



PEDRO HENRIQUE DE CARVALHO SALGUEIRO

**ESTUDO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO CILÍNDRICOS
PARA LÍQUIDOS**

LAVRAS - MG

2023

PEDRO HENRIQUE DE CARVALHO SALGUEIRO

**ESTUDO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DE
RESERVATÓRIO CILÍNDRICOS PARA LÍQUIDOS**

Projeto de Concepção Básica apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia Me-
cânica, para a obtenção do título de Bacharel

Prof. Dr. Mauricio Francisco Caliri Junior
Orientador

LAVRAS-MG

2023

RESUMO

O presente trabalho aborda o dimensionamento de reservatórios cilíndricos verticais com teto fixo. A fundamentação teórica é suportada por normas técnicas, como a NBR 7821, e explora os esforços solicitantes, como a ação do peso, a ação hidrostática e a ação do vento.

Além disso, o estudo abrange a análise de elementos finitos (MEF) para modelagem e análise estrutural. As etapas do método, desde o pré-processamento até o pós-processamento, são detalhadas, destacando a importância da discretização da região e da solução aproximada para problemas estruturais.

Os resultados abordam a geometria do reservatório, análise de convergência de malha, campo de deslocamentos, tensão equivalente de von Mises, tensão principal, perfis vertical e circunferencial de tensões, bem como tensões em locais específicos, como na altura de 300 mm, 600 mm e na região soldada.

No cenário mais crítico, segundo o critério de falha de von Mises, as tensões foram de 116,4 MPa a uma altura de 300 mm, 133,208 MPa a 600 mm e 130,83 MPa na região soldada. Os coeficientes de segurança calculados foram, respectivamente de, 2,23, 1,87 e 2,27.

Dessa forma, concluiu-se que os coeficientes de segurança estão de acordo com o método de falha de von Mises. Este estudo fornece uma compreensão abrangente e crítica do dimensionamento de reservatórios, incorporando aspectos teóricos e análises computacionais para garantir a segurança e eficiência das estruturas.

Palavras-chave: Reservatórios de líquidos, Método dos Elementos Finitos, Tensão de von Mises, Segurança Estrutural.

ABSTRACT

The present work addresses the sizing of vertical cylindrical tanks with a fixed roof. The theoretical foundation is supported by technical standards, such as NBR 7821, and explores the soliciting forces, such as the weight action, hydrostatic action, and wind action.

Furthermore, the study encompasses finite element analysis (FEA) for modeling and structural analysis. The steps of the method, from pre-processing to post-processing, are detailed, emphasizing the importance of discretizing the region and the approximate solution for structural problems.

The results cover the tank's geometry, mesh convergence analysis, displacement field, von Mises equivalent stress, principal stress, vertical and circumferential stress profiles, as well as stresses at specific locations, such as at heights of 300 mm and 600 mm, and in the welded region.

In the most critical scenario, according to the von Mises failure criterion, the stresses were 116.4 MPa at a height of 300 mm, 133.208 MPa at 600 mm, and 130.83 MPa in the welded region. The calculated safety factors were 2.23, 1.87, and 2.27, respectively.

Thus, it was concluded that the safety factors are in accordance with the von Mises failure method. This study provides a comprehensive and critical understanding of tank sizing, incorporating theoretical aspects and computational analyses to ensure the safety and efficiency of structures.

Keywords: Liquid reservoirs, Finite Element Method, Von Mises Stress, Structural Safety.

Lista de Figuras

2.1	Reservatório cilíndrico vertical	6
2.2	Tanque com teto fixo	7
2.3	Tanque com teto flutuante	7
2.4	Tanque cilíndrico horizontal	8
2.5	Tanque esférico	9
2.6	Tanque e acessórios - Terminologia	11
2.7	Esquema dos esforços solicitantes	14
2.8	Pressão hidrostática na lateral do cilindro	16
2.9	Esboço da pressão do vento na lateral do cilindro	17
2.10	Gráfico da pressão do vento por ângulo circunferencial	17
2.11	Perfil vertical da velocidade do vento	19
2.12	Juntas verticais do costado	22
2.13	Juntas típicas de fundo e teto	22
2.14	Propriedades mínimas metal-solda	23
2.15	Tensões permitidas pela norma AISC para metal de solda	23
2.16	Elementos linear (Tipicamente usado para representar mola, viga e barra)	24
2.17	Elementos superficiais (Tipicamente usado para representar chapas e casca)	25
2.18	Elementos sólidos (Tipicamente usado para representar elementos do meio contínuo)	25
3.1	Fluxograma	28
3.2	Distribuição das chapas do fundo quando se usam chapas anulares	32
3.3	Rebaixo nas juntas sobrepostas das chapas do fundo sob o costado do tanque	33
3.4	Geometria do reservatório	35
3.5	Modelagem da base	36
3.6	Modelagem do topo	37
3.7	Modelagem do Costado	38
3.8	Perfil da pressão hidrostática pela altura	39
3.9	Representação gráfica da pressão do vento	40
3.10	Perfil vertical da pressão do vento	41
4.1	Modelagem do reservatório	42
4.2	Gráfico de convergência de malha	44
4.3	Deslocamento máximo - Caso 1 (Aumento de 50x na escala)	44
4.4	Deslocamento máximo - Caso 2 (Aumento de 10x na escala)	45
4.5	Deslocamento máximo - Caso 3 (Aumento de 10x na escala)	45
4.6	Tensão de von Mises lado interno (z_2) e externo (z_1) - Caso 1	46
4.7	Tensão interna de von Mises - Caso 2	47

4.8	Tensão interna de von Mises - Caso 3	48
4.9	Gráfico da tensão externa principal pela altura por caso	50
4.10	Gráfico da tensão interna de von Mises pela altura por caso	50
4.11	Tensão principal (direção circunferencial) externa para $H = 9,6\text{m}$	51
4.12	Tensão de von Mises (direção circunferencial) interna para $H = 9,6\text{m}$	52
4.13	Tensão máxima de von Mises em $Z = 300$	52
4.14	Tensão máxima principal em $z = 300\text{ mm}$	53
4.15	Tensão interna de von Mises na região soldada	54
4.16	Limites das chapas e região da solda analisada	54
4.17	Resultados com ampliação na região da solda - Caso 1	55
4.18	Resultados com ampliação na região da solda - Caso 2	55

Lista de Tabelas

3.1	Propriedade mecânicas do aço ASMT-A36, (Luz 2017)	29
3.2	Espessura das chapas anulares da base	32
3.3	Função da pressão do vento por altura	40
4.1	Resultado dos coeficientes de segurança para todos os casos	49
4.2	Resultado dos coeficientes de segurança na região da solda	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Objetivo	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Classificação de reservatório	5
2.1.1	Reservatório cilíndrico vertical	5
2.1.1.1	Reservatório com teto aberto	6
2.1.1.2	Reservatório com teto fixo	6
2.1.1.3	Reservatório com teto flutuante	7
2.1.2	Reservatório cilíndrico horizontal	7
2.1.3	Reservatório Esférico	8
2.2	Dimensionamento de reservatório	9
2.3	Normas Técnicas	9
2.3.1	NBR 7821	10
2.3.2	Esforços solicitantes	14
2.3.2.1	Ação do Peso	15
2.3.2.2	Ação hidrostática	15
2.3.2.3	Ação do Vento	16
2.3.3	Tensão equivalente de von Mises	19
2.3.4	Soldas em estruturas metálicas	20
2.3.4.1	Tipos de Solda	20
2.3.4.2	Dimensão da Solda	20
2.3.4.3	Restrições sobre Juntas Soldadas	21
2.3.5	Resistência de Uniões Soldadas	22
2.4	Método dos elementos finitos (MEF) em problemas de análise e modelagem	24
2.4.1	Discretização da região	24
2.4.2	Solução aproximada para o problema estrutural	25
2.4.3	Montagem do sistema global	26
2.4.4	Etapas para solução computacional de problemas via MEF	27
2.4.4.1	Pré-processamento: Modelagem e Preparação	27
2.4.4.2	Processamento: Análise Numérica	27
2.4.4.3	Pós-processamento: Interpretação e Visualização	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	Projeto do reservatório baseado na norma NBR-7821	28

3.1.1	Material	29
3.1.2	Projeto do Costado	29
3.1.3	Projeto do Topo	30
3.1.4	Projeto da Base	31
3.1.4.1	Dimensões das chapas	31
3.1.4.2	Métodos de Construção do Fundo	32
3.1.4.3	Unições entre Chapas do Costado e do Fundo	33
3.2	Projeto de acordo com o método dos elementos finitos	34
3.2.1	Modelagem	34
3.2.1.1	Base	35
3.2.1.2	Topo	36
3.2.1.3	Costado	37
3.2.2	Carregamentos	38
3.2.2.1	Pressão hidrostática	39
3.2.2.2	Pressão do vento	39
3.2.2.3	Peso da estrutura	41
4	RESULTADOS	42
4.1	Geometria do reservatório	42
4.2	Análise de convergência de malha	43
4.3	Campo de deslocamentos - U	44
4.4	Tensão equivalente de von Mises	46
4.5	Perfil vertical da tensão máxima principal e von Mises	49
4.6	Perfil circunferencial da tensão principal e von Mises	51
4.7	Tensão na altura de 300 mm	52
4.8	Região soldada	54
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Os tanques de armazenamento são estruturas concebidas como reservatórios versáteis, capazes de conter uma ampla gama de fluidos, tanto líquidos quanto gasosos. Esses recipientes são projetados com a finalidade de armazenar esses fluidos para futuros usos utilitários. Por exemplo, podem servir como reservatórios de água para processos industriais, fornecimento à comunidades, armazenamento de combustíveis, contenção de produtos químicos e até mesmo para o armazenamento temporário de águas residuais, visando tratamento posterior (Fernández 2019).

A construção desses tanques envolve vários processos, como corte, dobramento, soldagem e montagem das chapas metálicas. Além disso, são considerados outros elementos, como sistemas de vedação, revestimentos internos e externos, dispositivos de segurança e sistemas de monitoramento.

A escolha adequada do material, o projeto estrutural e a execução correta das soldas são aspectos cruciais para garantir a integridade e a segurança estrutural dos tanques. Portanto, é essencial seguir alguma norma ou metodologia técnica no dimensionamento desses reservatórios, garantindo que eles atendam aos padrões de segurança e desempenho adequados.

Tanques de água com elevada estatura estão sujeitos a vários tipos de carregamento, como seu próprio peso, peso do líquido armazenado, cargas de vento e em alguns casos cargas sísmicas (Eltaly et al. 2014).

Nos projetos de reservatórios, chapas metálicas, geralmente de aço carbono ou aço inoxidável, são amplamente utilizadas devido à sua resistência, durabilidade e capacidade de suportar as condições adversas, como pressão hidrostática, carga de vento e terremotos, bem como a corrosão causada pelos produtos armazenados.

A importância dos tanques de armazenamento de líquidos com chapas metálicas reside na necessidade de armazenar grandes volumes de substâncias líquidas de forma segura, eficiente e econômica. Esses tanques proporcionam um meio confiável de armazenamento a longo prazo, permitindo às indústrias manterem um suprimento constante de produtos ou materiais líquidos essenciais para suas operações.

A NBR 7821 é uma norma técnica brasileira que estabelece os requisitos para a construção de tanques metálicos cilíndricos. Essa norma visa garantir a segurança, durabilidade e desempenho adequado desses tanques, que são amplamente utilizados em diversos setores industriais para o armazenamento de substâncias líquidas e gases (BARROS 1998).

No entanto, apesar de sua importância e relevância, é possível que a NBR 7821 apresente limitações que impactem os custos de construção dos tanques metálicos cilíndricos. Essas limitações podem estar relacionadas a não interpretação ou aplicação correta da norma bem como as demais normas técnicas nela citada, a requisitos excessivamente conservadores, restrições

de materiais, processos de soldagem complexos ou outras questões que elevam os custos de produção.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é estudar e explorar o projeto de um reservatório para armazenar $4710m^3$ de água. O trabalho será guiado pela norma técnica NBR - 7821, que estabelece os critérios e requisitos para esse tipo de estrutura, onde serão consideradas as restrições e limitações impostas por essa norma. Isso envolve analisar cuidadosamente as diretrizes específicas, as prescrições de projeto e as restrições dimensionais e estruturais estipuladas.

Neste estudo, pretende-se avaliar a aplicabilidade de norma técnica NBR - 7821 ao projeto proposto utilizando o Método de Elementos Finitos. Dessa forma, será possível obter informações detalhadas sobre a resposta estrutural do reservatório, como tensões, deformações e deslocamentos, verificando sua capacidade de suportar as cargas previstas durante sua vida útil. Essa comparação trará mais conhecimento sobre a origem, escopo e limitações da NBR - 7821, permitindo que futuros projetos sejam mais confiáveis e otimizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste trabalho visa revisar conceitos e características fundamentais relacionadas aos reservatórios metálicos de fluidos, considerando suas características e aplicações.

2.1 Classificação de reservatório

Os tanques de armazenamento de fluidos com formato cilíndrico, posição vertical, não enterrados com pressão atmosférica, de fabricação soldada e construídos com chapas de aço carbono (BARROS 1998), são utilizados para armazenar líquidos e substâncias de diferentes naturezas. Eles desempenham um papel fundamental na garantia do suprimento contínuo de produtos, no controle de estoque e na segurança operacional. Tais tanques podem ser classificados de diferentes maneiras, podendo ser diferenciados pela sua geometria ou até mesmo pela sua localização.

2.1.1 Reservatório cilíndrico vertical

Os reservatórios cilíndricos verticais são estruturas projetadas para armazenar grandes volumes de líquidos, com sua forma cilíndrica, esses reservatórios otimizam a utilização do espaço vertical disponível, sendo particularmente eficazes ao lidar com grandes quantidades de líquidos. Além disso, a construção simples e vertical (Figura 2.1) geralmente resulta em custos mais acessíveis em comparação com estruturas mais complexas, tornando-os uma opção econômica para o armazenamento em grande escala.

Sua aplicação é vasta, abrangendo setores como indústrias químicas, petroquímicas, alimentícias, de água potável, entre outras. Os reservatórios cilíndricos verticais são empregados para armazenar água, produtos químicos, óleos, combustíveis e diversas outras substâncias líquidas.

Além disso, a manutenção desses reservatórios é geralmente facilitada devido à sua forma e orientação. A disposição vertical permite fácil acesso para operações de inspeção, limpeza e reparos.

Figura 2.1: Reservatório cilíndrico vertical



Fonte: <https://fimaco.com.br/produtos/tanques-industriais/>

2.1.1.1 Reservatório com teto aberto

Um reservatório com teto aberto refere-se a um tanque ou recipiente de armazenamento que não possui uma cobertura completa no topo, deixando a parte superior do reservatório exposta ao ambiente.

Vantagens dos reservatórios com teto aberto podem incluir facilidade de acesso para carregamento e descarregamento, custos de construção e manutenção potencialmente mais baixos, além de permitir a ventilação natural. No entanto, esses reservatórios também têm desvantagens, como maior exposição ao clima e riscos associados, como contaminação, evaporação e perda de qualidade do conteúdo armazenado.

Portanto reservatórios com teto aberto geralmente são usados para armazenar produtos que podem ser contaminados ou evaporar, como água bruta.

2.1.1.2 Reservatório com teto fixo

São tanques cujos tetos estão diretamente ligados à parte superior de seus costados (Figura 2.2). Podem ser autoportantes ou suportados por uma estrutura interna de perfis metálicos. Os tetos autoportantes são apoiados ou soldados exclusivamente na periferia do costado (BARROS 1998).

Em engenharia e construção de tanques, reservatórios e estruturas similares, o termo "costado" refere-se à parede lateral ou à superfície vertical externa da estrutura. No contexto de um reservatório cilíndrico, o costado seria a parede lateral que forma a parte externa do cilindro.

Esse tipo de reservatório é aplicado no armazenamento de produtos não voláteis, como

água, diesel, petróleo bruto (Fernández 2019).

Figura 2.2: Tanque com teto fixo

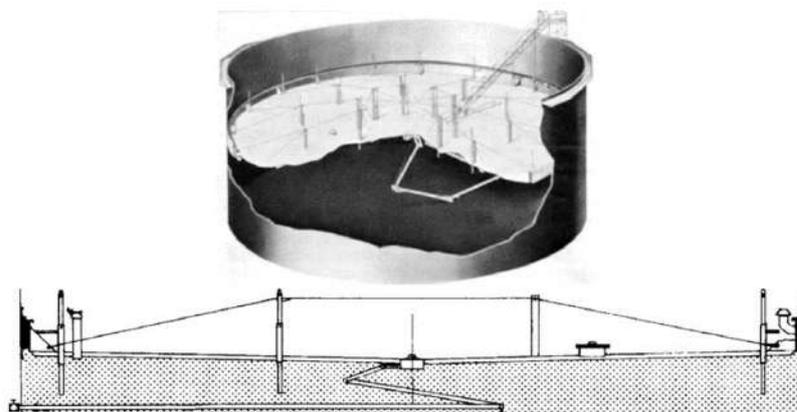


Fonte: (BARROS, 2010)

2.1.1.3 Reservatório com teto flutuante

São tanques cujos tetos estão diretamente apoiados na superfície do líquido armazenado, no qual flutuam, acompanhando sua movimentação durante os períodos de esvaziamento e enchimento (Figura 2.3). São utilizados com o objetivo de minimizar as perdas por evaporação devido à movimentação de produto (BARROS 1998). Projetados para armazenar produtos voláteis, como álcool, gasolina, combustíveis em geral (Fernández 2019).

