



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDA SANTOS DE SANTANA

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DOS ABALOS SÍSMICOS EM PROJETO DE
TANQUES ATMOSFÉRICOS REFERENTE À NORMA API STD 650 NO BRASIL**

Recife
2024

FERNANDA SANTOS DE SANTANA

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DOS ABALOS SÍSMICOS EM PROJETO DE
TANQUES ATMOSFÉRICOS REFERENTE À NORMA API STD 650 NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Luiz Adeildo da Silva Júnior

Coorientador: Armando Antônio de Sá Barreto Cruz

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santana, Fernanda Santos de.

Investigação dos efeitos dos abalos sísmicos em projeto de tanques atmosféricos referente à norma API STD 650 no Brasil / Fernanda Santos de Santana. - Recife, 2024.

84 p : il., tab.

Orientador(a): Luiz Adeildo da Silva Júnior

Coorientador(a): Armando Antônio de Sá Barreto Cruz

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

1. tanque de armazenamento. 2. sismos. 3. API 650. 4. projeto. I. Silva Júnior, Luiz Adeildo da . (Orientação). II. Cruz, Armando Antônio de Sá Barreto . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



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



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 26.º dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 19:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Investigação dos efeitos dos abalos sísmicos em projeto de tanques atmosféricos referente à norma API STD 650 no Brasil**, elaborado pela aluna **Fernanda Santos de Santana**, matrícula 20160007536, composta pelos avaliadores Prof. **Luiz Adeildo da Silva Júnior** (orientador), MSc. **Armando Antônio de Sá Barreto Cruz** (Coorientador), Profa. **Janaina Moreira de Menezes** (avaliadora), e Prof. **Justo Emilio Alvarez Jacobo** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, a candidata foi arguida pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua APROVAÇÃO, atribuindo-lhe a média 10,0 (DEZ), julgando-a apta(X) / inapta() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Luiz Adeildo da Silva Júnior Nota: 10,0 (DEZ)

Assinatura  **LUIZ ADEILDO DA SILVA JUNIOR**
Documento assinado digitalmente
Data: 26/02/2024 20:53:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador: MSc. Armando Antônio de Sá Barreto Cruz Nota: 10,0 (DEZ)

Assinatura  **ARMANDO ANTONIO DE SA BARRETO CRUZ**
Documento assinado digitalmente
Data: 07/03/2024 08:16:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliadora Interna: Profa. Janaina Moreira de Menezes Nota: 10,0 (DEZ)

Assinatura  **JANAINA MOREIRA DE MENESES**
Documento assinado digitalmente
Data: 03/03/2024 09:39:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno: MSc. Justo Emilio Alvarez Jacobo Nota: 10,0 (DEZ)

Assinatura  **JUSTO EMILIO ALVAREZ JACOBO**
Documento assinado digitalmente
Data: 05/03/2024 13:34:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 26 de fevereiro de 2024.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Senhor Jesus Cristo que permitiu que eu pudesse chegar até aqui e por todos estes anos ter dado-me força, saúde e condições para estudar.

Como também, tenho muito a agradecer aos meus pais Orlando Luiz e Aldenise Vicente por apoiarem-me no caminho que escolhi e terem trabalhado por mim, dos quais retenho um grande orgulho.

Quero agradecer a minha família que de alguma forma alegrou-se e torceu pela minha formação, bem como àqueles que me recebeu em sua casa com este fim, em especial meu tio Nelson.

Agradeço ao meu professor orientador Luiz Adeildo por ter se disposto a ajudar-me na defesa deste trabalho, bem como ao meu co-orientador Armando Cruz que de forma paciente partilhou de seu conhecimento.

Por fim, quero agradecer a todos que de alguma forma direta ou indiretamente contribuiu para que eu chegasse a conclusão deste curso.

RESUMO

Tanques de armazenamento atmosférico são comumente utilizados no armazenamento de derivados de petróleo muito presente em terminais e zonas industriais. Durante sua etapa de projeto, deve-se validar os principais critérios de estabilidade, os quais estão ligados à pressão interna, cargas de vento e excitação sísmica do local onde é montado. Contudo, no Brasil a condição sismológica não é levada em consideração em projetos por grande parte dos engenheiros que deveriam observá-la, visto que, pelo senso comum, tem-se que o Brasil é um país livre de condições sísmicas significativas. Assim, o presente trabalho objetiva como fonte de consulta para considerações sísmicas em tanques de armazenamento projetos para o Brasil. Diante disso, foi realizado, através de uma revisão bibliográfica, o levantamento histórico de sismos no Brasil com magnitude $m_b \geq 5,0$. Por conseguinte, três tanques foram projetados para diferentes taxas H/D e a consideração sísmica foi avaliada conforme anexo E da API STD 650 (2020). A região de maior índice de sismos foi localizada no mapa da norma ABNT NBR 15421 (2023) obtendo-se sua aceleração horizontal do levantamento, o Acre foi o estado que apresentou maior frequência de sismos com um percentual de 36,4%, estando este presente na zona 4 com aceleração horizontal de 0,15g. Os três tanques de estudo mostraram-se estáveis para a pressão interna de operação e cargas de vento do local, todavia não se mostram estáveis em razão da condição sísmica por apresentarem taxas de ancoragem $J \geq 1,54$. Além disso, foi identificado que tanques presentes nas zonas 0 e 1 não necessitam de verificações sísmicas.

Palavras-chave: tanque de armazenamento, sismos, API 650, projeto.

ABSTRACT

Atmospheric storage tanks are commonly used in the storage of petroleum derivatives, very present in terminals and industrial areas.

During its design stage, the main stability criteria must be validated, which are linked to internal pressure, wind loads and seismic excitation of the location where it is mounted.

However, in Brazil, the seismological condition is not taken into account in projects by most of the engineers who should observe it, since, according to common sense, Brazil is a country free from significant seismic conditions. Thus, the present work aims as a source of consultation for seismic considerations in storage tank projects for Brazil.

Therefore, through a bibliographical review, a historical survey of earthquakes in Brazil with magnitude $m_b \geq 5.0$ was carried out. Therefore, three tanks were designed for different H/D ratios and seismic consideration was evaluated as per Annex E of API STD 650 (2020). The region with the highest rate of earthquakes was located on the map of the ABNT NBR 15421 (2023) standard, obtaining its horizontal acceleration of the survey, Acre was the state that presented the highest frequency of earthquakes with a percentage of 36.4%, this being present in zone 4 with horizontal acceleration of 0.15g. The three study tanks proved to be stable for the internal operating pressure and wind loads at the site, however, they were not stable due to the seismic condition as they had anchorage rates $J \geq 1.54$. Furthermore, it was identified that tanks present in zones 0 and 1 do not require seismic checks.

Keywords: storage tank, earthquakes, API 650, design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Tanque de armazenamento com teto domo	17
Figura 2	Tanque de armazenamento com teto cônico	17
Figura 3	Tanque de armazenamento com teto em gomos	17
Figura 4	Característica construtiva dos tetos flutuantes: a. Flutuante simples, b. Pontão convencional e c. Flutuante duplo	18
Figura 5	Teto geodésico;	19
Figura 6	Principais partes do tanque;	21
Figura 7	Disposição das chapas do costado;	21
Figura 8	Cantoneira de topo em ligação teto – costado;	25
Figura 9	Parâmetros do teto domo autoportante;	27
Figura 10	Layout de fundo com chapas anulares na periferia	29
Figura 11	Deslizamento do tanque em razão das cargas de vento	31
Figura 12	Isopletas do Brasil da NBR 6123 (1988)	33
Figura 13	Condição esquemática para tombamento	34
Figura 14	Ponto de atuação da força ortogonal a parede do tanque mediante altura	35
Figura 15	Soma das pressões hidrodinâmicas em razão de uma excitação sísmica	36
Figura 16	Uplift e flambagem na região de ligação fundo-costado	36
Figura 17	Danos causados nos tanques do terremoto de Kobe em 1995, Japão	37
Figura 18	Desastre na Refinaria <i>Tohoku Oil Inc.</i> em 1978 no Japão	37
Figura 19	Incêndio em tanques em razão do terremoto <i>Prince William Sound</i>	38
Figura 20	Mapa de zoneamento sísmico no Brasil	39
Figura 21	Mapeamento de sismos acima de 5,0 graus no Brasil	40
Figura 22	Mapeamento de sismos entre 2,0 e 5,0 graus no Brasil	40
Figura 23	Conceito ilustrativo do espectro de resposta	41
Figura 24	Comportamento hidrodinâmico dentro de tanques atmosféricos	43
Figura 25	Modelo básico das componentes no efeito hidrodinâmico	44

Figura 26	Comportamento das forças em razão das componentes	44
Figura 27	Modelo básico das componentes do efeito hidrodinâmico	46
Figura 28	Área considerada na ligação teto-costado para o detalhe b	54
Figura 29	Vista da ação perpendicular do vento ao plano da figura	57
Figura 30	Estados com maior frequência de atividade sísmica $\geq 5,0$ m	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Melhores aplicações entre produto e tanque de armazenamento	20
Tabela 2	Espessura mínima da chapa do costado	22
Tabela 3	Relação entre diâmetro do tanque vs. Espessura do costado	24
Tabela 4	Recomendação típicas da chapa do costado por norma	24
Tabela 5	Dimensões mínimas da cantoneira de topo para ligação teto – costado	25
Tabela 6	Critérios mínimos das chapas de fundo conforme norma	29
Tabela 7	Mínima espessura da chapa anular conforme PETROBRAS N-270	30
Tabela 8	Declividade e sentido do fundo recomendados pela PETROBRAS N-270	30
Tabela 9	Zonas Sísmicas no Brasil	38
Tabela 10	Fatores de amplificação de acordo com o solo	42
Tabela 11	Dimensional dos tanques de estudo	48
Tabela 12	Dados de projetos	48
Tabela 13	Característica do material de projeto	49
Tabela 14	Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-01	50
Tabela 15	Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-02	51
Tabela 16	Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-03	51
Tabela 17	Peso do costado	52
Tabela 18	Espessura da chapa do teto	52
Tabela 19	Ângulo entre teto – costado	53
Tabela 20	Valores das combinações de cargas	54
Tabela 21	Dimensões das chapas anulares e de fundo	55
Tabela 22	Sobreposições mínimas	55
Tabela 23	Peso das chapas concernentes ao fundo	56

Tabela 24	Tabela de determinação do coeficiente de arrasto	57
Tabela 25	Fator de rugosidade S_2 para TQ-01, TQ-02 e TQ-03	58
Tabela 26	Quadro resumo dos pesos dos tanques por parte	59
Tabela 27	Momentos horizontais e verticais em razão a carga de vento	59
Tabela 28	Valores dos parâmetros calculados para análise de tombamento	60
Tabela 29	Levantamento histórico dos abalos sísmicos no Brasil $\geq 5,0$ mb	61
Tabela 30	Dados dos parâmetros das Equações (41) e (42);	66
Tabela 31	Espessuras final dos anéis do costado e seu respectivo peso total	70
Tabela 32	Espessuras da chapa de teto e seu respectivo peso	70
Tabela 33	Mínima área na ligação teto-costado	71
Tabela 34	Peso total das cantoneiras de topo por tanque	71
Tabela 35	Quadro resumo do projeto das chapas que configura o fundo do tanque	72
Tabela 36	Forças horizontais de vento ortogonais à parede do tanque	74
Tabela 37	Verificação de deslizamento	74
Tabela 38	Verificação de tambamento	75
Tabela 39	Validação da necessidade de prosseguimento de estudo sísmico	76
Tabela 40	Característica de cada componente do produto na condição sísmica	76
Tabela 41	Momento gerado no tanque pela excitação sísmica	77
Tabela 42	Condição de ancoragem	78
Tabela 43	Verificação de deslizamento em razão da excitação sísmica	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	TANQUES CILÍNDRICOS VERTICAIS DE ARMAZENAMENTO	15
3.1.1	Principais normas	15
3.1.2	Tipos de tanques	16
3.1.3	Escolha do tipo de tanque	19
3.1.4	Projeto do tanque	20
3.1.4.1	Projeto Costado	20
3.1.4.2	Cantoneira de topo	25
3.1.4.3	Projeto do teto domo	26
3.1.4.4	Projeto do fundo	28
3.1.5	Carga de vento	31
3.1.5.1	Resistência ao deslizamento	31
3.1.5.2	Resistência ao tombamento	34
3.2	SISMOLOGIA	35
3.2.1	Desastres e danos causados em tanques	35
3.2.2	Sismologia no território brasileiro	38
3.2.3	Espectro de resposta de projeto	41
3.2.4	Comportamento hidrodinâmico	42
3.2.5	Taxa de aspecto do tanque	45
4	METODOLOGIA	47
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS TANQUES DE ESTUDO	47
4.2	PARÂMETROS DE PROJETO	48
4.3	TANQUE DE ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO	49
4.3.1	Projeto do costado	49
4.3.1.1	Projeto costado – TQ-01	50
4.3.1.2	Projeto costado – TQ-02	50
4.3.1.3	Projeto costado – TQ-03	51
4.3.1.4	Peso do costado	51

4.3.2	Projeto teto domo autoportante	52
4.3.3	Definição da cantoneira de topo	53
4.3.4	Projeto do fundo	55
4.4	CARGAS DE VENTO CONFORME NBR 6123 E API 650	56
4.4.1	Força de arrasto	56
4.4.2	Verificação de deslizamento	59
4.4.3	Momento em razão da carga de vento	59
4.4.4	Verificação de tombamento	60
4.5	LEVANTAMENTO DE DADOS DE SISMO NO BRASIL	61
4.6	CONDIÇÃO SÍSMICA	63
4.6.1	Validação da necessidade de análise sísmica	63
4.6.2	Massa efetiva de cada componente	63
4.6.3	Centro de massa das componentes	64
4.6.4	Período natural da componente convectiva	64
4.6.5	Coeficientes de aceleração espectral (A_i e A_c)	65
4.6.6	Momento de tombamento sísmico	66
4.6.7	Resistência ao tombamento	66
4.6.8	Resistência ao deslizamento	68
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	70
5.1	PROJETO DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO	70
5.2	SISMOLOGIA DO BRASIL	72
5.3	CARGA DE VENTO	73
5.4	CARGA SÍSMICA	75
6	TRABALHOS FUTUROS	79
7	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Apesar do Brasil estar localizado em uma região intraplaca indicando baixo índice de efeitos sísmológicos, de acordo com Miranda *et al.* (2018) há uma estimativa, até a data de estudo, de cerca de 10 grupos de pesquisa relacionados a sismologia no CNPq. Por consequência, há poucas publicações sobre o assunto. Além disso, Miranda *et al.* (2018) verificou que cerca de 60,27%, dos engenheiros civis que responderam seu questionário, afirma não ser necessário adotar condição sísmica justificando que o Brasil apresenta baixa sismicidade e 20,55% revelaram não adotarem em seus projetos justamente por ausência de trabalhos que comprovam a necessidade.

O mesmo entendimento também recai e é empregado pelos engenheiros mecânicos projetistas de tanques atmosféricos, uma vez que, ignoram as cargas sísmicas levando apenas em consideração as cargas de vento (tombamento e deslizamento) e pressão interna para a verificação da necessidade de chumbadores ou não para manter a estabilidade do tanque, bem como sua condição estrutural.

No entanto, de acordo com Miranda *et al.* (2018), o Brasil em seus registros já apresentou abalos sísmicos da ordem de 5,0 graus na escala *Ritcher* e apresenta que um sismo desta ordem é capaz de causar grandes tragédias como a sofrida em 1966 no Uzbequistão que resultou em 1.800 mortos, 69.000 pessoas desabrigadas e 85.000 edificações com danos.

Portanto, uma investigação da necessidade ou não da consideração sísmica em projetos de tanques atmosféricos faz-se vital para o estabelecimento de um projeto seguro para os clientes e a sociedade. Diante deste cenário, o presente trabalho se propõe averiguar o impacto da aplicação dos abalos sísmicos em projetos de tanques atmosféricos com dados dos registros de sismos do Brasil.

Deste modo, espera-se que o presente trabalho contribua como uma fonte que revele se a hipótese empregada da não necessidade da aplicação sísmica em projetos de tanque atmosféricos no Brasil, bem como em todo seu território, realmente condiz com a aplicação ou não.

Além disso, a norma brasileira NBR 7821 (1983) de projetos de tanques soldados para armazenamento não apresenta seções que consideram a condição sísmica; e como esta encontra-se em situação de revisão, o presente trabalho pode ser relevante para o apontamento da sismicidade na nova versão da norma.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL E ESPECIFICOS

O presente trabalho tem por objetivo geral investigar os efeitos dos abalos sísmicos em projeto de tanques atmosféricos diante da norma *API STD 650* no Brasil. Para tanto foram estabelecidos como objetivos específicos:

- a) Estudar casos de desastres envolvendo tanques de armazenamento em razão de abalos sísmicos;
- b) Selecionar as regiões de maiores atividades sísmicas já registrado no Brasil;
- c) Verificar a partir de qual zoneificação da norma NBR 15421 são significativos diante da norma *API STD 650*;
- d) Aplicar nos cálculos de projetos de tanques a sismicidade com base nos dados da norma brasileira;
- e) Averiguar se há impacto significativo de projeto na utilização ou não da sismicidade em tanques atmosféricos no Brasil.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. TANQUES CILÍNDRICOS VERTICAIS DE ARMAZENAMENTO

3.1.1. Principais Normas

Para Budynas e Nisbett (2016) um padrão consiste em um conjunto de especificações limitadas que um material ou um processo detém, tendo como principais objetivos atingir uniformidade, ou seja, sempre entrega a mesma informação. Todavia, já o *código* trata-se também de especificações, porém voltado à análise, projeto, manufatura e construção resultando em certo grau de segurança utilizando-se dos padrões.

Desta forma, podemos enquadrar as normas como códigos que estabelecem padrões que devem ser seguidos como orientações para os engenheiros que as utilizam como base para que seus projetos sejam bem executados.

Além disso, servem de respaldo, já que, se bem seguidas, significam que as imposições das limitações de projeto foram respeitadas e as condições de segurança mantidas. Atualmente, as principais normas técnicas seguidas para o projeto de tanques atmosféricos no Brasil são: NBR 7821, PETROBRAS N – 270, API STD 650 e API STD 620.

A NBR 7821 - Tanque soldados para armazenamento de petróleo e derivados - de propriedade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tendo sua última versão datada de 1983, é a norma brasileira que rege as condições de projeto, material, fabricação e montagem que devem ser seguidos para tanques cilíndricos verticais soldados de aço-carbono; consistindo na tradução da versão anterior à época da norma API STD 620.

Em contrapartida, no Brasil tem-se a empresa brasileira Petrobras que está no mercado desde 1953 focada na extração de petróleo e gás, detendo grande expertise na exploração em águas profundas e ultraprofundas; sendo também uma grande distribuidora de petróleo e seus derivados.

Logo, a Petrobras, por sua grande *expertise* na área, tem sido uma fonte de entrega de conhecimento técnico como o desenvolvimento de normas que carregam suas condutas de boas práticas que são elaboradas por seus colaboradores especialistas e subsidiárias de propriedade da Petrobras, mas de caráter público

(PETROBRAS N-270). Portanto, a norma PETROBRAS N-270 - Projeto de tanque de armazenamento atmosférico, também é comumente utilizada em projeto de tanque de superfície como uma norma complementar a API STD 650.

Apesar de a norma PETROBRAS N-270 atender muitas diretrizes, há seções que a mesma indica a utilização da norma API STD 650 - *Welded tanks for oil storage* (Tanques soldados para armazenamento de óleo - tradução livre) e a API STD 620 – *Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks* (Projeto e construção de tanques de armazenamento: grandes, soldados e de baixa pressão – tradução livre) da *American Petroleum Institute*; onde esta é utilizada para tanques de pressões acima da atmosférica, porém que não se enquadra como um vaso de pressão.

