

DISCUSSÃO SOBRE O DIMENSIONAMENTO DO “DECK” EM TANQUES DE TETO TIPO PONTÃO

Carlos Eduardo Alvares de Castro e Sousa

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

RESUMO

Tanques de teto flutuante têm sido o dispositivo de armazenamento de derivados de petróleo voláteis mais utilizado desde a sua demonstração inicial, em 1923, pela Chicago Bridge & Iron. Atualmente, existem em operação milhares de tanques deste tipo, estando alguns deles em operação há mais de 50 anos.

Este tipo de teto é particularmente interessante para tanques de grandes diâmetros onde a construção de um teto fixo é de difícil execução, tem alto custo de instalação e o volume de vapores liberados para a atmosfera é demasiadamente grande.

O objetivo deste trabalho é determinar uma forma analítica fechada capaz de auxiliar no dimensionamento do “Deck” de um teto flutuante conforme a condição de chuva prevista em norma, utilizando como critério de validação a comparação com uma análise em elementos finitos do mesmo problema.

PALAVRAS-CHAVE: Tanques, Teto Flutuante, Pontão, Placas, Grandes Deslocamentos.

ABSTRACT

“Dimensioning of a Floating Roof Tank”

Floating roof tanks have been the most used storage device for volatile petroleum derivatives since its first demonstration, in 1923, by the Chicago Bridge & Iron. Today, there are thousands of this kind of tanks, some of them being operating for more than 50 years.

This kind of roof is particularly suitable for large diameter tanks where the construction of fixed roof tanks is difficult, expensive and the volume of vapors released to the atmosphere is to high.

The objective of this work is to achieve a closed analytical form, capable of helping dimensioning the Deck of a floating roof tank by standard rain condition, using as validation criteria the comparison with a finite element analysis of the same problem.

KEYWORDS: Tanks, Floating Roof, Pontoon, Plates, Large Displacements.

ÍNDICE:

1	INTRODUÇÃO	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1	FLEXÃO DE PLACAS COM PEQUENOS DESLOCAMENTOS.....	4
2.2	FLEXÃO DE PLACAS COM GRANDES DESLOCAMENTOS	6
2.3	MODELO NUMÉRICO	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1	AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API 650	8
3.2	OUTRAS NORMAS ¹	9
4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	9
5	SOLUÇÃO	13
6	RESULTADOS	14
7	CONCLUSÕES	18
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO

Primeiramente consta uma introdução onde são descritos os tipos de tanques mais comuns para o armazenamento de petróleo e os seus derivados, especialmente tanques de teto flutuante e seu princípio de funcionamento, bem como os objetivos deste trabalho. A seguir é feita uma revisão bibliográfica citando as principais normas utilizadas neste tipo de dimensionamento e descrevendo em especial a norma na qual este trabalho se baseou. O problema é descrito e uma solução é proposta. Os resultados então são discutidos.

1 INTRODUÇÃO¹

Tanques são dispositivos de armazenamento destinados a estocar líquidos a pressão atmosférica ou baixas pressões. Devido a forma construtiva dos mesmos, existe um espaço disponível entre a superfície do líquido e o teto onde é possível a formação de vapores.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das principais características dos tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados.

O desenvolvimento dos tanques de teto flutuante acontece principalmente devido ao constante aumento no rigor das regulamentações internacionais que dizem respeito à segurança e ao controle de emissões em instalações onde existem derivados de petróleo estocados. Outras razões

importantes para utilização deste tipo de tanque são os seus reduzidos custos de operação e manutenção em relação aos demais tipos de tanques de armazenamento.

Quando um produto volátil é estocado em um tanque, a concentração dos vapores existentes no espaço de vapor do tanque irá variar conforme a condição de operação do tanque. Durante os períodos de espera, enquanto não ocorre nenhuma operação de carga ou descarga, o espaço de vapor dentro do tanque irá tornar-se saturado com uma determinada quantidade de vapores do produto dependente da temperatura de estocagem. Em períodos de espera, emissões poderão ocorrer através do processo de “respiração” do tanque, ou seja, durante o dia o produto será aquecido, causando um aumento do volume do líquido armazenado e fazendo com que a mistura de ar e vapor existente dentro do espaço de vapor seja expelida para fora do tanque, durante a noite o resfriamento do tanque reduz o volume do líquido armazenado, causando a aspiração de ar para dentro do tanque e fazendo com que este processo se reinicie.

Operações normais de carga e descarga também causam os mesmos efeitos do processo de “respiração” do tanque, porém, a variação do volume do produto não se deve a variações nas condições atmosféricas, e sim ao acréscimo ou diminuição da quantidade de produto armazenada.

A existência da mistura de ar e vapores causa também um aumento no risco de incêndio ou explosão e também aumenta a corrosão no interior do tanque.

Tanques de teto flutuante são construídos com um teto móvel que flutua sobre o líquido armazenado, reduzindo drasticamente o espaço de vapor e fazendo com que seu volume permaneça praticamente constante durante a operação, independente das variações de volume do produto armazenado. O espaço de vapor fica reduzido a um pequeno volume sob o selo que faz a vedação entre o teto e o costado do tanque e a pequenos volumes que possam vir a existir entre a superfície do líquido e as chapas do teto. A flutuabilidade do teto do tanque é garantida através da instalação de uma série de flutuadores em pontos estratégicos de sua superfície. A emissão de vapores para atmosfera fica portanto reduzida a perdas devido à não estanqueidade do selo e a eventuais aberturas na superfície do tanque. Este tipo de tanque é particularmente interessante quando grandes diâmetros são utilizados. Este tipo de construção está sujeita ao acúmulo de chuva, neve, areia ou gelo (onde aplicável) devendo resistir ao esforço adicional sem perder a flutuabilidade.

O objetivo deste trabalho é determinar uma forma analítica fechada capaz de auxiliar no dimensionamento do “Deck” de um teto flutuante conforme a condição de chuva prevista em norma, utilizando como critério de validação a comparação com uma análise em elementos finitos do mesmo problema.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 FLEXÃO DE PLACAS COM PEQUENOS DESLOCAMENTOS

Considere-se primeiramente o caso de uma placa circular de espessura uniforme, com os bordos engastados e sujeita a uma pressão uniforme sobre toda a sua superfície. A solução para a superfície elástica desta placa, através da teoria clássica de flexão de placas com pequenos deslocamentos é dada por^{2,3,4,5,6}

$$w(r) = \frac{q}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

onde r é a posição radial, a é o raio da placa, $w(r)$ é o deslocamento transversal na posição r , q é a pressão aplicada sobre a superfície da placa e D é o módulo de rigidez a flexão da placa que é dado por

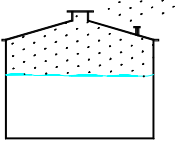
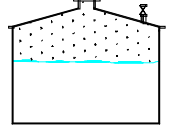
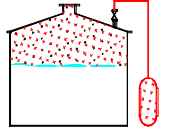
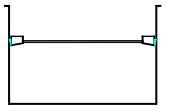

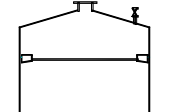
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

onde E é o módulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson e h é a espessura da placa.

A equação (1) pode ser utilizada com bons resultados quando as seguintes condições forem satisfeitas:

- 1) material da placa é elástico, homogêneo e isotrópico.
- 2) A espessura da placa é pequena com relação ao seu raio ($h \leq 0,1r$).
- 3) Os deslocamentos provenientes da flexão da placa são pequenos com relação à sua espessura ($w(r)_{\text{máx}} \leq 0,2h$).
- 4) A inclinação da superfície média da placa é pequena em comparação à unidade ($dw(r)/dr \ll 1$)
- 5) Linhas retas inicialmente normais a superfície média da placa permanecem retas e normais a superfície média da placa após a deformação.
- 6) Tensões normais a superfície média da placa podem ser desconsideradas.
- 7) A deformação da placa é o resultado do deslocamento de pontos inicialmente na superfície média da placa na direção normal a esta superfície.