Figura 2.3: Tanque com teto flutuante



Fonte: (BARROS, 2010)

2.1.2 Reservatório cilíndrico horizontal

Esses reservatórios são frequentemente usados para armazenar líquidos ou gases em locais onde o espaço vertical é limitado. Além disso o formato horizontal (Figura 2.4) permite

transportar líquidos ou gases de um ponto a outro de forma eficiente, podendo ser colocados em cima de carrocerias de caminhões.

Figura 2.4: Tanque cilíndrico horizontal



Fonte: <http://inoxmilk.com.br/produto/tanque-de-estocagem-horizantal/>

2.1.3 Reservatório Esférico

O formato do reservatório tem a forma de uma esfera tridimensional (Figura 2.5). Isso resulta em uma distribuição uniforme da pressão interna, tornando os reservatórios esféricos eficientes em termos de resistência estrutural.

Entretanto a construção de reservatórios esféricos pode ser mais cara e complexa em comparação com tanques com formas mais simples, devido à necessidade de fabricação de peças curvas e à complexidade da montagem.

Esses tipos de reservatórios são comumente utilizados em aplicações industriais, como armazenamento de gás liquefeito, armazenamento de produtos químicos, e até mesmo em tanques de combustíveis em algumas situações.

Figura 2.5: Tanque esférico



Fonte: <https://arcosamexico.mx/product/recipientes-esfericos/>

2.2 Dimensionamento de reservatório

Ao dimensionar um reservatório, o processo inicia-se pela definição cuidadosa das características do produto armazenado. Elementos essenciais, como o volume desejado para armazenagem, a temperatura operacional e a localização do reservatório, são pontos-chave nesse estágio. Esses parâmetros fundamentais fornecem as bases cruciais para um projeto e dimensionamento adequados do reservatório.

Essa consideração detalhada desses elementos essenciais gera uma grande variação de tipos de tanques reservatórios. Cada tipo possui características específicas adaptadas às suas condições de trabalho e ao propósito do armazenamento. Seja um tanque elevado para água potável, um tanque de armazenamento de produtos químicos, ou um tanque subterrâneo para combustíveis, as peculiaridades de cada projeto são moldadas pelas particularidades do líquido armazenado, pelas exigências ambientais e pelos padrões regulatórios aplicáveis.

Essa diversidade de tipos de tanques não apenas reflete a natureza variada das aplicações, mas também destaca a importância de seguir normas específicas, como a NBR 7821, API 650 e AWWA D100, para garantir que o projeto atenda a critérios de segurança, qualidade e eficiência reconhecidos internacionalmente. Na próxima seção, exploraremos mais a fundo como essas normas influenciam e orientam o processo de projeto, assegurando a integridade estrutural e funcionalidade dos reservatórios.

2.3 Normas Técnicas

No Brasil, as normas mais utilizadas pelos projetistas para o dimensionamento de tanques metálicos são a NBR 7821, a API 650 e a AWWA D100 (Gomes 2017). A NBR 7821, atualizada em 1983 é a norma brasileira mais comumente utilizada e é intitulada "Tanques Sol-

dados para Armazenamento de Petróleo e Derivados", sendo publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essa norma é específica para o dimensionamento de tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados.

A norma NBR 7821 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define as exigências mínimas para materiais, projeto, produção, montagem e testes de tanques de aço-carbono. Esses tanques são cilíndricos, verticais, não enterrados, podendo ter teto fixo ou flutuante, são utilizados para o armazenamento de petróleo e seus derivados líquidos. A norma se aplica exclusivamente a tanques que operam sob pressões próximas à atmosférica (com variações da pressão interna da ordem de $0,0035 \text{ kgf/cm}^2$) e em condições onde os produtos armazenados têm temperaturas variando entre 6°C e 200°C . O Anexo F da norma NBR-7821 estabelece requisitos adicionais para tanques de teto fixo projetados para suportar pequenas pressões internas, acima de $0,0035 \text{ kgf/cm}^2$.

A norma regulamentadora americana API 650, em sua edição de 2013, intitulada "Welded Steel Tanks for Oil Storage", é amplamente utilizada no Brasil para o projeto de tanques de aço soldados para armazenamento de petróleo e seus derivados. A API (American Petroleum Institute) é a responsável pela elaboração dessa norma.

Outra norma americana frequentemente adotada é a AWWA D100-05, publicada pela American Water Works Associations. Essa norma, intitulada "Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage", tem como objetivo fornecer requisitos mínimos para o projeto, construção, inspeção e teste de novos tanques de aço carbono soldados destinados ao armazenamento de água.

A presente pesquisa concentrar-se-á na análise e aplicação da norma brasileira NBR 7821, a qual desempenha um papel crucial no contexto nacional para o dimensionamento e projeto de reservatórios de água, e será detalhada na sequência.

2.3.1 NBR 7821

De acordo com (Zorzo 2012), a NBR 7821 é a norma brasileira exclusiva para o projeto de tanques. Embora tenha sido originalmente desenvolvida para tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados, ela também é amplamente utilizada no Brasil para reservatórios de água.

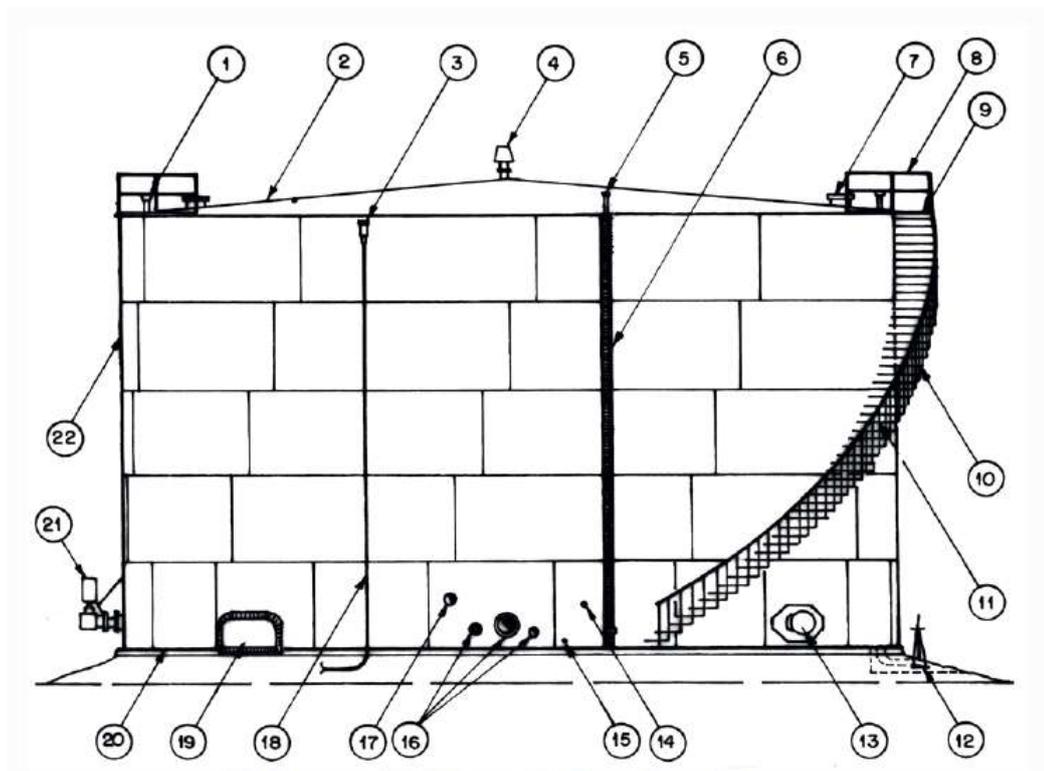
No âmbito deste trabalho, será realizada uma descrição da norma NBR 7821, que estabelece as diretrizes para o projeto e construção de tanques de armazenamento de líquidos derivados de petróleo e produtos químicos. A norma abrange uma série de tópicos cruciais para garantir a segurança, eficiência e durabilidade desses tanques.

A finalidade da NBR 7821, é definida no respectivo documento como:

Esta Norma tem por objetivo estabelecer as exigências mínimas que devem ser seguidas para materiais, projeto, fabricação, montagem e testes de tanques de aço-carbono, soldados, cilíndricos, verticais, não enterrados, com teto fixo ou flutuante, destinados ao armazenamento de petróleo e seus derivados líquidos. (ABNT 1983)

- **Referências:** A norma faz referência a outras normas e documentos relevantes, no Anexo A, fornecendo um contexto mais amplo para a aplicação das diretrizes nela contidas.
- **Terminologia:** Para facilitar a compreensão, a norma estabelece uma terminologia específica, representada pela Figura 2.6, definindo os termos técnicos que serão utilizados ao longo do documento.

Figura 2.6: Tanque e acessórios - Terminologia



Fonte: (ABNT 1983)

1 - Escotilhas de medição	12 - Dreno de fundo
2 - Chapa do teto	13 - Boca de visita no costado
3 - Câmara de espuma	14 - Termômetro
4 - Respiro	15 - Saída de condensado
5 - Caixas de selagem de gases	16 - Bocais de entrada e saída de produto
6 - Régua externa do medidor de bóia	17 - Entrada de vapor de aquecimento
7 - Bocas de visita no teto	18 - Tubulação de espuma
8 - Corrimão do teto	19 - Porta de limpeza
9 - Plataforma da escada	20 - Chapa do fundo
10 - Escada helicoidal de costado	21 - Misturador
11 - Corrimão	22 - Costado

- **Tipos de Tanques:** Descreve os diferentes tipos de tanques abordados pela norma, fornecendo uma classificação de acordo com o teto. Pode incluir tanques sem teto, teto fixo ou teto flutuante.
- **Material:** Especifica os requisitos relativos aos materiais a serem utilizados na construção dos tanques. A norma NBR 7821 pode fornecer orientações específicas sobre os materiais de chapa (fina ou grossa), eletrodo utilizado na soldagem, perfil de aço laminado, tubos, flanges parafusos e porcas que são adequados para a construção de tanques de armazenamento.
- **Projeto:** Detalha as diretrizes e critérios a serem seguidos durante o projeto dos tanques, incluindo projeto do topo, da base, do costado, recomendações de solda e todos os acessórios que o tanque pode ter (bocais, suportes, aberturas, etc.)
- **Fabricação:** Apresenta algumas recomendações para a fabricação dos tanques, garantindo que os padrões de qualidade e segurança sejam mantidos durante o processo.
- **Fundações:** Informações detalhadas e diretrizes específicas sobre o projeto e construção das fundações são apresentadas no Anexo C.
- **Montagem:** Descreve os procedimentos e critérios para a montagem dos tanques, incluindo técnicas de soldagem, fixação e inspeção durante o processo.
- **Métodos de Inspeção, Qualificação e Marcação:** Detalha métodos específicos, como radiográfico para inspeção, qualificação de procedimentos de soldagem, soldadores e operadores, além de requisitos para marcação dos tanques.
- **Divisão de Responsabilidades:** Define claramente as responsabilidades das partes envolvidas no projeto e construção dos tanques, garantindo uma distribuição eficiente de tarefas e obrigações.

- **Anexo A - Normas de referência:** Lista todas as normas que podem ser consultadas como referência.
- **Anexo B Dados típicos de projeto:** Este anexo é uma fonte rica de dados e parâmetros que oferecem diretrizes específicas para o planejamento e execução de projetos
- **Anexo C - Fundações:** Recomendações para construção de fundações para tanques cilíndricos verticais, para armazenamento de produtos de petróleo e construídos segundo a presente Norma.
- **Anexo D - Tetos flutuantes:** O Anexo D foca no projeto e construção de tetos flutuantes.
- **Anexo E - Alternativa de Projeto para Costados:** Este anexo apresenta uma alternativa criteriosa para o projeto dos costados de tanques de armazenamento. Nessa abordagem, destaca-se a utilização de aços com elevada resistência ao impacto, exigindo uma inspeção mais rigorosa no serviço de solda, além de prever detalhes mais elaborados para os diversos bocais e bocais de visita.
- **Anexo F - Projeto de tanques para pequenas pressões internas:** O Anexo F aborda especificamente o projeto de tanques sujeitos a pequenas pressões. No caso de tanques de teto fixo, a pressão máxima pode ser aumentada para os limites estabelecidos por este anexo, desde que atendidas suas exigências adicionais correspondentes.
- **Anexo G - Projeto de costados de tanques admitindo-se tensões elevadas:** O Anexo G apresenta uma alternativa específica para o projeto dos costados dos tanques, consistindo em uma variação do modelo descrito na norma, notavelmente caracterizada por mudança de fórmulas no cálculo das espessuras das chapas, mudança de material com maior resistências para se utilizar e critérios mais específicos como por exemplo testes de impactos nas chapas.
- **Anexo H - Tetos flutuantes cobertos:** O Anexo H estabelece requisitos mínimos para tetos fixos, tetos flutuantes e acessórios de tanques, priorizando segurança e durabilidade, aplicáveis a tanques novos ou instalações em tanques existentes. Considerações específicas, como ventilação, podem estender esses requisitos em situações particulares.
- **Anexo I - Tanques de armazenamento montados na fábrica:** O Anexo I estabelece requisitos para projeto e fabricação de tanques verticais, com capacidade de montagem na fábrica e entrega prontos para instalação. Diâmetro máximo: 6 m, conforme limites da presente norma.
- **Anexo J - Alternativa para cálculo da espessura do costado:** O Anexo J propõe um método alternativo para calcular espessuras de costado, substituindo o método padrão da

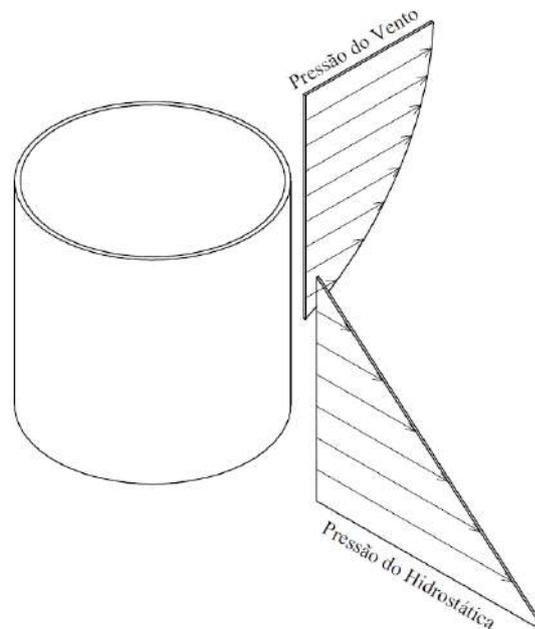
Norma. Utiliza o método do ponto de projeto variável para cada anel, onde é calculado cada anel do costado de uma forma, fazendo com que haja uma variação na espessura no costado, visando reduzir o peso total de material e permitir a construção de tanques de maiores diâmetros.

- **Anexo K - Folha de dados:** O Anexo K propõe uma Folha de Dados de 3 páginas para facilitar a encomenda de tanques em conformidade com a Norma, permitindo ao comprador inserir informações ou selecionar opções, enquanto os esclarecimentos indicam espaços para dados do tanque e componentes, com a possibilidade de identificar conjuntos de dados comuns. Durante a construção, o fabricante fornece revisões na Folha de Dados ao comprador para manter informações precisas sobre o tanque fabricado.

2.3.2 Esforços solicitantes

Nesta seção, abordaremos os diversos esforços solicitantes (Figura 2.7) que impactam as estruturas de reservatórios de água. Os esforços solicitantes referem-se às forças e pressões que atuam sobre a estrutura do reservatório em diferentes condições operacionais. Estes esforços podem originar-se de várias fontes e fatores, desempenhando um papel crucial na análise e no dimensionamento adequado dessas estruturas.

Figura 2.7: Esquema dos esforços solicitantes



Fonte: Do autor

2.3.2.1 Ação do Peso

O peso é o produto da massa do objeto e aceleração da gravidade na região, dentro do respectivo campo gravitacional, em que o objeto está localizado (Young e Freedman 2008).

É importante destacar que o peso não é a mesma coisa que a massa, embora sejam frequentemente confundidos. A massa é uma propriedade intrínseca dos corpos, que indica a quantidade de matéria presente neles e pode ser medida em quilogramas (kg) no Sistema Internacional de Unidades - SI.

O estudo do peso é fundamental em diversas áreas da física, como a mecânica, a dinâmica, a termodinâmica, entre outras. Conhecer o peso de um objeto é essencial para calcular sua aceleração, velocidade, forças que atuam sobre ele, entre outras grandezas físicas relevantes (Young e Freedman 2008).

Para calcular o módulo da força peso total de uma estrutura, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$P = mg \quad (2.1)$$

onde P é a força peso, m é a massa do objeto e g é a força gravitacional.

2.3.2.2 Ação hidrostática

A pressão hidrostática demonstrada na Figura 2.8 é um conceito importante em diversas áreas da física e da engenharia, como na hidráulica, na oceanografia, na engenharia naval, entre outras. Por exemplo, em um reservatório de água, a pressão hidrostática deve ser medida em diferentes pontos para garantir que a estrutura esteja suportando corretamente o peso do líquido (White 2004).

Segundo a Lei de Stevin, a pressão hidrostática em um ponto dentro de um volume ocupado por um líquido em repouso é igual ao produto da densidade do líquido, da aceleração da gravidade e da profundidade do ponto em relação à superfície do líquido. Essa relação é expressa pela seguinte equação:

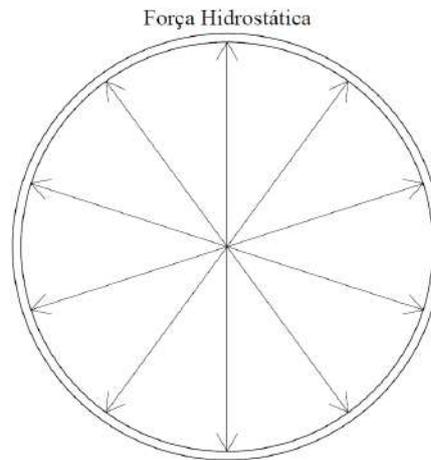
$$P_h = \rho gh \quad (2.2)$$

onde P_h é a pressão hidrostática, ρ é a densidade do líquido, g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade do ponto em relação à superfície do líquido.

