturas metálicas e a fundação do tanque e seus recalques;
- b) avaliação do tanque com uma sobrepressão crítica no seu interior;
- c) análise das cargas dinâmicas produzidas pelos ventos no tanque;
- d) estudo de fadiga no projeto do fundo do tanque;

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STD 650** - *Steel Welded Tanks for Oil Storage*. API, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A283M/283** - *Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates*. West Conshohocken: ASTM, 2013.

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

AZEVEDO, Á. F. **Método dos Elementos Finitos**. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2003.

AZZUNI, E., & GUZEY, S. Comparison of the Shell Design Methods for Cylindrical Liquid Storage. **Engineering Structures**, 2015.

BARROS, S. M. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2014.

BRITISH STANDARD. **BS EN10279** - *Hot rolled steel channels. Tolerances on shape, dimension and mass*. CEN, 2000.

EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN10025-2**: *Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*. Bruxelas: CEN, 2004.

EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN1993-4-2**: *Design of Steel Structures: Tanks*. Bruxelas: CEN, 2007.

GOKHALE, N. **Practical Finite Element Analysis**. Maharashtra: Finite To Infinite, 2008.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS**. Mankato: Prentice-Hall, Inc., 1999.

OSKOU EI, A., & NAGHANI, E. Mechanical Behavior Investigation for an Atmospheric Storage Tank according to API 650 under Lodas using FEM. **Journal of Current Research in Science**, 2014.

PETROBRAS. **N-270**: *Projeto de Tanques de Armazenamento Atmosféricos*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2014.

SEGERLIND, L. ***Applied finite element analysis***. Michigan: John Wiley & Sons, Inc., 1984

VDTÜV. *Richtlinie für die Herstellung von Flachbodentanks mit besonderen Anforderungen; Tankanlagen 960-2002/1*. Düsseldorf: VdTÜV, 2002.

ZHOU, Y. ***Research on Fire and Explosion Accidents of Oil Depots***. Chongqing: AIDIC, 2016.

ANEXO A

CÁLCULO DO TETO

1 - DADOS DE CÁLCULO

Diâmetro do tanque	$d = 2.863,0 \text{ cm}$
Fator de curvatura do teto	$f_{\text{curv}} = 1,2 -$
Espessura da chapa de teto	$t_d = 0,475 \text{ cm}$
Coeficiente de segurança	$v = 1,5 -$
Material para perfis	EN 10025-2 S275.
Material para chapas	ASTM A283 Gr. C
Tensão de escoamento perfis	$\sigma = 275 \text{ N/mm}^2$
Tensão de escoamento chapas	$\sigma = 205 \text{ N/mm}^2$
Sobreposição de pétalas	$L_p = 70 \text{ mm}$
Largura das chapas para pétalas do teto	$S_p = 1.800 \text{ mm}$
Distancia máxima entre vigas - API 650	204,44 cm
Número mínimo de vigas - API 650	44
Número mínimo de pétalas	52
Número de vigas adotado	$n = 52$

$$= \pi d / (L_p - S_p)$$

Tensão admissível do material PERFIS	$\sigma_{\text{all}} = 183,3 \text{ N/mm}^2$
Tensão admissível do material CHAPAS	$\sigma_{\text{all}} = 136,7 \text{ N/mm}^2$
Raio de tanque	$r = 1.431,5 \text{ cm}$
Raio de curvatura	$a = 3.435,6 \text{ cm}$
Altura do domo	$h = 312,4 \text{ cm}$

$$= \sigma / v$$

$$= \sigma / v$$

$$= d / 2$$

$$= f_{\text{curv}} d$$

$$= a - \sqrt{(a^2 - r^2)}$$

2 - ANÁLISE DE CARGAS

2.1. - Cargas permanentes

Peso próprio da viga radial	$Q_1 = 120.362 \text{ N}$
Peso do anel central	$Q_2 = 21.533 \text{ N}$
Peso próprio dos anéis poligonais	$Q_3 = 21.446 \text{ N}$
Peso próprio das demais estruturas de teto	$Q_4 = 121.000 \text{ N}$
Peso próprio chapa teto (Projetado)	$g_h = 412 \text{ N/m}^2$
Superfície esférica	$S_e = 674,4 \text{ m}^2$
Superfície projetada	$S_p = 643,8 \text{ m}^2$
Peso da estrutura projetada	$g_R = 441,68 \text{ N/m}^2$

$$= 2 \pi a h$$

$$= \pi d^2 / 4$$

$$= \sum Q_i / S_p$$

2.2. - Sobrecargas

Pressão de sucção	$D_d = 483 \text{ N/m}^2$
Pressão dinâmica API 650	$W_t = 84,35 \text{ Kg /m}^2$
Carga de neve	$P_n = 0 \text{ N/m}^2$
Sobrecarga de uso	$P_a = 1.177 \text{ N/m}^2$
	$p = 1.660 \text{ N/m}^2$

$$= D_d + P_n + P_a$$

3 - CÁLCULO DE ESFORÇOS

3.1. - Pressão de flambagem

$b_R =$	173,0 cm	$= 2 \pi r / n$
$l_R =$	162,5 cm	$= b_R (1 - \pi / n)$
$K =$	0,277 < 1	$= l_R^2 / (58,4 a t_D)$
$\delta =$	1,383 -	$= 10.000 t_D / a$
$P_{B1} =$	195,33 Kg/m ²	$= 26,3 \delta^2 (K + 1/K)$
$P_{B2} =$	200,71 Kg/m ²	$= 105 \delta^2$
P_B (adotado) =	195,33 Kg/m²	> $g_H = 42$ Kg/m²