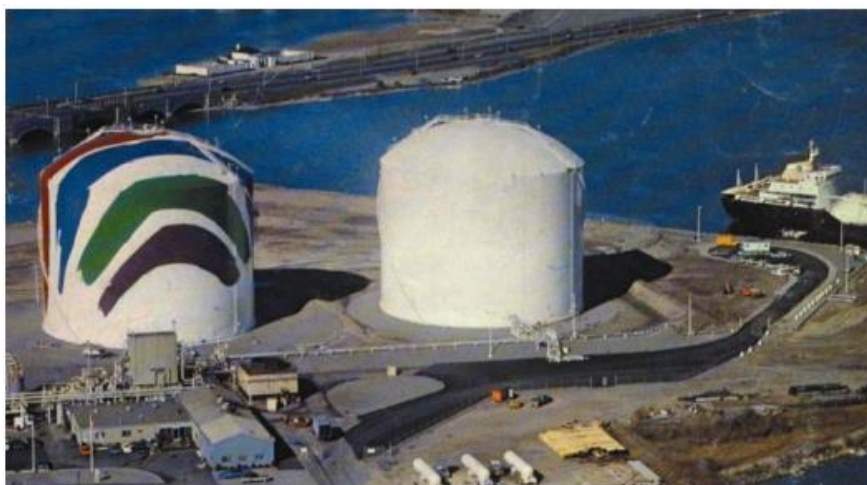
3.1.2. Tipos de Tanque

Os tanques são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de teto que terá. Para a norma NBR 7821 (1983) os tanques são classificados como: tanque sem teto, tanques de teto fixo e tanques de teto flutuante.

Os tanques sem teto são abertos, não tendo nenhum tipo de cobertura. Porém, os tanques de teto fixo podem ser classificados em autoportantes e suportados, estes apresentam estrutura para serem sustentados (NBR 7821, 1983); aqueles, são apoiados na periferia do costado do tanque sem nenhum outro tipo estrutura interna (BARROS, 2010).

Além disso, os tetos fixos são classificados conforme sua forma, ou seja, podem ser do tipo: domo, cônico, “guarda-chuva ou em gomos” (*umbrela*). O teto domo assemelha-se a uma calota esférica, ver Figura 1; o teto cônico, a um cone reto – ver Figura 2; e o teto em gomos assemelha-se a um guarda-chuva aberto, ver Figura 3.

Figura 1 – Tanque de armazenamento com teto domo.



Fonte: BARROS, (2010).

Figura 2 – Tanque de armazenamento com teto cônico.



Fonte: BARROS, (2010).

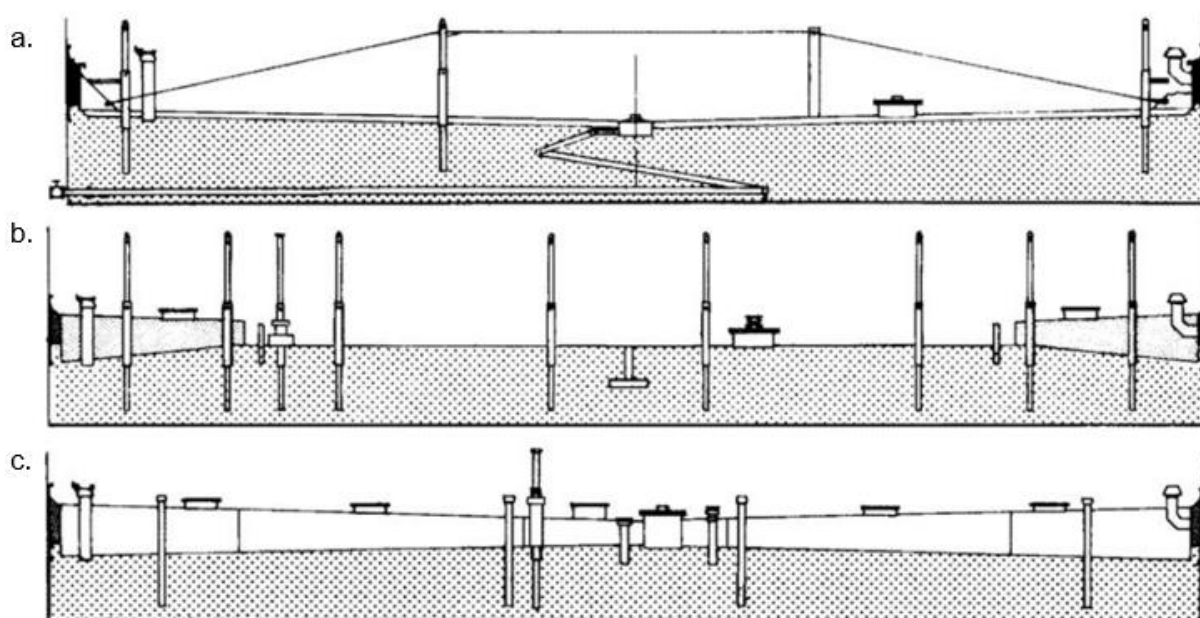
Figura 3 – Tanque de armazenamento com teto em gomos.



Fonte: BARROS, (2010).

Diferentemente dos tetos fixos que são sustentados por estruturas metálicas ou apoiados na periferia do costado, os tanques de teto flutuante são diretamente apoiados na superfície do produto o que permitirá a minimização de perdas por evaporação (BARROS, 2010). Os tetos flutuantes podem ser internos ou externo ao costado. As formas construtivas de acordo com Barros (2010) são: flutuante simples (*Single Deck* ou *Pan-Type Floating-Roof*), pontão convencional (*Pontoon Floating-Roof*) e flutuante duplo (*Doble-Deck Floating roof*), ver Figura 4.

Figura 4 – Característica construtiva dos tetos flutuantes: a. Flutuante simples, b. Pontão convencional e c. Flutuante duplo.



Fonte: BARROS, (2010).

O teto flutuante simples consiste apenas de uma camada de chapas apresentando estrutura metálica para manter a estabilidade. O teto tipo pontão convencional apresenta um disco feito de chapas, porém nas extremidades contendo flutuadores. Já o tipo flutuante duplo consiste em duas camadas de chapas que se conectam por uma estrutura metálica interna contendo entre elas uma camada de ar que auxilia no isolamento térmico (BARROS, 2010).

Além dos tetos já citados, a norma PETROBRAS N-270 (2020) apresenta um quarto tipo de tanque: teto com cobertura geodésica de teto flutuante, ver Figura 5. Este tipo de teto é utilizado como uma alternativa para reduzir as perdas por

evaporação e pode ser aplicado a um tanque com teto flutuante já existente (BARROS, 2010).

Figura 5 – Teto geodésico.



Fonte: BARROS, (2010).

O teto geodésico assemelha-se a um teto domo suportado, porém consiste de uma estrutura treliçada formando a superfície esférica e coberta por chapas de alumínio triangulares firmemente fixados a armação (API 650, 2020).

3.1.3. Escolha do tipo de Tanque

A escolha do tipo de tanque que deve ser projetado e montado depende muito das condições de operação, segurança, qualidade, custo (PETROBRAS N-270); portanto, da necessidade do cliente. A partir de todos estes fatores estabelecidos é possível determinar qual tanque atenderia melhor todos os requisitos, como por exemplo: se o líquido armazenado for muito volátil é recomendado que seja armazenado em tanque de teto flutuante, já que, por seu teto está apoiado diretamente sobre o líquido minimizará movimentações na superfície que ensejariam na evaporação do mesmo - consequentemente evitando perdas (BARROS, 2010).

Para facilitar esta escolha, a norma PETROBRAS N-270 (2020) apresenta uma tabela que estabelece uma relação entre produto e melhores opções de tanques para o líquido em questão, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Melhores aplicações entre produto e tanque de armazenamento.

Produto	Tanque Recomendado
Biodiesel	Tanque atmosférico de teto flutuante interno; Tanque atmosférico para pequena pressão interna, segundo a API STD 650 “Anexo F”.
Gasolina de Aviação (GAV)	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno; Tanque atmosférico para pequena pressão interna - segundo a API STD 650. Tanque para baixa pressão de teto cônico, segundo a API STD 620.
Óleo diesel classes I e II	Tanque atmosférico de teto flutuante externo; Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Álcool etílico anidro	Tanque atmosférico de teto fixo com teto flutuante interno.
Água	Sem teto, ou seja, aberto.

Fonte: PETROBRAS - N270, (2020)

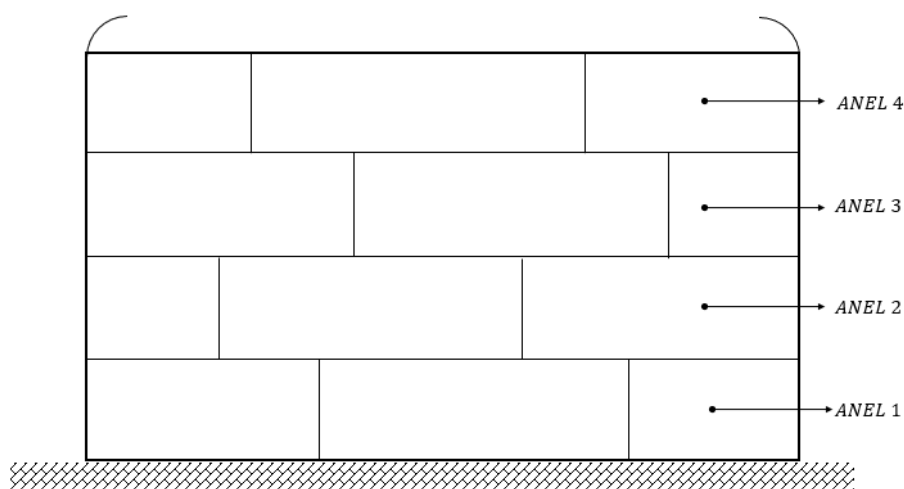
Além de indicar qual seria o melhor tipo de tanque, faz referência em alguns casos, como apresentado na seção para gasolina de aviação (GAV), a melhor norma construtiva a ser seguida. É interessante ressaltar que cada norma detém os limites que assim considerada mais eficiente e conservador, podendo se diferenciar em alguns casos em magnitude.

3.1.4. Projeto do Tanque

3.1.4.1 Projeto do Costado

O costado consiste em uma casca cilíndrica vertical formada pelo conjunto de chapas calandradas ou não soldadas formando anéis circulares, como indicado na Figura 6.

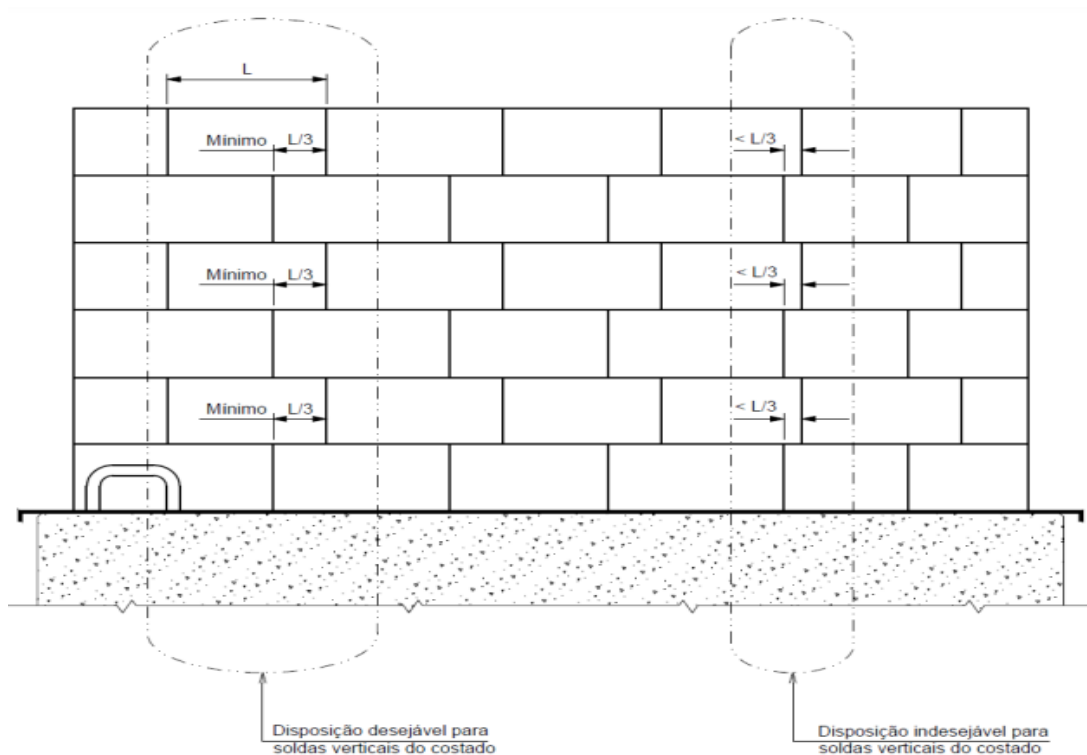
Figura 6 - Principais partes do tanque.



Fonte: Própria autora, (2024).

A depender do diâmetro do tanque, um mesmo anel é formado por várias chapas calandradas e a norma PETROBRAS N-270 (2020) defini que sempre que possível as juntas verticais da união de anéis sobrepostos devem possuir um afastamento mínimo de $1/3$ do comprimento da chapa, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Disposição das chapas do costado.



Fonte: PETROBRAS N-270, (2020).

O cálculo de dimensionamento da espessura da chapa do costado pode iniciar-se de baixo para cima (ou vice-versa) conforme enumeração apresentada na Figura 6, ou seja, do anel inferior (ligado ao fundo) ao superior (ligado ao teto, se houver).

Para a NBR 7821 (1983) existem 3 condições de análise, onde a maior delas deve definir a espessura do costado, ou seja, Máx(condição 1; condição 2; condição 3). As condições são definidas do seguinte modo:

- a. Condição 1: espessura calculada por meio de equações, tais como a equação (1), relativa ao método básico e suas formas variantes de cálculo acrescida da sobreespessura de corrosão definida para cada anel.

$$e = 0,040D(H - 0,3)G \quad (1)$$

Onde:

e: espessura mínima, mm;

D: Diâmetro nominal do tanque, m;

H: altura medida da linha de centro da cantoneira de topo à linha de centro da junta inferior, m;

G: densidade do líquido que será armazenado.

- b. Condição 2: espessura calculada pela Equação 1 considerando a densidade do produto igual a um sem sobreespessura de corrosão;
- c. Condição 3: a espessura nominal da chapa não deve ser inferior àquela indicada na Tabela 2.

Tabela 2 – Espessura mínima da chapa do costado.

Diâmetro nominal do tanque – D [m]	Espessura nominal mínima – e [mm]
$D < 15$	4,5
$15 \leq D < 35$	6,3
$35 \leq D < 60$	8,0
$60 < D$	9,0

Fonte: NBR 7821 (1983).

Em relação a condição 3 é importante observar que na Tabela 2 existem dois parâmetros: diâmetro nominal e espessura nominal. Para a norma NBR 7821 (1983) o diâmetro nominal é medido a partir da linha de centro da chapa do costado se todas estiverem em uma linha de centro comum ou se o alinhamento das chapas for definido

pela face interna. Em contrapartida, a espessura nominal é a espessura da chapa do tanque já montado.

Tais considerações fazem-se importantes, tendo em vista, que isso incidirá no entendimento correto da escolha do diâmetro indicado na Tabela 2, assim como, se a espessura nominal mínima satisfaz a sobreespessura de corrosão necessária indicada na folha de dados caso venha a existir.

Para a norma PETROBRAS N-270 (2020), quando não indicado oposição, faz-se a utilização da norma API STD 650 (2020) onde são estabelecidos dois critérios. O primeiro critério é o cálculo da espessura a partir do método do ponto fixo e eficiência de junta de 0,85 do anexo A da norma. Todavia, caso a espessura calculada no primeiro critério seja superior a 13 mm segue-se para o segundo critério que adota o método do ponto variável conforme corpo de norma.

A aplicação do método do ponto variável de acordo com a norma API 650 (2020) permite a construção de tanque de grandes diâmetros com a mínima espessura possível.

Porém, no corpo de norma da API STD 650 (2020), para tanques até 61 m, existe um método mais simples do que o método iterativo do ponto variável chamado método de 1 pé. Para este método duas considerações são avaliadas:

a) Espessura de projeto

$$t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d} + CA \quad (2)$$

b) Espessura de teste hidrostático

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

Onde:

D : Diâmetro nominal do tanque, m;

CA : Sobre corrosão permitida, mm;

H : Altura de líquido de projeto, m;

G : Gravidade especificado do líquido;

S_d : Tensão admissível de projeto, MPa;

S_t : Tensão admissível para teste hidrostático, MPa.

A espessura para cada anel será calculada de maneira independente, porém para cada anel será calculado a espessura de projeto (t_d) através da Equação (2) e a espessura de teste hidrostático (t_t), pela Equação (3). Contudo, a norma especifica que as condições mínimas devem ser respeitadas; o mesmo procede-se para a norma PETROBRAS N-270 (2020) como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre diâmetro do tanque vs. espessura do costado

Diâmetro nominal do tanque – D [m]	API 650 - Espessura nominal mínima – e [mm]	PETROBRAS N-270 – Espessura mínima estrutural de montagem [mm]
$D < 15$	5,0	4,75
$15 \leq D < 36$	6,0	6,30
$36 \leq D < 60$	8,0	8,00
$60 > D$	10,0	9,50

Fonte: API 650, (2020).

Além da espessura do costado, tem-se que ser determinada a largura da chapa que será utilizada no anel do costado que está relacionada a altura do tanque e aos padrões dimensionais encontrados no mercado. Um quadro resumo é apresentado na Tabela 4 com as indicações das normas. Todavia, a largura da chapa está intimamente atrelada a largura comercial mais acessível, em termos de acessibilidade de fabricação e preço. No entanto, existe atualmente uma tendência de fabricação comercial com chapas de 2500 mm para espessuras maior ou igual a 6,35 mm.

Tabela 4 – Recomendação típicas da chapa do costado por norma.

Norma	Largura
API STD 650	1800 mm
NBR 7821	1800 mm
PETROBRAS N-270	<i>Espessura de chapa de 4,75 mm:</i>
	1500 mm
	1800 mm
	<i>Espessura de chapa maior que 6,3 mm:</i>
	2440 mm

Fonte: Própria autora, (2024).

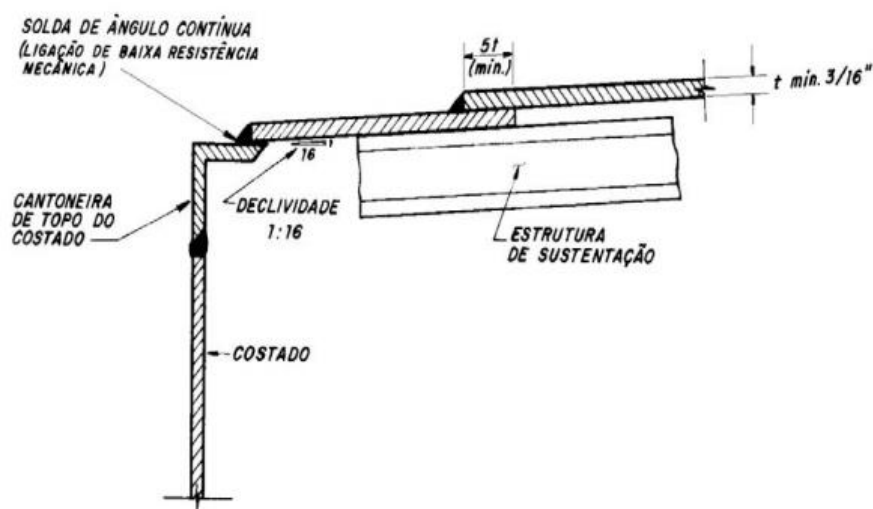
A partir primeiramente do cálculo da espessura do costado guiado pela NBR 7821 ou PETROBRAS N-270 ou API STD 650, podemos definir a largura da chapa e,

assim, seu comprimento para definir a quantidade de anéis e a quantidade total de material.

3.1.4.2. Cantoneira de topo

Na parte superior do tanque, na última chapa do costado, é soldada uma cantoneira que gera um reforço no tanque – exemplo ilustrativo apresentado na Figura 8. A norma PETROBRAS N-270 (2020) indica que para tetos fixos a aba da cantoneira deve ser voltada para o lado interno, porém, em teto flutuante voltada para o lado externo.