Tabela 1: Principais Características dos Tanques de Armazenamento de Petróleo e seus Derivados

Tipo de Teto		Espaço de Vapor (Conteúdo)	Emissões para atmosfera e suas Causas	Risco de Incêndio e Explosão	Custos de instalação e operação	Observações
Fixo com Respiro		Grande. (Ar + Vapor)	Constantes. Amplificadas pelo processo de respiração do tanque, carga e descarga.	Muito Alto. Devido as constantes emissões de vapores com a conseqüente formação de mistura explosiva em seu interior e ao redor do respiro.	Baixo.	Tipo de construção não usual. Normalmente utiliza-se um válvula de alívio no lugar do respiro.
Fixo com Válvula de Alívio		Grande. (Ar + Vapor)	Somente quando da abertura da válvula de alívio devido a elevação da pressão interna.	Idem ao anterior, porém somente quando da abertura da válvula de alívio.	Baixo	Tipo de construção mais usual para pequenos diâmetros.
Fixo com Abafamento com N ₂		Grande. (Ar + N ₂)	Nenhuma emissão direta.	Praticamente nenhum. Não há mistura Ar + Vapor em seu interior	Alto. Instalação adicional para a injeção de N ₂ e o grande volume de gás necessário para a realização das operações diárias.	A mistura de Ar + N ₂ é expulsa para a atmosfera quando do enchimento ou respiração (perda de N ₂).
Flutuante tipo Pontão		Pequeno. Apenas o volume sob o selo e pequenos volumes que entre a superfície do líquido e as chapas do teto. (Ar + Vapor)	Pequenas. Não estanqueidade do selo e eventuais aberturas na superfície do tanque.	Pequeno. Pouco volume da Mistura Ar + Vapor para que a combustão ocorra.	Médio. Tanques deste tipo são particularmente interessantes quando grandes diâmetros são utilizados.	Volume do espaço de vapor é constante durante a operação. Este tipo de construção está sujeita ao acúmulo de chuva, neve, areia ou gelo (onde aplicável) devendo resistir ao esforço adicional sem perder a flutuabilidade.
Flutuante tipo Duplo-Deck		Pequeno. Menor que o tipo Pontão (Ar + Vapor)	Pequenas. Similar ao tipo Pontão.	Menor que o tipo Pontão pois apresenta menor espaço de vapor	Alto. Tem construção complicada	Idem ao tipo Pontão porém com maior rigidez e flutuabilidade.
Flutuante Interno		Grande. (Depende da Instalação)	Muito Pequena. Depende do tipo de instalação.	Depende da Instalação.	Muito Alto.	As cargas adicionais devido ao acúmulo de neve, chuva, areia ou gelo sobre o teto flutuante são eliminadas permitindo a construção de um teto flutuante mais leve e utilizando materiais alternativos. Pode ser do tipo Duplo-Deck ou Pontão, aceitando também as mesmas instalações adicionais que os tanque de teto fixo. Muitas vezes é adaptado a partir de um tanque de teto flutuante existente.

2.2 FLEXÃO DE PLACAS COM GRANDES DESLOCAMENTOS

Considere-se agora o caso de uma placa circular de espessura uniforme que descansa sobre uma base elástica, com seus bordos ligados a um anel elástico e sujeita à uma pressão uniforme sobre toda a sua superfície. A solução para a superfície elástica desta placa, através da teoria de flexão de placas com grandes deslocamentos, pode ser encontrada pela solução das seguintes equações diferenciais

$$D\nabla^4 w(r) = q - kw(r) + h\delta^4(w(r), \Phi(r)) \quad (3)$$

$$\nabla^4 \Phi(r) = -\frac{E}{2} \delta^4(w(r), w(r)) \quad (4)$$

onde k é a resistência específica da base elástica, $\Phi(r)$ é a função de tensões de Airy e os operadores ∇^4 , δ^4 podem ser escritos de forma simplificada para o caso axissimétrico como

$$\nabla^4 f(r) = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2 f(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df(r)}{dr} \right) \quad (5)$$

$$\delta^4(f(r), g(r)) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{df(r)}{dr} \frac{dg(r)}{dr} \right) \quad (6)$$

As equações diferenciais (5) e (6) acima podem ser utilizadas com bons resultados quando as seguintes condições forem satisfeitas:

- 1) material da placa é elástico, homogêneo e isotrópico.
- 2) A espessura da placa é pequena com relação ao seu raio ($h \leq 0,1r$).
- 3) Os deslocamentos provenientes da flexão da placa são pequenos com relação ao seu raio ($w(r)_{\text{máx}} \ll r$).
- 4) A inclinação da superfície média da placa é pequena em comparação à unidade ($dw(r)/dr \ll 1$)
- 5) Linhas retas inicialmente normais a superfície média da placa permanecem retas e normais a superfície média da placa após a deformação.
- 6) Tensões normais a superfície média da placa podem ser desprezadas.

A partir da determinação de $w(r)$ e de $\Phi(r)$ é possível calcular:

$$\text{Inclinação da placa} \quad \alpha = \frac{dw(r)}{dr} \quad (7)$$

$$\text{Momento radial} \quad Mr = -D \left(\frac{d^2 w(r)}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw(r)}{dr} \right) \quad (8)$$

$$\text{Momento tangencial} \quad Mt = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw(r)}{dr} + \nu \frac{d^2w(r)}{dr^2} \right) \quad (9)$$

$$\text{Tensão radial} \quad \sigma_r = \frac{6Mr}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Phi}{dr} \quad (10)$$

$$\text{Tensão tangencial} \quad \sigma_t = \frac{6Mt}{h^2} + \frac{d^2\Phi}{dr^2} \quad (11)$$

$$\text{Deformação radial} \quad \varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r + \nu \sigma_t) \quad (12)$$

$$\text{Deformação tangencial} \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t + \nu \sigma_r) \quad (13)$$

$$\text{Força radial por unidade de comprimento} \quad N_r = \frac{h}{r} \frac{d\Phi(r)}{dr} \quad (14)$$

As condições de contorno necessárias para a solução deste problema são

$$\text{Simetria:} \quad \alpha|_{r=0} = 0 \quad (15)$$

$$\varepsilon_r|_{r=0} = 0 \quad (16)$$

$$\text{Bordo apoiado:} \quad w(r)|_{r=a} = 0 \quad (17)$$

$$\text{Rigidez radial do bordo:} \quad \varepsilon_r|_{r=a} = \frac{N_r r_0}{EA r} \Big|_{r=a} \quad (18)$$

$$\text{Rigidez torcional do bordo:} \quad \alpha|_{r=a} = \frac{M t r_0^2}{EJ} \Big|_{r=a} \quad (19)$$

onde r_0 é o raio do centróide do anel elástico, A é a área resistente da seção transversal do anel elástico e J é o momento de inércia polar do anel elástico com respeito ao ponto de ligação entre a placa e o anel.