3.2. - Carga total

$$P_R = 2063,8 \text{ N/m}^2 = g_R + (g_h + p - P_B / v) + W_t$$

3.3. - Forças primárias e Momentos

Carga sobre a viga

$$P = 25.550 \text{ N} = \pi d^2 P_R / (n 4)$$

$$\beta = 0,214 - = g_R / P_R$$

Peso da viga

$$G = 5.468 \text{ N} = \beta P$$

Força normal devido a G

$$N_G = 12.852 \text{ N} = 0,513 r G / h$$

Força normal devido a P

$$N_P = 43.900 \text{ N} = 0,375 r P / h$$

Total de força em cada viga

$$N = 56.752 \text{ N} = 5,79 \text{ Tn} = N_G + N_P$$

$$M_{\max} = 1.206.988 \text{ N cm} = 0,033 P r$$

3.4. - Cálculo do Perfil

DADOS DO PERFIL

Tipo de perfil

IPE

Perfil

IPE 160 R

Peso

17,7 kg/m

Espessura da alma

$$t_w = 5,6 \text{ mm} > 5,5 \text{ mm}$$

Altura do perfil

$$h_1 = 16,20 \text{ cm}$$

Área da seção transversal do perfil

$$A = 22,60 \text{ cm}^2$$

$$J_x \geq \beta v N (r/100)^2 / 2,07$$

$$J_x = 989 \text{ cm}^4 \geq 859,0 \text{ cm}^4 \text{ para } \beta = 1$$

3.4.1. - Momento de inércia requerido para vigas a 0,5r do centro do teto

Comprimento da seção da pétala

$$b'_D = 26,92 \text{ cm} = b'_D = 10 \cdot t_D \sqrt[3]{b_R / (2 \cdot t_D)}$$

Área da seção da pétala

$$F_o = 12,79 \text{ cm}^2 = b'_D t_D$$

$$a_o = 5,09 \text{ cm} = ((-f_o \cdot t_D / 2) + (A \cdot h_1 / 2)) / (f_o + A)$$

$$e_o = 5,6 \text{ cm} = a_o + t_D$$

$$e_u = 11,1 \text{ cm} = h_1 - a_o$$

$$J'_x = 1.557,0 \text{ cm}^4 = (b'_D t_D^3 / 12) + f_o a_o^2 + J_x + A (((h_1 / 2) - a_o)^2)$$

$$W'_{xo} = 279,9 \text{ cm}^3 = J'_x / e_o$$

3.4.2. - Efeito segundo ordem

$$\epsilon = 0,1904 - = v N (r/100)^2 / (6 J'_x)$$

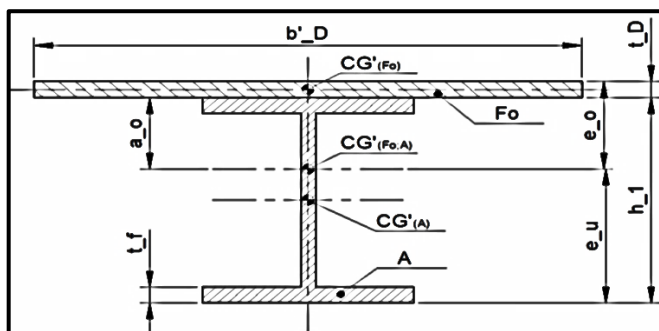
$$^I M = 1.490.758 \text{ N cm} = M_{\max} / (1 - \epsilon)$$

$$^I N = 56.752 \text{ N}$$

$\sigma_{\text{MAXO}} =$	69,29 N/mm ²	$< \sigma_{\text{all}} =$	183,33 N/mm ²
$\sigma_{\text{MAXu}} =$	122,44 N/mm ²	$< \sigma_{\text{all}} =$	183,33 N/mm ²

$$\sigma_{\text{maxxo}} = \frac{^I N}{F_o + F_u} + \frac{^I M}{W'_{xo}}$$

$$\sigma_{\text{maxxu}} = \frac{^I N}{F_o + F_u} + \frac{^I M}{W'_{xu}}$$



3.5. – Desenho do suporte central

$t_o =$	1,6 cm
$t_u =$	1,6 cm
$b_k =$	70 cm $\geq 2 h_k$
$h_k =$	12,9 cm
$F_o =$	112 cm ² $= b_k t_o$
$F_u =$	112 cm ² $\leq F_o$
$\rho =$	143 cm $= 0,1 r$