Figura 8 – Cantoneira de topo em ligação teto – costado.



Fonte: BARROS, (2010).

A norma PETROBRAS N-270 (2020) indica a utilização da norma API 650 (2020) para a escolha dimensional da cantoneira, assim como a melhor configuração. A Tabela 5 apresenta as dimensões mínimas que a cantoneira de topo deve atender para tetos fixos autportantes.

Tabela 5 – Dimensões mínimas da cantoneira de topo para ligação teto – costado.

Diâmetro do tanque	Cantoneira de topo	
	[mm]	[in]
$D \leq 11$	50 x 50 x 5	2 x 2 x 3/16
$11 \leq D \leq 18$	50 x 50 x 6	2 x 2 x 1/4
$D > 18$	75 x 75 x 10	3 x 3 x 3/8

Fonte: API 650, (2020)

3.1.4.3. Projeto do teto domo

O teto domo de acordo com Myers (1997) consiste aproximadamente de uma superfície esférica, onde para a API STD 650 (2020) os raios mínimo e máximo que tal seção esférica pode ter são 0,8D a 1,2D, respectivamente.

A espessura da chapa de teto domo autoportante deve respeitar a condição: $t \geq \max(Equação (4); (5); 5 \text{ mm})$. Atentando-se que, para a API STD 650 (2020) o valor da espessura já corroída não deve ser menor que 13 mm.

$$4000r_r \sqrt{\frac{B}{1000E}} + CA \quad (4)$$

$$4000r_r \sqrt{\frac{B}{1330E}} + CA \quad (5)$$

Onde:

D : Diâmetro nominal do tanque, m;

E : Módulo de elasticidade, MPa;

B : Maior valor das cargas combinadas da seção 5.2.1, e_1 e e_2 da APIS 650 com S_b , kPa;

U : Maior valor das cargas combinadas da seção 5.2.1, e_1 e e_2 da APIS 650 com S_u , kPa;

r_r : Raio do teto, m.

Além disso, a área de união teto costado através de uma cantoneira de topo dado na Tabela 5 ou pelo anexo F da norma API 650 não deve exceder o concedido pela Equação (6).

$$\frac{pD^2}{8F_a \tan \theta} \quad (6)$$

Onde:

p : Maior carga combinada da seção 5.2.2, e_1 e e_2 ;

D : Diâmetro nominal do tanque;

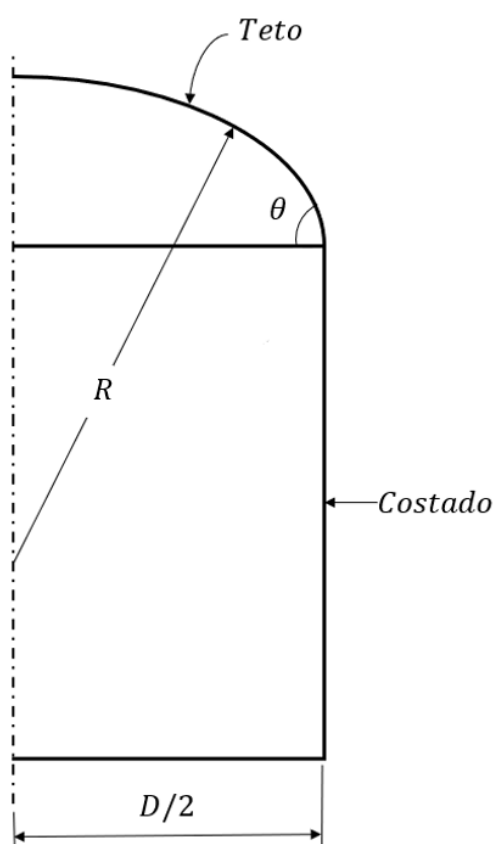
θ : Ângulo horizontal entre teto – costado, graus;

F_a : Igual a $0,6F_y$;

F_y : Tensão de escoamento do material da ligação teto-costado na máxima temperatura de projeto.

As características construtivas, tais como raio da superfície esférica do tanque R e o ângulo horizontal entre teto e o costado podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 – Parâmetros do teto domo autoportante.



Fonte: Adaptado de Myers, (19)

O ângulo θ (teta), independe do diâmetro do tanque e é determinado conforme Equação (7), onde f corresponde ao fator de multiplicação do diâmetro que foi utilizado (0,8 – 1,0).

$$\theta = 90^\circ - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2f} \right) \quad (7)$$

Já a maior carga combinada (p) indicada pela norma API 650 (2020) corresponde a satisfação das condições: $\max(B_1; B_2)$ e $\max(U_1; U_2)$. Onde, B_1 , B_2 , U_1 e U_2 são determinados pelas Equações (8), (9), (10) e (11), respectivamente.

$$B_1 = D_L + \max(L_r; S_b) + F_{pe}P_e \quad (8)$$

$$B_2 = D_L + 0,4\max(L_r; S_b) + P_e \quad (9)$$

$$U_1 = D_L + \max(L_r; S_u) + F_{pe}P_e \quad (10)$$

$$U_2 = D_L + 0,4\max(L_r; S_u) + P_e \quad (11)$$

Onde,

F_{pe} : Fator de combinação de pressão externa, definido como $\max(0,4; P_{o-}/P_e)$;

P_{o-} : Pressão externa de operação, kPa;

P_e : Pressão externa de projeto, kPa;

D_L : Carga morta, definida como $\frac{9,80665W}{1000\pi(D^2/4)}$, kPa;

W : Peso do teto e seus componentes, kg;

L_r : Mínima carga viva no teto, kPa;

S_b : Carga de projeto de neve balanceada, kPa;

S_u : Carga de projeto de neve desbalanceada, kPa;

3.1.4.4. Projeto do fundo

O fundo do tanque corresponde a base na qual o primeiro anel do costado será soldado, assim como será responsável pela sustentação de todo o tanque, ou seja, é projetado para que suporte carga e tensões. As chapas de fundo apresentam critérios que são estabelecidos por normas que podem ser vistos e comparados na Tabela 6 pelas principais normas utilizadas no projeto de tanques atmosféricos.

Tabela 6 – Critérios mínimos das chapas de fundo conforme norma.

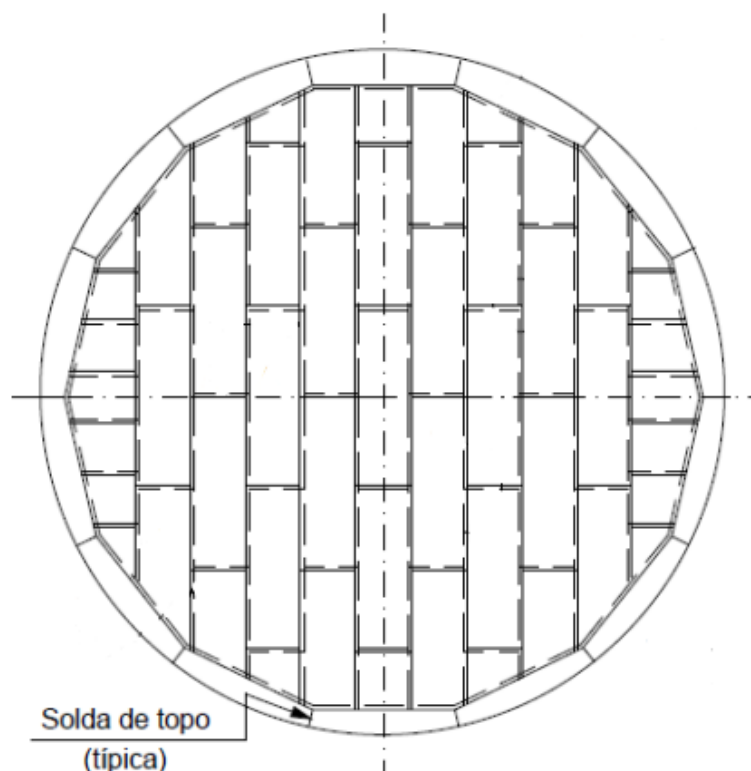
Parâmetro	Norma		
	API STD 650	ABNT NBR 7821	PETROBRAS N-270
Material	Depende das condições de operação/projeto	Escolha do engenheiro projetista ou cliente	ASTM A 283 Gr. C ou ASTM A 36
Projeção externa ¹	50 mm (Mínimo)	25 mm (Mínimo)	50 mm (a partir do filete de solda)
Espessura mínima	6,00 mm (Mínima corroída)	6,30 mm (Sem sobre corrosão)	6,30 mm (Mínimo)
Largura mínima	1.800 mm (Mínimo)		
Sobreposição de 3 chapas de fundo	Distância de 300 mm (Mínimo)		

Nota 1 A projeção externa corresponde a distância radial medida da aresta externa do costado até a aresta mais externa da chapa.

Fonte: própria autora, (2024).

Além disso, a PETROBRAS N-270 (2020) torna obrigatório o uso de chapas anulares para diâmetros superiores a 15 m que contorne o fundo, ilustrado na Figura 10, e define que seu material deve ser o mesmo da chapa de fundo.

Figura 10 - Layout de fundo com chapas anulares na periferia.



Fonte: Adaptada de PETROBRAS N-270, (2020).

Ademais, estabelece que sua espessura deve ser calculada pela API STD 650 (2020), contudo a norma determina valores mínimos como indicado na Tabela 7 que dependem da espessura do 1º anel do costado e do sentido de declividade do fundo.

Tabela 7 – Mínima espessura da chapa anular conforme PETROBRAS N-270.

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

Fonte: PETROBRAS N-270, (2020).

A declividade do fundo corresponde a orientação que as impurezas ou a água que estiver no combustível irá decantar, em sua maioria é muito comum a declividade para o centro, onde será colocado um poceto. Todavia, as declividades estabelecidas e recomendadas pela PETROBRAS N-270 (2020) podem ser vistas na Tabela 8.

Tabela 8 – Declividade e sentido do fundo recomendados pela PETROBRAS N-270.

Diâmetro do tanque	Sentido de declividade	Inclinação
$D \leq 6 m$	Fundo Plano	0
$D > 6 m$	Declividade para a Periferia	1: 120 - Mínimo

NOTA 1 Se o controle de qualidade necessita ser rigoroso utilizar declividade para o centro conforme indicado em PETROBRAS N-270, seção 8.1.3 (2020).

NOTA 2 Se a declividade for para o centro a inclinação deve respeitar os valores mínimos e máximos, respectivamente, de 1:1000 a 1:25.

Fonte: Adaptada de PETROBRAS N-270, (2020)

Para a largura das chapas anulares a API STD 650 define que sua largura deve ser calculada pela Equação (12) e ter valor mínimo de 600 mm, a qual for maior.

$$L = 2t_b \sqrt{\frac{F_y}{2\gamma GH}} \quad (12)$$

Onde:

t_b : Espessura nominal da chapa anular, mm;

F_y : Tensão mínima de escoamento do material da chapa anular em temperatura ambiente, MPa;

γ : Fator de densidade de água, MPa/m;

G : Densidade específica do líquido armazenado, não maior que 1,0;

H : Máxima nível de líquido de projeto, m;

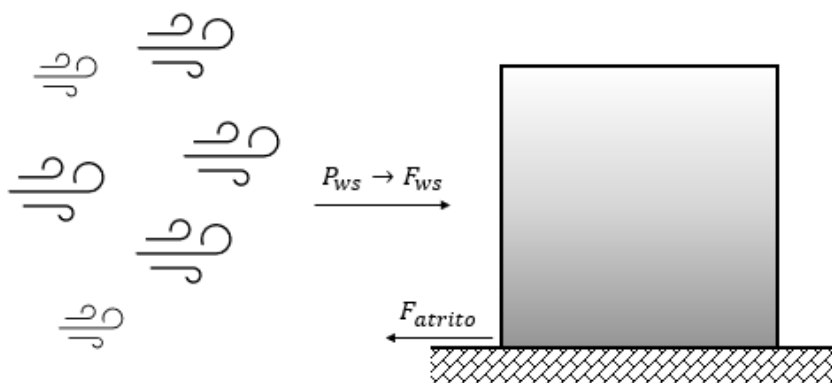
Em contrapartida, a norma PETROBRAS N-270 define que a largura mínima das chapas anulares não deve ser menor que 750 mm e para a ABNT NBR 7821 não pode ser menor que 500 mm. Portanto, se L foi maior que 750 mm a dimensão será conservadora e mantendo-se no especificado das normas nacionais.

3.1.5. Carga de vento

3.1.5.1. Resistência ao Deslizamento

O tanque é considerado um corpo que quando não ancorado pode sofrer deslizamento horizontal em razão das cargas de vento (P_{ws}) quando estas vencem a força de atrito (F_{atrito}) (PINHO, 2009), como representado na Figura 11.

Figura 11 – Deslizamento do tanque em razão das cargas de vento.



Fonte: própria autora, (2024).

Para a API 650 a pressão (P_{ws}) do vento que atuará no tanque para o seu deslizamento deve ser calculada pela Equação (13) e (14).

$$P_{ws} = 890(V/190)^2 \quad (13)$$

$$F_{ws} = A_t P_{ws} \quad (14)$$

Onde:

V : Velocidade de projeto do vento, Km/h ;

A_t : Área do tanque, m^2 ;

F_{ws} : Força da carga de vento no tanque, N .

Além disso, a mesma defini que a força de atrito (F_{atrito}) é o resultado do produto entre o coeficiente de atrito de 0,40 e força que age contra o fundo do tanque. No entanto, a norma NBR 6123 aborda o assunto através da determinação de forças estáticas em razão do vento e define a força de arrasto conforme Equação (15).

$$F_a = C_a q A_e \quad (15)$$

Onde:

C_a : Coeficiente de arrasto;

A_e : Área da projeção ortogonal da edificação (Tanque);

q : Pressão dinâmica, N/m^2 .

Porém, a pressão dinâmica (q) é determinada por uma sequência de passos, como se segue:

- a) Primeiramente é definida a velocidade básica do vento (V_0) no local em que o tanque será montado, para isto é utilizado o mapa com as isopletas do Brasil como apresentado na Figura 12;
- b) Ao ser determinada a velocidade básica do vento (V_0) a mesma é multiplicada pelos fatores:
 - i. S_1 : Fator topográfico que considera a variação do relevo;
 - ii. S_2 : Fator que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;
 - iii. S_3 : Fator estatístico que considera o grau de segurança exigida e a vida útil da edificação.

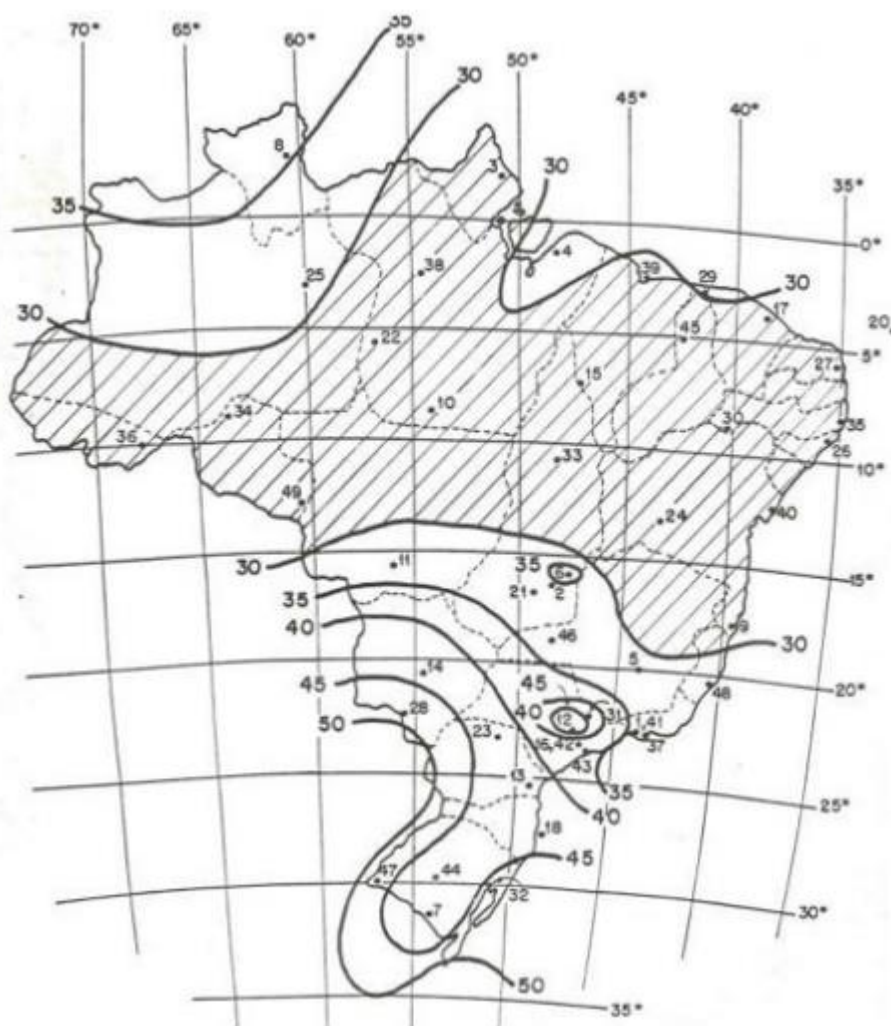
Com a determinação dos fatores a velocidade básica resulta em na velocidade característica do vento, Equação (16).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (16)$$

c) Por fim, a pressão dinâmica é obtida pela Equação (17).

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (17)$$

Figura 12 – Isopletas do Brasil da NBR 6123 (1988).



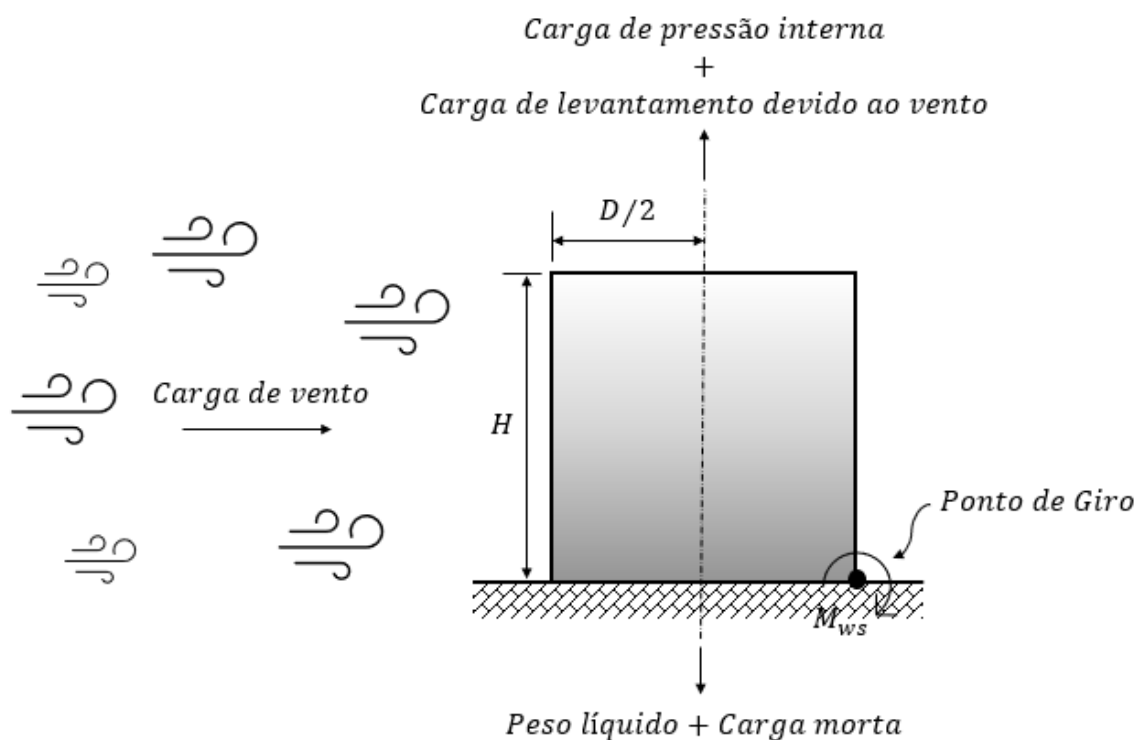
Fonte: LOREDO-SOUZA *et. al.*, (2023).