A pressão hidrostática é um fator importante a ser considerado em projetos de engenharia que envolvem líquidos, como reservatórios, barragens, tubulações, entre outros. Isso é importante, pois, para um mesmo nível de fluido, a pressão hidrostática é a mesma. Logo, considerações geométricas cuidadosas considerando o fluido em questão devem garantir que a

estrutura irá suportar os respectivos esforços.

Figura 2.8: Pressão hidrostática na lateral do cilindro



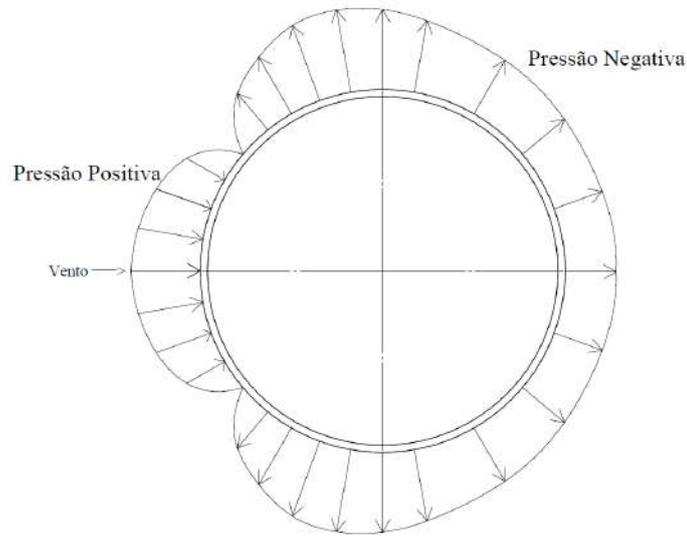
Fonte: Do autor

2.3.2.3 Ação do Vento

A ação do vento em estruturas de reservatórios cilíndricos deve ser um fator importante a ser considerado no projeto e na operação dessas estruturas. O vento pode exercer forças sobre a superfície dos reservatórios, causando pressão ou sucção, que podem afetar a estabilidade e a segurança da estrutura.

Considerando que as estruturas possuem uma grande relação de diâmetro/espessura da estrutura, a ação do vento é um fator importante a ser analisado quando os mesmos estão vazios, pois é nessa fase que a estrutura fica mais suscetível às ações do vento.

Figura 2.9: Esboço da pressão do vento na lateral do cilindro

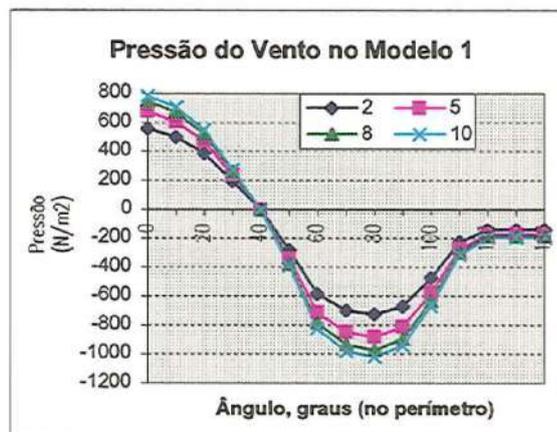


Fonte: Do autor

O perfil de pressão será caracterizado pelas características do vento que incide na estrutura, no estudo a velocidade de referência utilizada para o cálculo da pressão do vento é de 40m/s , criando um perfil de pressão dinâmica de acordo com a Figura 2.9.

Para calcular as pressões do vento, adotou-se uma equação que descreve a força exercida pelo vento em relação a uma área específica do tanque. Dado que a pressão sobre a estrutura varia para cada altura, de acordo com a camada limite atmosférica, recorreu-se à dissertação de Junior 1998 como referência para o trabalho, onde foi calculado um gráfico da pressão do vento pela angulação circunferencial que será utilizado para modelar a pressão do vento.

Figura 2.10: Gráfico da pressão do vento por ângulo circunferencial



Fonte: (Junior 1998)

A influência variável do vento é meticulosamente calculada de acordo com a norma

NBR6123 - "Forças devidas do vento em edificações"(1988). Em termos gerais, assume-se que o vento pode agir em qualquer direção horizontal. Dado que a estrutura do reservatório tem simetria cilíndrica no eixo vertical (em relação ao solo), considera-se que o vento pode incidir perpendicularmente a qualquer geratriz do reservatório.

A força do vento atuante na estrutura, foi assumida e considerada, de acordo com a norma NBR 6123, como um incremento de pressão ΔP atuando na direção normal a um elemento de área dA , conforme equação 2.3

$$\Delta P = C_{pe} q dA \quad (2.3)$$

Aqui, C_{pe} é o coeficiente de pressão externa, q é a pressão dinâmica do vento em um ponto onde ocorre a estagnação do ar (obtida pela expressão $q = 0,613(V_k)^2$), com $V_k = S1S2S3V_0$, onde V_k é em m/s e q em N/m^2 .

A velocidade V_0 é denominada velocidade básica, representando uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez a cada 50 anos. Essa medida é tomada a 10 metros acima do terreno, em um local plano e aberto. A velocidade de referência utilizada foi de $40m/s$

S1 é o fator topográfico das variações no relevo do terreno, enquanto S2 é um efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação. S3 é o fator estático que avalia o grau de segurança e a vida útil da estrutura.

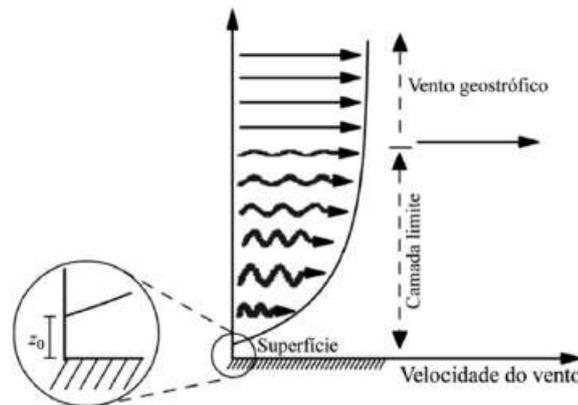
O vento exibe uma notável variabilidade, tanto em termos geográficos quanto temporais, sendo influenciado por diversos fatores que afetam sua intensidade, direção e comportamento. Aspectos como as condições do solo, a topografia da região e a presença de obstáculos desempenham um papel significativo na modulação do vento.

O escoamento do ar sobre a superfície terrestre é diretamente influenciado pelo relevo e pela presença de obstáculos, gerando turbulências no fluxo atmosférico. A rugosidade da superfície, uma propriedade física que descreve como a superfície terrestre reduz o momento e absorve o impacto dos ventos, também desempenha um papel crucial nesse cenário (Picolo 2014).

A complexidade do relevo e a altura dos seus componentes contribuem para perturbações significativas no movimento do ar. Como resultado, a velocidade do vento não apresenta uniformidade vertical, originando um perfil com valores mais baixos próximo ao solo e aumentando progressivamente em alturas maiores.

Como ilustração, a Figura 2.11 representa de maneira visual o perfil vertical da velocidade do vento, abrangendo desde a superfície até a altura do vento geostrófico (Picolo 2014).

Figura 2.11: Perfil vertical da velocidade do vento



Fonte: (Picolo 2014)

2.3.3 Tensão equivalente de von Mises

O critério de von Mises é aplicado a materiais que se deformam plasticamente, ou seja, materiais que, uma vez atingido um certo limite de tensão, não retornam completamente à sua forma original após a remoção da carga. Este critério considera que o material falhará quando a energia de deformação plástica por unidade de volume atingir um valor crítico num ensaio de tração uniaxial (Norton 2013). Para materiais isotrópicos e homogêneos, esse valor crítico é dado pela inequação 2.4.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3J_2} \leq \sigma_y \quad (2.4)$$

onde J_2 é a segunda invariante do tensor de deformação, σ_y é a tensão de escoamento no material e σ_{VM} é a tensão equivalente de von Mises. A tensão equivalente de von Mises é uma medida unificada que incorpora os efeitos de todas as componentes normais e cisalhantes do tensor de tensões σ_{ij} em um ponto específico de um material ou estrutura.

J_2 pode ser escrito em função das tensões principais no ponto material, σ_1 , σ_2 e σ_3 .

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.5)$$

Em um estado bidimensional de tensão, a fórmula de von Mises é simplificada para:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}{2}} \quad (2.6)$$

O critério de von Mises é particularmente útil para prever falhas em materiais submetidos a carregamentos multiaxiais, onde as tensões principais variam em magnitude e direção.

Ele fornece uma abordagem simplificada para avaliar a segurança de um material em relação ao início de falhas plásticas. Em um contexto de estruturas bidimensionais, tais como chapas, como tanques ou recipientes, a análise das tensões ao longo da espessura da chapa desempenha um papel crucial na avaliação da integridade estrutural. Pode-se dividir o material ao longo da espessura em camadas, ou posições específicas ao longo dessa direção. Particularmente, as posições ao longo da espessura nas posições extremas $\pm t_0/2$ são chamadas de top-bottom. Onde t_0 seria espessura da chapa, por exemplo. Para a metodologia e software utilizados nesse trabalho, para estrutura estudada a parte externa do reservatório é referenciada por z_1 e a parte interna por z_2 .

2.3.4 Soldas em estruturas metálicas

A soldagem é um processo fundamental na indústria, desempenhando um papel crucial na fabricação e integridade estrutural de diversos produtos. A norma NBR-7821 estabelece diretrizes precisas para a execução de soldas, definindo termos, dimensões e restrições que visam garantir a qualidade e segurança das estruturas soldadas. Vamos explorar alguns dos principais conceitos abordados por essa norma.

2.3.4.1 Tipos de Solda

Dentre os variados métodos de soldagem, a escolha do tipo adequado é determinada por fatores como o tipo de material, a aplicação final e os requisitos específicos de resistência e durabilidade. A norma define os tipos de soldas possíveis para ser utilizado no projeto.

- **Solda de Topo:** Executada entre duas peças posicionadas topo a topo, podendo apresentar faces paralelas ou chanfradas.
- **Solda de Ângulo:** Apresenta um corte transversal triangular, unindo superfícies em ângulo reto, como juntas sobrepostas em "T" ou de quina.
- **Solda Intermitente:** Um cordão de solda de ângulo ou sobreposto que é interrompido em intervalos regulares.

2.3.4.2 Dimensão da Solda

- **Solda de Topo:** Profundidade do chanfro acrescida da penetração de raiz, quando especificada.
- **Solda de Ângulo:** O comprimento corresponde ao lado do maior triângulo isósceles ou aos catetos do maior triângulo retângulo inscrito no corte transversal.

2.3.4.3 Restrições sobre Juntas Soldadas

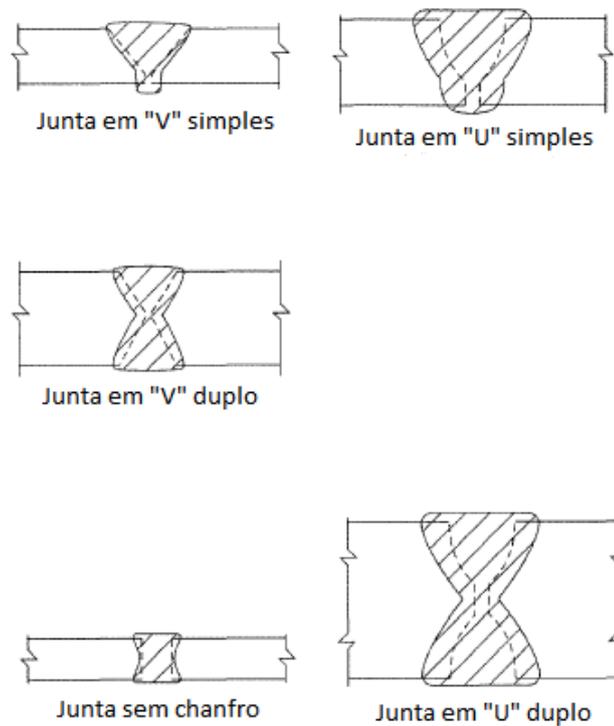
De acordo com a Norma NBR-7821, a Figura 2.12, são representações das soldas associadas às juntas verticais do costado do tanque. Essas soldas desempenham um papel crucial na integridade estrutural, garantindo a estabilidade e a resistência da estrutura vertical do tanque. A análise dessas soldas é essencial para assegurar que a união entre as placas do costado seja realizada de maneira eficaz, minimizando possíveis falhas e garantindo a segurança operacional. Alguns destaques da norma são:

- Os pontos de solda não têm valor de resistência estrutural.
- Dimensões mínimas para soldas de ângulo, dependendo da espessura das chapas.
- Juntas sobrepostas simplesmente soldadas são permitidas apenas nas chapas do fundo e do teto dos tanques.
- Especificações detalhadas para a sobreposição em juntas sobrepostas, variando com o tipo de junta.

Na Figura 2.13 é apresentado as juntas entre o costado e a base do tanque, abrangendo as soldas nessa região. Essa junção é crítica, pois lida com as cargas transmitidas do costado para a base e vice-versa.

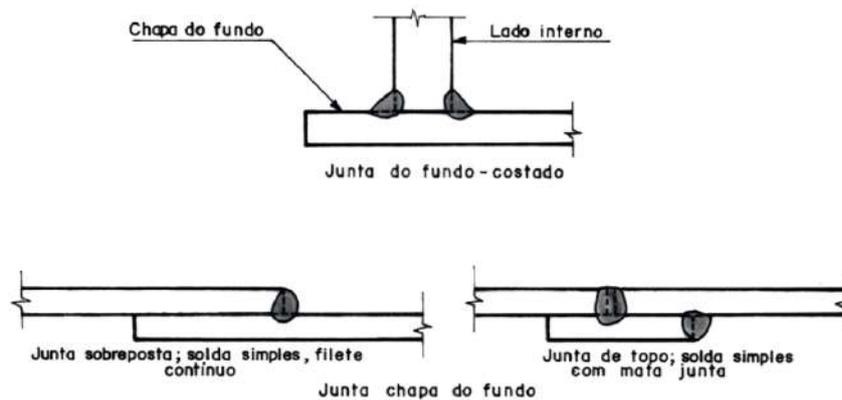
Será conduzida uma análise minuciosa nas soldas do reservatório, representadas nas Figuras 2.12 e 2.13, focando nas uniões verticais do costado e na junção entre o costado e a base do tanque, incluindo as soldas associadas na base.

Figura 2.12: Juntas verticais do costado



Fonte: (ABNT 1983)

Figura 2.13: Juntas típicas de fundo e teto



Fonte: (ABNT 1983)

2.3.5 Resistência de Uniões Soldadas

Apesar da importância da concordância entre as características do eletrodo e do metal base, de acordo com Shigley e Mischke 2005, sua influência não é tão acentuada quanto a velocidade de execução, a excelência da operação e a aparência final do material da junta. Um aspecto notavelmente variável que contribui significativamente para a resistência da união

soldada é a resistência do eletrodo. Algumas propriedades mínimas destacadas na Figura 2.14, onde as resistências são expressas em kpsi e (MPa). Para este estudo, o eletrodo E60xx será utilizado como referência para os cálculos.

Figura 2.14: Propriedades mínimas metal-solda

Número de Eletrodo AWS*	Resistência à tração	Resistência ao escoamento	Elongação percentual
E60xx	62(427)	50(345)	17-25
E70xx	70(482)	57(393)	22
E80xx	80(551)	67(462)	19
E90xx	90(620)	77(531)	14-17
E100xx	100(689)	87(600)	13-16
E120xx	120(827)	107(737)	14

Fonte: (Shigley e Mischke 2005)

De acordo com Shigley e Mischke 2005, uma das normas mais recomendadas para materiais de construção metálicas é a American Institute of Steel Construction (AISC). As tensões permissíveis atualmente são baseadas na resistência ao escoamento do material, em vez da resistência última. As tensões calculadas sob a garganta das juntas soldadas simétricas devem ser confrontadas com as tensões admissíveis correspondentes, conforme especificado nos diversos tipos de juntas soldadas, utilizando as informações fornecidas na Figura 2.15.

Figura 2.15: Tensões permitidas pela norma AISC para metal de solda

Tipo de carregamento	Tipo de solda	Tensão permissível	n*
Tração	Topo	$0.60S_y$	1.67
Suporte	Topo	$0.90S_y$	1.11
Flexão	Topo	$0.60-0.66S_y$	1.52-1.67
Compressão simples	Topo	$0.60S_y$	1.67
Cisalhamento	Topo ou filete	$0.30S_{ut}^{\dagger}$	

* O fator de segurança n tem sido computado usando-se a teoria da energia de distorção

† A tensão de cisalhamento no metal base não excederá a $0.40S_y$ do metal base.