Condição a se satisfazer $9.351 \text{ cm}^4 \geq 8.185 \text{ cm}^4$

$$h_k^2 \cdot \frac{F_o \cdot F_u}{F_o + F_u} \geq \frac{n}{2 \cdot \pi} \cdot J_x$$

Tipo de anel central: B (ver imagens ao lado)

2,6274381

$t_1 = 1,25 \text{ cm}$	$t_2 = 1,25 \text{ cm}$	$t_3 = 1,25 \text{ cm}$
$L_1 = 55,0 \text{ cm}$	$L_2 = 14,5 \text{ cm}$	$L_3 = 11,4 \text{ cm}$

$\alpha = 0,0458574$ $L_y = 25,0$

$L_u = 99,02 \text{ cm}$

Volume do anel 1: 61.772 cm³

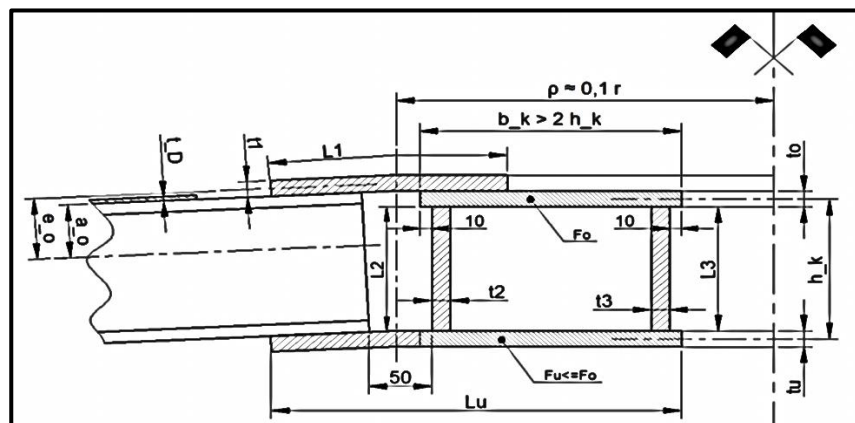
Volume do anel 2: 15.973 cm³

Volume do anel 3: 6.560 cm³

Volume do anel "o": 74.946 cm³

Volume do anel "u": 120.469 cm³

Massa do anel central: 2.196 Kg



$$\begin{aligned} {}^{\text{II}}M_k &= 1.341.839 \text{ N cm} &= (1-\rho/r) {}^{\text{II}}M \\ {}^{\text{II}}N_k &= 70.940 \text{ N} &= 1,25 {}^{\text{II}}N \\ \theta &= 0,0604 \text{ -} &= \pi / n \end{aligned}$$

A força horizontal no anel da coroa inferior é determinada a partir da força normal e da ordem do momento II:

$$H_u = 139.309 \text{ N} \quad = H_u = \frac{e_o}{h_k} {}^{\text{II}}N_k + \frac{{}^{\text{II}}M_k}{h_k}$$

A força no anel da coroa inferior segue de acordo com a equação:

$$R_u = 1.152.926 \text{ N} \quad = H_u / (2 \theta)$$

Momento no anel da coroa inferior é determinado a partir da força

$$\text{horizontal: } M_u = 200.346 \text{ N.cm} \quad = \theta \rho H_u / (2 (3+\theta^2))$$

Modulo de resistência no anel da coroa inferior é calculado:

$$W_u = 1.307 \text{ cm}^3 \quad = t_u b_k^2 / 6$$

$$\sigma_{\text{MAXO}} = 104,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{all}} = 136,67 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{maxo}} = \frac{R_u}{F_u} + \frac{M_u}{W_u}$$

3.5. – Desenho do anel exterior

Perfil: IPE 160 R

$$i_y = 1,83 \text{ cm}$$

Distancia max. Entre os anéis

$$S_{ky \text{ max}} = 327,57 \text{ cm}$$

Condição: $S_{ky} / i_y < 180$

Número mínimo de anéis

$$N_{a \text{ mim}} = 4 \text{ -}$$

Número de anéis adotados

$$N_a = 4 \text{ -}$$

Distância entre anéis igualmente espaçados

$$S_{ky} = 2,627 \text{ m}$$

$$S_{ky} / i_y = 143,6 < 180$$

Distância entre anéis adotados

$$S_{ky_a} = 2,327 \text{ m}$$

$$S_{ky} / i_y = 127,2 < 180$$

Ângulo entre anéis igualmente espaçados

$$4,381^\circ$$

Ângulo adotado

$$3,881^\circ$$

Anéis	Perfil	kg/m	Ângulo	Raio (m)	Comprimento (m)	Peso (kg)
Anel 1	UPN 100	10,6	69,256°	12,17	1,47	809,94
Anel 2	UPN 100	10,6	73,137°	9,97	1,20	663,35
Anel 3	UPN 80	8,6	77,018°	7,72	0,93	418,73
Anel 4	UPN 80	8,6	80,899°	5,43	0,66	294,84
Peso total =						2186,9