Vale ressaltar que, de acordo com Reis (2020) as isopletas consistem em linhas que em toda a sua extensão indicam a mesma velocidade do vento e nos mapas em que se encontram delimitam regiões que apresentam fenômenos da ação do vento semelhantes.

3.1.5.2. Resistência ao Tombamento

As cargas de vento também podem ocasionar nos tanques um momento no ponto de giro indicado na Figura 13, se o tanque não conseguir resistir a este momento o mesmo irá tombar. As forças que agem de maneira resistivas são: a carga morta (peso do costado + cantoneira de topo + teto + fundo) e o peso do líquido.

Figura 13 – Condição esquemática para tombamento.



Fonte: Adaptado de API STD 650, (2020).

O momento vertical que age no teto do tanque pode ser calculado conforme a Equação (18) oriunda da pressão vertical indicada pela API 650 (2020), já o seu momento horizontal que age no costado pode ser calculado pela Equação (19)

$$M_v = 1480\pi \left(\frac{V}{190}\right)^2 \left(\frac{D_e}{2}\right)^3 \quad \text{Equação (18)}$$

Onde:

V : Velocidade do vento, [km/h];

D_e : Diâmetro externo, [m];

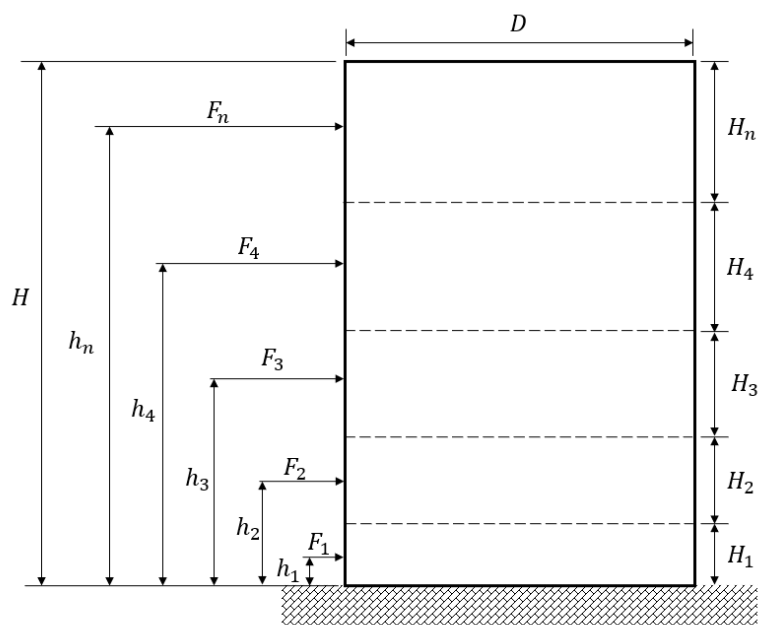
$$M_{ws} = \sum_0^n F_n \left(\frac{h_n}{2} \right) \quad \text{Equação (19)}$$

Onde:

F_n : Força horizontal do vento ortogonal a parede do tanque em cada altura da seção considerada – Figura 14, [N];

h_n : Altura de cada seção considerada – Figura 14, [m].

Figura 14 – Ponto de atuação da força ortogonal a parede do tanque mediante altura.



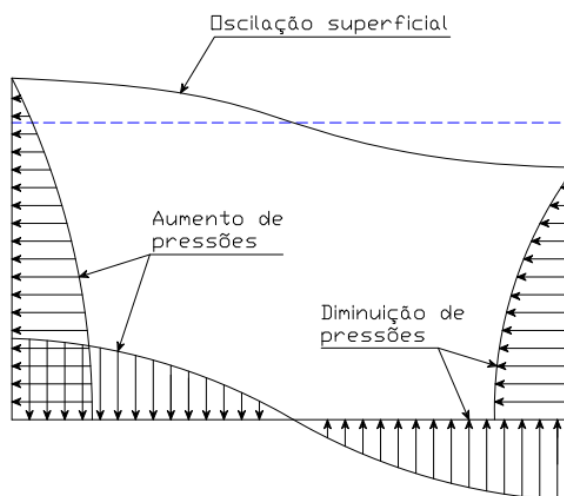
Fonte: própria autora, (2024).

3.2. SISMOLOGIA

3.2.1. Desastres e danos causados em tanques

De acordo com Pinho (2009) as solicitações sísmicas sofridas pelos tanques de armazenamento atmosférico começaram a serem consideradas após a ocorrência de desastres ligados a estes. Pois, as ações sísmicas também são responsáveis pelos danos sofridos em tanques de armazenamento, como por exemplo: o rompimento das tubulações internas ao tanque em razão das pressões hidrodinâmicas causadas pela aceleração horizontal – Figura 15.

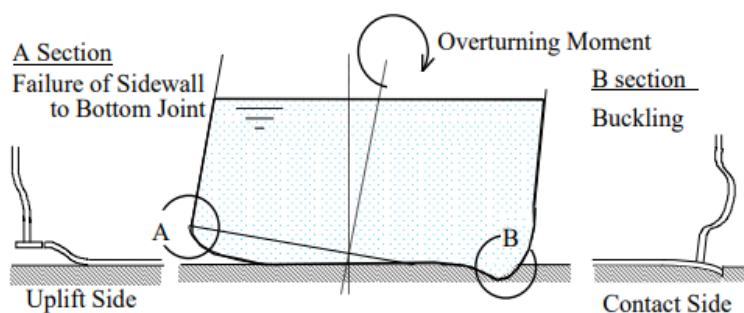
Figura 15 – Soma das pressões hidrodinâmicas em razão de uma excitação sísmica.



Fonte: PINHO, (2009).

Assim como, pelo levantamento (*uplift*) de um dos lados do tanque em razão de cargas laterais provocadas pela excitação sísmica que geram um momento resultando em uma forte força compressiva lateralmente ocasionando a flambagem na seção inferior do tanque (YOSHIDA, 2018), portanto uma deformação plástica (PINHO, 2009) - Figura 16.

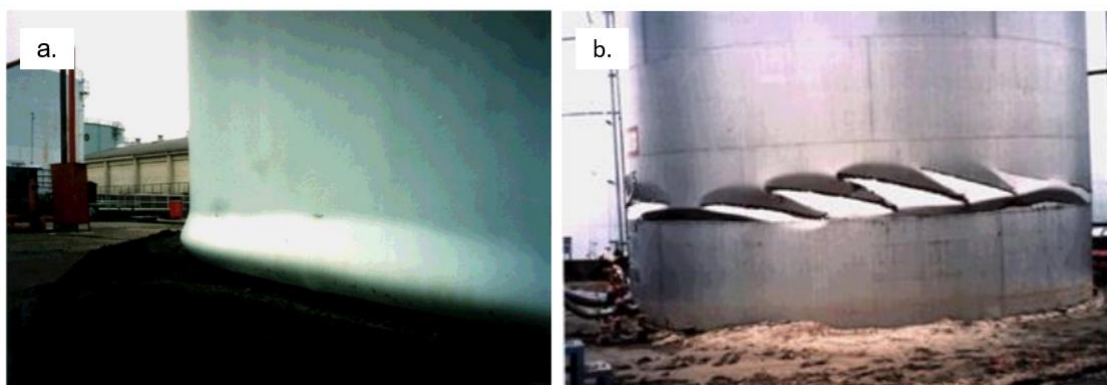
Figura 16 – *Uplift* e flambagem na região de ligação fundo-costado.



Fonte: YOSHIDA, (2018).

Este tipo de dano foi gerado em 1995, em Kobe no Japão em um terremoto de magnitude de 6.8 com epicentro em Nojima Fault, que também é muito conhecido como “pata de elefante” por sua forma – Figura 17.a. Além disso, houve flambagem nas chapas do costado dos tanques dano também chamado de diamante por sua forma. Ambos os danos podem ser vistos na Figura 17.b.

Figura 17 – Danos causados nos tanques do terremoto de Kobe em 1995, Japão.



Fonte: YOSHIDA, (2018).

Em Kobe os danos não ocasionaram rompimentos nos tanques, todavia o mesmo não ocorreu na refinaria *Tohoku Oil Inc.* em 1978 no Japão, onde três grandes tanques: dois com capacidade nominal de 31.500 m³ e um de 23.700 m³; após um terremoto de magnitude de 7.7 atingir a região, os tanques sofreram “*uplift*” o que ocasionou grande tensão na ligação fundo-costado provocando a fratura do filete de solda o que direcionou a uma falha catastrófica (YOSHIDA, 2018).

O rompimento da ligação permitiu o escoamento do conteúdo do tanque que gerou a inundação em grande parte da refinaria, além de atingir o porto. Na Figura 18, as áreas em preto na refinaria correspondem ao óleo que se espalhou. Apesar da grande exposição o combustível não entrou em combustão (YOSHIDA, 2018).

Figura 18 – Desastre na Refinaria Tohoku Oil Inc. em 1978 no Japão.



Fonte: YOSHIDA, (2018).

Todavia, o resultado foi diferente no Alaska no continente norte-americano, pois em 1964 um terremoto de magnitude de 8.4 ocorreu na região provocando roturas nos tanques causando grandes prejuízos e incêndio, como mostrado na Figura 19. Mediante investigação foi identificado que os tanques não haviam sido projetados para resistir a sismos o que direcionou após incidente a implementação das solicitações sísmicas nos projetos de tanques e sistemas que inviabilize o derramamento de óleo (PINHO, 2009).

Figura 19 – Incêndio em tanques em razão do terremoto *Prince William Sound*.



Fonte: PINHO, (2009).

3.2.2. Sismologia no território brasileiro

A norma brasileira hoje disponível para a consideração sísmica é a ABNT NBR 15421 - Projeto de estruturas resistentes a sismos - direcionada à área civil. No entanto, concede um mapeamento sobre as acelerações horizontais no Brasil que nos ampara como fonte de informação resumidas na Tabela 9 para terrenos de classe B.

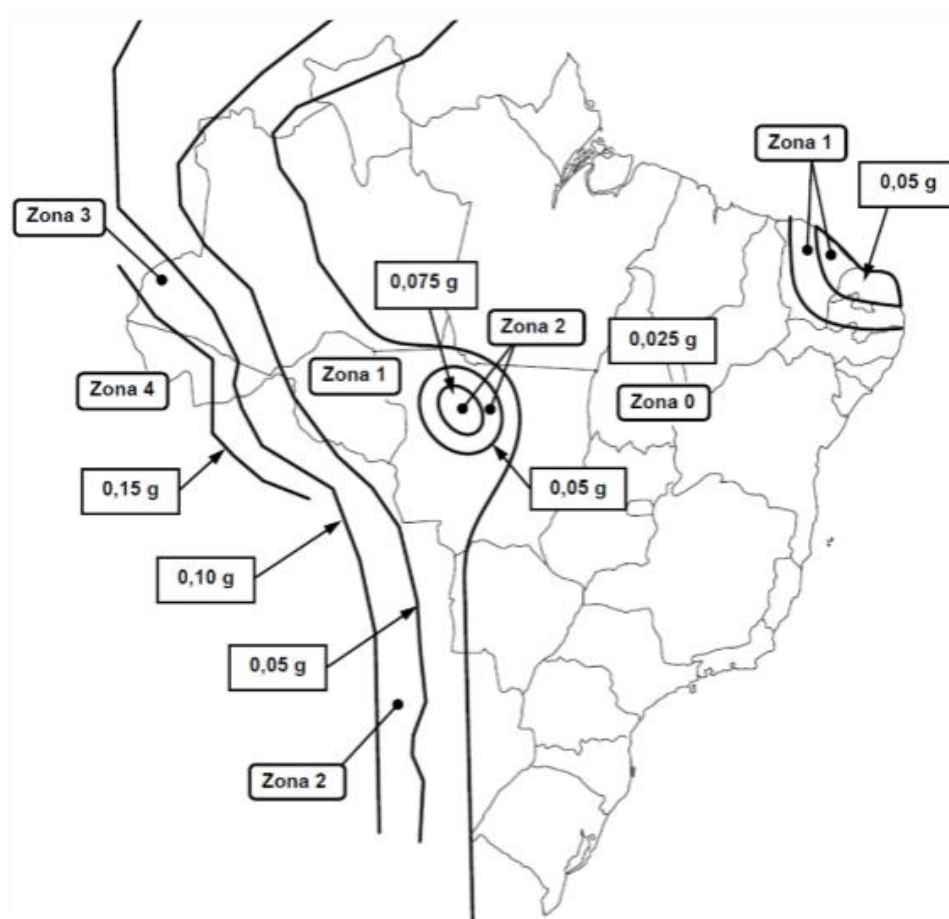
Tabela 9 –Zonas Sísmicas no Brasil.

Zonas Sísmicas	Valores de a_g
Zona 0	$a_g = 0,025g$
Zona 1	$0,025g < a_g \leq 0,05g$
Zona 2	$0,05g < a_g \leq 0,10g$
Zona 3	$0,10g < a_g \leq 0,15g$
Zona 4	$a_g = 0,15g$

Fonte: ABNT NBR 15421, (2023).

As zonas podem ser identificadas através do mapa do Brasil apresentado na Figura 20, onde as linhas que atravessam o mapa correspondem ao limite máximo da aceleração horizontal, enquanto as zonas representam a seção do país que podem apresentar aquela faixa de aceleração.

Figura 20 – Mapa de zoneamento sísmico no Brasil.



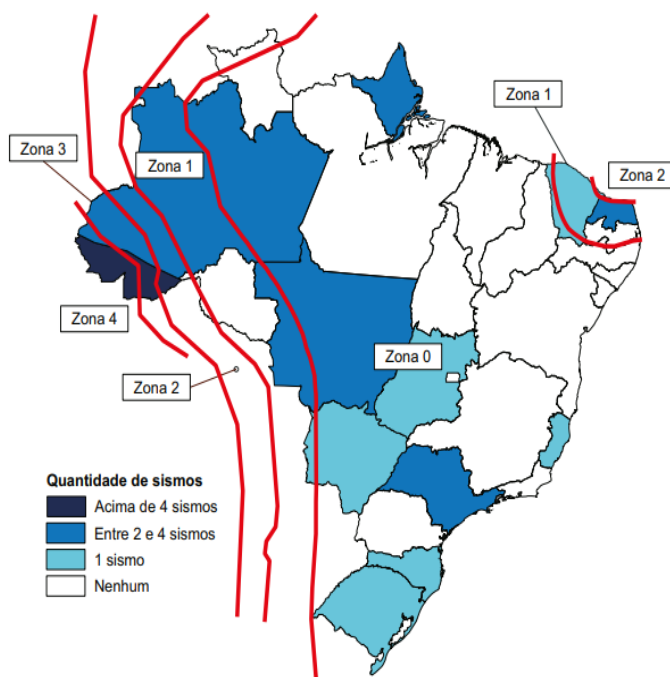
Fonte: NBR 15421, (2023).

Além disso, o levantamento histórico dos sismos registrados no Brasil de 1724 a 2017 por Miranda *et al.* (2018) revela que regiões que estão definidas como zona 0 ($a_g = 0,025\text{ g}$) já apresentaram sismos maior ou igual a 5,0 graus na escala *Richter*, o que ele classifica como Sismos II e pode ser observado na Figura 21 mapeado por sua frequência de aparecimento.

Apesar de Miranda *et al.* (2018) apresentar os dados com base na versão 2016 da norma NBR 15421, os dados matêm-se válidos; visto que, a mudança da zona 0 recebeu aumento de aceleração horizontal e a alteração da norma foi significativa apenas no estado do Mato Grosso nesta zona.

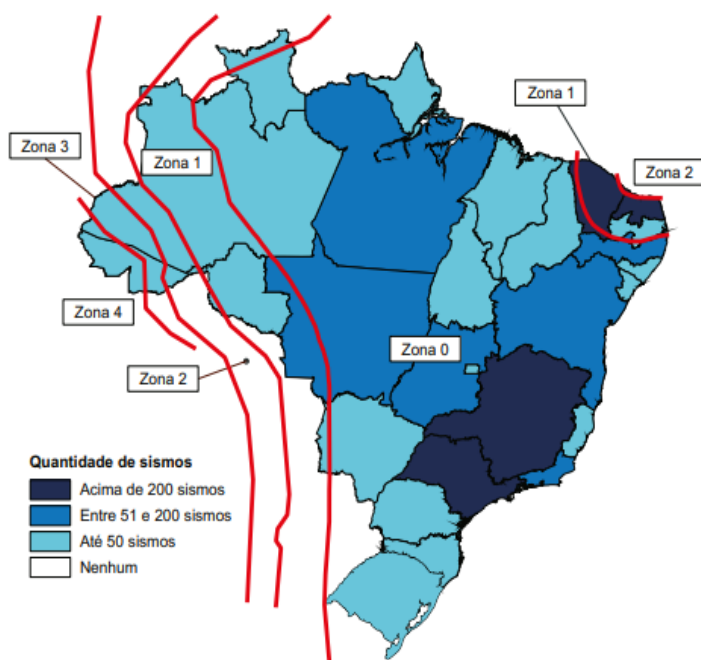
De modo análogo, para sismos menores categorizados entre 2,0 e 5,0 graus, chamados de Sismos I, a ocorrência torna-se bem dentro dos registros levantados por Miranda *et. al.* (2018), como apresentado esquematicamente na Figura 22.

Figura 21 - Mapeamento de sismos acima de 5,0 graus no Brasil.



Fonte: MIRANDA *et al.*, (2018)

Figura 22 - Mapeamento de sismos entre 2,0 e 5,0 graus no Brasil.

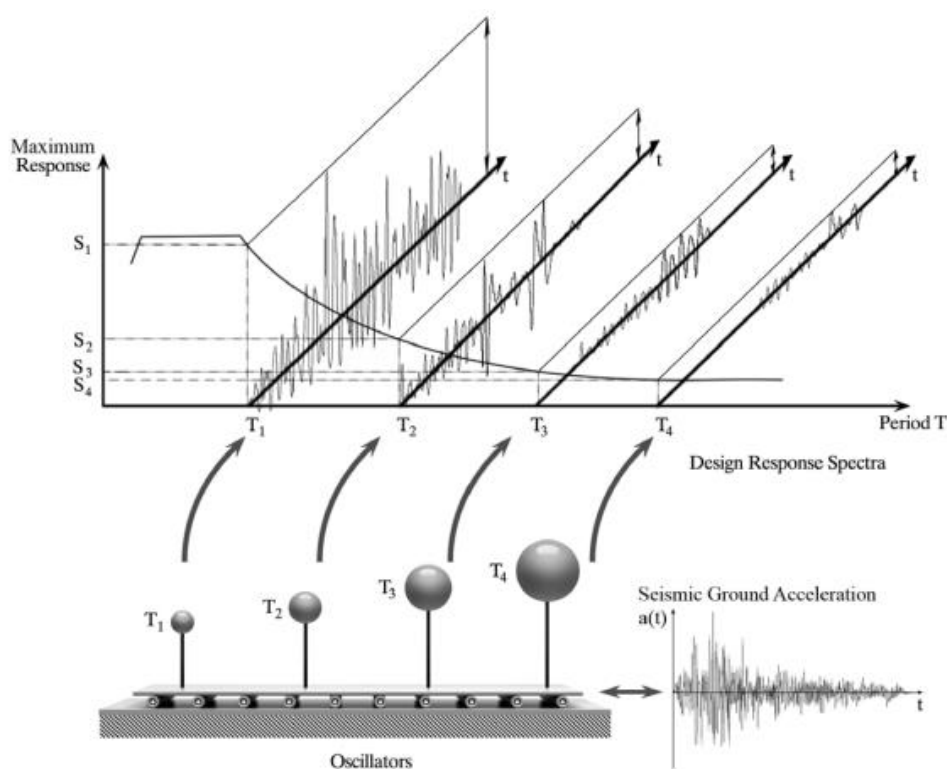


Fonte: MIRANDA *et al.*, (2018)

3.2.3. Espectro de resposta de projeto

O espectro de resposta consiste em uma representação gráfica de um conjunto de osciladores de um grau de liberdade que foram expostos a uma certa excitação contendo a resposta máxima de um parâmetro em função do período ou da frequência para um mesmo valor de amortecimento (QUINTERO, 2017) – Figura 23.