Fonte: (Shigley e Mischke 2005)

Dessa forma, na região da solda em estudo, a abordagem adotada será tratá-la como uma solda de topo em tração. A resistência à tração da solda de topo foi considerada como a média aritmética (Equação 2.7) das resistências dos materiais unidos.

$$S_{ySolda} = \frac{S_{yBase} + S_{yEletrodo}}{2} = \frac{250 + 345}{2} = 297,5 MPa \quad (2.7)$$

2.4 Método dos elementos finitos (MEF) em problemas de análise e modelagem

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica amplamente utilizada para a resolução de problemas em diversas áreas da engenharia e ciência. O MEF é particularmente eficaz na análise de sistemas com geometrias complexas e condições de contorno que não podem ser tratadas de forma analítica. De acordo com Logan 2002, a abordagem do MEF envolve a discretização, ou seja a divisão da região de interesse em elementos finitos, que são pequenas sub-regiões, a fim de aproximar a solução de um problema contínuo. A seguir, os passos essenciais envolvidos no processo do MEF:

2.4.1 Discretização da região

A região de interesse é dividida em sub-domínios, denominados elementos (finitos), que podem ser de diferentes tipos de acordo com a forma, número de dimensões espaciais, física implementada e grau de aproximação das soluções locais.

Cada elemento é definido por um conjunto de nós, que são pontos de interseção na região de estudo. A escolha do tamanho dos elementos, ou malha, é uma consideração crítica, pois afeta a precisão da solução. Malhas mais densas, com elementos menores, podem reduzir o erro de discretização espacial (Bathe 2006).

A escolha dos elementos usados em uma análise de elementos finitos depende da composição física do corpo sob condições reais de carga e de quão próximos do comportamento real o analista deseja que os resultados estejam. O julgamento sobre a adequação de idealizações unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais é necessário. Além disso, a escolha do elemento mais apropriado para um problema específico é uma das principais tarefas que devem ser realizadas pelo projetista/analista (Logan 2002). Exemplos de alguns elementos são mostrados nas Figuras 2.16, 2.17, 2.18.

Figura 2.16: Elementos linear (Tipicamente usado para representar mola, viga e barra)



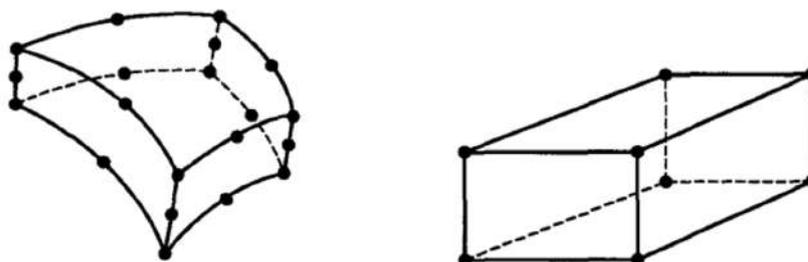
Fonte:(Bathe 2006)

Figura 2.17: Elementos superficiais (Típicamente usado para representar chapas e casca)



Fonte:(Bathe 2006)

Figura 2.18: Elementos sólidos (Típicamente usado para representar elementos do meio contínuo)



Fonte:(Bathe 2006)

2.4.2 Solução aproximada para o problema estrutural

Em cada elemento, a solução é aproximada usando funções interpoladoras. Geralmente, essas funções são polinomiais e são selecionadas com base na natureza do problema e na ordem de precisão desejada. A partir das funções interpoladoras, são derivadas equações que descrevem a resposta aproximada em cada elemento. Essas equações podem ser equações diferenciais ou integrais, dependendo do contexto (Logan 2002).

A física de interesse para este trabalho, trata de deformações e tensões em estruturas a partir das quais é possível a identificação de falhas estruturais. As relações constitutivas, são leis que definem a física pontual de determinados materiais. Essas leis relacionam as grandezas pontuais de deformação, para obtermos as tensões nos materiais e conseqüentemente avaliar falhas estruturais.

Elaborando o problema estrutural, para deslocamento unidimensional na direção x , por exemplo, a deformação (ϵ_x) está relacionada ao deslocamento (u_x), pela Equação 2.8. Nela, são considerando pequenas deformações, a deformação na direção x pode ser obtida pelo gradiente da função deslocamento U_x (Logan 2002).

$$\epsilon_x = \frac{du_x}{dx} \quad (2.8)$$

Para obtermos as tensões e assim tornar possível a identificação de falhas em materiais, é preciso obter essas grandezas a partir das deformações. A lei constitutiva mais comum é a Lei de Hooke, frequentemente utilizada em análise de tensões no regime linear, pode ser definida para o caso unidimensional pela Equação 2.9, que relaciona a tensão σ_x à deformação ϵ_x na direção x , sendo E o módulo de elasticidade.

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (2.9)$$

Para o caso genérico e tridimensional, a tensão e a deformação são dadas por tensores de segunda ordem e são relacionados pela lei de Hooke escrita por um tensor constitutivo de quarta ordem.

2.4.3 Montagem do sistema global

Uma vez discretizado o domínio do problema inicial, é preciso resolver um sistema de equações proporcional ao número de graus de liberdade que a discretização e simplificação do sistema gerou na aplicação do MEF. O sistema global a ser resolvido consiste em equações algébricas e representa uma aproximação da solução do problema original. Esse sistema global é formado a partir da integração das contribuições de todos os elementos que formam o domínio de estudo, a partir das chamadas matrizes elementares de rigidez, para o caso estrutural estático.

O sistema global, representativo do problema estrutural em questão, pode ser escrito na seguinte forma matricial:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (2.10)$$

Onde $\{F\}$ é o vetor de forças generalizado e $\{U\}$ é o vetor deslocamentos generalizado. A quantidade de graus de liberdade é definida pela soma de todos os graus de liberdade em cada nó da malha formada pelas elementos.

Esse sistema linear é tipicamente resolvido de modo direto mas pode ser resolvido por métodos iterativos a depender da complexidade e assimetria da matriz global.

2.4.4 Etapas para solução computacional de problemas via MEF

A resolução de problemas complexos em engenharia, especialmente aqueles envolvendo milhões de graus de liberdade, demanda o uso de abordagens computacionais avançadas. Nesse contexto, os programas (software) de CAE (*Computer Aided Engineering*) que abordam o Método dos Elementos Finitos (MEF), surgem como ferramentas fundamentais na engenharia moderna. Ao aplicar o MEF com o auxílio desses programas, a solução de problemas torna-se mais eficiente, permitindo uma análise mais próxima da realidade. Este tópico descreve as três etapas essenciais para a solução de problemas utilizando MEF, apontando os programas da Altair que foram utilizados nesse trabalho e que são programas já conhecidos e validados tecnicamente pela indústria.

2.4.4.1 Pré-processamento: Modelagem e Preparação

Antes de iniciar a resolução de um problema via MEF, é crucial realizar o pré-processamento. Esta etapa envolve a criação de um modelo computacional que representa fielmente o sistema em análise. Utilizando softwares como o HyperMesh da Altair[®], foi possível desenvolver malhas eficientes e precisas, definindo geometrias, propriedades de materiais e condições de contorno. A qualidade do pré-processamento influencia diretamente na acurácia e na eficiência da simulação subsequente.

2.4.4.2 Processamento: Análise Numérica

A fase de processamento é central na solução de problemas via MEF. Nesta etapa, os softwares de simulação, como o OptiStruct da Altair[®], entram em cena. Eles realizam a análise numérica do modelo, aplicando conceitos matemáticos e mecânicos para obter soluções aproximadas. O processamento via MEF monta e resolve o sistema de equações de equilíbrio para determinar as respostas do sistema às condições impostas. É no processamento que são gerados os valores quantitativos para as variáveis (GDLs) do problema e variáveis derivadas/complementares.

2.4.4.3 Pós-processamento: Interpretação e Visualização

Após a análise numérica, é essencial interpretar os resultados de maneira significativa. Ferramentas como o HyperView da Altair facilitam o pós-processamento, permitindo a visualização e interpretação dos dados gerados. Essa etapa é crucial para entender o comportamento do sistema, identificar pontos críticos e otimizar o design.

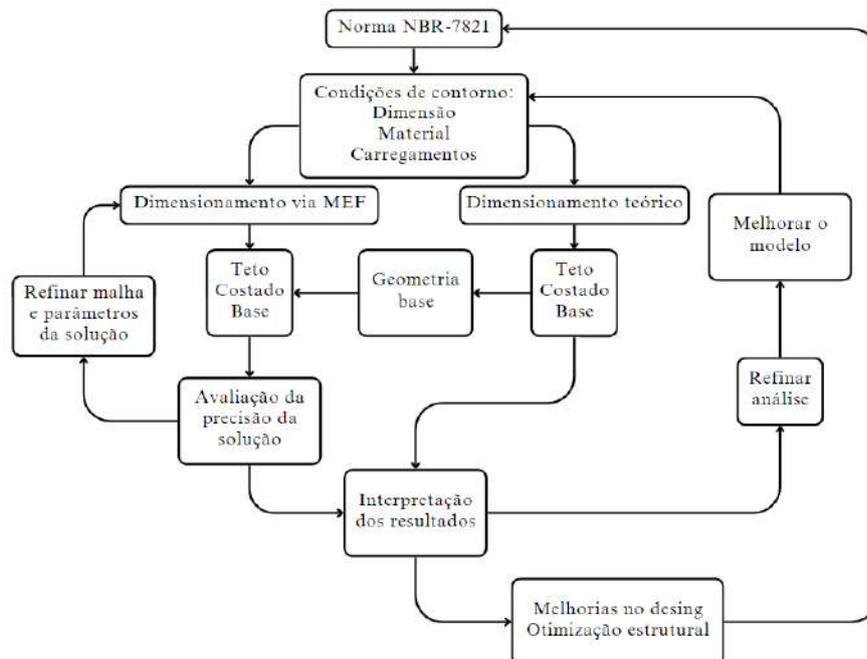
3 METODOLOGIA

3.1 Projeto do reservatório baseado na norma NBR-7821

A metodologia proposta neste projeto visa realizar uma análise abrangente do comportamento estrutural de um tanque reservatório, utilizando duas abordagens distintas: o cálculo analítico baseado na norma NBR 7821 e o método de elementos finitos. Essa comparação permitirá uma avaliação precisa das tensões, deformações e segurança estrutural do reservatório em questão. A norma NBR 7821 estabelece diretrizes e critérios para o projeto e execução de tanques de armazenamento, enquanto o método de elementos finitos utiliza técnicas computacionais avançadas para modelar o comportamento estrutural com acesso ao comportamento estrutural de todo o o domínio do tanque, possibilitando um cálculo com maior precisão. Ao combinar essas duas abordagens, será possível avaliar as diferenças entre as previsões teóricas e os resultados obtidos por meio de simulações computacionais, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões e aprimoramento do projeto do tanque reservatório.

Com o objetivo de realizar uma avaliação abrangente do comportamento estrutural desses tanques, foi desenvolvida uma metodologia sólida, representada de maneira visual de acordo com a Figura 3.1.

Figura 3.1: Fluxograma



Fonte: Do autor

3.1.1 Material

De acordo com o tópico 5.1 da norma brasileira 7821 é possível escolher diversos tipos de material para a construção de reservatórios, entre eles o aço ASTM 36. O American Society for Testing and Materials A36 - ASMT A36 - é uma norma para aços com aplicabilidade estrutural. Será utilizado o aço ASMT A36 neste estudo pelo seu custo, alta resistência, alta ductilidade, boa soldabilidade e disponibilidade, sendo amplamente usado no mundo todo. A Tabela 3.1 descreve as propriedades mecânicas do aço que se enquadra na norma ASMT A36.

Tabela 3.1: Propriedade mecânicas do aço ASMT-A36, (Luz 2017)

Propriedades Mecânicas	
Densidade	7,85 g/cm ³
Limite de escoamento	250 MPa
Resistencia a tração	400 MPa - 550MPa
Módulo de elasticidade	200GPa
Coefficiente de Poisson	0,26
Módulo de encruamento	3,6 Gpa

3.1.2 Projeto do Costado

Segundo a NBR-7821, espessura do costado do cilindro depende da densidade do líquido a ser armazenado, do diâmetro do cilindro e da altura máxima do líquido. Além disso, pode ser adicionada uma sobre espessura para combater a corrosão, a qual é determinada pelo comprador ou projetista. Essa sobre espessura pode ser aplicada em alguns anéis específicos ou pode variar de anel para anel, dependendo do tipo de líquido armazenado.

A espessura da chapa de cada anel do costado deve ser calculada de acordo com o projeto, a norma NBR-7821 disponibiliza a equação (3.1).

$$e = 0,04D(H - 0,3)G \quad (3.1)$$

Onde, o e é o valor da espessura calculada em milímetros, D é o diâmetro nominal do tanque em metros, H é a altura máxima do líquido armazenado em metros e G é a densidade do líquido armazenado em gramas por centímetro cúbico.

A Equação (3.1) é derivada da teoria da tensão na membrana circunferencial de um cilindro sujeito a pressão interna, juntamente com a definição de pressão hidrostática. Essa equação considera a tensão máxima atuando a uma distância de 300 mm acima da linha central da junta horizontal inferior do anel em questão.

De acordo com (Beer e Johnston 1989), a tensão tangencial em cilindros pressurizados,

pode ser dado pela equação (3.2).

$$\sigma = \frac{Pr}{t} \quad (3.2)$$

Onde σ é a tensão tangencial em MPa , P é a pressão interna em MPa , r sendo o raio do cilindro em metros e t é a espessura da membrana em milímetros.

(White 2004) descreve a fórmula de pressão hidrostática de acordo com a equação (3.3).

$$P = P_0 + \rho gh \quad (3.3)$$

Onde P = Pressão MPa , P_0 = Pressão inicial MPa , ρ = densidade do líquido ton/mm , g = gravidade em mm/s , h = altura do líquido em milímetros.

Considerando $P_0 = 0$, $r = \frac{D}{2}$, $\rho = G$, $h = H$, $t = e$ e igualando as Eq. (3.2) e (3.3), temos:

$$\frac{2\sigma e}{D} = GHg \quad (3.4)$$

Isolando a espessura:

$$e = \frac{g}{2\sigma} DHG \quad (3.5)$$

A equação 3.1, da norma, considera $g/2\sigma = 0,04$ e também aplica uma correção de 30% ao valor da espessura. Essa correção não é detalhada na norma. O fator multiplicador implica em uma transformação de unidades e a utilização de uma tensão máxima admissível de $14,8 \text{ kgf/mm}^2 \approx 151 \text{ MPa}$. Entretanto para uma abordagem mais ampla é possível utilizar a equação (3.5) para os cálculos de espessura com a qual se pode variar a tensão máxima admissível, além da densidade do líquido.

3.1.3 Projeto do Topo

O projeto de tetos cônicos autoportantes segue a norma NBR-7821 para garantir sua estabilidade sob uma sobrecarga de 60 kgf/m^2 .

A norma NBR-7821 estabelece que o ângulo do cone do teto (q) deve variar entre 10° e 37° em relação à horizontal, influenciando diretamente a forma e inclinação do teto.

A espessura mínima das chapas do teto (e) é determinada pela equação 3.6.

$$e = \frac{D}{5,64 \sin(q)} \quad (3.6)$$

Considerando um tanque com diâmetro nominal D em metros, segundo a NBR-7821, é essencial garantir uma espessura mínima de 4,5 mm para assegurar a resistência estrutural, com uma restrição superior de 12,5 mm. No entanto, caso as chapas do teto sejam fortalecidas por perfis soldados, a espessura não necessita seguir a fórmula mencionada, desde que seja igual ou superior a 4,5 mm.

A determinação da espessura do teto envolve considerações específicas, e ao realizar os cálculos para um diâmetro de 25 metros e um ângulo de 20° , obtém-se uma espessura de 12,96 mm. É importante observar que, de acordo com as normas estabelecidas, a espessura selecionada deve ser restrita a 12,5 mm.

Além disso, a condição para a área total da seção, considerando a cantoneira de topo, o costado e o teto até as distâncias de 16 vezes suas espessuras, medida a partir do ponto mais afastado da união entre a cantoneira superior e o costado, é expressa pela seguinte inequação 3.7, onde, A_{total} é a área total da seção em mm^2 , D é o diâmetro nominal do tanque em metros, θ é o ângulo do teto em graus.

$$A_{\text{total}} \geq \frac{D^2}{60 \tan(\theta)} \quad (3.7)$$

3.1.4 Projeto da Base

O projeto do fundo de tanques de armazenamento segue algumas especificações rigorosas (ABNT 1983).

3.1.4.1 Dimensões das chapas

A espessura mínima das chapas do fundo é de 6,3 mm, excluindo sobre-espessura de corrosão. Chapas, incluindo as recortadas para a periferia, devem ter largura mínima de 1200 mm.

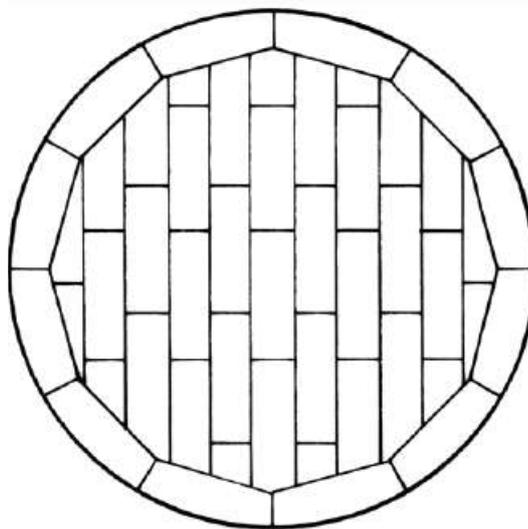
Para tanques grandes (> 25 m), recomenda-se conectar as chapas periféricas formando anéis, denominadas chapas anulares, representado na Figura 3.2. As espessuras ideais são apresentadas na Tabela 3.2. As chapas anulares devem ter o maior comprimento possível, largura ≥ 500 mm. Recomenda-se radiografar ou examinar com ultrassom os 1500 mm adjacentes à periferia em 10% das juntas soldadas.