A solução para o caso em que a rigidez do anel elástico é infinita (bordo da placa engastado) e o material possui módulo de Young de 0,3 pode ser encontrada na literatura³, conforme segue abaixo:

$$w(r) = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (20)$$

$$w_0 = \sqrt[3]{\frac{0,171}{0,471} \frac{qa^4}{Eh}} \quad (21)$$

2.3 MODELO NUMÉRICO⁷

Soluções analíticas para o problema descrito no item 2.2 são difíceis de serem encontradas e não estão disponíveis na literatura devido à sua aplicação não usual. Para resolução de problemas de difícil solução analítica, um dos métodos mais versáteis é o método dos elementos finitos.

Vários sistemas baseados neste método estão disponíveis no mercado, sendo capazes de encontrar a solução para este problema através da criação de um modelo discreto coerente com a geometria da placa, da inclusão das condições de contorno do problema e através da seleção de um modelo numérico compatível com o problema real.

Para este trabalho será utilizado o programa Ansys 5.5⁸ para o pré-processamento, solução e pós-processamento do problema, de forma a aferir o resultado analítico obtido. Para geração da malha será utilizado um elemento axissimétrico de placa, dotado de não linearidade geométrica (para que a premissa de grandes deslocamentos seja satisfeita).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir se faz uma breve descrição de duas normas de projeto que auxiliam o dimensionamento de tetos flutuantes:

3.1 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API 650⁹

A API 650 normatiza materiais, projeto, fabricação, construção e teste para tanques de armazenamento cilíndricos, soldados, verticais, acima do nível do solo, de teto aberto ou fechado. Diversos tamanhos e capacidades de tanques para pressões internas pouco acima da pressão atmosférica (não excedendo o peso do teto do tanque) são permitidos. A aplicabilidade desta norma limita-se a tanques com fundo completamente apoiado e a temperatura ambiente.

Esta norma tem por objetivo fornecer à indústria do petróleo tanques de armazenamento seguros e econômicos.

No caso de tetos flutuantes, a norma estabelece os seguintes requisitos mínimos para seu dimensionamento:

- 1) O material do teto deve ser selecionado utilizando os mesmos critérios apresentados para os demais componentes do tanque.
- 2) Os acessórios instalados no teto devem permitir que o teto flutue livremente desde o seu nível mínimo até o seu nível máximo sem que ocorra dano algum aos demais componentes do tanque.
- 3) As especificações de solda devem ser realizadas utilizando os mesmos critérios apresentados para os demais componentes do tanque.

- 4) Quando exposto à atmosfera corrosiva, tal como vapores de petróleo, o “deck” do tanque deve manter total contato com a superfície do líquido armazenado, evitando assim o aparecimento da mistura entre ar e vapores dentro do tanque.
- 5) O teto deve possuir drenagem própria de forma a evitar o acúmulo de líquidos provenientes de chuva ou vazamento.
- 6) Deformações permanentes não devem ocorrer no teto do tanque durante qualquer uma das condições de projeto.
- 7) O teto deve possuir pernas de sustentação para que, por ocasião do esvaziamento do tanque, seja possível o acesso à sua parte interna.
- 8) Tetos flutuantes devem ter suficiente flutuabilidade para permanecerem flutuando operacionalmente sobre um líquido com densidade de 700 kg/m³ e com o sistema de drenagem inoperante para as seguintes condições:
 - a) Chuva de 254 mm durante um período de 24 horas.
 - b) Falha de flutuação em quaisquer dois compartimentos de flutuação (pontão) adjacentes.

3.2 OUTRAS NORMAS¹

Abaixo segue uma lista de outras normas pertinentes ao assunto que não estavam disponíveis para a consulta durante o período de execução deste trabalho

- 1) Associação Brasileira de Normas Técnicas – NB-89
- 2) Petrobrás – N270
- 3) British Standard – BS-2654

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A descrição do tanque a ser analisado encontra-se na Tabela 2. Para a descrição dos elementos que constituem o tanque em questão, ver Figura 1 até Figura 6.

Tabela 2: Dados de Projeto

Diâmetro Interno do Tanque:	47 m
Altura total do Tanque:	14,7 m
Código de Projeto:	API 650
Produto Estocado:	Gasolina

A análise será realizada tanto numérica como analiticamente. Os resultados estão apresentados no item 6 - Resultados.