Figura 23 – Conceito ilustrativo do espectro de resposta.



Fonte: E VROCHIDOU *et al*, (2014)

Apesar de um espectro de resposta consistir na resposta máxima de uma excitação particular (QUINTERO, 2017), quando estamos tratando de espectro de resposta de projeto temos na verdade uma envoltória dos espectros de resposta das excitações de uma região típica (BRITO, 2017) determinados através de análise estatística.

A norma NBR 15421 (2023) fornece um espectro de resposta de projeto para acelerações horizontais, com um grau de liberdade e amortecimento crítico de 5% usando como base as acelerações horizontais e a classe de terreno para amplificações que pode ser calculado através das Equações (20) para cada intervalo de tempo.

$$0 \leq T \leq 0,04(C_V/C_a) \rightarrow S_a(T) = a_{gs0}(37,5T C_a/C_V + 1,0) \quad (20.a)$$

$$0,04(C_V/C_a) \leq T \leq 0,3(C_V/C_a) \rightarrow S_a(T) = 2,5a_{gs0} \quad (20.b)$$

$$0,3(C_V/C_a) \leq T \leq 2,0(C_V/C_a) \rightarrow S_a(T) = a_{gs1}/T \quad (20.c)$$

$$T \geq 2,0(C_V/C_a) \rightarrow S_a(T) = 2(C_V/C_a)(a_{gs1}/T^2) \quad (20.d)$$

Onde:

T : Período natural, s;

a_{gs0} : aceleração espectral no período 0,0 s dada por $a_{gs0} = C_a a_g$;

a_{gs1} : aceleração espectral no período 1,0 s dada por $a_{gs1} = C_V 0,75 a_g$;

C_a : fator de amplificação sísmica do solo para o período 0,0s;

C_V : fator de amplificação sísmica do solo para o período 1,0s;

Porém, os fatores de amplificação sísmica são definidos conforme Tabela 10 em função do tipo de solo.

Tabela 10 – Fatores de amplificação de acordo com o solo.

Classe do terreno	C_a		C_v	
	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

Fonte: NBR 15421: 2023.

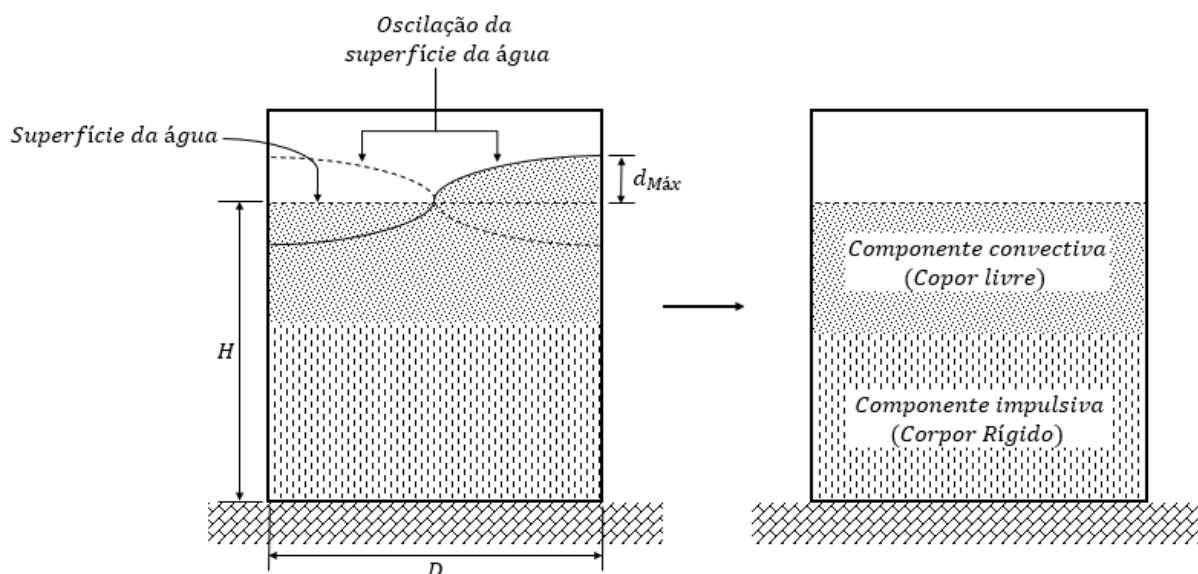
3.2.4. Comportamento hidrodinâmico

De acordo com Myers (1997) mesmo com o estabelecimento dos requisitos básicos dos abalos sísmicos da região de interesse, os engenheiros enfrentam um problema fundamental que é entender o comportamento hidrodinâmico do fluido dentro dos tanques de armazenamento para assim poder definir os efeitos resultantes na estrutura do tanque.

Considerando a aceleração horizontal gerada pela força sísmica, ondas são geradas internamente no tanque onde dois tipos de componentes podem ser encontrados: impulsiva e convectiva (MYERS, 1997).

A força impulsiva é a massa do fluido que fica próxima ao fundo e comporta-se como um corpo rígido, deste modo seu movimento acompanha o movimento do solo e do tanque a uma mesma taxa de aceleração. Em contrapartida, a seção acima corresponde à superfície do fluido que possui a liberdade de movimento e, assim, a força sísmica provoca oscilações que se transformam em ondas que colidem com a parede do tanque (costado) (MYERS, 1997) configurando a força convectiva. Ambas as componentes podem ser visualizadas no exemplo ilustrativo da Figura 24.

Figura 24 – Comportamento hidrodinâmico dentro de tanques atmosféricos.



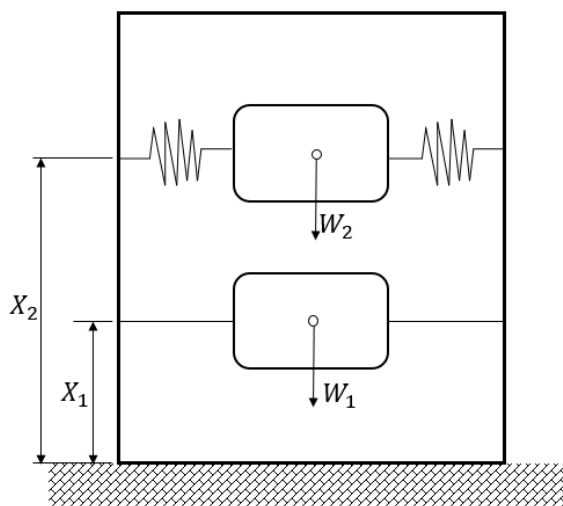
Fonte: Adaptado de Myers (1997).

Uma hipótese adotada para o modelo é que o tanque assume uma estrutura rígida, pois a frequência de impacto da massa do fluido com a parede do tanque (costado) é menor do que a frequência dominante do abalo sísmico, condição que não gera erros tão significativos.

Se a hipótese supracitada for admitida, a componente convectiva pode ser analisada como uma única massa presa por molas fixas à parede do tanque com seu centro de massa distante X_2 acima em relação ao fundo do tanque; já a componente impulsiva será analisada como um corpo rígido ligado ao tanque e seu centro de

massa distante X_1 , também, em relação ao fundo do tanque (MYERS, 1997), Figura 25.

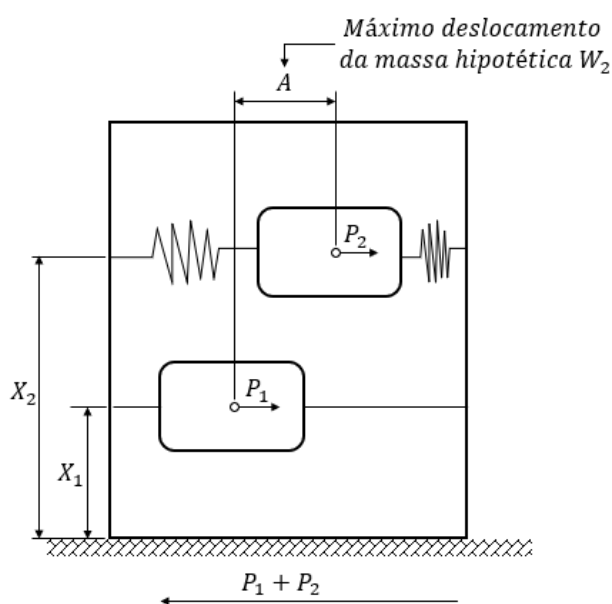
Figura 25 - Modelo básico das componentes no efeito hidrodinâmico.



Fonte: Adaptada de Myers (1997).

O modelo apresentado na figura 4 dão base para mensurar a intensidade das forças que cada componente contribui para: força cortante e momento no costado do tanque, forças transmitidas para fundação e solo; compressão e tensões axiais; e em especial, momento de tombamento que pode ser calculado pelas forças P_1 e P_2 como apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Comportamento das forças em razão das componentes.



Fonte: Adaptada de Myers (1997).

A componente impulsiva por comportar-se como um corpo rígido a mesma irá se mover em concordância com o tanque e o solo. A aceleração adquirida produzirá a força P_1 que atuará no centróide da porção de massa impulsiva. De modo semelhante, a componente convectiva apresentará agindo sem seu centróide X_2 a força P_2 . Ambas as forças são resultado da aceleração adquirida pela movimentação do solo.

3.2.5. Taxa de aspecto do tanque

Ao determinar a capacidade nominal de armazenamento desejada, temos que dimensionar o tanque de modo que este nos dê a configuração mais econômica. Em razão das variáveis que se interligam, determinar a melhor relação entre altura x diâmetro, de acordo com Barros (2010), torna-se uma análise quase impossível.

Todavia, a literatura apresenta-nos duas relações (BARROS, 2010):

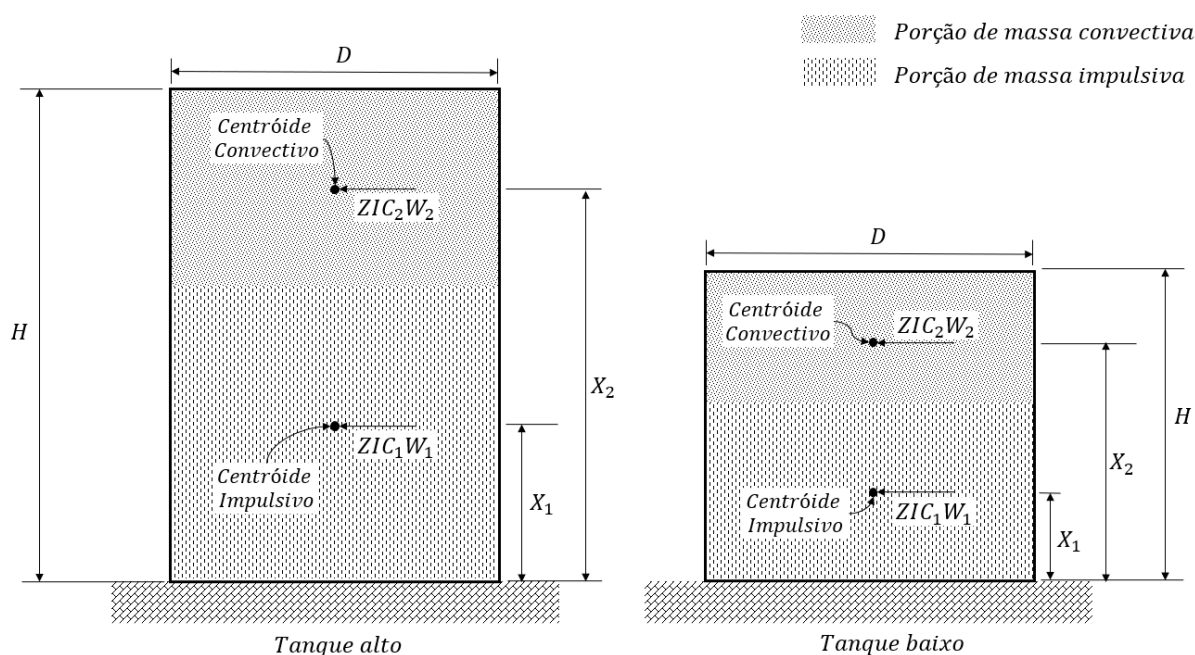
- a. $D \sim H$: Tanque de pequena e média capacidade;
- b. $D \sim (8/3) H$: Tanque de grande capacidade.

A razão D/H não é uma condição rígida, pois o dimensionamento não se restringe a isto, visto que, existem questões que limitam relações muito fechadas, tais como por exemplo: a menor altura do anel do costado deve ser de 1.800 mm (API STD 650, seção 5.6.1.2). Se a altura definida e a largura das chapas comerciais não permitem que a condição da norma seja respeitada, a razão deve ser revista.

De modo semelhante, quando tratamos de condições sísmicas em tanques a razão H/D transmite informações sobre a localização das componentes impulsiva e convectiva. Tendo H/D sido determinada em projeto e a partir de então sendo considerada uma constante, podemos definir a proporção da massa do fluido que contribuirá como uma componente convectiva ou impulsiva, assim como seu centróide (MYER, 1997).

A definição dada por Myers (1997) diante da relação não o corresponde agora à capacidade de armazenamento, mas se este é considerado um tanque alto ou baixo. Para isto define-se como um tanque alto aquele que apresenta a razão $H/D \geq 3/4$, caso contrário será considerado baixo. Além disso, se o tanque é considerado alto, $1/4$ da altura a partir do fundo, a porção de massa sempre será impulsiva. A Figura 27 apresenta de maneira esquemática as relações definidas por Myers (1997).

Figura 27 - Modelo básico das componentes do efeito hidrodinâmico.



Fonte: Adaptado de Myers (1997).

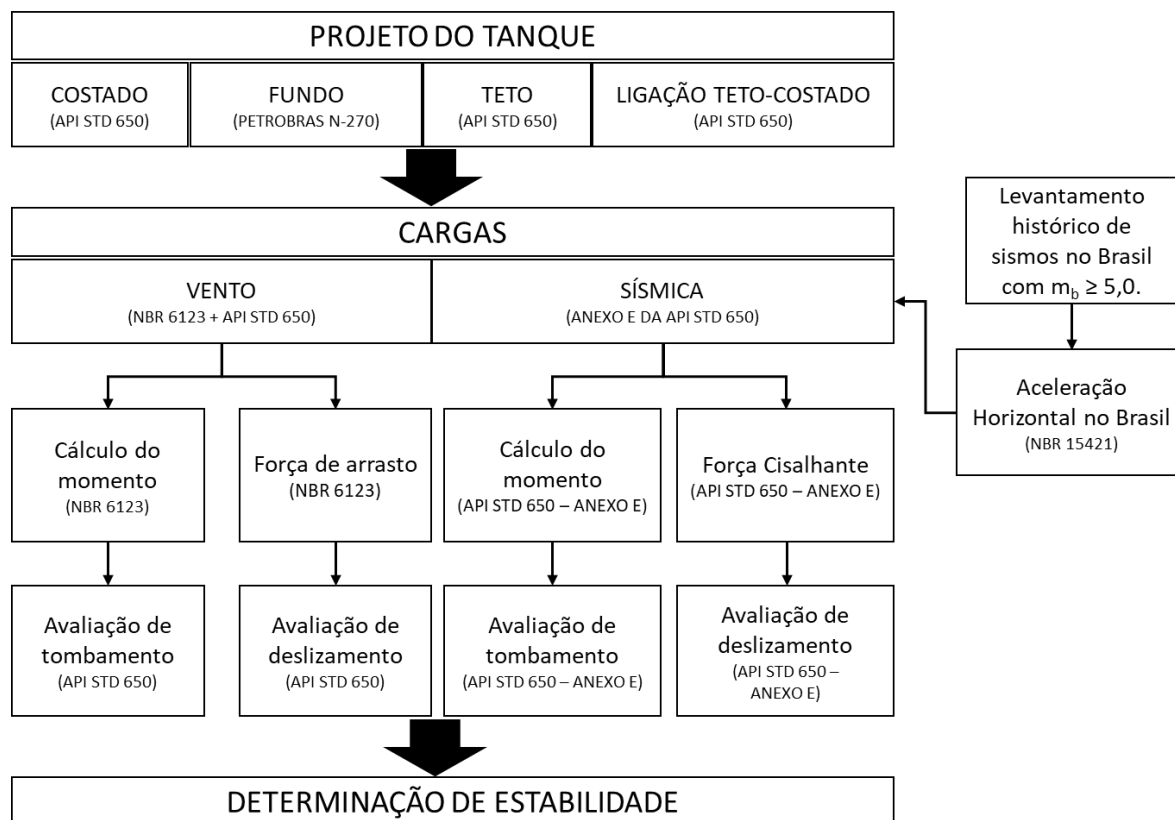
O fato do tanque ser considerado alto ou baixo afetará a equação que define a localização dos centróides das componentes impulsivas e convectivas, portanto a aplicação das forças P_1 e P_2 .

Como apresentado na Figura 21, temos as forças P_1 e P_2 , agora representadas como forças estáticas de projeto, indicadas por ZIC_1W_1 e ZIC_2W_2 , respectivamente, como apresentado na Figura 22. As forças dependem dos termos C_1 e C_2 que correspondem a coeficientes de aceleração que sujeitos ao fator S (coeficiente do sítio) e T (período natural do primeiro modo de deslizamento, em segundos); I que representa o fator de importância, que para os tanques de armazenamento de petróleo e derivados é fixado igual a 1,0; e Z que é a contribuição da sismicidade local (MYERS, 1997).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido conforme fluxograma 1. Onde, além de mostrar o que foi calculado em cada etapa, indica a norma utilizada em cada seção de modo esquemático.

Fluxograma 1 - Equema das etapas de estudo do projeto.



Fonte: Própria autora, (2024).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TANQUES DE ESTUDO

Para investigar os efeitos sísmicos em projeto de tanques atmosféricos temos que iniciar a avaliação com base na taxa de aspecto do tanque, onde $H/D \geq 0,75$ é considerado um tanque alto, em caso contrário, baixo (MYERS, 1997); visto que, isto nos norteará quanto ao impacto da sismicidade para cada caso. Além disso, os dados fornecidos pela norma API STD 650 (2020) abrangem a tanques até 23 m de altura. Desse modo, para alcançar ambas as considerações e estabelecer o dimensional do tanque, um volume de 9.200 m³ como a capacidade desejada para o para armazenamento de gasolina “A” (Gasol “A”) foi definido para a investigação do estudo.

A Tabela 11 apresenta os dados dimensionais dos 03 tanques de estudo. Os tanques TQ-01 e TQ-02 adequam-se a capacidade mínima definida de 9.200 m³ e são considerados tanque alto e baixo, respectivamente; abordando assim ambos os casos da análise sísmica que podem ser definidos por sua taxa H/D. Contudo, o tanque TQ-03 corresponde a uma tendência de mercado, onde os tanques são mais altos e de pequeno diâmetro em razão dos espaços hoje disponíveis, em especial para expansões.

Tabela 11 – Dimensional dos tanques de estudo.

Identificação do Tanque	Diâmetro	Altura	Capacidade nominal	Taxa de aspecto – H/D
TQ-01	22,924 m	22,500 m	9.286 m ³	0,98
TQ-02	34,386 m	10,000 m	9.286 m ³	0,29
TQ-03	11,462 m	22,500 m	2.321 m ³	1,96

Fonte: própria autora, (2024).

4.2 PARÂMETRO DE PROJETO

Os dados de projeto geralmente são fornecidos pelos clientes através da folha de dados indicando as condições de operações que influenciam as definições de projeto, tal como a espessura dos anéis do costado considerando a corrosão exigida pelo cliente. Desse modo, os dados de projeto fornecidos por BARROS (2018) serão utilizados neste estudo, como apresentada na Tabela 12, com adição de informações necessárias para cálculos subsequentes.

Tabela 12 – Dados de projetos

Parâmetro	Magnitude
Tipo de teto	Domo autoportante
Produto	Gasolina
Densidade relativa do produto	0,76
Densidade relativa de projeto (G)	1
Pressão de operação	1 atm
Pressão de projeto	0,363 kPa 0,25 kPa
Temperatura de operação / projeto	30°C / 80°C
Sobresspesura de corrosão – costado	1,0 mm

Fonte: BARROS, (2018).