Tabela 3.2: Espessura das chapas anulares da base

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

Fonte: (ABNT 1983)

Figura 3.2: Distribuição das chapas do fundo quando se usam chapas anulares

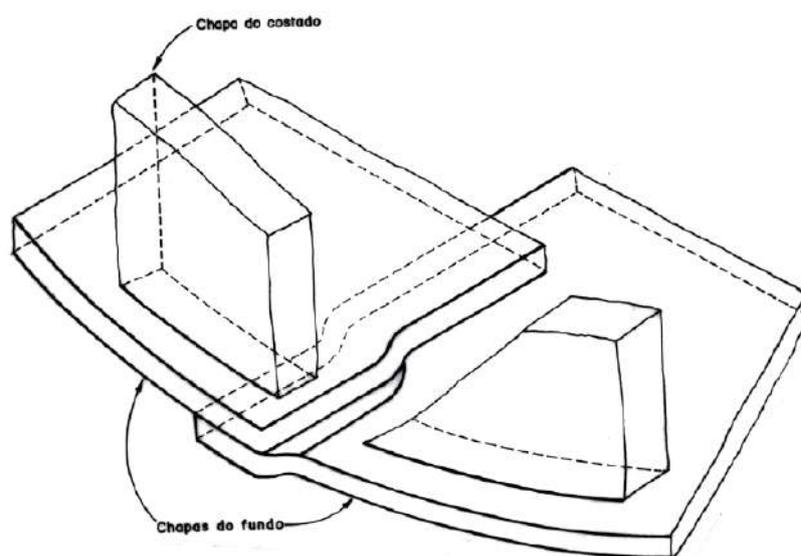


Fonte: (ABNT 1983)

3.1.4.2 Métodos de Construção do Fundo

A construção do fundo pode ser realizada por meio de sobreposição ou união das chapas, seguindo uma das metodologias a seguir.

Figura 3.3: Rebaixo nas juntas sobrepostas das chapas do fundo sob o costado do tanque



Fonte: (ABNT 1983)

- Sobreposição

As chapas do fundo que sejam unidas por juntas sobrepostas devem ser retangulares e esquadrejadas. Juntas com três sobreposições devem distanciar-se no mínimo 300 mm do costado e entre si. Extremidades rebaixasadas são necessárias quando há soldas sobrepostas (Figura 3.3).

- União

Juntas de topo exigem extremidades preparadas para solda com bordas paralelas ou chanfradas em V simples. Abertura mínima da fresta para chapas não chanfradas: 6 mm. Soldas de topo podem ter um cobrejunta de 3 mm; espaçadores mantêm a abertura. Outros métodos podem ser submetidos à aprovação do comprador. Juntas de três chapas devem ter distanciamento mínimo de 300 mm.

3.1.4.3 Uniões entre Chapas do Costado e do Fundo

União por solda de ângulo nas faces das chapas do costado. Dimensão da solda não superior a 13 mm, nem inferior à espessura nominal da chapa mais fina entre costado e fundo sob o costado.

A norma recomenda que o comprador garanta fundações adequadas para tanques de armazenamento, especialmente os de grandes dimensões (detalhes no Anexo C).

É importante ressaltar que todas as etapas foram conduzidas de acordo com procedimentos padronizados. A utilização das fórmulas especificadas nos regulamentos proporcionou uma abordagem consistente e confiável para o desenvolvimento do projeto. Os resultados obtidos para essas fórmulas são minuciosamente tabulados na norma, abrangendo uma variedade de reservatórios, com o intuito de oferecer uma referência abrangente para projetos similares.

Vale destacar que, neste documento, optamos por manter o foco nas informações essenciais, não detalhando aspectos específicos pelos anexos. Essa abordagem visa proporcionar uma compreensão clara e direta do projeto, seguindo as diretrizes normativas, e facilitando a consulta das informações fundamentais. Em caso de necessidade de informações adicionais ou detalhes específicos, os anexos podem ser consultados conforme apropriado.

3.2 Projeto de acordo com o método dos elementos finitos

Como mencionado anteriormente, para validar e aprimorar as premissas estabelecidas no projeto do tanque reservatório metálico, será empregado o Método dos Elementos Finitos (MEF). Para esta tarefa, serão utilizados os renomados softwares da Altair: HyperMesh (HM) para a geração eficiente de malhas, OptiStruct (OP) para análise linear estática e HyperView (HV) para a interpretação visual dos resultados.

A escolha pela análise linear estática proporcionará uma compreensão inicial e abrangente das características estruturais do tanque. Este método considera a relação linear entre forças aplicadas e deformações resultantes, sendo particularmente relevante para estruturas sujeitas a cargas estáticas. O uso conjunto do HM, OP e HV garantirá uma análise robusta e precisa, possibilitando ajustes no design conforme necessário.

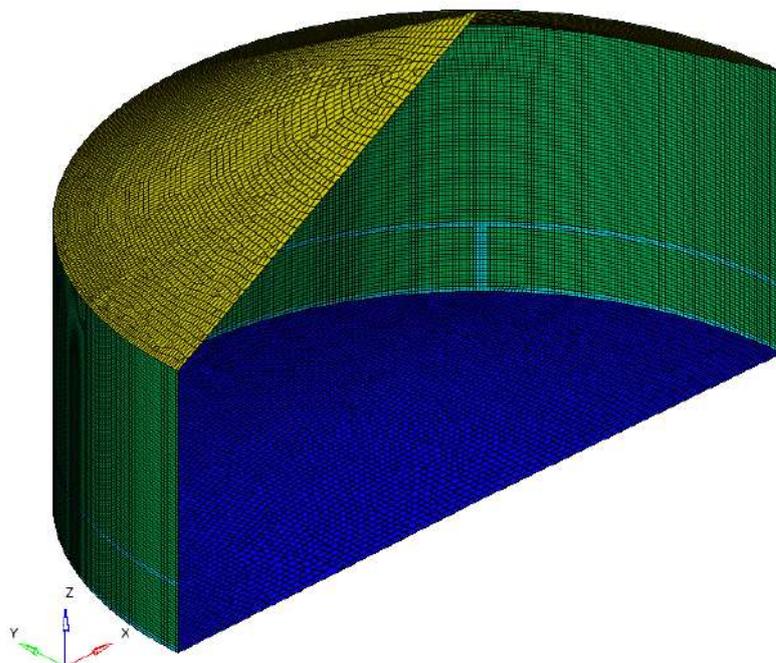
Durante o processo, o HyperMesh será empregado para criar malhas de elementos finitos de alta qualidade, garantindo representações precisas da geometria do tanque. Posteriormente, o OptiStruct realizará a análise linear estática, calculando tensões, deformações e outras características críticas. Por fim, o HyperView será utilizado para visualizar de forma clara e intuitiva os resultados obtidos, facilitando a interpretação dos dados e orientando eventuais modificações no projeto.

3.2.1 Modelagem

Nesta seção, foi descrita a metodologia utilizada na modelagem de cada seção da estrutura. Para garantir uma abordagem eficiente, optou-se por adotar a geometria base definida pelo cálculo analítico, representando simetricamente apenas metade do tanque como mostrado na Figura 3.4. Além disso, a decisão foi tomada de excluir elementos como janelas, bocais, escadas e outros acessórios da modelagem, motivada por restrições associadas à licença estu-

dantil, limitações computacionais da máquina de simulação e a simplificação de cálculos para uma compreensão global da estrutura. Ao longo desta seção, foi abordadas as simplificações adotadas e considerações específicas relacionadas a cada componente estrutural.

Figura 3.4: Geometria do reservatório



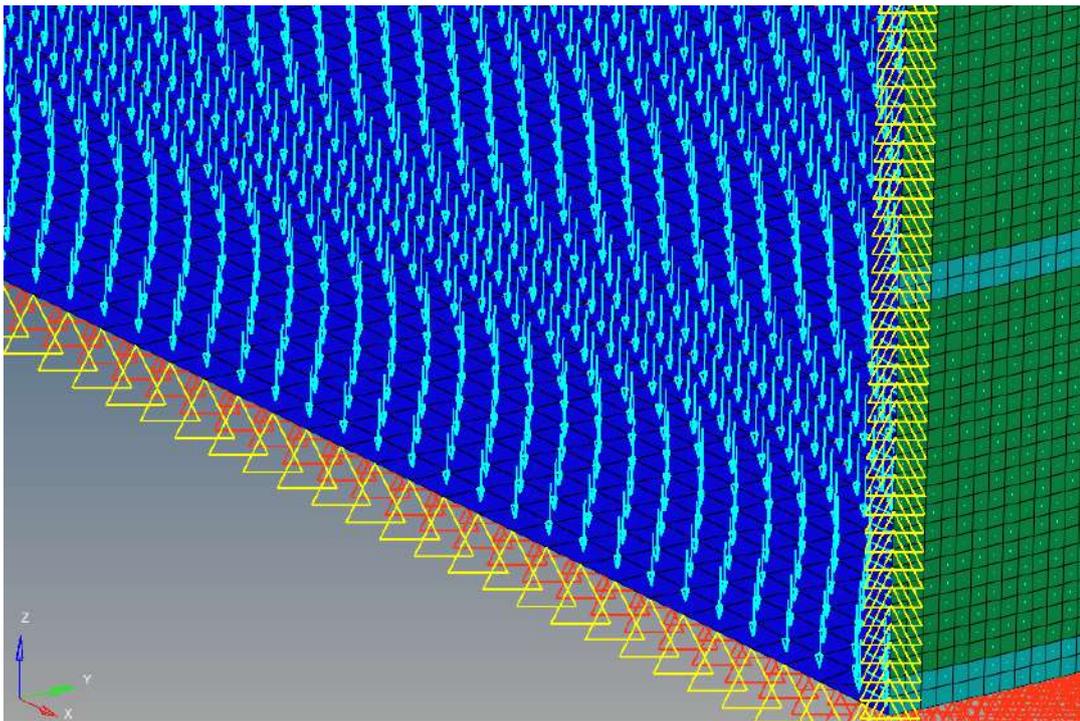
Fonte: Do autor

3.2.1.1 Base

- Optou-se pela utilização de elementos de casca (CQUAD4 e CTRIA3) (Figura 3.5) com dimensões de 300 mm. Isso se justifica pelo fato de a base ser estruturalmente menos crítica, o que permite o uso de elementos maiores. Essa escolha visa modelar eficientemente o domínio, possibilitando uma representação eficaz da geometria tridimensional.
- Foi utilizado o aço ASMT-A36;
- Foi implementada uma malha refinada na proximidade da região de solda junto à base do tanque, com o intuito de aprimorar a precisão dos resultados;
- Para tornar a simulação mais próxima da realidade, foi aplicada uma restrição ao plano do chão exclusivamente no eixo Z, efetivamente criando uma superfície de suporte tridimensional;
- Com o propósito de preservar a simetria, implementou-se uma restrição de movimento ao longo do eixo Y, acompanhada de restrições rotacionais nos eixos X e Z;

- A base foi concebida como um componente único, visando a simplificação da simulação. Essa abordagem parte da premissa de que a base será suportada por uma fundação apropriada, eliminando qualquer deslocamento indesejado da base;
- A base apresenta uma inclinação de 0,47 graus da parte do costado em direção ao centro.

Figura 3.5: Modelagem da base

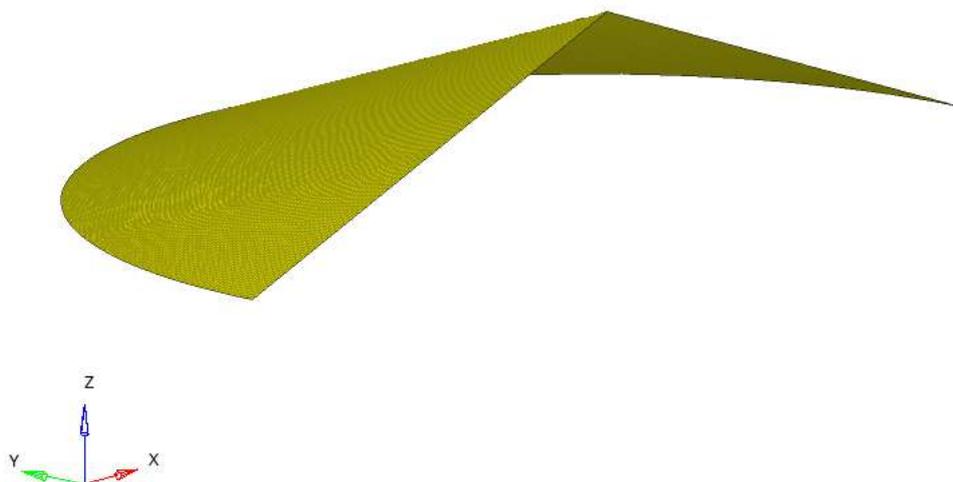


Fonte: Do autor

3.2.1.2 Topo

- Foi empregado elementos de casca (CQUAD4 e CTRIA3) com dimensões de 300 mm, mantendo o mesmo pressuposto utilizado na base. Essa abordagem visa modelar de maneira consistente o domínio, assegurando uma representação eficiente da geometria tridimensional, respresentado na Figura 3.6, de acordo com as considerações aplicadas à base.
- Foi utilizado o aço ASMT-A36;
- Foi implementada também a simetria de movimento ao longo do eixo Y, acompanhada de restrições rotacionais nos eixos X e Z;
- Também foi modelada como componente único para a simplificação de simulação;
- A inclinação do topo é de 30 graus.

Figura 3.6: Modelagem do topo

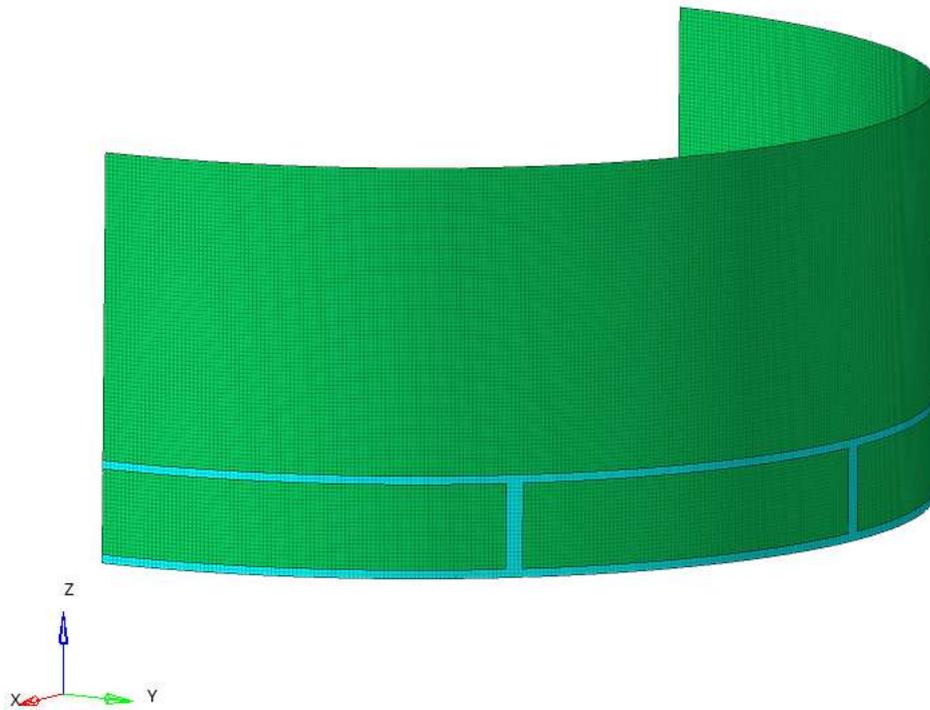


Fonte: Do autor

3.2.1.3 Costado

- Adoção de elementos de casca CQUAD4 com tamanho 100 mm, para modelar a região mais crítica da estrutura. Esta escolha visa garantir uma análise mais precisa devido à importância desta área específica.
- Foi utilizado o aço ASMT-A36;
- Foi implementada a simetria de movimento ao longo do eixo Y, acompanhada de restrições rotacionais nos eixos X e Z, como na base e teto;
- A ausência de contraventamento se justifica devido à significativa influência do teto na rigidez estrutural frente às cargas de vento.
- Foi dedicada uma atenção especial aos limites das chapas nas proximidades da base, adotando uma abordagem focalizada nas regiões de soldagem (Figura 3.7). Essa estratégia visa preparar o terreno para análises mais aprofundadas em estágios subsequentes.

Figura 3.7: Modelagem do Costado



Fonte: Do autor

3.2.2 Carregamentos

No contexto da análise estrutural, a avaliação de diferentes cenários é fundamental para compreender o comportamento de uma estrutura sob diversas condições. Neste trabalho, foi proposto a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar três combinações de esforços:

- Caso 1: Pressão hidrostática + Peso da estrutura + Pressão do vento;
- Caso 2: Pressão hidrostática + Peso da estrutura;
- Caso 3: Pressão do Vento + Peso da estrutura.