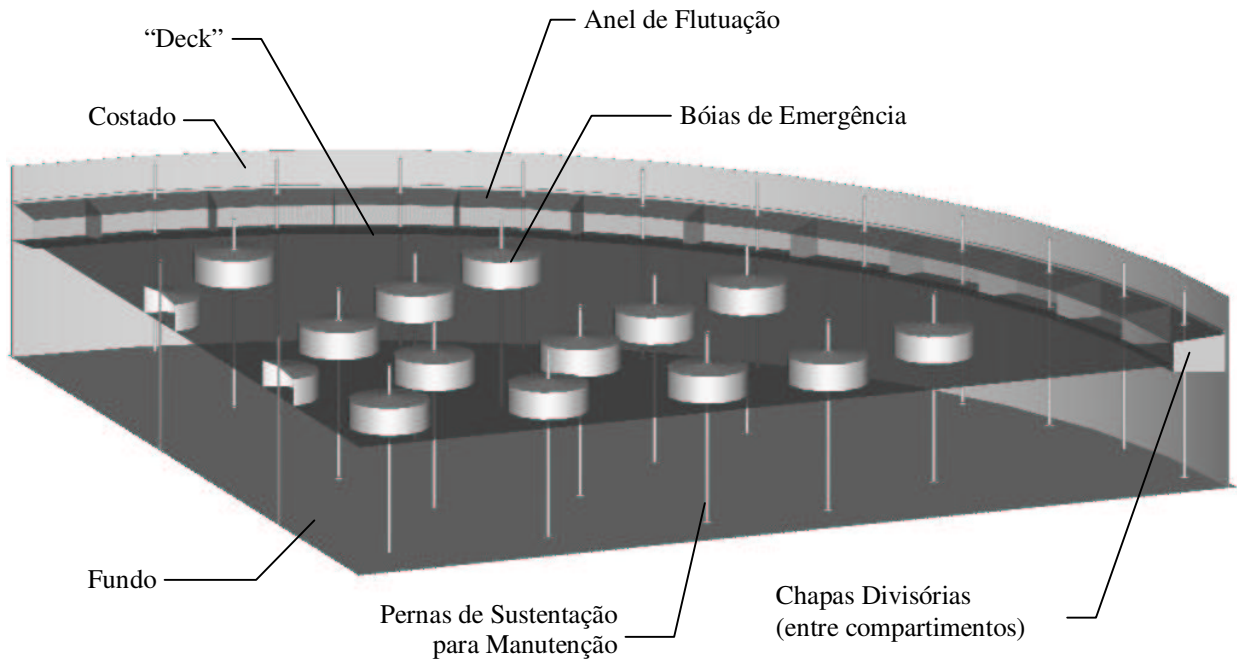


Figura 1: Arranjo Geral

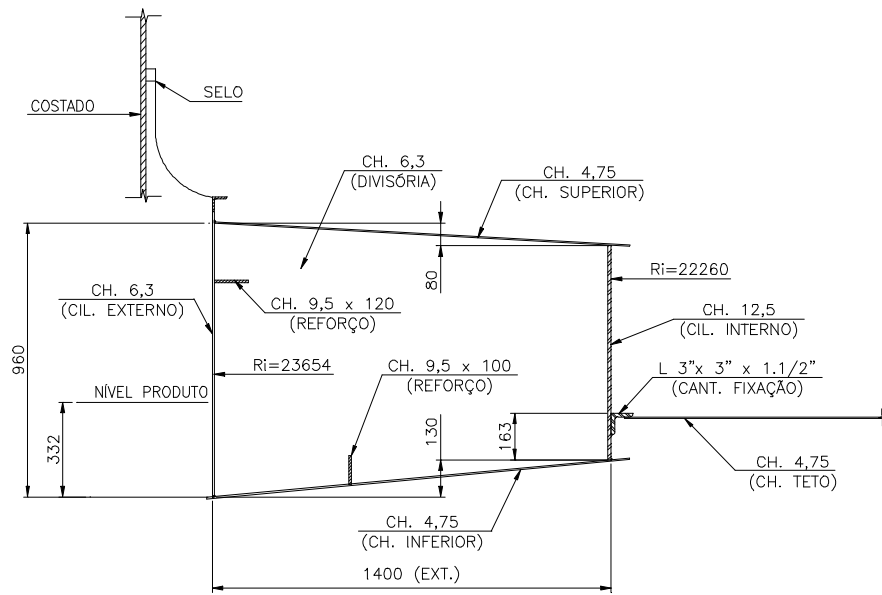


Figura 2: Detalhe da Seção do Anel de Flutuação



Figura 3: Bóias de Emergência



Figura 4: Anel de Flutuação e Selo

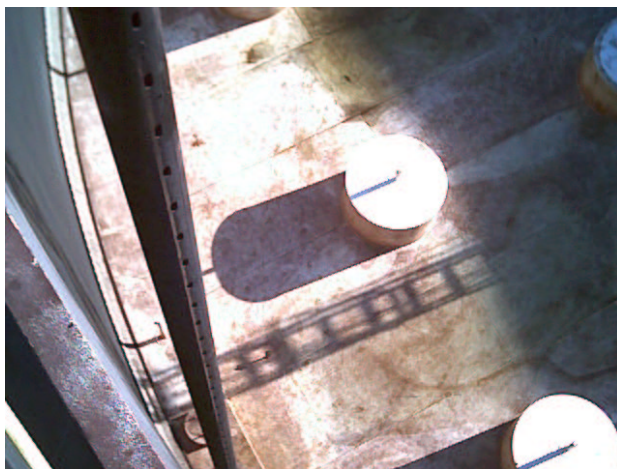


Figura 5: Guia Anti-rotacional



Figura 6: Escada de Acesso ao Teto

A Figura 7 apresenta o diagrama de corpo livre utilizado para o modelo analítico e para o modelo numérico.

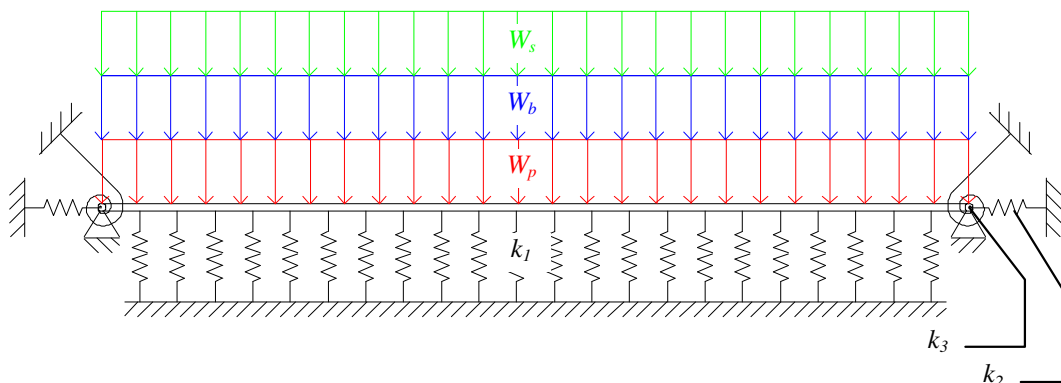


Figura 7: Modelo para o Cálculo

onde W_p é o peso próprio das placas do Deck, W_b é a carga distribuída correspondente ao peso das bóias de emergência, tendo em vista que estas somente gerariam força acendente quando da

perfuração do teto, W_s é a sobrecarga de água prevista por norma, k_1 é a resistência específica da base elástica que corresponde ao empuxo exercido pelo produto estocado sobre a placa, k_2 e k_3 são as constantes elásticas do anel elástico.

Os valores para os carregamentos foram obtidos conforme abaixo:

$$W_p = \rho_{aço} g h \quad (22)$$

$$W_b = \frac{nmg}{\pi a^2} \quad (23)$$

$$W_s = \rho_{água} g z \quad (24)$$

$$k = k_1 = \rho_{produto} g \quad (25)$$

onde $\rho_{aço}$ é a densidade do aço (7850 kg/m^3), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), n é o número de bóias de emergência instaladas sobre o teto (56), m é a massa média das bóias de emergência (300 kg), $\rho_{água}$ é a densidade da água (1000 kg/m^3), z é a altura da coluna de líquido acumulada sobre o teto (254 mm) e $\rho_{produto}$ é a densidade do produto armazenado (800 kg/m^3).

Sendo assim, a carga q aplicada sobre a placa é:

$$q = W_p + W_b + W_s = 3014 Pa \quad (26)$$

Já a resistência específica da base elástica pode ser escrita como:

$$k_s = 7848 \frac{Pa}{m} \quad (27)$$

Os demais valores para o cálculo são:

$$\begin{aligned} E &= 210 \times 10^9 Pa \\ \nu &= 0,3 \\ h &= 4,75 mm \\ a &= 23,2 m \end{aligned} \quad (28)$$

Para o dimensionamento estrutural de um teto flutuante, é importante considerar que ele deve permanecer operacional para os carregamentos de norma (veja item 3.1). Isto implica nas seguintes considerações¹⁰:

- 1) Rotação do anel de flutuação: a rotação do anel de flutuação, devida a sua torção, deve ser inferior à torção necessária para causar o emperramento do teto. O anel de flutuação possui um dispositivo chamado de guia anti-rotacional (Figura 5) que impede que o teto danifique acessórios instalados em seu Deck, através de seu movimento de rotação axial. Em casos extremos de rotação do anel flutuador, ocorrerá o emperramento desta guia, fazendo com que o teto não possa deslocar-se livremente.

- 2) Resistência: o teto deve resistir aos esforços de norma sem que ocorram deformações permanentes em sua estrutura.

O cálculo de resistência será baseado nas seguintes hipóteses¹¹:

- 1) O anel elástico tem rigidez suficientemente alta para que possa ser considerado rígido, ou seja, a placa está engastada no bordo (Figura 2).
- 2) Os reforços do anel de flutuação são capazes de evitar a flambagem das placas que o compõem.
- 3) Todas as cargas podem ser consideradas como estando distribuídas uniformemente sobre a superfície da placa (Figura 1, Figura 3 e Figura 6).
- 4) Todas as demais cargas, exceto aquelas consideradas na Figura 7, são desprezíveis.