O material que foi utilizado, bem como suas características em todas as seções do tanque (teto, fundo e costado) está descrita na Tabela 13.

Tabela 13 – Característica do material de projeto.

Material ASTM A36	
Tensão admissível de projeto (S_d)	160 MPa
Tensão admissível de teste hidrostático (S_t)	171 MPa
Tensão mínima de escoamento (S_y)	250 MPa
Pertencente ao grupo I	espessura ≤ 20 mm
Pertencente ao grupo II ^a	espessura > 20 mm
Nota a: ASTM A36 pertencente ao grupo II deve apresentar composição química com requisitos adicionais conforme indicado em norma API STD 650.	

Fonte: API STD 650, (2020)

4.3 TANQUE DE ARMAZENAMENTO ATMOSFÉRICO

4.3.1 Projeto do costado

Para todos os tanques, o método básico de 1 (um) pé da norma API 650 (2020) será utilizado para dimensionar as espessuras das chapas do costado. Além disso, a largura da chapa foi de 2500 mm com comprimento de 12000 mm em razão do novo cenário que surge no mercado e a densidade do aço ASTM A36 é de 7850 kg/m³ de acordo com Carlesso *et. al* (2018).

A quantidade de anéis (n) que os tanques TQ-01, TQ-02 e TQ-03 terão, respectivamente, está calculado conforme equações (21), (22) e (23). Desse modo, temos que:

$$n_{TQ-01} = \frac{H}{L_{chapa}} = \frac{22,50}{(2500/1000)} = 9,0 \quad \text{Equação (21)}$$

$$n_{TQ-02} = \frac{H}{L_{chapa}} = \frac{10,00}{(2500/1000)} = 4,0 \quad \text{Equação (22)}$$

$$n_{TQ-03} = \frac{H}{L_{chapa}} = \frac{22,50}{(2500/1000)} = 9,0 \quad \text{Equação (23)}$$

4.3.1.1 Projeto costado - TQ-01

A espessura nominal mínima estrutural para este tanque conforme Tabela 3 do presente trabalho é de 6,30 mm. Utilizando-se das Equações (2) e (3) as espessuras foram calculadas e a partir de tais espessuras é possível determinar a maior dentre elas, ou seja, $t_f = \max(t_d; t_i; t_e)$. E, assim, definir a espessura adotada (t_a) diante das espessuras hoje comerciais. A Tabela 14 apresenta um quadro resumo das espessuras calculadas e a final adotada.

Tabela 14 – Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-01.

Anel	Espessura de projeto (t_d)	Espessura do teste Hidrostático (t_i)	Espessura mínima estrutural (t_e)	Maior espessura calculada (t_f)	Espessura final adotada (t_a)
1	16,58 mm	14,58 mm	6,30 mm	16,58 mm	19,00 mm
2	14,83 mm	12,94 mm	6,30 mm	14,83 mm	16,00 mm
3	13,08 mm	11,30 mm	6,30 mm	13,08 mm	16,00 mm
4	11,32 mm	9,66 mm	6,30 mm	11,32 mm	12,7 mm
5	9,56 mm	8,01 mm	6,30 mm	9,56 mm	12,7 mm
6	7,81 mm	6,37 mm	6,30 mm	7,81 mm	8,00 mm
7	6,05 mm	4,73 mm	6,30 mm	6,30 mm	6,35 mm
8	4,30 mm	3,09 mm	6,30 mm	6,30 mm	6,35 mm
9	2,54 mm	1,45 mm	6,30 mm	6,30 mm	6,35 mm

Fonte: própria autora, (2024).

4.3.1.2 Projeto costado - TQ-02

Para um diâmetro menor que 36 m, a espessura nominal mínima estrutural conforme Tabela 3 do presente trabalho é de 6,30 mm. E de maneira análoga ao TQ-01 foi calculada as espessuras para o TQ-02, onde, estas estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-02.

Anel	Espessura de projeto (t_d)	Espessura do teste Hidrostático (t_i)	Espessura mínima estrutural (t_e)	Maior espessura calculada (t_f)	Espessura final adotada (t_a)
1	11,21 mm	9,56 mm	6,30 mm	11,21 mm	12,7 mm
2	8,58 mm	7,09 mm	6,30 mm	8,58 mm	9,50 mm
3	5,95 mm	4,63 mm	6,30 mm	6,30 mm	6,35 mm
4	3,32 mm	2,17 mm	6,30 mm	6,30 mm	6,35 mm

Fonte: própria autora, (2024).

4.3.1.3 Projeto costado - TQ-03

Para um diâmetro menor que 15 m, a espessura nominal mínima estrutural conforme Tabela 3 do presente trabalho é de 4,75 mm. Considerando o mesmo método utilizado para TQ-01, um quadro resumo das espessuras calculadas e a adotada do TQ-03 estão discretizadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Quadro resumo das espessuras e espessura final calculada do TQ-03.

Anel	Espessura de projeto (t_d)	Espessura do teste Hidrostático (t_i)	Espessura mínima estrutural (t_e)	Maior espessura calculada (t_f)	Espessura final adotada (t_a)
1	8,79 mm	7,29 mm	4,75 mm	8,79 mm	9,5 mm
2	7,92 mm	6,47 mm	4,75 mm	7,92 mm	8,00 mm
3	7,04 mm	5,65 mm	4,75 mm	7,04 mm	8,00 mm
4	6,16 mm	4,83 mm	4,75 mm	6,16 mm	6,35 mm
5	5,28 mm	4,01 mm	4,75 mm	5,28 mm	6,35 mm
6	4,40 mm	3,19 mm	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm
7	3,53 mm	2,36 mm	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm
8	2,65 mm	1,54 mm	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm
9	1,77 mm	0,72 mm	4,75 mm	4,75 mm	4,75 mm

Fonte: própria autora, (2024).

4.3.1.4 Peso do costado

A partir do dado da espessura por anel (e_{anel}), altura do anel (h_{anel}), diâmetro interno (D_{int}) e densidade do material (ρ); podemos determinar o peso do costado, por anel, não corroído – conforme indicado Equação (24) e apresentado na Tabela 17.

$$Peso = \pi \left[D_{int} + \left(\frac{e_{anel}}{1000} \right) \right] e_{anel} h_{anel} \rho \quad \text{Equação (24)}$$

Tabela 17 – Peso do costado.

Anel	Peso por anel		
	TQ-01	TQ-02	TQ-03
1	26.853,66 kg	26.500,33 kg	6.713,42 kg
2	22.610,65 kg	20.138,49 kg	5.652,66 kg
3	22.610,65 kg	13.459,76 kg	5.652,66 kg
4	17.661,87 kg	13.405,92 kg	4.486,16 kg
5	17.661,87 kg	-	4.486,16 kg
6	11.301,38 kg	-	3.355,32 kg
7	8.969,82 kg	-	3.355,32 kg
8	8.969,82 kg	-	3.355,32 kg
9	8.933,95 kg	-	3.341,90 kg
TOTAL	145.573,69 kg	73.504,49 kg	40.398,90 kg

Fonte: própria autora, (2024).

4.3.2 Projeto teto domo autoportante

Para o presente trabalho, como o teto considerado será autoportante, precisaremos calcular apenas a espessura da chapa que será utilizada, onde a API 650 (2020) limita a espessura de 13,00 mm já com a sobrecorrosão e mínima de 5,00 mm.

A partir das cargas máximas apresentadas na Tabela 20 e das Equações (4) e (5), as espessuras calculadas e a espessura final das chapas do teto estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Espessura da chapa do teto.

Tanque	Espessura nominal com base na carga B	Espessura nominal com base na carga U	Condição mínima	Espessura adotada
TQ-01	7,315 mm	6,343 mm	5,00 mm	8,00 mm
TQ-02	12,127 mm	10,516 mm	5,00 mm	12,50 mm
TQ-03	3,526 mm	3,057 mm	5,00 mm	6,35 mm

Fonte: própria autora, (2024).

O peso do teto será dado pela Equação (25), assim a Tabela 32 apresenta o peso do teto em razão das chapas para cada caso de estudo.

$$P = 2\pi R h e \rho \quad \text{Equação (25)}$$

Onde:

R : Raio da esfera dado por $f \cdot D_{int}$;

f : Fator de multiplicação do teto domo;

D_{int} : Diâmetro interno nominal;

h : Altura do teto;

e : Espessura da chapa de teto;

ρ : Densidade do material da chapa de teto;

4.3.3 Definição da cantoneira de topo

Para que a cantoneira de topo seja definida é necessário a priori determinar qual é a área mínima na ligação teto-costado para um teto domo conforme definido pela Equação (6). No entanto, antes faz-se necessário o cálculo da maior carga combinada no teto e a determinação do ângulo gerado entre teto – costado.

O ângulo θ (teta) gerado pela reta tangente que toca o teto perpendicular a prolongação R, como apresentado na Figura 9 – é calculado conforme Equação (7). O fator de multiplicação dos tanques TQ-01, TQ-03 e TQ-02 será $f = 0,8$ e o ângulo calculado apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Ângulo entre teto – costado.

Tanque	Fator de Multiplicação (f)	Equacionamento	Ângulo (θ)	
TQ-01, TQ-02 e TQ-03	0,8	$90^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{1}{2 \times 0,8}\right)$	38,68 °C	0,675 rad

Fonte: própria autora, (2024).

Para a determinação da mínima espessura faz-se necessário o cálculo das combinações de cargas como apresentado na seção 3.1.4.3, desse modo as maiores cargas para cada tanque estão discretizadas na Tabela 20; bem como dados de projeto comum a todos os tanques.

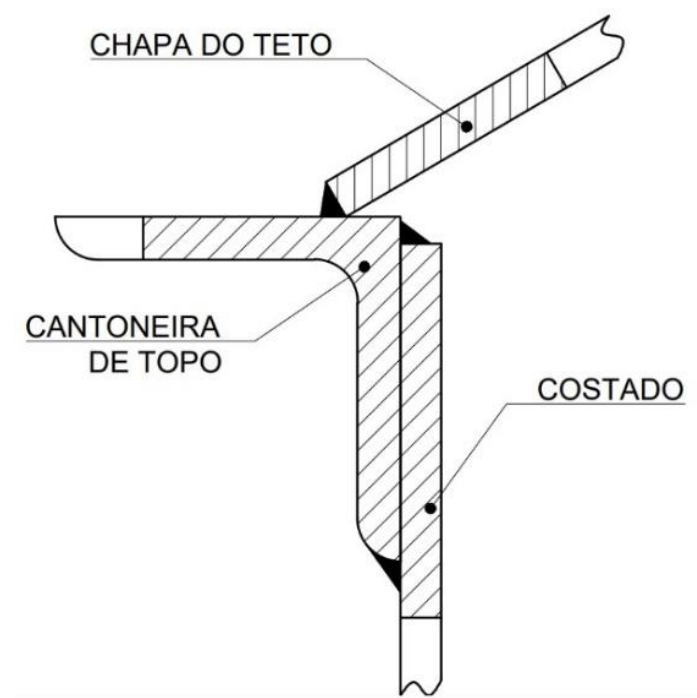
Tabela 20 - Valores das combinações de cargas.

Dados de Projeto					
$S_b = 0$	$S_u = 0$	$F_{pe} = 0,9$	$L_r = 0,9807\text{ kPa}$	$P_e = 0,25\text{ kPa}$	
Cargas combinadas					
Tanque	B_1	B_2	U_1	U_2	D_L
TQ-01	1,986 kPa	1,423 kPa	1,986 kPa	1,423 kPa	0,780 kPa
TQ-02	2,426 kPa	1,863 kPa	2,426 kPa	1,863 kPa	1,220 kPa
TQ-03	1,817 kPa	1,253 kPa	1,817 kPa	1,253 kPa	0,611 kPa
Cargas Máximas					
Tanque	$Máx(B_1; B_2)$		$Máx(U_1; U_2)$		
TQ-01	1,986 kPa		1,986 kPa		
TQ-02	2,426 kPa		2,426 kPa		
TQ-03	1,817 kPa		1,817 kPa		

Fonte: própria autora, (2024).

A Equação (6) defini qual deve ser a mínima área (A_{min}) que a ligação teto-costado necessita satisfazer. O detalhe b será utilizado nos três tanques, além disso, a área do detalhe b (A_b) será calculado conforme anexo F da API 650 (2020) e corresponde a área rachurada da Figura 28.

Figura 28 – Área considerada na ligação teto-costado para o detalhe b.



Fonte: Adaptado da norma API STD 650, (2020).

4.3.4 Projeto do fundo

O projeto de fundo seguirá as diretrizes da norma PETROBRAS N-270 (2020), desse modo tanques com diâmetro acima de 15 m devem ter obrigatoriamente chapa anular que para a norma devem ser do mesmo material do primeiro anel do costado. Assim, os tanques TQ-01 e TQ-02 terão chapas anulares; além disso o material será ASTM A36 e largura mínima de 750 mm.

Apesar da norma PETROBRAS N-270 indicar declividade para a periferia conforme apresentado na Tabela 8, aqui será utilizado declividade para o centro o que nos leva a definir as espessuras das chapas anulares mediante consulta da Tabela 7 e para as chapas de fundo Tabela 6. Assim, as dimensões finais estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Dimensões das chapas anulares e de fundo.

Tanque	Chapa anular		Chapa de fundo	
	Espessura	Largura	Espessura	Largura
TQ-01	9,50 mm	750 mm	6,35 mm	1.800 mm
TQ-02	8,0 mm	750 mm	6,35 mm	1.800 mm
TQ-03	-	-	6,35 mm	1.800 mm

Fonte: própria autora, (2024).

Embora não seja o objetivo deste trabalho, faz-se necessário adicionar condições de montagem, visto que, isto influenciará no peso final do fundo. Desse modo, as sobreposições das chapas de fundo e anulares estão discretizadas na Tabela 22 conforme norma PETROBRAS N-270 (2020).

Tabela 22 – Sobreposições mínimas.

Tanque	Sobreposição Chapa de fundo Mínima	Sobreposição Chapa de fundo adotada	Sobreposição Chapa de fundo e anular
TQ-01	31,75 mm	35,00 mm	60 mm
TQ-02	31,75 mm	35,00 mm	60 mm
TQ-03	31,75 mm	35,00 mm	-

Fonte: própria autora, (2024).

Para o cálculo do peso do fundo será considerado a área que necessita ser coberta pelas chapas de fundo com declividade de 1:20 e a área utilizadas pelas

chapas anulares. O valor de sobreposição já é adicionado ao cálculo da área das chapas anulares, porém como para as chapas de fundo faria-se necessário um estudo de configuração das chapas; iremos considerar que as sobreposições geram um aumento de 2% em seu peso total. A Tabela 23 apresenta os valores para cada situação.

Tabela 23 – Peso das chapas concernentes ao fundo.

Tanques	Peso das chapas de fundo	Peso das chapas anulares	Peso total do fundo
TQ-01	18.758,43 kg	3.917,17 kg	22.675,60 kg
TQ-02	43.843,03 kg	4.993,73 kg	48.836,77 kg
TQ-03	5.352,28 kg	-	5.352,28 kg

Fonte: própria autora, (2024).

Além disso, conforme API 650 (2020) a projeção externa da chapa de fundo ou anular a partir da face externa do costado será de 50 mm.

4.4 CARGAS DE VENTO CONFORME NBR 6123 E API 650

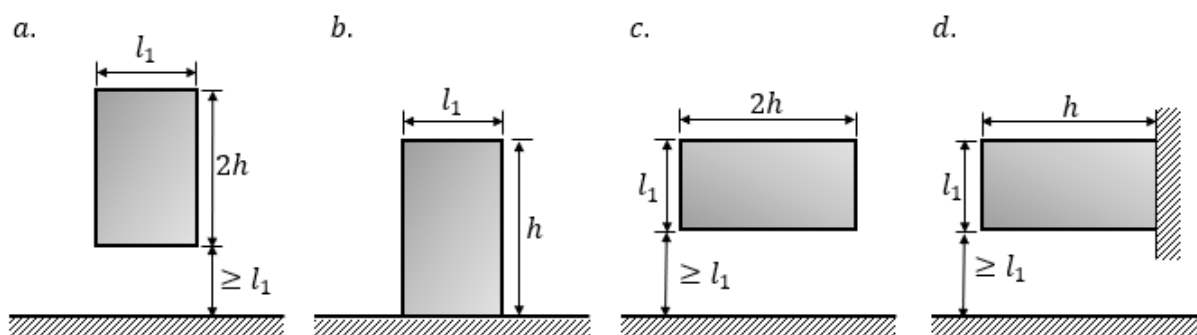
4.4.1 Força de Arrasto

A força de arrasto é calculada conforme Equação (15), desse modo, precisamos determinar quem são os fatores: coeficiente de arrasto (C_a), pressão dinâmica (q) e a área de projeção ortogonal (A_e).

a) Coeficiente de arrasto

Para se utilizar o coeficiente de arrasto (C_a) da NBR 6123, o corpo em questão deve ter sua seção constante ou com pouca variação. Além disso, dois termos são utilizados para a análise: h e l_1 . Tais termos dependem da posição que o corpo está alocado, como apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Vista da ação perpendicular do vento ao plano da figura.



Fonte: Adaptado de NBR 6123, (1988).

Para tanques de combustíveis cilíndricos verticais, o modelo a ser adotado é o representado na Figura 29.b; onde l_1 representa o diâmetro externo e h a altura do tanque. Estes parâmetros são importantes, visto que, serão utilizados para a determinação de C_a com base na Tabela 24. Contudo, além disso, é necessário o cálculo do número de *Reynolds* aferido pela Equação (26).

$$R_e = 70000V_k l_1 \quad (26)$$

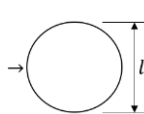
Onde:

V_k : Velocidade característica do vento, m/s;

l_1 : Dimensão de referência - Figura 29.b, m.

A norma apresenta uma tabela com várias vistas em plantas, a seção que será utilizada como base de cálculo é a cilíndrica lisa, que apresenta valores e relações como indicado na Tabela 24 e será aplicada na análise em estudo.

Tabela 24 – Tabela de determinação do coeficiente de arrasto.

Vista em Planta		$R_e^{(A)} \times 10^{-5}$	h/l_1						
			1/2	1	2	5	10	20	∞
	Liso (Metal, concreto, alvenaria rebocada)	$\leq 3,5$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
		$\geq 4,2$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	Com rugosidade ou saliência = $0,02l_1$	Todos os valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
	Com rugosidade ou saliência = $0,08l_1$	Todos os valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4

Fonte: NBR 6123, (1988)

b) Velocidade Característica do vento

Para o cálculo da velocidade característica faz-se necessário determinar os fatores que influência em sua magnitude. Desse modo, temos:

i. S_1 : Fator topográfico:

Como tanques de armazenamento cilíndricos verticais são montados em fundações tipicamente planas, o fator S_1 para terrenos planos ou levemente acidentados é de $S_1 = 1,0$.

ii. S_2 : Fator de rugosidade

A categoria do terreno utilizada foi a III, visto que, terminais de armazenamento geralmente são construídos em regiões muito aberta. Além disso, a edificação também é categorizada em classes que dependem, em nosso caso, de diâmetro e altura; que para todos os estudos de caso configura-se a classe B. Para cada 5 m da altura do tanque, um fator S_2 será utilizado, como apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Fator de rugosidade S_2 para TQ-01, TQ-02 e TQ-03.

Altura [m]	5	10	15	20	22,5
Fator S_2	0,86	0,92	0,96	0,99	1,03

Fonte: NBR 6123, (1988).

iii. S_3 : Fator estatístico

Como tanques de armazenamento para combustíveis geralmente são construídos em zonas de baixa ocupação e os colaboradores presentes o número não é significativo, o fator estatístico pertence ao grupo 3 e equivale a $S_3 = 0,95$.

c) Área da projeção ortogonal

Mediante as alturas consideradas pelo fator S_2 , a ação do vento terá uma força atuante no ponto ortogonal desta altura – como esquematizado na Figura 14 – e utilizando a Equação (27) obtemos as áreas das projeções ortogonais.

$$A_e = (H_n/2)D_e \quad \text{Equação (27)}$$

4.4.2 Verificação de deslizamento

A força normal mínima que age contra o fundo do tanque é o somatório da força peso das chapas de fundo, anulares, costado e teto; bem como, em razão da cantoneira de topo. Os dados dos pesos para cada tanque estão organizados na Tabela 26.