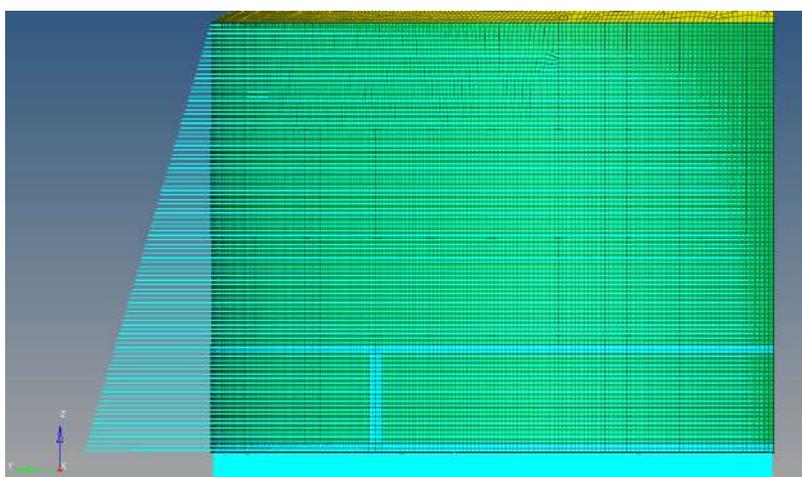
Para as combinações das ações em questão, será conduzida uma análise linear, visando avaliar o comportamento estrutural conforme os critérios de falha de von Mises e máxima tensão principal. A análise será realizada ao longo do eixo Z, representando a altura do reservatório, e circunferencialmente ao longo do ângulo θ . Além disso, haverá uma atenção específica para as regiões de solda, onde serão avaliadas as características estruturais em termos de distribuição de

tensões e potenciais pontos de concentração de esforços. Esta abordagem abrangente permitirá uma compreensão detalhada do desempenho da estrutura em diferentes direções e regiões críticas, contribuindo para a identificação precoce de possíveis áreas de preocupação e otimização do projeto.

3.2.2.1 Pressão hidrostática

A pressão hidrostática foi ajustada na base e no costado por meio da função "pressure" do *HyperMesh*, seguindo a equação 2.2, e o tamanho da malha foi modificado para aprimorar a visualização. É demonstrado pela Figura 3.8 o perfil vertical linear da pressão hidrostática.

Figura 3.8: Perfil da pressão hidrostática pela altura

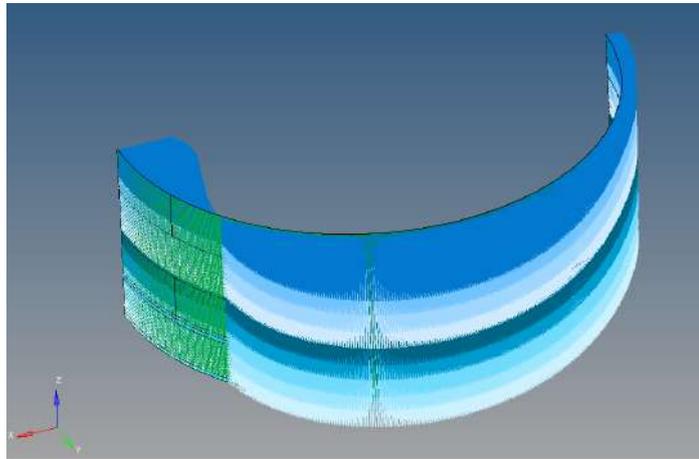


Fonte: (ABNT 1983)

3.2.2.2 Pressão do vento

Para incorporar a influência da pressão do vento no *Hypermesh* (Figura 3.9, foi adotado um sistema de coordenadas cilíndricas, onde o eixo x representa o raio, o eixo y representa o ângulo, e o eixo z representa a altura do reservatório. Essa abordagem facilita a modelagem de estruturas cilíndricas sujeitas a cargas de vento.

Figura 3.9: Representação gráfica da pressão do vento



Fonte: Do autor

A modelagem das curvas geradas para diferentes alturas em relação à camada limite foi conduzida com base em dados fornecidos por **(author?)** (Junior 1998), que desempenhou um papel fundamental no levantamento e definição dessas curvas. A abordagem adotada envolveu a determinação de funções polinomiais, onde a variável y representa a variação angular em coordenadas cilíndricas, conforme detalhado na Tabela 3.3.

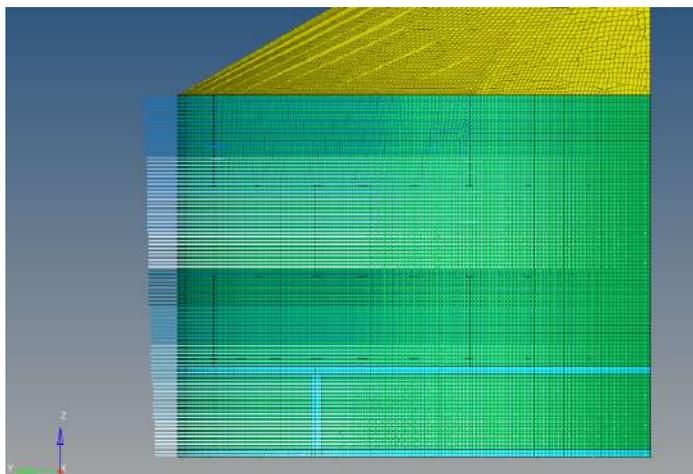
Tabela 3.3: Função da pressão do vento por altura

Altura (m)	Função $y(x)$
1	$0.00053 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
2	$0.000558 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
3	$0.00059 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
4	$0.00062 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
5	$0.000676 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
6	$0.00069 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
7	$0.00071 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
8	$0.000746 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
9	$0.00077 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$
9,6	$0.000788 \cdot (0.3361y^5 - 3.0108y^4 + 9.3327y^3 - 10.932y^2 + 2.4798y + 0.9015)$

Fonte: (ABNT 1983)

O perfil vertical do vento foi considerado conforme a Figura 3.10

Figura 3.10: Perfil vertical da pressão do vento



Fonte: Do autor

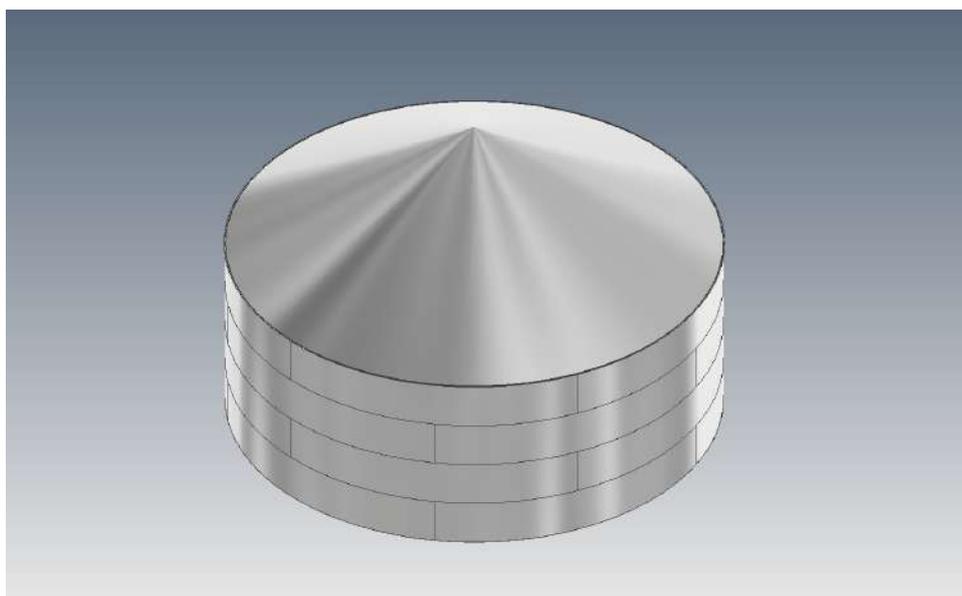
3.2.2.3 Peso da estrutura

Para incorporar o peso da estrutura no Hypermesh, é necessário inserir um *load step* com o "Card Image" denominado GRAV e especificar o sentido da gravidade, bem como o eixo ao qual ela será aplicada. No contexto deste projeto, optou-se por selecionar o eixo z para baixo. Essa escolha implica que a força de gravidade será modelada ao longo do eixo z na direção negativa, contribuindo assim para a análise do peso da estrutura no sistema.

4 RESULTADOS

4.1 Geometria do reservatório

Figura 4.1: Modelagem do reservatório



Fonte: Do autor

Resultado do projeto de um tanque reservatório metálico (Figura 4.1) para armazenamento de água com 4710 m^3 de capacidade de acordo com a norma NBR-7821:

- Altura do tanque: $9,6m$
- Diâmetro do tanque: $25m$
- Espessura do costado: $9,3mm$
- Espessura do Topo: $12,5mm$
- Espessura do Base: $6,3mm$
- Chapa do costado: $2400 \text{ mm} \times 6000 \text{ mm}$
- Inclinação do teto: 30°
- Inclinação da base: $0,47^\circ$
- Sem anel de contraventamento
- Teto autoportante soldado ao costado

- Costado soldado a base
- Soldas do costado, fundo e topo com penetração completa
- Base apoiada na fundação

4.2 Análise de convergência de malha

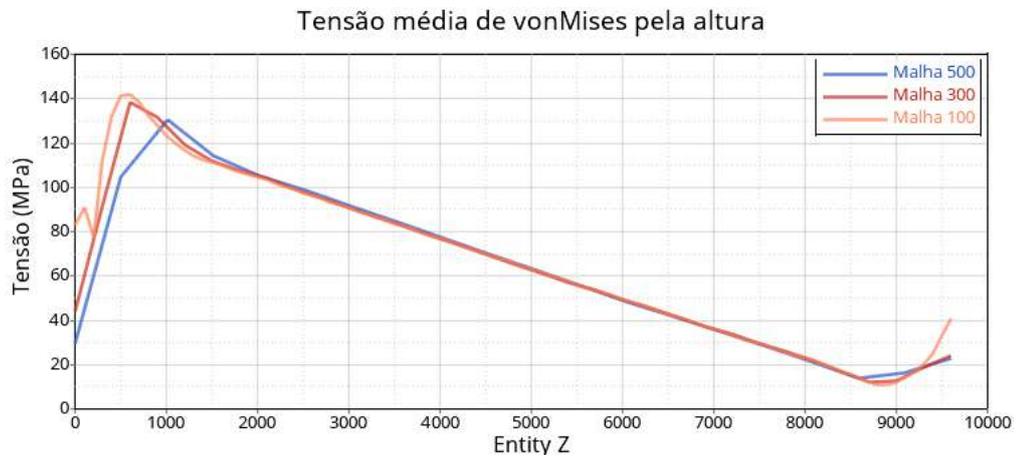
Esta seção inicia abordando a análise de convergência de malha, um processo essencial para garantir a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos por meio de simulações. As dimensões dos elementos, discutidas detalhadamente na seção anterior, foram determinadas considerando um estudo aprofundado sobre a qualidade física dos resultados, conduzido através de uma análise de convergência de malha.

Para realizar essa análise, foram conduzidas simulações da tensão de von Mises da parte interna ao longo da altura do reservatório, utilizando malhas de diferentes tamanhos, mais especificamente, 500mm , 300mm e 100mm, conforme a Figura 4.2. A avaliação comparativa dessas malhas revelou que a diferença entre os resultados obtidos com malhas de 300 e 100 elementos foi mínima. Diante dessa constatação, podemos concluir que há convergência nos valores da tensão média de von Mises.

Essa constatação reforça a robustez e confiabilidade do modelo de elementos finitos adotado, indicando que a malha de 300 elementos é suficiente para representar adequadamente o comportamento da estrutura em análise. A escolha criteriosa das dimensões dos elementos, embasada na análise de convergência de malha, contribui para assegurar resultados precisos e eficientes no contexto da simulação estrutural.

É relevante salientar que a escolha da malha de tamanho 100 não apenas proporciona resultados convergentes, mas também atende às limitações impostas pela licença de estudante do software e às capacidades da máquina utilizada para a simulação. Essa decisão estratégica visa otimizar os recursos disponíveis, garantindo uma análise eficiente e precisa dentro das condições específicas do ambiente de simulação.

Figura 4.2: Gráfico de convergência de malha

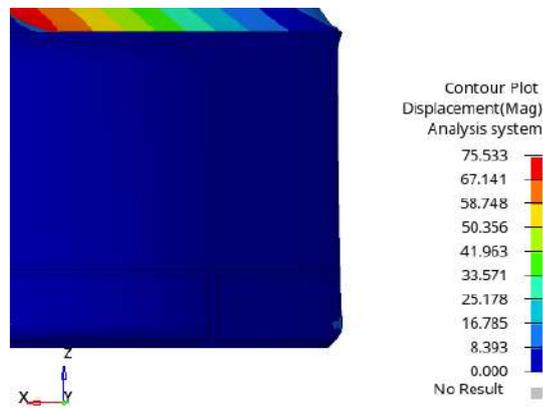


Fonte: Do Autor

4.3 Campo de deslocamentos - U

Para o primeiro caso, Figura 4.3, (Pressão hidrostática + Pressão do vento + Peso da estrutura) temos um deslocamento de 75,533mm na parte do teto, já o costado teve um deslocamento de 9,021mm, na altura de 700mm.

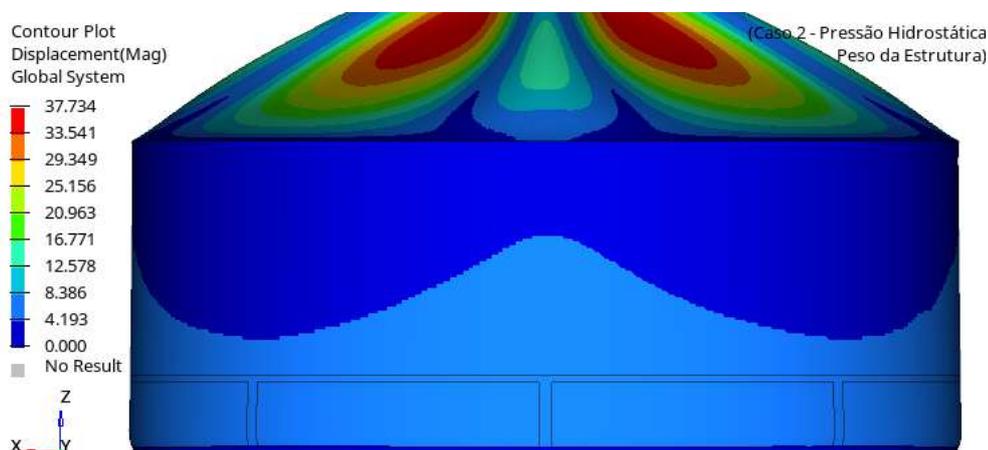
Figura 4.3: Deslocamento máximo - Caso 1 (Aumento de 50x na escala)



Fonte: Do autor

Para o segundo caso, Figura 4.5, (Pressão hidrostática + Peso da estrutura) temos um deslocamento de 37,734mm na parte do teto. Para o costado, o deslocamento foi de 8,214mm, também na altura de 700mm.

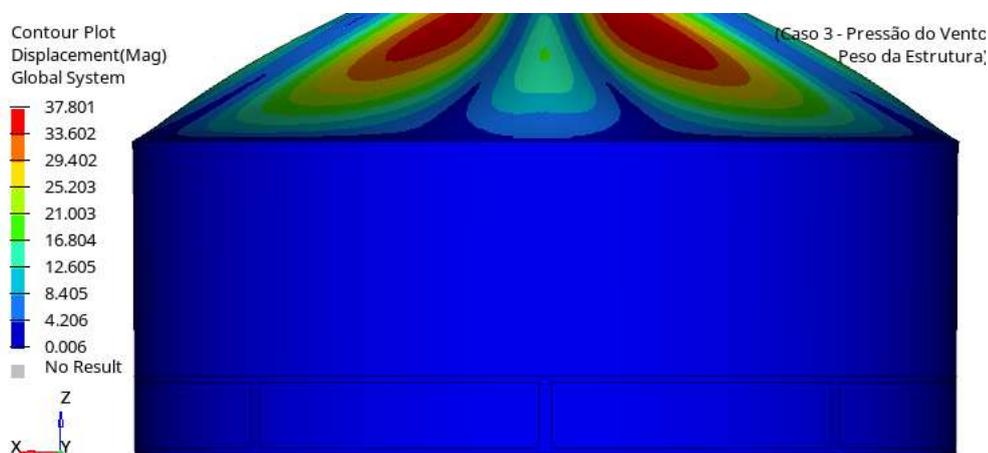
Figura 4.4: Deslocamento máximo - Caso 2 (Aumento de 10x na escala)



Fonte: Do autor

E para o terceiro caso, Figura 4.5 (Pressão do vento + Peso da estrutura) temos um deslocamento de 37,801 mm na parte do teto. Para o costado, o deslocamento foi de 4,157 mm na junção com o teto.

Figura 4.5: Deslocamento máximo - Caso 3 (Aumento de 10x na escala)



Fonte: Do Autor

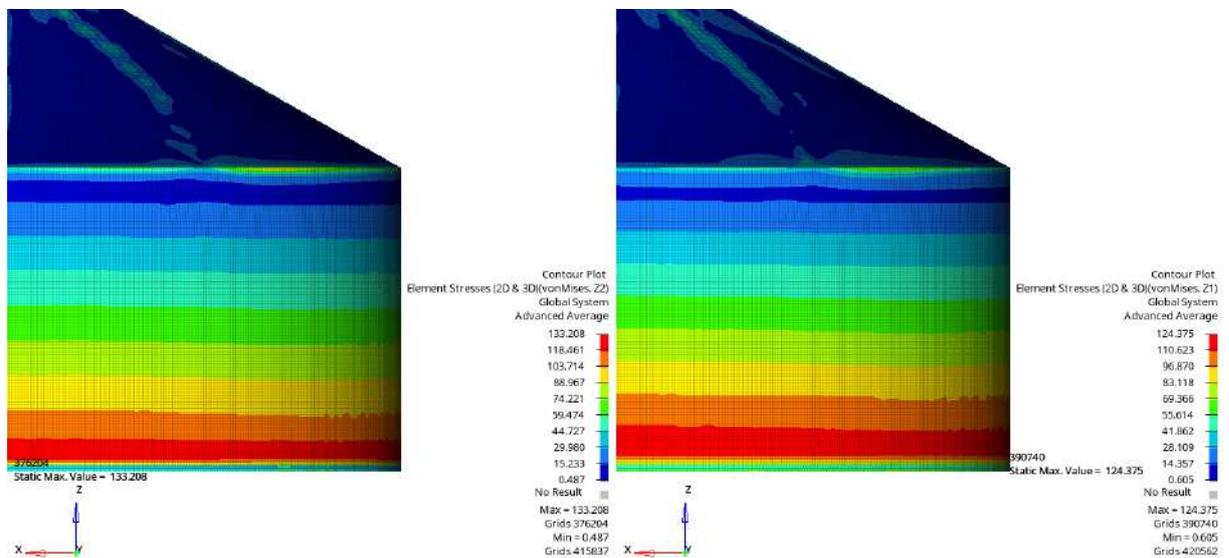
Os campos de deslocamento desempenham um papel crucial na análise estrutural, proporcionando uma representação quantitativa e qualitativa das deformações e deslocamentos em um determinado material ou estrutura. Esses campos são resultados macroscópicos que permitem avaliar o comportamento global de uma estrutura sob a ação de cargas externas, como por exemplo, se a força peso está na direção correta.