5 SOLUÇÃO

Para solução das equações diferenciais (5) e (6) supõe-se primeiramente que $w(r)$ e $\Phi(r)$ são funções da seguinte forma:

$$w(r) = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (29)$$

$$\Phi(r) = B_0 r^2 + B_1 r^4 + B_2 r^6 + B_3 r^8 \quad (30)$$

então utilizando o método de Bubnov Galerkin¹², é possível obter:

$$\int_0^a \left(D \nabla^4 w(r) - q + k w(r) - h \delta^4(w(r), \Phi(r)) \right) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 r dr \quad (31)$$

$$w_0^3 = - \frac{143 (16a^4 (\nu^2 - 1) k - 112 E h^3) w_0 - 21a^4 (\nu^2 - 1) q}{8 E h (\nu + 1) (742\nu - 1457)} \quad (32)$$

$$w_0 = \frac{1}{12} \frac{\sqrt[3]{A_2^2 + 13728(-kA_1 + 7Eh^3)A_3}}{A_2 \sqrt[3]{A_3}} \quad (33)$$

onde as constantes A_1 , A_2 , A_3 e A_4 , podem ser calculadas conforme equações abaixo:

$$A_1 = a^4 (\nu^2 - 1) \quad (34)$$

$$A_2 = (324324qA_1 + A_4)A_3^2 \quad (35)$$

$$A_3 = E h (\nu + 1) (742\nu - 1457) \quad (36)$$

$$A_4 = \sqrt{2587151204352 \frac{(kA_1 - 7Eh^3)^3}{A_3} + 105186056976q^2 A_1^2} \quad (37)$$

As tensões e os momentos podem ser escritas como:

$$\sigma_r = \frac{w_0^2 E (\nu - 1)}{a^6} \left(\frac{30 - 18\nu}{\nu - 1} + 6 \frac{r^2}{a^2} + 4 \frac{r^4}{a^4} + \frac{r^6}{a^6} \right) + 2 \frac{h}{a^4} \frac{r^2 (3 + \nu) - a^2 (1 + \nu)}{(\nu^2 - 1)} \quad (38)$$

$$\sigma_t = 2 \frac{E h w_0}{a^2 (1 - \nu^2)} \left[1 + \nu - \frac{r^2}{a^2} (1 - 3\nu) \right] - \frac{1}{6} \frac{E w_0^2}{a^2} \left(18 \frac{r^2}{a^2} + 5 \frac{r^4}{a^4} + 7 \frac{r^6}{a^6} - \frac{18\nu + 30}{\nu - 1} \right) \quad (39)$$

$$M_r = \frac{1}{3} \frac{E h^3 w_0}{a^4} \frac{r^2 (3 + \nu) - a^2 (1 + \nu)}{(\nu^2 - 1)} \quad (40)$$

$$M_t = \frac{1}{3} \frac{E h^3 w_0}{a^4} \frac{r^2 (3\nu + 1) - a^2 (1 + \nu)}{(\nu^2 - 1)} \quad (41)$$

6 RESULTADOS

Alguns resultados obtidos da superfície elástica para o carregamento e o material do problema proposto, utilizando a Equação (31), o modelo numérico e um polinômio de grau mais elevado desenvolvido a partir da metodologia apresentada nos itens anteriores, podem ser encontrados nas figuras a seguir (Figura 8 até Figura 14). Especial importância foi dada à superfície elástica devido ao fato de ser possível, através de sua correta determinação a obtenção de todos os demais esforços. Nestas figuras, o carregamento foi mantido constante, enquanto o diâmetro foi variado.