Tabela 26 – Quadro resumo dos pesos dos tanques por parte.

Tanque	Costado	Cantoneira de topo	Teto	Fundo	Peso total
TQ-01	145.573,69 kg	770,67 kg	31.510,81 kg	22.675,60 kg	200.530,77 kg
TQ-02	73.504,49 kg	1.156,55 kg	110.924,79 kg	48.836,77 kg	234.422,60 kg
TQ-03	40.398,90 kg	170,54 kg	6.276,99 kg	5.352,28 kg	52.198,71 kg

Fonte: própria autora, (2024).

Considerando o coeficiente de atrito indicado pela API 650 (2020) de 0,4 e o peso total para cada tanque, temos que a força de atrito total resultante (F_r) que impede o deslizamento dos tanques é verificada pelo produto da força normal e o coeficiente de atrito. Para que o tanque não deslize a condição deve ser satisfeita: *Força de atrito resultante (F_r) $\geq$ Força de arrasto (F_a).*

4.4.3 Momento em razão da carga de vento

Para o cálculo do momento vertical e momento horizontal nos tanques foram utilizadas as Equações (18) e (19) tendo seus resultados apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Momentos horizontais e verticais em razão a carga de vento.

Tanque	Momento vertical - M_v	Momento horizontal - M_{ws}	Momento combinado $M_w = M_{ws} + M_v$
TQ-01	2.267.840,60 N.m	1.374.845,27 N.m	3.642.685,87 N.m
TQ-02	7.643.291,53 N.m	350.981,84 N.m	7.994.273,37 N.m
TQ-03	283.480,07 N.m	687.422,64 N.m	970.902,71 N.m

Fonte: própria autora, (2024).

4.4.4 Verificação de tombamento

Para tanque de teto domo autoportante a norma API 650 (2020) definiu que 3 condições devem ser satisfeitas para definir se o tanque necessitará de chumbadores ou não como se segue.

Condição 1:

$$0.6M_w + M_{pi} < (M_{DL}/1.5) + M_{DLR} \quad (28)$$

Condição 2:

$$M_w + F_p M_{pi} < [(M_{DL} + M_F)/2] + M_{DLR} \quad (29)$$

Condição 3:

$$M_{ws} + F_p M_{pi} < (M_{DL}/1.5) + M_{DLR} \quad (30)$$

Onde:

F_p : Fator de combinação de pressão;

M_{pi} : Momento na união costado – fundo da pressão interna de projeto;

M_w : Momento de tombamento na união costado – fundo da pressão horizontal mais a vertical da carga de vento;

M_{DL} : Momento na união costado – fundo do peso nominal do costado e estruturas do teto suportada pelo costado;

M_F : Momento na união costado – fundo do peso do líquido;

M_{DLR} : Momento na união costado – fundo do peso das chapas de teto mais qualquer estrutura fixada;

M_{ws} : Momento na união costado – fundo da pressão horizontal da carga de vento;

Os valores calculados para cada parâmetro das Equações (28), (29) e (30) e para cada tanque em estudo estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Valores dos parâmetros calculados para análise de tombamento.

Parâmetro	TQ-01	TQ-02	TQ-03
F_p	0,8	0,8	0,8
F_{pi}	149.574,34 N	336.855,79 N	37.393,59 N
M_{pi}	1.713.000,14 N.m	5.789.456,26 N.m	214.125,02 N.m
M_{DL}	16.441.646,36 N.m	12.588.001,76 N.m	2.278.968,47 N.m
M_F	29.899.638,85 N.m	43.800.532,54 N.m	3.737.454,86 N.m
M_{DLR}	3.540.207,69 N.m	18.702.144,07 N.m	352.606,83 N.m

Fonte: própria autora, (2024).

4.5 LEVANTAMENTO DE DADOS DE SISMO NO BRASIL

Para a avaliação de um evento sísmico faz-se necessária a escolha do melhor caminho de interpretação, visto que, na sismologia podemos qualificar ou quantificar um sismo. A magnitude de um sismo refere-se a sua quantificação, pois corresponde a energia liberada no evento sísmico (NETO, 2021); por outro lado, a intensidade corresponde a qualificação do evento, já que, traduz o nível de impacto que o tremor causa, portanto, sendo de avaliação subjetiva (ALVES, 2020).

Para o levantamento dos registros dos sismos no Brasil foram considerados trabalhos que forneciam informações em Escala de Magnitude de Ondas de Corpo (m_b). Esta magnitude foi utilizada já que é uma alternativa a estaca Richter, pois o cálculo da magnitude independe do sismógrafo e trabalha com amplitude máximas normalizadas (ALVES, 2020).

Tabela 29 – Levantamento histórico dos abalos sísmicos no Brasil $\geq 5,0 m_b$.

Local	Estado	Ano de ocorrência	Magnitude	Fonte
Passa Tempo	Minas Gerais	1922	5,1 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Tubarão	Santa Catarina	1938	5,5 m_b	NETO, F. M. A. (2021)
Oiapoque	Amapá	1949	5,0 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Serra do Tombador	Mato Grosso	1955	6,2 m_b	NÓBREGA, P.G.B. & NÓBREGA, S. H. S. (2016)
Porto dos Gaúchos	Mato Grosso	1955	6,2 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Vitória	Espírito Santo	1955	6,1 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Manuas	Amazonas	1963	5,1 m_b	NETO, F. M. A. (2021)
Pacajus	Ceará	1980	5,2 m_b	NETO, F. M. A. (2021)
Cadajás	Amazonas	1983	5,5 m_b	NETO, F. M. A. (2021)
Feijó	Acre	1983	5,8 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
João Câmara	Rio Grande do Norte	1986	5,1 m_b	NETO, F. M. A. (2021)
Ipixuma	Amazonas	1986	5,9 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Tarauacá	Acre	1989	6,4 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Feijó	Acre	1990	5,3 m_b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA,

				G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Atalaia do Norte	Amazonas	1997	5,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Feijó	Acre	1997	5,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Tarauacá	Acre	1998	5,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Atalaia do Norte	Amazonas	2002	5,5 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Floresta Amazônica	Amazonas	2003	7,1 m _b	NÓBREGA, P.G.B. & NÓBREGA, S. H. S. (2016)
Ipixuma	Amazonas	2003	5,1 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Porto do Gaúchos	Mato Grosso	2005	5,0 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Itacarambi	Minas Gerais	2007	4,9 m _b	NÓBREGA, P.G.B.; NÓBREGA, S. H. S. (2016)
Tarauacá	Acre	2007	6,1 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Tarauacá	Acre	2009	5,6 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
125 km de Cruzeiro do Sul	Acre	2010	6,5 mb	NETO, F. M. A. (2021)
Mara Rosa	Goiás	2010	5,0 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Macau	Rio Grande do Norte	2012	5,3 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Porto do Gaúcho	Mato Grosso	2012	5,2 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
São Caitano	Pernambuco	2012	5,0 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Jordão	Acre	2013	5,0 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Cruzeiro do Sul	Acre	2014	5,1 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Atalaia do Norte	Amazonas	2014	5,0 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Macapá	Amapá	2014	5,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Feijó	Acre	2015	>7,0 m _b	NÓBREGA, P.G.B. & NÓBREGA, S. H. S. (2016)
Feijó	Acre	2015	6,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)
Amaturá	Amazonas	2015	5,4 m _b	PREVE, W. S.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. (2017)

Fonte: própria autora, (2024).

4.6 CONDIÇÃO SÍSMICA

4.6.1 Validação da necessidade de análise sísmica

De acordo com Quintero (2017) existe diferença entre os conceitos de espectro de resposta e espectro de resposta de projeto, aquele trata-se da resposta máxima para um sismo particular; enquanto este consiste em uma envoltória de espectros. Portanto, espectro fornecido pela norma NBR 15421 (2023) consiste em um espectro de resposta de projeto. Portanto, o espectro de resposta do presente estudo seguirá as definições indicadas.

Para a API STD 650 (2020), no anexo E, as condições de sismicidade em tanques de armazenamento não devem ser considerada quando o fator S_1 for menor ou igual a 0,04 (para T de 1,0s) e o fator S_s menor ou igual a 0,15 (para um T de 0,2s) ou a aceleração horizontal local for menor ou igual a 0,05g.

Pela norma API STD 650 (2020), para localidades fora dos Estados Unidos onde a região possua informações sobre suas acelerações horizontais chamada pela norma de S_p , os fatores S_1 e S_s podem ser calculados conforme o conjunto de Equações (31) e (32).

$$S_1 = 1,25S_p \quad (31)$$

$$S_s = 2,5S_p \quad (32)$$

O termo S_p corresponde a a_g da NBR 15421 (2023) que pode ser determinada a partir do mapa da Figura 14 ou pela Tabela 9. Para nossa região de estudo, o Acre encontra-se no zoneamento sísmico 4 com $a_g = 0,15g$, zona mais crítica do Brasil. Desse modo, é possível quantificar os espectros e determinar a necessidade ou não de estudo sísmico.

4.6.2 Massa efetiva de cada componente

A porção do produto contido pelo tanque que se comportará como componente impulsiva (W_i) pode ser calculado conforme Equações (33) ou (34) a depender da taxa D/H , todavia para a componente convectiva (W_c), independente da taxa, a Equação (35); ambas dependendo do peso total do produto contido (W_p).

$$D/H \geq 1,333 \rightarrow W_i = \frac{\tanh\left(0,866\frac{D}{H}\right)}{0,866\frac{D}{H}} W_p \quad (33)$$

$$D/H < 1,333 \rightarrow W_i = \left[1,0 - 0,218\frac{D}{H}\right] W_p \quad (34)$$

$$W_c = 0,230\frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3,67H}{D}\right) W_p \quad (35)$$

4.6.3 Centro de massa das componentes

O centro de massa de cada componente a partir do fundo do tanque são dadas pelas Equações (36) e (37) para componente impulsiva e Equação (38) para a componente convectiva.

$$D/H \geq 1,333 \rightarrow X_i = 0,375H \quad (36)$$

$$D/H < 1,333 \rightarrow X_i = \left(\frac{1}{2} - 0,094\frac{D}{H}\right) H \quad (37)$$

$$X_c = \left[1,0 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67H}{D}\right) - 1}{\frac{3,67H}{D} \sinh\left(\frac{3,67H}{D}\right)}\right] H \quad (38)$$

4.6.4 Período natural da componente convectiva

O primeiro período natural em segundos da movimentação das ondas na zona superficial do fluido é dado pela Equação (39) e o coeficiente do período de onda (K_s) pela Equação (40) conforme API 650 (2020).

$$T_c = 1,8K_s\sqrt{D} \quad (39)$$

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68H}{D}\right)}} \quad (40)$$

4.6.5 Coeficientes de aceleração espectral (A_i e A_c)

Para localidades fora dos Estados Unidos onde as acelerações horizontais que apresentam tempo de retorno de 475 anos com amortecimento de 5%, os coeficientes podem ser determinados pelas Equações (41) e (42).

De acordo com Rodrigues *et. al.* (2019) um tempo de retorno de 475 anos corresponde a condição probabilística de um sismo de projeto exceder em 10% seu valor em 50 anos.

$$\begin{aligned} \text{Para,} \quad A_i &= S_{DS} \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \geq 0,007 \\ \text{Se } S_1 &\geq 0,6, \quad A_i \geq 0,5S_1 \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \end{aligned} \quad (41)$$

$$A_c \begin{cases} T_C \leq T_L, K S_{D1} \left(\frac{1}{T_C} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \\ T_C > T_L, K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_C^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \end{cases} \quad (42)$$

Os valores dos parâmetros das equações são calculados e definidos conforme apresentado na Tabela 30 mediante API STD 650 (2020).

Tabela 30 – Dados dos parâmetros das Equações (41) e (42).

Parâmetro	Descrição	Valor
Q	Para regiões que não utilizam a ASCE 7	1,0
I	Tanque para SUG I	1,0
R_{wi}	Tanque não acorado	3,5
R_{wc}	Tanque não acorado	2,0
F_a	Para $S_s \geq 1,25$ e classe de terreno B	1,0
F_v	Para $S_1 \geq 0,5$ e classe de terreno B	1,0
T_L	Para regiões não definidas pela norma ASCE 7	4 s
K	Coeficiente para ajuste de aceleração espectral	1,5
S_{DS}	$Q F_a S_s$	3,68
S_{DS1}	$Q F_v S_1$	1,84

Fonte: própria autora, (2024).

4.6.6 Momento de tombamento sísmico

A Equação (43) corresponde ao momento da contribuição de cada componente que em razão do sismo a partir do centro de ação de cada força.

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_iX_i + W_sX_s + W_rX_r)]^2 + [A_c(W_cX_c)]^2} \quad (43)$$

Onde:

W_i : Peso da componente impulsiva;

W_c : Peso da componente convectiva;

W_s : Peso do costado e bocais;

W_r : Peso total do teto incluindo estrutura e qualquer outro objeto presente fixo;

X_i : Centro de ação de força da componente impulsiva ao fundo do tanque;

X_r : Distância do centro de gravidade do teto e conexões ao fundo do tanque;

X_s : Distância do centro de gravidade do costado ao fundo do tanque;

X_c : Centro de ação de força da componente convectiva ao fundo do tanque;

A_i : Coeficiente de aceleração espectral impulsiva;

A_c : Coeficiente de aceleração espectral convectiva;

4.6.7 Resistência ao tombamento

Conforme a norma API STD 650 (2020) o tanque para não ser ancorado deve satisfazer cinco condições:

- a. Condição 1: A taxa de ancoragem (J) é satisfeita;
- b. Condição 2: A máxima largura da zona circunferencial determinada pela força de resistência (w_a) é 3,5% do diâmetro do tanque;
- c. Condição 3: A tensão de compressão definida pela norma na seção E.6.2.2 é satisfeita;
- d. Condição 4: A espessura da chapa da zona circunferencial não excede a espessura da chapa do costado que se liga ao fundo;
- e. Condição 5: Requisitos de flexibilidade das tubulações são satisfeitas.

Para a condição 1 ser verificada é necessário que antes a força de resistência (w_a) seja identificada conforme Equação (44). Caso a condição presente na Equação (44) não seja satisfeita o valor de L deve ser substituído por $0,035D$ (3,5% de D).

No entanto, caso a condição da Equação (44) seja satisfeita e o valor da largura da chapa anular seja menor do que L_{min} conforme Equação (46), um novo valor de w_a deve ser calculado de acordo com a Equação (45).

$$w_a = 99t_a\sqrt{F_yHG_e} \leq 201,1HDG_e \quad (44)$$

$$w_a = 5742HG_eL_s \quad (45)$$

$$L_{min} = 0,01723t_a\sqrt{F_y/HG_e} \quad (46)$$

Onde:

t_a : Espessura da chapa do fundo ou anular em contado com o costado sem sobre corrosão, mm;

F_y : Tensão de escoamento da chapa em contado com o costado, MPa;

H : Máxima altura de líquido, m;

D : Diâmetro do tanque, m;

G_e : Efetiva gravidade específica incluindo efeito sísmico vertical, $G(1 - 0,4AA_v)$;

A partir da força de resistência é possível calcular a taxa de ancoragem (J) pela Equação (47) que defini as condições de estabilidade do tanque.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2[w_t(1-0,4A_v) + w_a - F_p w_{int}]} \quad (47)$$

Onde:

w_t : Definido por $[(W_s/\pi D) + w_{rs}]$;

w_{rs} : Carga do teto que age sobre o costado, N.m;

w_{int} : Carga de levantamento ao torno da zona circunferencial em razão da pressão de projeto, N.m;

F_p : Taxa de combinação de pressão (pressão interna de projeto/ pressão interna de operação);

M_{rw} : Momento de tombamento do tanque em razão da sismicidade, N.m;

A_v : Aceleração vertical, m/s²;

Para a verificação da condição 3 faz-se necessário a determinação da tensão de compressão longitudinal admissível no costado pela Equação (48) e comparar com a tensão de compressão do costado em situação não ancorada conforme Equação (49).

$$F_c = \begin{cases} \frac{GHD^2}{t^2} \geq 44, & 83 \frac{t_s}{D} \\ \frac{GHD^2}{t^2} < 44, & \frac{83t_s}{2,5D} + 7,5\sqrt{GH} \end{cases} \quad (48)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} J \leq 0,785, \frac{1}{1000t_s} \left[w_t(1 + 0,4A_v) + \frac{1,273M_{rw}}{D^2} \right] \\ J > 0,785, \frac{1}{1000t_s} \left[\frac{w_t(1+0,4A_v)+w_a}{0,607-0,18667J^{2,3}} - w_a \right] \end{cases} \quad (49)$$

Onde:

$t_s = t$: Espessura do primeiro anel sem corrosão, mm;

D : Diâmetro do tanque, m;

H : Altura do nível de produto, m;

M_{rw} : Momento de tombamento, N.m;

w_a : Força de resistência, N/m;

w_t : Carga do tanque (teto+anéis do costado) que age na base do costado, N/m;

A condição 5 não será verificada em razão de que foge em parte do projeto do tanque sendo de maior interesse em projeto de tubulação.

4.6.8 Resistência ao deslizamento

Analogamente, a verificação de deslizamento em razão da carga de vento, na condição sísmica, é verificada a força lateral cisalhante (V_s) causada pela excitação sísmica que pode gerar o deslizamento entre as interfaces do fundo e fundação em relação a força atrito resultante (F_r) gerada pelo atrito na mesma região por meio da Equação (50).

$$V_s = \mu(W_s + W_r + W_f + W_p)(1,0 - 0,4A_v) \quad (50)$$

Onde:

A_v : Aceleração sísmica vertical dada por $0,47S_{DS}$, %g;

S_{DS} : QF_aS_s , %g;

μ : Coeficiente de atrito de 0,40;

W_s : Peso total do costado e bocais, N;

W_r : Peso total do teto e estrutura e qualquer objeto fixo, N;

W_f : Peso do fundo, N;

W_p : Peso total do conteúdo do tanque, N;

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROJETO DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Inicialmente foram calculadas as espessuras dos anéis do costado pelo método básico de 1 (um) pé, sendo as espessuras comerciais adotadas conforme indicado na Tabela DWS para cada tanque de estudo. A partir da espessura foi possível calcular a contribuição em massa de cada anel e, assim definir o peso total do costado também apresenta na Tabela 31.

Tabela 31 – Espessuras final dos anéis do costado e seu respectivo peso total.

Anel	TQ-01	TQ-02	TQ-03
1	19,00 mm	12,5 mm	9,5 mm
2	16,00 mm	9,50 mm	8,00 mm
3	16,00 mm	6,35 mm	8,00 mm
4	12,7 mm	6,35 mm	6,35 mm
5	12,7 mm	-	6,35 mm
6	8,00 mm	-	4,75 mm
7	6,35 mm	-	4,75 mm
8	6,35 mm	-	4,75 mm
9	6,35 mm	-	4,75 mm
Pesos	145.573,69 kg	73.504,49 kg	40.398,90 kg

Fonte: própria autora, (2024).

Para o teto domo um fator de 0,8 foi considerado em todos os casos o que nos conduziu a permanecer dentro do limite de 13 mm da espessura das chapas de teto domo autoportante. A partir da Equação (DC) foi possível determinar a contribuição da carga do teto. As espessuras e pesos para cada caso de estudo estão descritos na Tabela 32.

Tabela 32 – Espessuras da chapa de teto e seu respectivo peso.

Tanque	Espessura adotada	Peso (kg)
TQ-01	8,00 mm	31.510,81
TQ-02	12,50 mm	110.924,79
TQ-03	6,35 mm	6.276,99

Fonte: própria autora, (2024).