4.4 Tensão equivalente de von Mises

Na presente análise, observa-se consistentemente que a camada z_2 apresenta as maiores tensões em todos os casos analisados. Esta consistência indica que as regiões mais internas do tanque, representadas pela camada z_2 , estão sujeitas a esforços mais elevados em comparação com as camadas mais externas.

A partir da Figura 4.6, a tensão interna de von Mises para o primeiro caso é de 133,208 MPa, na região de 600 mm de altura.

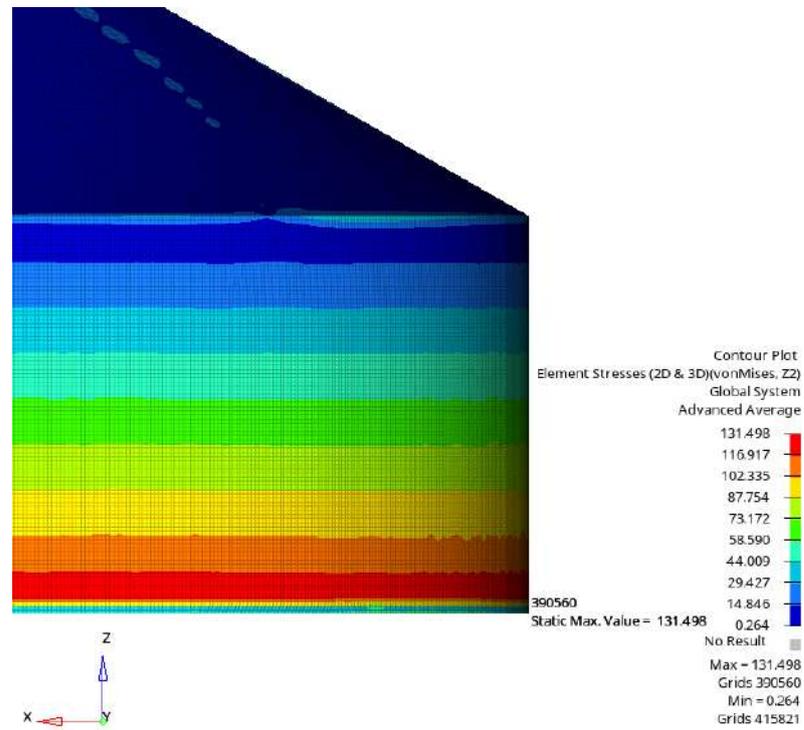
Figura 4.6: Tensão de von Mises lado interno (z_2) e externo (z_1) - Caso 1



Fonte: Do Autor

Para o Caso 2, Figura 4.7, a tensão máxima de von Mises foi de 131,498 MPa, na região de 600 mm de altura.

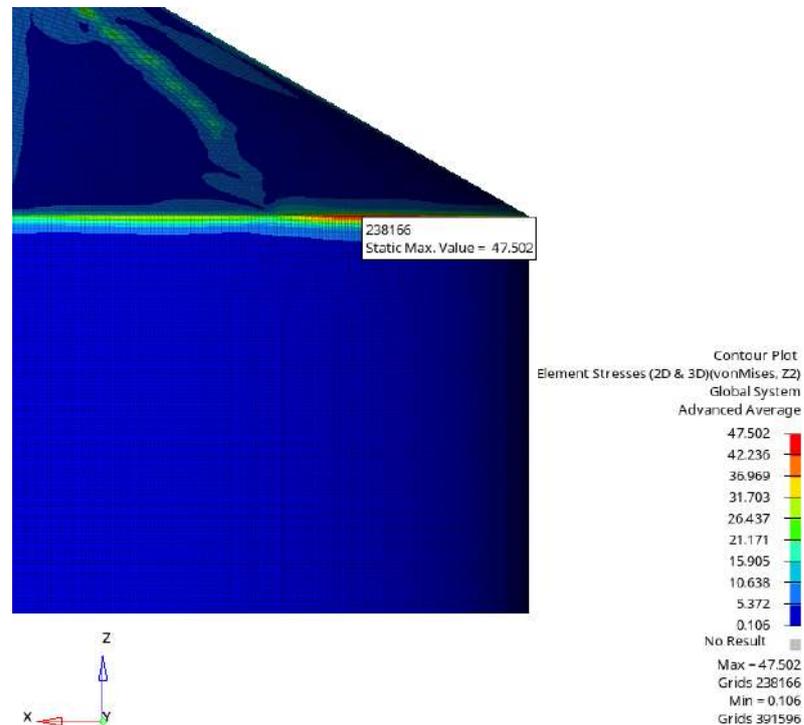
Figura 4.7: Tensão interna de von Mises - Caso 2



Fonte: Do Autor

Para o Caso 3, Figura 4.8 a tensão máxima de von Mises foi de 47,502 MPa, na região da junta do teto com o costado.

Figura 4.8: Tensão interna de von Mises - Caso 3



Fonte: Do Autor

Com base no limite de escoamento do material, é viável calcular o coeficiente de segurança (CS) (Equação 4.2) para cada situação específica. Esse coeficiente de segurança é obtido ao dividir o limite de escoamento pela tensão equivalente, seguindo o critério de falha de von Mises.

$$CS = \frac{\sigma_{escoamento}}{\sigma_{VM}} \quad (4.1)$$

Conforme mencionado na seção 3.1.2, o cálculo para o costado é derivado da tensão máxima agindo a uma distância de 300 mm acima da junção horizontal inferior. Inicialmente, uma análise foi realizada considerando a altura de 300 mm. No entanto, verificou-se que as tensões mais elevadas ocorreram na região de 600 mm. Diante desse cenário, procedeu-se à comparação dos resultados evidenciado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultado dos coeficientes de segurança para todos os casos

	Altura (mm)	Coeficiente de Segurança
Caso 1	300	2,23
	600	1,87
Caso 2	300	2,31
	600	1,90
Caso 3	300	26,81
	600	24,27

Para o caso 3 a região com maior tensão é o topo, com uma tensão de 47,502 MPa, o valor do coeficiente de segurança para o teto nesse caso é de 5,26.

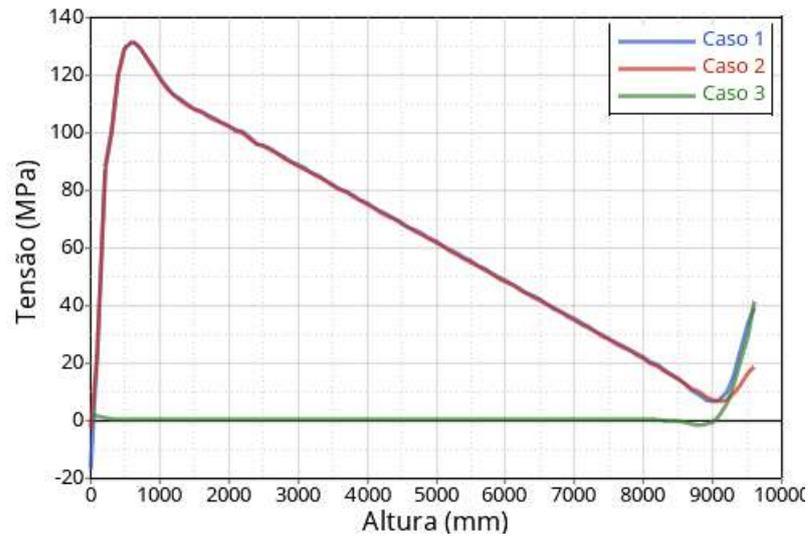
O cenário mais desafiador corresponde ao caso 1, no qual a estrutura é submetida simultaneamente à pressão hidrostática, à pressão do vento e ao peso próprio. Nesse contexto, a tensão resultante é de 133,208 MPa. Importante notar que esse valor se encontra abaixo do limite normativo estabelecido de 151 MPa. Adicionalmente, destaca-se que o coeficiente de segurança na região crítica é de 1,87, onde é possível ter uma margem robusta em relação à possibilidade de falha.

4.5 Perfil vertical da tensão máxima principal e von Mises

Nesta seção, será apresentado o perfil vertical da tensão máxima principal de acordo com a Figura 4.9 e da tensão de von Mises de acordo com a Figura 4.10 para todos os casos analisados. A visualização desses perfis proporcionará uma compreensão detalhada da distribuição das tensões ao longo da estrutura.

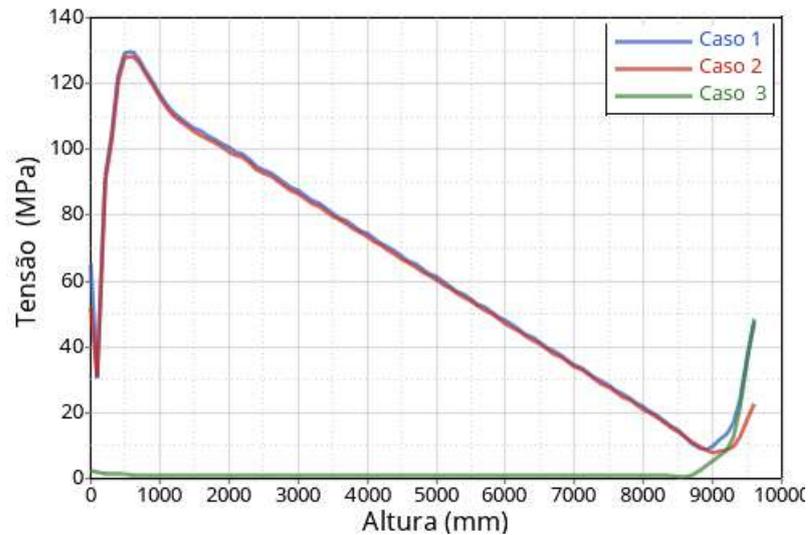
Esta abordagem se mostra relevante, considerando que muitas metodologias de falha fundamentam-se nas tensões principais como parâmetros críticos para a avaliação da integridade estrutural.

Figura 4.9: Gráfico da tensão externa principal pela altura por caso



Fonte: Do Autor

Figura 4.10: Gráfico da tensão interna de von Mises pela altura por caso



Fonte: Do Autor

Nesta análise, destaca-se a identificação de uma região crítica com uma altura de 600 mm, o que diverge da metodologia de cálculo estabelecida pela norma que especifica uma região de maior tensão com altura limitada a apenas 300 mm. Segundo Azzuni e Guzey 2015, a norma API 650 propõe três métodos de cálculo para o costado, sendo que um desses métodos é adotado pela norma NBR-7821. Conforme a mesma fonte, a metodologia preconizada pela norma NBR-7821 é mais indicada para tanques com diâmetro inferior a 15 metros. É relevante ressaltar que, diferentemente da API 650, a norma NBR-7821 não estabelece restrições de tamanho do tanque com base no método utilizado.

Além disso, ao observar a distribuição da tensão ao longo da espessura, torna-se evi-

dente que a norma busca dimensionar o tanque considerando a maior tensão, geralmente encontrada em torno de 300 mm. Este valor é extrapolado para dimensões variáveis do tanque, conforme permitido pela norma, com base em considerações analíticas, lineares e proporcionais.

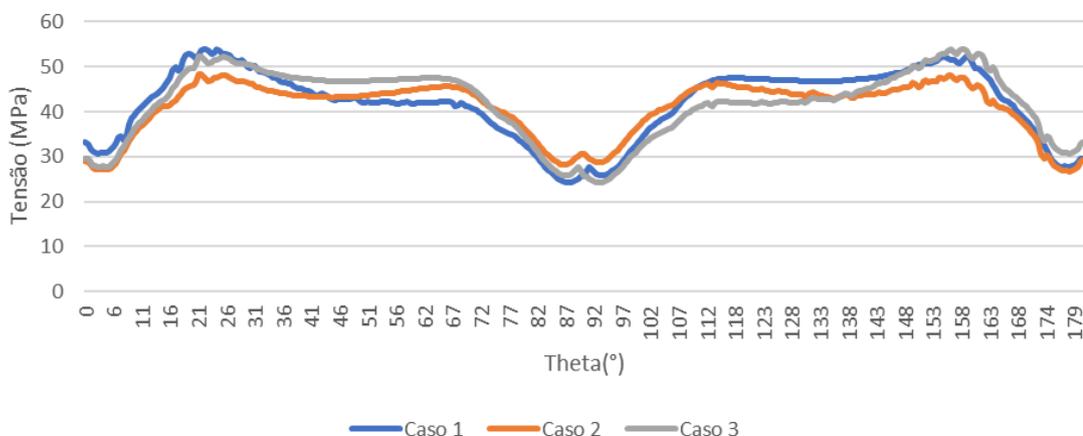
Assim, ao utilizar um método como o Método dos Elementos Finitos (MEF), é não apenas possível, mas também esperado obter valores diferentes daqueles prescritos pela norma para a posição do ponto de maior tensão. O MEF oferece uma abordagem mais sofisticada, considerando não apenas as simplificações lineares, mas também nuances e variações que podem influenciar a distribuição real das tensões na estrutura. Portanto, a divergência nos resultados destaca a capacidade do MEF em fornecer uma análise mais precisa e detalhada da distribuição de tensões em comparação com as abordagens mais simplificadas da norma.

Diante dessa discrepância, recomenda-se uma revisão minuciosa dos parâmetros de cálculo e da modelagem estrutural, garantindo a aplicação correta dos métodos preconizados pelas normas em relação às dimensões específicas do tanque em questão. Essa análise detalhada é essencial para assegurar a conformidade integral com as normas pertinentes e garantir a segurança e integridade estrutural do tanque.

4.6 Perfil circunferencial da tensão principal e von Mises

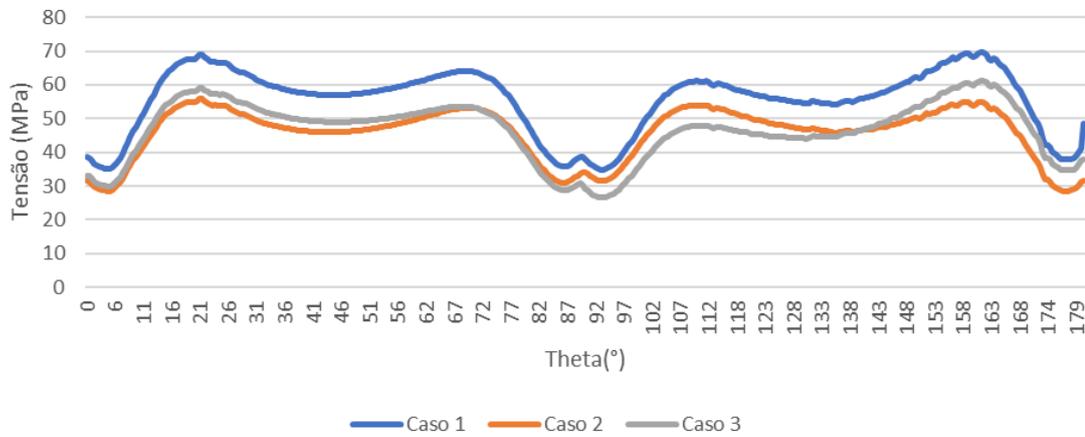
Agora, a análise concentra-se no estudo do ponto mais elevado do tanque, onde $Z = H$, com o objetivo de compreender a influência do perfil de pressão do vento.

Figura 4.11: Tensão principal (direção circunferencial) externa para $H = 9,6\text{m}$



Fonte: Do Autor

Figura 4.12: Tensão de von Mises (direção circunferencial) interna para H = 9,6m



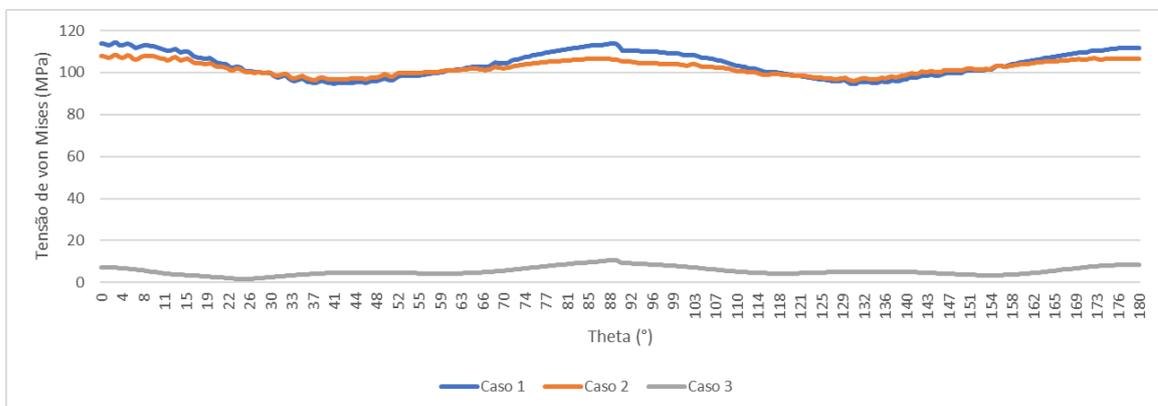
Fonte: Do Autor

Para uma investigação das tensões no topo do tanque, foi possível plotar o gráfico ao longo da direção tangencial ($\sigma_t \times \theta$) para os três casos, tanto para tensão máxima (Figura 4.11), quanto para tensão de von Mises (Figura 4.12). Nestas figuras o vento está incidindo na posição circunferencial igual a 180° .