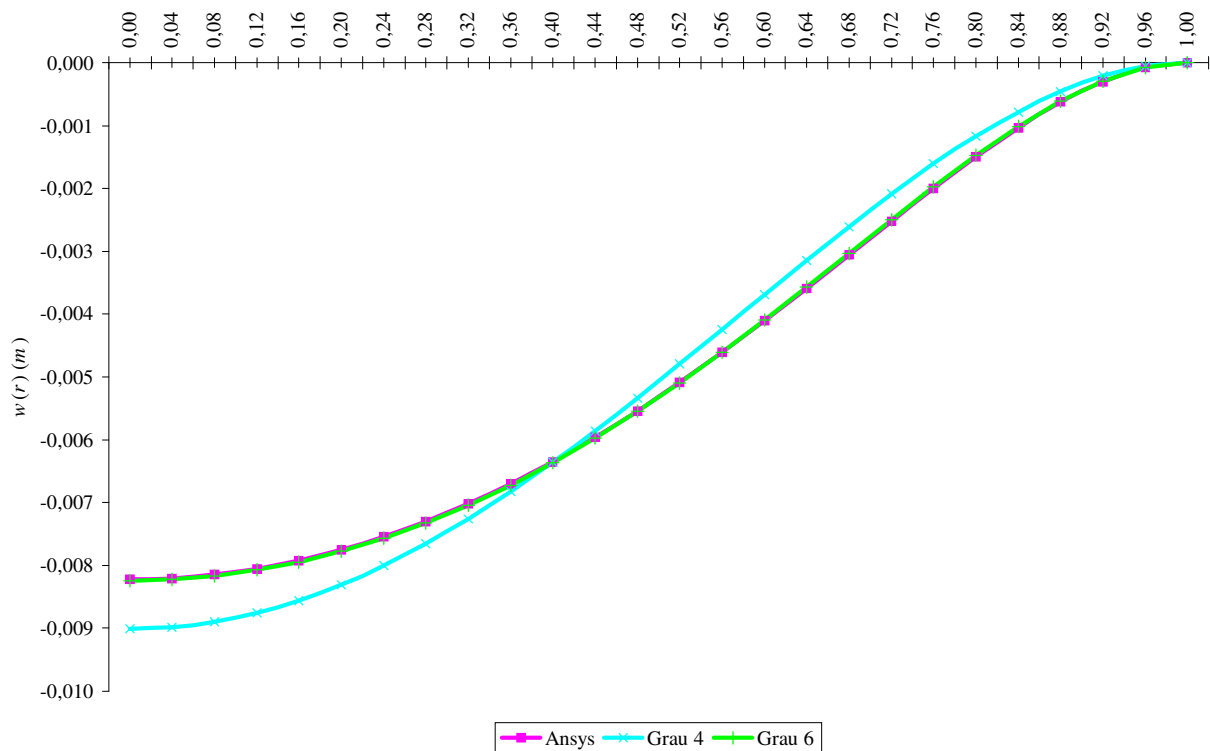


Figura 8: Superfície Elástica: $k = 7848$ e $a = 1$ m

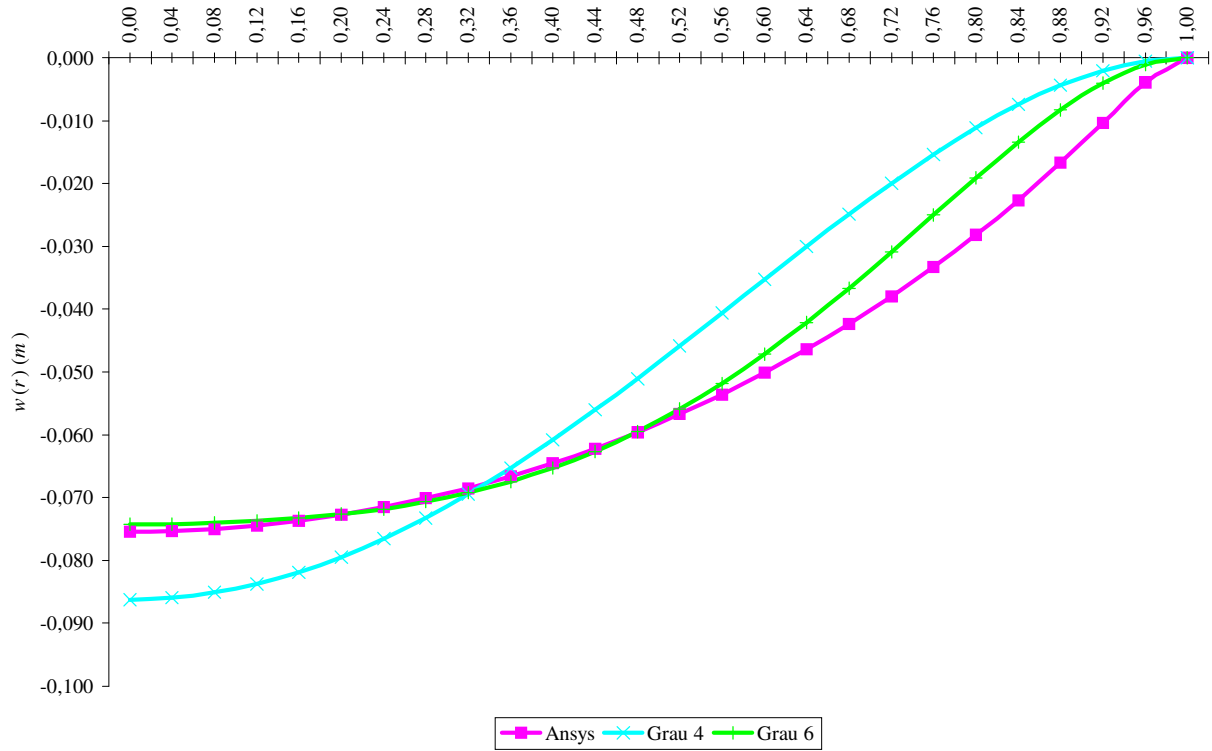


Figura 9: Superfície Elástica: $k = 7848 Pa/m$ e $a = 5 m$

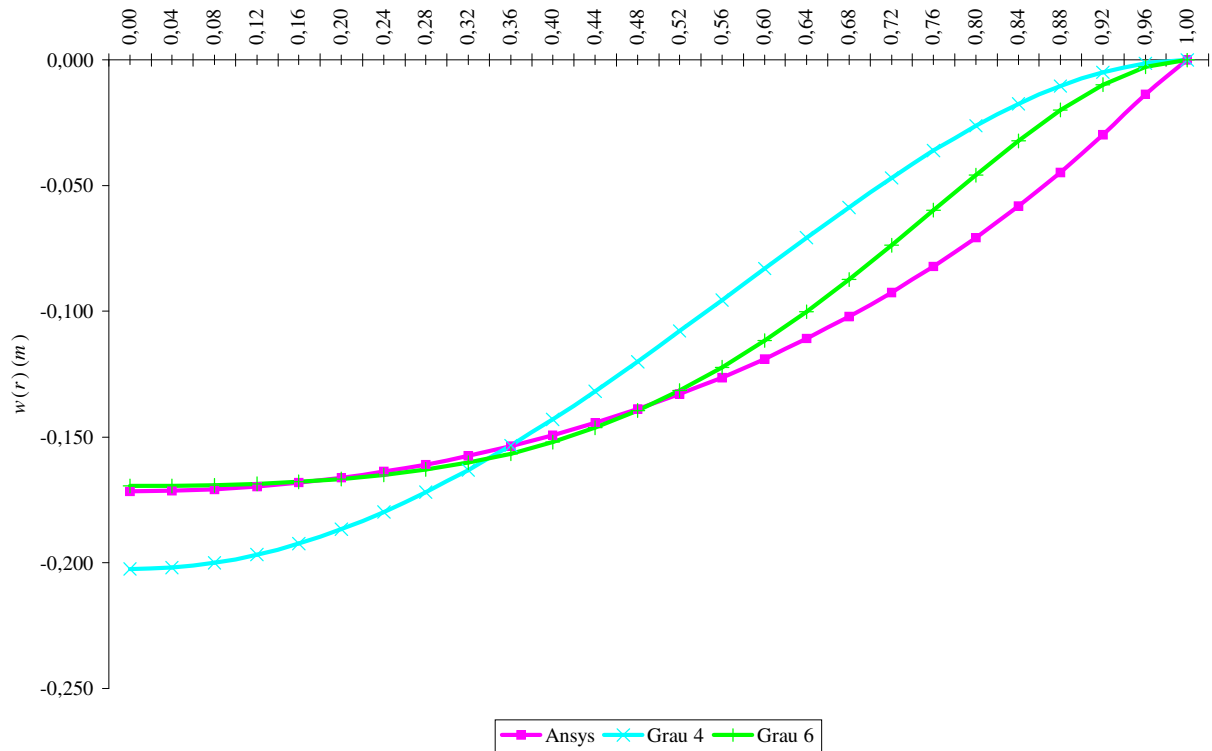


Figura 10: Superfície Elástica: $k = 7848 Pa/m$ e $a = 10 m$

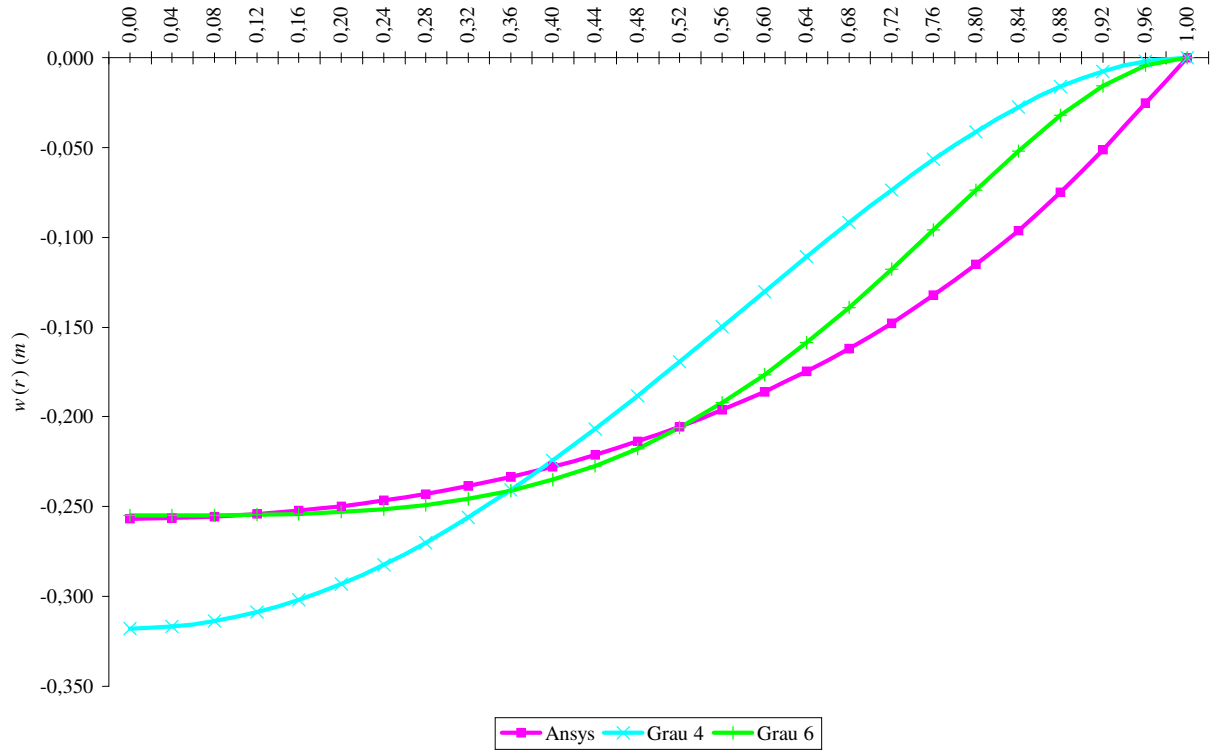


Figura 11: Superfície Elástica: $k = 7848 \text{ Pa/m}$ e $a = 15 \text{ m}$

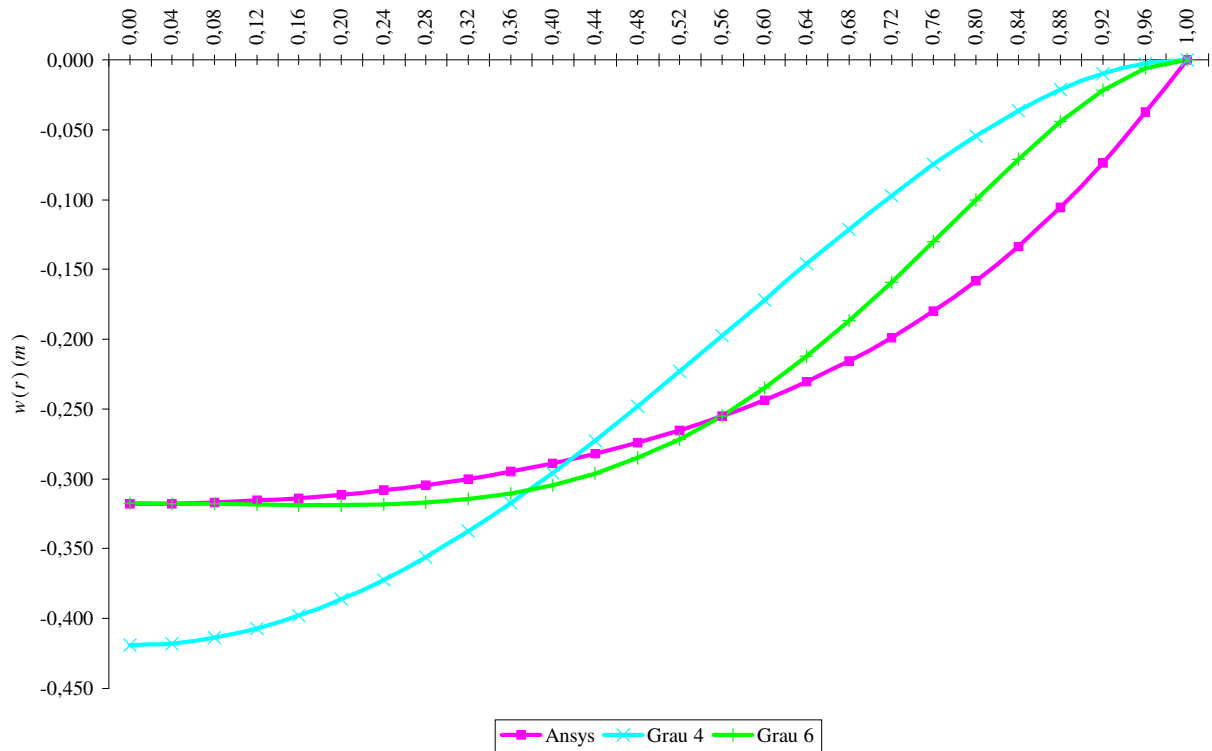


Figura 12: Superfície Elástica: $k = 7848 \text{ Pa/m}$ e $a = 20 \text{ m}$

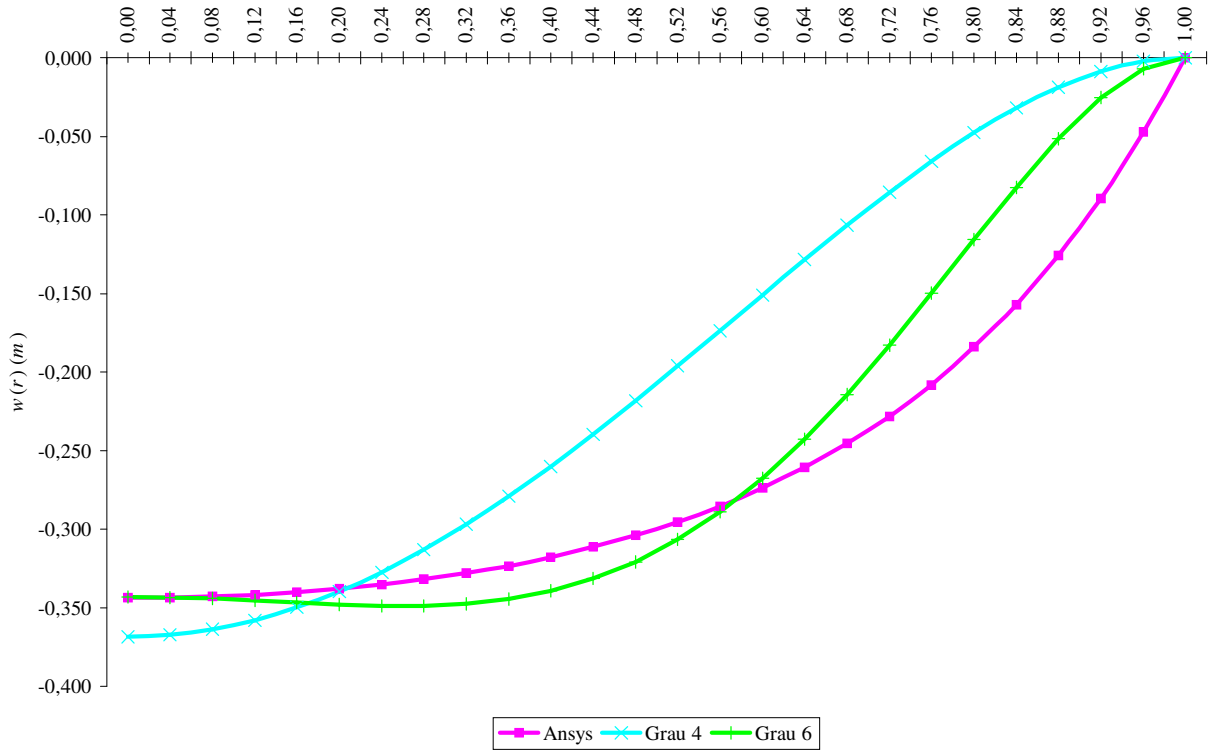


Figura 13: Superfície Elástica: $k = 7848 \text{ Pa/m}$ e $a = 23,2 \text{ m}$

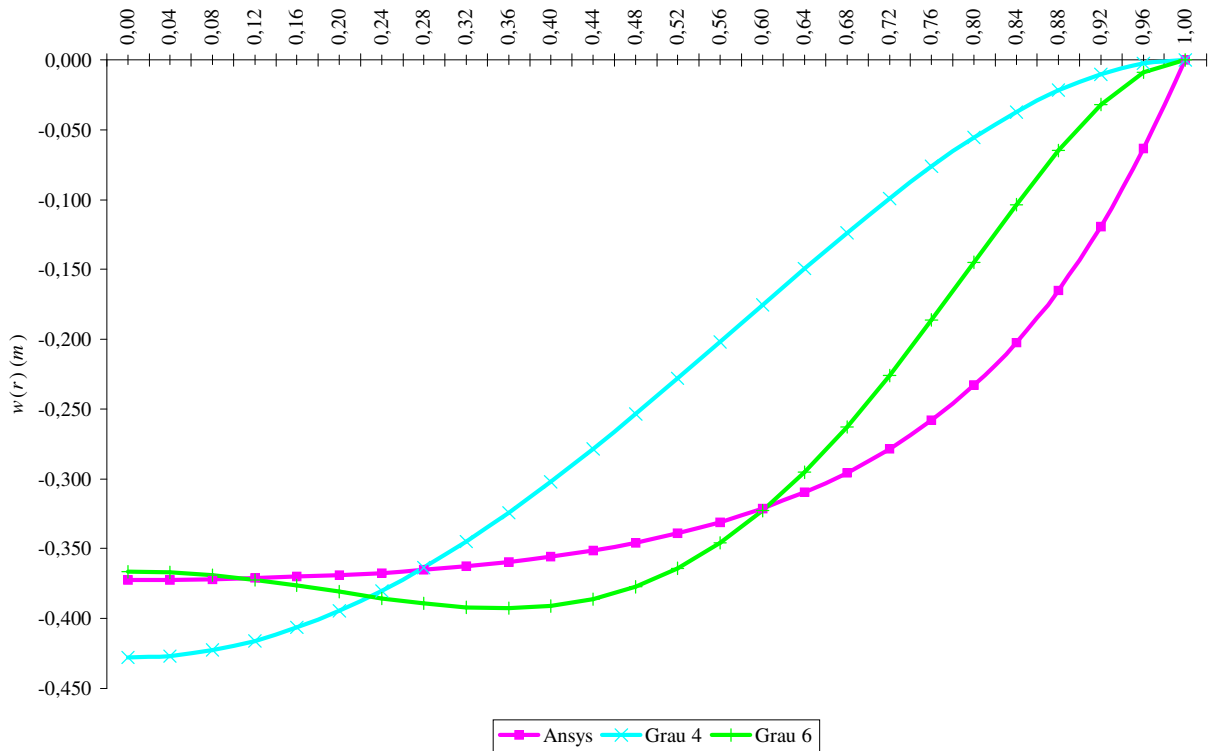


Figura 14: Superfície Elástica: $k = 7848 \text{ Pa/m}$ e $a = 30 \text{ m}$

Também foi graficada a variação obtida na flecha máxima em função do aumento do diâmetro do tanque (Figura 15), conforme as equações (1), (20) e (33). Neste gráfico é possível observar

que a flecha máxima, a partir de um determinado diâmetro de tanque assume um valor constante tanto no modelo numérico quanto na equação (33). Isto se deve ao fato de que para grandes diâmetros as flechas tornam-se tão grandes que a reação da base elástica passa a ser igual ao carregamento aplicado sobre a placa.