A Tabela 33 apresenta os dados das cantoneiras de topo escolhidas mediante Tabela 5, bem como suas respectivas áreas. Além disso, a área gerada pela ligação teto-costado conforme Figura df indicada por *Área “detalhe b”*. Como pode ser observado a condição mínima é satisfeita e podemos permanecer com a configuração e dimensões das cantoneiras selecionadas.

Tabela 33 – Mínima área na ligação teto-costado.

Tanque	Área Mínima (A_{min})	Dimensões da cantoneira	Área “detalhe b” (A_b)	Condição: $A_b \geq A_{min}$
TQ-01	1.086,24 mm ²	3" x 3/8"	3.020,18 mm ²	Condição Satisfeita
TQ-02	2.985,55 mm ²	3" x 5/8"	4.478,67 mm ²	Condição Satisfeita
TQ-03	248,47 mm ²	2" x 1/4"	1.356,54 mm ²	Condição Satisfeita

Fonte: própria autora, (2024).

Um dado importante para as análises de cargas de vento e condições sísmica é o peso, onde a contribuição da cantoneira de topo para cada tanque está expressa na Tabela 34.

Tabela 34 – Peso total das cantoneiras de topo por tanque.

Tanque	Pesos Linear	Comprimento	Peso
TQ-01	10,71 kgf/m	71,958 m	770,67 kg
TQ-02	10,71 kgf/m	107,98 m	1.156,55 kg
TQ-03	4,74 kgf/m	35,97 m	170,54 kg

Fonte: própria autora, (2024).

O fundo do tanque como apresentado na seção 4.3.4 do presente trabalho segue uma sequência de condições quanto a espessura, largura e projeções mínimas conforme as normas PETROBRAS N-270 (2020) e API STD 650 (2020) que definem as características do projeto do fundo. Desse modo, a Tabela 35 corresponde a um quadro resumo das condições finais de projeto do fundo.

Tabela 35 – Quadro resumo do projeto das chapas que configura o fundo do tanque.

Dimensão e condição de montagem finais						
Tanque	Chapa anular		Chapa de fundo		Chapa de fundo ¹	Chapa de fundo e anular ²
	Espessura	Largura	Espessura	Largura		
TQ-01	9,50 mm	750 mm	6,35 mm	1.800 mm	35,00 mm	60 mm
TQ-02	8,0 mm	750 mm	6,35 mm	1.800 mm	35,00 mm	60 mm
TQ-03	-	-	6,35 mm	1.800 mm	35,00 mm	-
Peso Total ³						
TQ-01: 22.675,60 kg		TQ-02: 48.836,77 kg		TQ-03: 5.352,28 kg		

NOTA 1 Sobreposição de chapas de fundo.

NOTA 2 Sobreposição das chapas de fundo e anular.

NOTA 3 O peso total inclui as chapas de fundo e anulares para os casos que esta é necessária.

Fonte: própria autora, (2024).

5.2 SISMOLOGIA DO BRASIL

Por meio da Tabela 29 os estados do Acre, Amazonas e Mato Grosso foram os que apresentaram maiores atividades sísmicas, para dados maiores ou iguais a 5,0 mb, como apresentado na Figura 30. O Acre apresentou o pico de maior quantidade de sismos o que nos levou a considerá-lo como região de instalação de um tanque de armazenamento com considerações sísmicas.

Vale ressaltar que o presente trabalho selecionou publicações que informavam as magnitudes e seus respectivos locais e anos, além de apresentarem uma Magnitude de Ondas de Corpo de no mínimo 5,0 mb o que resultou em 36 resultados.

Miranda *et al.* (2018) em seu levantamento considerando a escala *Richter*, verificou que os estados que apresentavam magnitude maior ou igual a 5,0 graus com no mínimo 1 ocorrência foram os estados do Acre, Amazonas, Mato grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Espírito Santo, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Onde, o Acre foi o estado que apresentou a maior ocorrência de sismo.

Tabela 36 – Forças horizontais de vento ortogonais à parede do tanque.

Parâmetros					
Altura [m]	Ponto médio [m]	V_k [m/s]	q [N/m ²]	A_e [m ²]	F_{ws} [N]
5	2,5	24,51	368,25	114,71	211.122,11
10	7,5	26,22	421,43	114,71	24.172,19
15	12,5	27,36	458,87	114,71	26.319,82
20	17,50	28,22	488,00	114,71	27.990,51
22,5	21,25	29,36	528,23	57,35	15.149,03
Força de arrasto final – TQ-01					114.753,66
5	2,5	24,51	368,25	171,99	31.668,44
10	7,5	26,22	421,43	171,99	36.241,43
Força de arrasto final – TQ-02					67.909,87
5	2,5	24,51	368,25	57,35	10.561,06
10	7,5	26,22	421,43	57,35	12.086,10
15	12,5	27,36	458,87	57,35	13.159,91
20	17,50	28,22	488,00	57,35	13.995,25
22,5	21,25	29,36	528,23	28,67	7.574,52
Força de arrasto final – TQ-03					57.376,83

Fonte: própria autora, (2024).

Uma observação importante é que apesar dos tanques TQ-01 e TQ-03 terem a mesma altura na força de arrasto devido ao vento, o TQ-03 teve uma ação menor. Isto ocorre em razão da área de projeção ortogonal que para o TQ-03 é menor em razão de ter um diâmetro 50% menor.

A partir da força de arrasto devido ao vento e da força de atrito gerada entre fundo e fundação a condição de deslizamento é verificada conforme Tabela 37.

Tabela 37 – Verificação de deslizamento.

Tanque	Força de Arrasto, devido ao vento - (F_a)	Força de Atrito, resultante - (F_r)	Verificação da condição $F_r \geq F_a$
TQ-01	114.753,66 N	786.882,73 N	Satisfeita, Tanque não desliza
TQ-02	67.909,87 N	919.874,28 N	Satisfeita, Tanque não desliza
TQ-03	57.376,83 N	204.827,72 N	Satisfeita, Tanque não desliza

Fonte: própria autora, (2024).

As forças de atrito diferentemente da força de arrasto devido ao vento, matém-se proporcionais, no entanto isto ocorrem em razão do peso particular de cada tanque

que gera a força normal. Apesar do tanque TQ-02 ter menor altura e menos anéis, a quantidade de chapa por anel é maior em razão do tamanho do seu diâmetro, bem como a quantidade de chapas para seu teto e da cantoneira de topo maior o que contribui para ter uma força de atrito suficiente para que não deslize.

Já para o caso do tombamento do tanque, os momentos verticais e horizontais das forças atuantes no tanque foram calculados conforme apresentado na seção 4.4.4; para, então serem verificadas as condições de tombamento. Um quadro resumo dos valores calculados e as condições para cada tanque estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Verificação de tombamento.

Tanque	Condição 1	Condição 2	Condição 3
TQ-01	3.898.611,66 < 14.501.305,26 Condição satisfeita	5.013.085,98 < 26.710.850,29 Condição satisfeita	2.745.245,38 < 14.501.305,26 Condição satisfeita
TQ-02	10.586.020,28 < 27.094.145,24 Condição satisfeita	12.625.838,38 < 46.896.411,22 Condição satisfeita	4.982.546,84 < 27.094.145,24 Condição satisfeita
TQ-03	796.666,64 < 1.871.919,14 Condição satisfeita	1.142.202,72 < 3.360.818,49 Condição satisfeita	858.722,65 < 1.871.919,14 Condição satisfeita

Fonte: própria autora, (2024).

Conforme apresentado na Tabela 38 todas as condições foram satisfeitas, desse modo temos que os tanques são estáveis a condição de vento e pressão interna.

5.4 CARGA SÍSMICA

Para a norma API 650 (2020), a região onde deseja-se montar um tanque de armazenamento não deve ter aceleração do espectro de resposta (S_1) no período de 1 segundo menor que 0,04 e aceleração do espectro de resposta (S_s) no período de 0,2 s menor ou igual a 0,15, ambos com amortecimento de 5%; Bem como a aceleração horizontal local menor que 0,49 m/s². Portanto, caso estes requisitos sejam satisfeitos não se faz necessário a análise sísmica.

Todavia, para o Acre que está presente na zona 4 conforme norma NBR 15421 (2023) a aceleração horizontal é de 0,15g e através do espectro de resposta indicado

pela norma API STD 650 (2020) para regiões que possuem informações de suas acelerações horizontais temos que conforme Tabela 39 a avaliação sísmica faz-se necessário.

Tabela 39 – Validação da necessidade de prosseguimento de estudo sísmico.

Valores dos fatores		
S_1	a_{g0}	S_s
$1,84 \text{ m}^2$	$1,47 \text{ m}^2$	$3,68 \text{ m}^2$
Validação		
$[(S_1 \leq 0,04) \wedge (S_s \leq 0,15)] \vee a_g \leq 0,05g$		
Condição lógica válida: Necessita avaliação sísmica		

Fonte: própria autora, (2024).

Tal análise será necessária para os três tanques de estudo, uma vez que, esta avaliação independe das condições dimensionais do tanque, mas apenas das questões sísmicas locais.

Desse modo, foi investigado a partir de que zona ou aceleração não seria necessária a análise sísmica; onde, observou-se que a partir de $a_g = 0,05g$ que corresponde a máxima aceleração da zona 1, os tanques não necessitam de análise sísmica em seu projeto.

Portanto, tanques presentes a partir da zona 2 devem levar em consideração o estudo de sismicidade.

Logo, para a nossa região de estudo e considerando cada taxa de aspecto dos tanques, temos que o período natural da componente convectiva (T_c), a contribuição de cada componente (impulsiva e convectiva), seu respectivo centro de massa (X_i e X_c), bem como o coeficiente de aceleração espectral (A_i e A_c) estão informados na Tabela 40.

Tabela 40 – Característica de cada componente do produto na condição sísmica.

Tanque	T_c (s)	Componente em massa (kg)		Centro de Massa (m)		A_i	A_c
		Impulsiva (w_i)	Convectiva (w_c)	Impulsiva (X_i)	Convectiva (X_c)		
TQ-01	4,985	7.223.912,13	2.172.917,23	9,09	16,58	0,26	0,22
TQ-02	6,866	3.102.437,23	5.790.702,72	3,75	5,43	0,26	0,12
TQ-03	3,522	2.063.804,55	272.018,51	10,17	19,38	0,26	0,26

Fonte: própria autora, (2024).

Desse modo, a partir da contribuição de cada componente é possível verificar o momento de tombamento do tanque considerando as ações das forças convectiva e impulsiva em seus respectivos centros de massa, bem como pela ação do próprio peso do tanque.

Todavia, a estabilidade do tanque é verificada através da taxa de ancoragem (J) que descarta as condições que tornam o tanque estável ou não. Os momentos e as taxas de ancoragem para os tanques do presente estudo calculados estão apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Momento gerado no tanque pela excitação sísmica.

Tanque	Zona de estudo (Zona 4, $a_g = 0,15g$)		Zona de estabilidade (Zona 1, $a_g \leq 0,05g$)
	Momento (M_{rw})	J	Novo Momento (M_{rw})
TQ-01	191.458.808,40 <i>N.m</i>	8,100	63.819.602,80 <i>N.m</i>
TQ-02	49.825.314,34 <i>N.m</i>	1,707	16.608.438,11 <i>N.m</i>
TQ-03	57.141.897,19 <i>N.m</i>	14,851	19.047.299,06 <i>N.m</i>

Fonte: própria autora, (2024).

A API STD 650 (2020) definiu os critérios de estabilidade do tanque a partir da taxa de ancoragem conforme apresentado na Tabela 42. A partir de tal consideração, temos que nenhum dos nossos estudos de caso, mediante Tabela 41 no zoneamento 4 onde o Acre encontra-se, permanece estável sem a necessidade de chumbadores.

Um ponto observado é que os espectros de resposta em razão apenas da aceleração horizontal têm grande influência sobre os coeficientes de aceleração espectral que são utilizados no cálculo do momento.

Todavia, conforme indicado na Tabela 41, a partir da máxima aceleração da zona 1, os tanques não necessitam de chumbadores, uma vez que, apresentam uma aceleração menor igual a 0,05g conforme condição de verificação de mínima aceleração estabelecida pela API STD 650 (2020) para avaliação sísmica.

O efeito da mudança de zona é perceptível nos novos valores de momento em que houve uma redução de 67% em relação a zona 4 em todos os tanques de estudo.

Tabela 42 – Condição de ancoragem.

Taxa de ancoragem (J)	CrITÉRIOS
$J \leq 0,785$	Não há levantamento - Tanque não é ancorado.
$0,785 < J \leq 1,54$	O tanque sofre levantamento, porém torna-se estável se as condições de força compressiva do costado são satisfeitas.
$J > 1,54$	i. O tanque não é estável e por suas próprias cargas não pode ser estável. ii. Modificar largura da chapa anular para $0,035D$ – verificar se o tanque mantém estabilidade. iii. Condição ii não satisfeita, adicionar chumbadores ao tanque.

Fonte: APIS STD 650, (2020.)

Outra verificação importante é a de deslizamento que também influencia na estabilidade do tanque. A partir da força deslizante (V_s) gerada pela condição sísmica a condição de deslizamento é verificada como indicado na Tabela 43.

Tabela 43 – Verificação de deslizamento em razão da excitação sísmica.

Tanque	Força lateral deslizante - (V_s)	Força de Atrito, resultante - (F_r)	Verificação da condição $F_r \geq V_s$
TQ-01	11.480.683,60 N	91.887.686,02 N	Satisfeita, Tanque não desliza
TQ-02	11.521.697,52 N	92.020.677,57 N	Satisfeita, Tanque não desliza
TQ-03	2.872.671,07 N	22.980.028,54 N	Satisfeita, Tanque não desliza

Fonte: própria autora, (2024).

Os dados revelam que a força de atrito é muito superior àquela gerada pela excitação sísmica, logo os tanques não sofrerão deslizamento. Vale ressaltar que a força de atrito resultante (F_r) no efeito sísmico levou em consideração o peso do conteúdo, fato não aplicado na condição de carga de vento.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como o presente trabalho buscou a verificação dos efeitos sísmicos em tanques de armazenamento nas condições do Brasil utilizando como exemplo três tanques tipicamente projetados sem considerar na espessura do seu costado dimensionamento sísmico, bem como sendo submetidos unicamente a zona 4 e utilizando-se do espectro de resposta definido no Anexo E da API STD 650 (2020) para condições fora dos Estados Unidos; temos como uma proposta de maior investigação sobre o tema os seguintes estudos:

- a) A avaliação do impacto da excitação sísmica no cálculo da espessura do costado;
- b) Estabilidade das zonas 2 e 3;
- c) Melhor entendimento do espectro de resposta do Brasil.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou avaliar a necessidade ou não da consideração sísmica em projetos de tanques de armazenamento por partes dos engenheiros projetistas no Brasil, diante do senso comum de que o Brasil é livre de situações sísmicas relevantes que tenham a capacidade de gerar efeitos negativos em estruturas.

Contudo, através de um levantamento bibliográfico, os registros históricos sísmológicos no Brasil mostraram-se relevante com magnitude $m_b \geq 5,0$. Além disso, no presente ano a norma brasileira ABNT NBR 15421 foi atualizada, mostrando uma mudança significativa para o estado do Mato Grosso que antes, região considerada na zona 0, agora definida por zona 2.

Assim, três tanques foram projetados através das normas PETROBRAS N-270 (2020) e API STD 650 (2020) para serem montados no estado do Acre, estado que apresentou maior índice de sismos nos registros do Brasil, e utilizando-se destes tanques todos foram submetidas as solicitações sísmicas para averiguar a condição de estabilidade por meio do Anexo E da norma API STD 650 (2020). Para isto, as equações e dado foram aplicados no programa Excel que foi utilizado como nossa ferramenta de cálculo.

Constatou-se que, primeiramente as solicitações sísmicas mostram-se relevantes para as zonas 2, 3 e 4 do Brasil conforme ABNT NBR 15421 (2023), o que implica que para os estados do Acre, parte do Amazonas, Mato Grosso e Rondônia, ou porventura, qualquer outro estado que apresente futuramente aceleração horizontal maior que 0,05g as cargas sísmicas em projetos de tanques de armazenamento atmosférico nestes locais devem ser avaliadas.

Assim, diante das condições operacionais e construtiva dos tanques de estudo, nenhum apresentou estabilidade; ou seja, todos devem ser mecanicamente ancorados diante dos critérios da API STD 650 (2020). Desse modo, o presente trabalho aponta que as cargas sísmicas não devem ser ignoradas no projeto de tanques e devem ser acrescentadas a norma ABNT NBR 7821 (1983); estando esta atualmente em revisão.

REFERÊNCIAS

- ALVES, F. V. **Estudo de sismicidade do Brasil para revisão da ABNT NBR 15421**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2020.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STD 650**: Welded Tanks for Oil Storage. Massachusetts: API, 2020.
- APOLONIO NETO, F. M., **Mapeamento das acelerações sísmicas no estado do ceará**, 2021, 113 f., Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes a sismos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7821**: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- BARROS, S. M. **Tanques de armazenamento**. PETROBRAS, Recursos Humanos, Universidade Petrobrás, Rio de Janeiro, 2010. ISBN 85-85227-17-6.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10 ed, Porto Alegre, AMGH Editora Ltda, 2016. ISBN 978-85-8055-554-7.
- CARLESSO, A. L.; BOZETTI, C. S.; MUNIZ, R. P. G. C. **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**. 2018. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdades Integradas de Aracruz, Aracruz, 2018.

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA. **PETROBRAS N-270**: Projeto de armazenamento atmosférico. CONTEC, 2020.

LOREDO-SOUZA, A. M.; PFEIL, M. S.; NASCIMENTO, E. L.; RIERA, J. D.; FISH, G. F.; BECK, A. T. A climatology-based wind speed map for NBR 6123. **IBRACON de Estruturas e Materiais**. V. 6, n. 4, 2023.

MIRANDA, P. S. T.; VARUM, H. S. A.; POUCA, N. S. V. Risco sísmico no Brasil: ameaça, normalização e vulnerabilidade. **Revista Concreto & Construções**, Edição 92º, p. 78 - 86, 2018.

MYERS, P. E. **Abovereground storage tanks**, 1 ed., Estados Unidos, McGraw Hill, 1997. ISBN 0-07-044272-X.

NÓBREGA, P. G. B.; NÓBREGA, S. H. S. Perigo sísmico no Brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas. **HOLOS**, Natal – RN, v. 4, p. 162-175, 2016.

PINHO, L. R. **Projecto de tanques metálicos circulares de grandes dimensões sob acções regulamentares estáticas e sísmias: a influência de fundações elásticas**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

PREVE, W. L.; D'ESPINDULA, G. P. C.; VALDATI, J. Abalos sísmicos moderados no Brasil: um levantamento dos eventos registrados nos séculos XX e XXI e a difusão de medidas preventivas, 2017 – Campinas, **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, São Paulo, Unicamp, 2017, p. 3935 – 3937.

QUINTERO, P. M. **Análise sísmica no domínio do tempo versus no domínio a frequência para uma ponte em seção circular**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

REIS, E. D. **Critérios de projeto de estruturas de linhas aéreas de transmissão em Minas Gerais**. 2020. Dissertação (Pós-Graduação) – Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

RODRIGUES, R. A.; MAZZILI, C. E. N.; BITTENCOURT, T. N. Análise comparative das considerações normativas para dimensionamento e detalhamento sísmico de estruturas de concreto armado. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. Vol. 12, n. 5, p. 1220-1247.

SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S. Base sismológica para a zonificação sísmica da ABNT NBR 15421. **Revista Concreto & Construções**, Edição 92º, p. 72 - 77, 2018. Disponível em: http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/pdfs/revista92.pdf. Acesso em: 25 de fevereiro de 2023.

VROCHIDOU, E.; ALVANITOPOULOS, P. F.; ANDREADIS, I.; ELENAS, A.; MALLOUSI, K. Synthesis of artificial spectrum-compatible seismic accelerograms. **IOP Publishing: Measurement Science and Technology**, v. 25, n.8, 2014.

YOSHIDA, S. Earthquake Damages and Disaster Prevention of aboveground Storage Tanks. **EPI International Journal of Engineering**, v. 11, n. 2, p. 87-93, 2018.