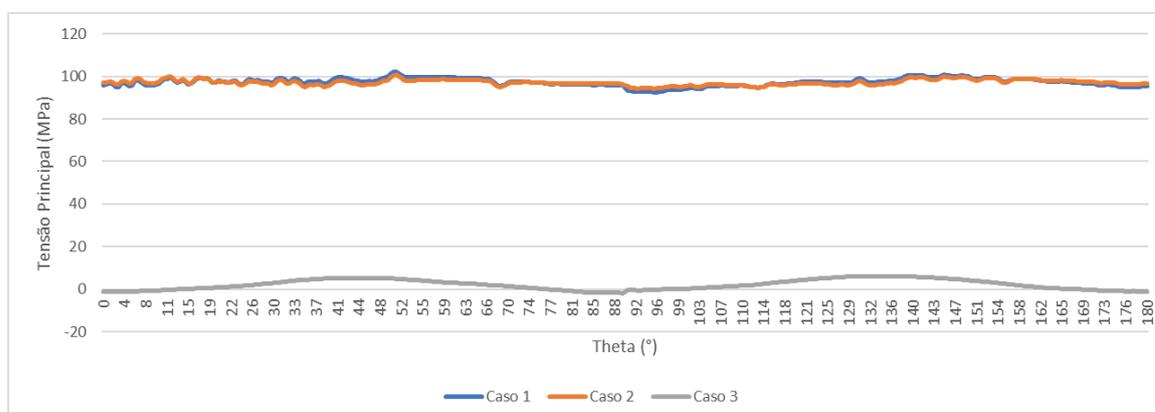
O comportamento oscilatório do gráfico pode ser justificado pelo perfil variado de atuação do vento na estrutura, juntamente com o peso da estrutura. O gráfico apresenta seu maior valor de tensão tangencial para a tensão externa principal foi no caso 1 com o valor de 53,78 MPa. Para a tensão interna de von Mises também foi no caso 1 com o valor de 70,30 MPa.

4.7 Tensão na altura de 300 mm

Figura 4.13: Tensão máxima de von Mises em Z = 300



Fonte: Do Autor

Figura 4.14: Tensão máxima principal em $z = 300$ mm

Fonte: Do Autor

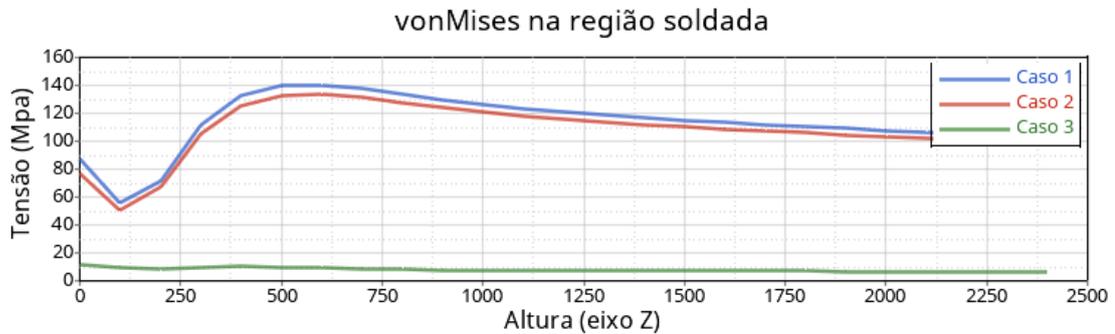
No estudo da tensão na altura de 300 mm, foram considerados as três combinações de carga, além disso a tensão de von Mises foi maior que a tensão principal, conforme a Figura 4.14, a maior tensão principal foi para o caso 1, cerca de 100 MPa. Para a tensão de von Mises, nos casos 1 e 2, as tensões registradas foram de 116,4 MPa e 111,45 MPa, para o critério de falha de von Mises, validado pela Figura 4.13 respectivamente. No entanto, destaca-se a tensão para a altura de 600 mm, onde a tensão nessa altura supera aquelas observadas nos casos anteriores. Notavelmente, o caso 3 não apresentou níveis críticos de tensão.

No entanto, é crucial ressaltar que a altura de maior tensão na simulação difere das considerações estabelecidas pela norma. A tensão na região crítica, conforme indicada pela norma (a 300 mm de altura), registra 116,4 MPa, resultando em uma diferença notável de 21,35% no coeficiente de segurança.

É importante observar que o valor obtido para uma altura de 600 mm é o dobro do especificado pela norma. Essa disparidade destaca a necessidade de entender por que essa discrepância ocorreu. A norma, como cabe mencionar, utiliza uma metodologia destinada a tanques com altura máxima de 15 metros (Azzuni e Guzey 2015). Assim, seria apropriado considerar o emprego do Método do Ponto de Projeto Variável (VDM), recomendado para tanques com alturas entre 15 e 50 metros (650 2013). Essa abordagem mais abrangente poderia oferecer uma análise mais precisa e adequada às condições específicas da estrutura em questão.

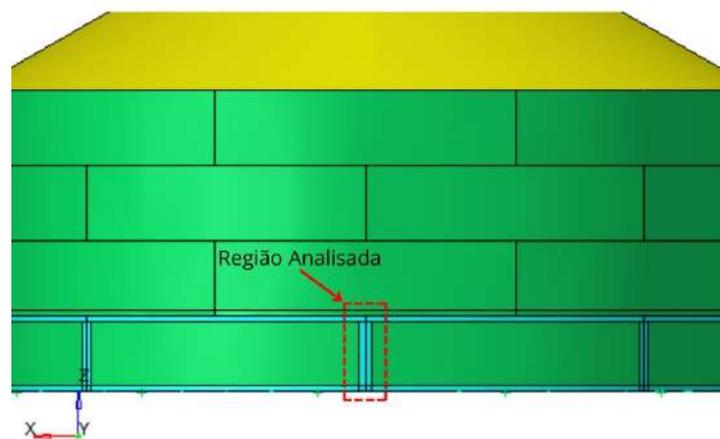
4.8 Região soldada

Figura 4.15: Tensão interna de von Mises na região soldada



Fonte: Do Autor

Figura 4.16: Limites das chapas e região da solda analisada

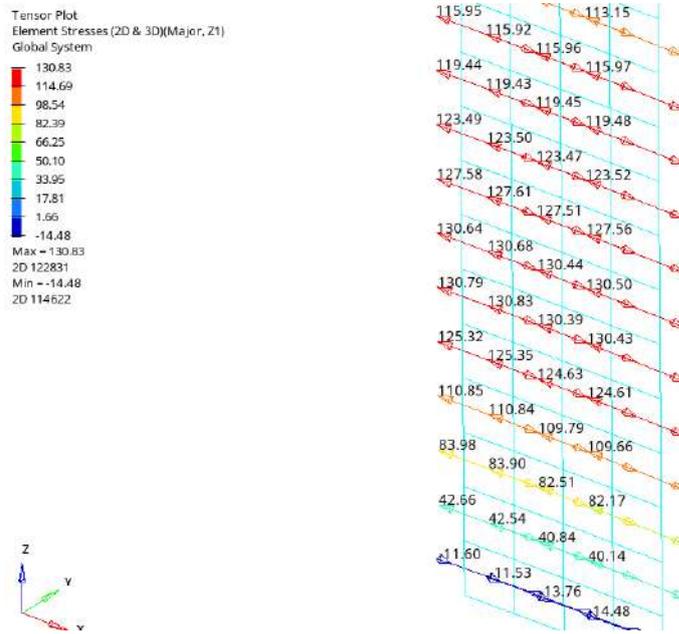


Fonte: Do Autor

Ao avaliar a região de solda, como ilustrado na Figura 4.16, foi feito o uso do critério da tensão máxima principal. Essa decisão está em sintonia com a metodologia adotada para analisar as tensões no costado, pois as tensões nas outras estruturas são baixas. Concentraremos nossa atenção, de maneira mais específica, na solda do primeiro anel de chapas, identificada como a região onde as tensões no costado atingem seu ponto mais crítico.

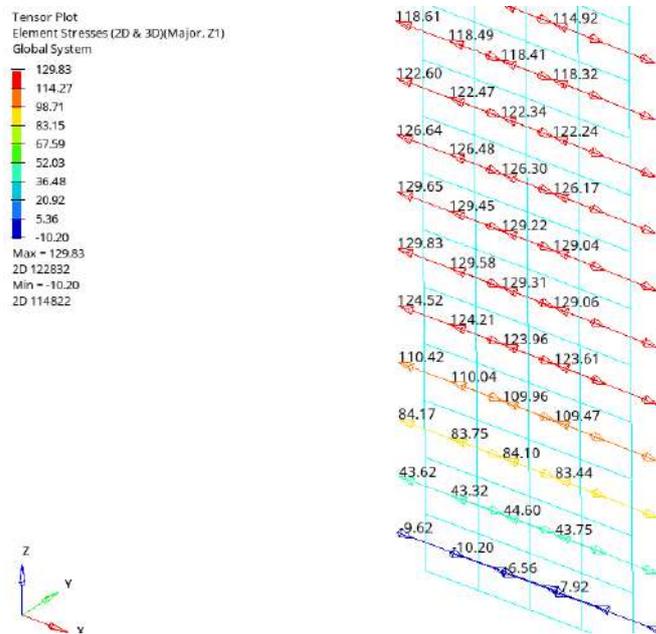
Além disso, é essencial considerar a natureza peculiar dessa região, uma vez que a solda tende a ser mais suscetível a falhas e fragilidades. Como foi considerado uma solda de topo no costado será utilizado conforme delineado na Figura 2.15, no qual a tensão admissível da solda é a média aritmética das resistências do metal base e do eletrodo. A tensão externa principal na solda tem o valor, para os casos 1 e 2, respectivamente, 130,83 MPa e 129,83 MPa, na altura de 600 mm e ambas são tensões de tração.

Figura 4.17: Resultados com ampliação na região da solda - Caso 1



Fonte: Do Autor

Figura 4.18: Resultados com ampliação na região da solda - Caso 2



Fonte: Do Autor

$$CS = \frac{\sigma_{material}}{\sigma_{solicitado}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.2: Resultado dos coeficientes de segurança na região da solda

Caso	Coeficiente de Segurança
Caso 1	2,27
Caso 2	2,29

Os resultados obtidos para os coeficientes de segurança na região da solda estão em conformidade com a tensão resultante da combinação dos metais. Essa concordância teórica sugere que, no papel, a estrutura é segura, uma vez que os coeficientes de segurança estão acima de 1,67. Para uma análise mais conservadora é possível utilizar a resistência de escoamento do metal base, onde na maioria das vezes, é o metal com a menor resistência.

É importante ressaltar que em algumas regiões ocorre o cruzamento de cordões de solda, gerando uma tensão de aproximadamente 100 MPa, como ilustrado na Figura 4.15. Dado que esta área é considerada crítica, torna-se essencial aprofundar os estudos nos cruzamentos de solda para uma análise mais detalhada, possibilitando melhorias em projetos futuros.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo realizar uma análise abrangente das metodologias de cálculo aplicadas ao dimensionamento de reservatórios cilíndricos para líquidos. Ao longo do trabalho, foi explorado o referencial teórico, abordando o dimensionamento de reservatório para armazenamento de água, juntamente com os esforços solicitantes que influenciam o projeto estrutural. Além disso, discutiu-se os aspectos críticos das soldas em estruturas metálicas, incluindo tipos de solda, juntas e dimensões, visando garantir a integridade das uniões soldadas.

De acordo com a formulação da norma, a tensão máxima permitida foi estabelecida em 151 MPa. Na simulação realizada, o valor obtido para o caso mais crítico aproximou-se de 133,208 MPa, demonstrando consistência com o cálculo normativo. Vale ressaltar que o material utilizado apresenta escoamento a uma tensão de 250 MPa.

A constatação de que os coeficientes de segurança na região da solda estão acima do valor mínimo estabelecido (2,27 para o caso 1 e 2,29 para o caso 2) é um indicativo positivo da robustez estrutural. Esses resultados sugerem que, de acordo com a análise realizada, a estrutura possui uma margem de segurança adequada em relação às tensões aplicadas, proporcionando uma resposta segura em condições normais de carga. É importante, no entanto, considerar outros aspectos como normas específicas, critérios de projeto e condições operacionais para uma avaliação abrangente da integridade estrutural.

A norma em questão pode oferecer sugestões de cálculos mais otimizados, porém, é importante ressaltar que essas abordagens podem ser opcionais e não obrigatórias. No contexto deste trabalho, o foco principal foi investigar as orientações gerais e mínimas estabelecidas pela norma para o projeto dos tanques.

Concluindo, ressalta-se que a norma apresenta diversas restrições, tanto geométricas quanto de material, para sua aplicação. No entanto, a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) oferece a vantagem de possibilitar o dimensionamento de estruturas mais altas e esbeltas. Isso é viabilizado mediante o emprego de chapas mais finas, desde que seja realizado o uso criterioso e apropriadamente posicionado de reforços, como elementos estruturais de viga. A aplicação do MEF, portanto, representa uma abordagem eficaz para otimizar o projeto e a concepção de estruturas, superando algumas das limitações impostas pelas restrições normativas.

REFERÊNCIAS

650, A. S. Welded tanks for oil storage. Washington, 2013.

ABNT. Abnt nbr 7.821: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. *Rio de Janeiro*, 1983.

AZEVEDO, Á. F. Método dos elementos finitos. *Faculdade de Engenharia da universidade do Porto*, v. 1, n. 7, 2003.

AZZUNI, E.; GUZEY, S. Comparison of the shell design methods for cylindrical liquid storage tanks. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 101, p. 621–630, 2015.

BARROS, S. M. d. Tanques de armazenamento. *Rio de Janeiro: Petrobras*, 1998.

BATHE, K.-J. *Finite element procedures*. [S.l.]: Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: McGraw-Hill São Paulo, 1989.

CARLESSO, A. L. e. a. *ANÁLISE COMPARATIVA DOS AÇOS ASTM A131 AH36 E ASTM A36: UM ESTUDO DE CASO DO USO DE UM DOS AÇOS NO PISO DE UM MÓDULO PARA FPSO*. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Faculdades Integradas de Aracruz, 2018.

CHEN, Z. et al. A simplified method for calculating the stress of a large storage tank wall. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 221, n. 3, p. 119–127, 2007.

CHRISTIE@UNIFEI.EDU.BR, M. C. *Escala de Beaufort*. 2023. Disponível em: <<https://meteorologia.unifei.edu.br/pag/escalas/beaufort.php>>.

ELTALY, B. et al. Experimental and fe modal analysis for elevated steel water tanks. *Internati-*

onal Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume, v. 3, 2014.

FERNÁNDEZ, K. A. S. *Análisis comparativo de costos sobre fabricación de tanque vertical de 500 M3 para almacenamiento de agua, bajo Normas API-650 y AWWA D-100*. Tese (Doutorado) — Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019.

GODOY, L. A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 103, p. 1–21, 2016.

GOMES, E. F. Soldagem em reservatórios metálicos para armazenamento de água. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

GREINER, R.; GUGGENBERGER, W. Buckling behaviour of axially loaded steel cylinders on local supports—with and without internal pressure. *Thin-walled structures*, Elsevier, v. 31, n. 1-3, p. 159–167, 1998.

JACA, R. C. et al. A reduced stiffness approach for the buckling of open cylindrical tanks under wind loads. *Thin-walled structures*, Elsevier, v. 45, n. 9, p. 727–736, 2007.

JOAQUIM, R. Manual de tecnologia de fabricação e soldagem—módulo ii processo de soldagem arame tubular. *Centro de Tecnologia de Soldagem, SP*, 2001.

JUNIOR, L. J. d. A. *Análise estrutural das chapas metálicas de silos e de reservatórios cilíndricos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1998.

LOGAN, D. L. *A first course in the finite element method*. [S.l.]: Thomson, 2002. v. 4.

LUZ, G. 2022: *Aço ASTM A36 propriedades Mecânicas E Composição química*. 2017. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>.

N-270. Norma petrobras - projeto de tanque atmosférico. Petrobras, 2010.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. [S.l.]: bookman editora, 2013.

NUNES, C. Uma metodologia de projetos de tanques atmosféricos verticais para armazenamento de petróleo e seus derivados. *Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre*, 2013.

PICOLO, A. An approach to the wind energy as an alternative for teaching topics of classical physics. 2014.

SHI, L. et al. Experimental and numerical investigation of stress in a large-scale steel tank with a floating roof. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 117, p. 25–34, 2017.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. *Projeto de engenharia mecânica*. [S.l.]: Bookman, 2005.

TREBUŇA, F.; ŠIMČÁK, F.; BOCKO, J. Failure analysis of storage tank. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 26–38, 2009.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2004.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2004.

YASUNAGA, J.; UEMATSU, Y. Dynamic buckling of cylindrical storage tanks under fluctuating wind loading. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 150, p. 106677, 2020.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física I: mecânica*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 12.

ZORZO, F. Otimização da estrutura do teto cônico de um tanque atmosférico. 2012.