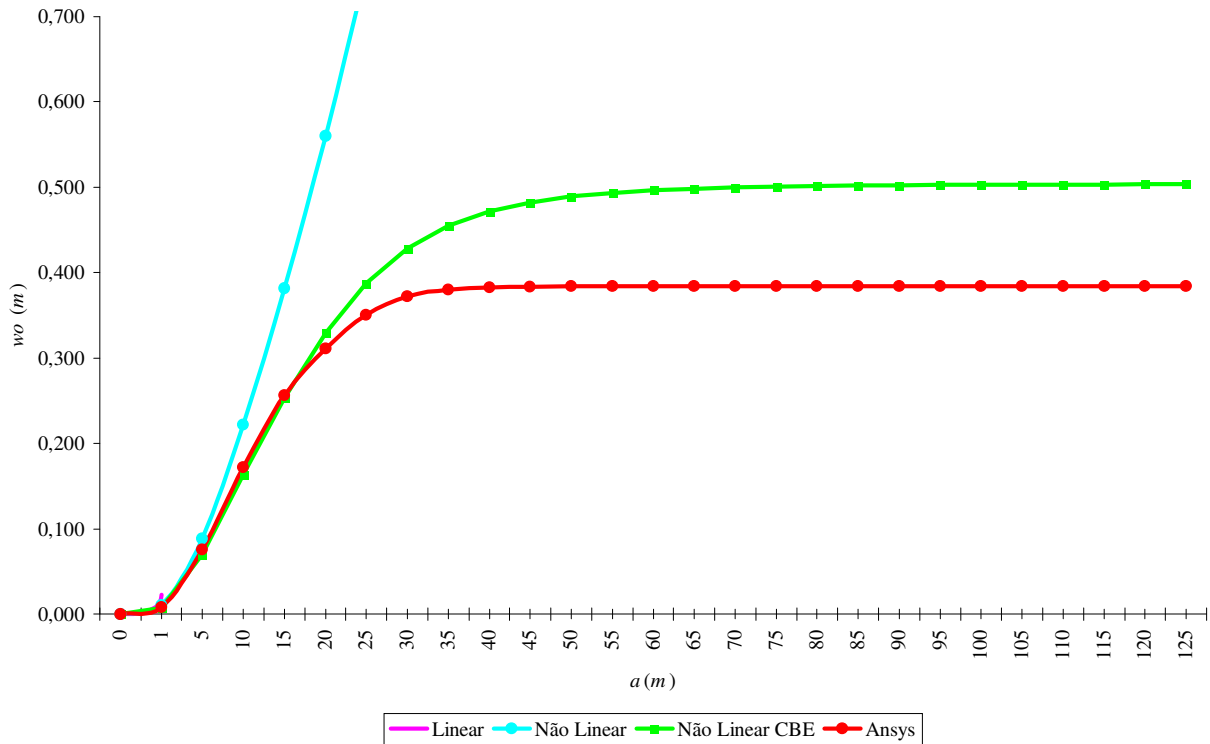


Figura 15: Variação da flecha máxima em função do diâmetro do tanque

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi obtida uma forma analítica fechada com objetivo de auxiliar o dimensionamento do “Deck” de um teto flutuante conforme a condição de chuva prevista em norma. Foi utilizando como critério de validação a comparação entre a equação obtida e uma análise em elementos finitos do mesmo problema.

A comparação dos resultados para a superfície elástica mostra que a equação obtida se aproxima do modelo em elementos finitos para pequenos diâmetros (até 17 m). A partir deste diâmetro, os resultados vão se distanciando cada vez mais da solução numérica.

Para caso de interesse deste trabalho ($a = 23,2 \text{ m}$ e $k = 7848 \text{ Pa/m}$), os resultados obtidos apresentam elevada diferença em relação a análise numérica.

A exatidão do método utilizado para a solução do problema depende fortemente das funções de forma utilizadas e poderia ser melhorada através da utilização de um polinômio de grau mais alto como função de forma ou mesmo a adoção de outro tipo função de forma.

Para os diâmetros comuns de tanques de teto flutuante o equacionamento proposto não oferece exatidão suficiente, porém fornece subsídios para uma análise qualitativa da influência de cada um dos parâmetros de projeto envolvidos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ Monteiro de Barros, Stenio, 1984. "**Tanques de Armazenamento**", PETROBRÁS – SEPES / DIVEN / SEN-RIO, Rio de Janeiro.
- ² Mansfield, E. H., 1964 "**The Bending and Stretching of Plates**", Pergamon Press, Oxford.
- ³ Timoshenko, Woinowsky-Krieger, 1970, "**Teoría de Placas y Láminas**", Urmo, Bilbao
- ⁴ Szilard, R., 1974, "**Theory and Analysis of Plates**", Prentice-Hall, New Jersey
- ⁵ Beluzzi, O., 1967, "**Ciencia de la Construcción**", Aguilar, Madrid
- ⁶ C. Young, W., 1989. "**Roark's Formulas for Stress & Strain**", McGraw-Hill, New York.
- ⁷ Marczak, R. J., 1995, "**Elementos Finitos**", Fundatec, Porto Alegre.
- ⁸ Ansys Manual
- ⁹ American Petroleum Institute, 1994, "**API Standard 650**", Washington.
- ¹⁰ da Costa, Theodomiro, 1990, "**Cálculo de Flutuabilidade para Tanques de Armazenamento de Teto Flutuante Tipo Pontão**", SIBRAT, Salvador.
- ¹¹ Epstein, H. L., 1978, "**Design of pontoons for Floating Roofs**", ASME, New York.
- ¹² Eaton, W. P., "**A New Analytical Solution for Diaphragm Deflection and its Application to a Surface-Microachined Pressure Sensor**", Sandia National Laboratories, Albuquerque.