

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

FELIPE SCHAPPO

PROJETO ESTRUTURAL DE UMA PLATAFORMA SEMI-SUMERSÍVEL

Joinville

2017

FELIPE SCHAPPO

PROJETO ESTRUTURAL DE UMA PLATAFORMA SEMI-SUBMERSSIVEL

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2017

RESUMO

Dentre os vários tipos de plataformas oceânicas, a plataforma semissubmersível apresenta características de perfuração e produção em águas profundas, sendo constituída de uma estrutura de um ou mais conveses apoiados em flutuadores verticais (colunas) e horizontais (pontões). Tais flutuadores sofrem ação de ondas, ventos e correntes, proporcionando assim riscos estruturais aos equipamentos e a tripulação. Neste contexto, este trabalho apresenta o procedimento para o projeto estrutural de uma plataforma semissubmersível baseado na aplicação da norma ABS. O procedimento é então aplicado ao projeto estrutural da plataforma GVA 400 resultando em um dimensionamento preliminar dos elementos estruturais que compõem o convés, as colunas e os pontões. Por fim é apresentada uma análise estrutural utilizando o Método dos Elementos Finitos da estrutura projetada, considerando falhas por escoamento e por flambagem. O resultado final é o projeto estrutural da plataforma analisada, bem como os coeficientes de segurança obtidos a partir da análise numérica usando o Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: Projeto estrutural. Semissubmersível. Norma. Método dos Elementos Finitos. Flambagem.

ABSTRACT

Among the various types of ocean platforms, the semi-submersible platform has characteristics of drilling and production in deep waters, being constituted of a structure of one or more decks supported in vertical (columns) and horizontal (pontoon) floats. These types of floats suffer from waves, winds and currents, thus providing structural risks to equipment and crew. In this context, this final paper presents the procedure for the structural design of a semisubmersible platform based on the application of the ABS standard. The procedure is then applied to the structural design of the GVA 400 platform resulting in a preliminary dimensioning of the structural elements that make up the deck, columns and pontoons. Finally, a structural analysis is presented using the Finite Element Method of the projected structure, considering flow and buckling faults. The final result is the structural design of the analyzed platform, as well as the safety coefficients obtained from the numerical analysis using the Finite Element Method.

Keywords: Structural design. Semi-submersible. Standard. Finite Element Method. Buckling.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
1.1. Objetivos	12
1.2 Estrutura do Relatório	12
2. Fundamentação Teórica.....	13
2.1 Movimentos de Sistemas Flutuantes	13
2.2 Esforços Globais.....	14
2.2.1 Split Forces ou Forças de Separação	15
2.2.2 Forças/Momento Torsional	17
2.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais	18
2.4 Flambagem	20
3. DESENVOLVIMENTO.....	22
3.1 Dimensionamento Estrutural do Convés	25
3.2 Dimensionamento Estrutural da Coluna.....	26
3.3 Dimensionamento Estrutural dos Pontões.....	29
3.4 Modelagem no Programa CAD	30
3.5 Simulação no Programa de Elementos Finitos.....	35
3.5.1 Análise Global.....	36
3.5.2 Análise Local.....	45
3.5.3 Análise de Flambagem	48
4. Análise de Resultados.....	51
4.1 Resultados da Análise Global do Deck	51
4.2 Resultados da Análise Global do Flutuador	53
4.3 Resultados da Análise Local	55
4.4 Resultados da Análise de Flambagem.....	55
5. Conclusão	59
Referências	60
Apêndice A – Engenharia assistida por computador.....	61

Apêndice B – Norma e Regulamentos American bureau of shipping: Mobile Offshore Driling Units	67
Apêndice C – Norma e Regulamentos American bureau of shipping: Buckling and ultimate Strength Assessment for offshore Structure	69
Apêndice E – Norma e Regulamentos American bureau of shipping: Stell Vessels	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenvolvimento da produção em águas profundas	10
Figura 2 - Sistema de Movimento de Unidades Flutuantes	13
Figura 3 – Fluxograma dos esforços atuantes na estrutura.....	14
Figura 4 – Comparação das dimensões principais do navio e a plataforma.....	15
Figura 5 - Split In	16
Figura 6 - Split In	16
Figura 7 – Plataforma semi-submersível P-51 em construção.....	17
Figura 8 - Momento Torsional	18
Figura 9 – Diagrama tensão deformação	19
Figura 10 – Viga sobre compressão	20
Figura 11 – Modos de Flambagem em Painéis Reforçados	22
Figura 12 – Modos de falha em referencia aos elementos estruturais da plataforma.....	23
Figura 13 – Fluxograma do processo de determinação do dimensionamento estrutural.....	24
Figura 14 – Seção Transversal dos Reforçadores do Convés.....	26
Figura 15 – Incógnitas da Seção transversal dos reforçadores da coluna	27
Figura 16 – Seção Transversal dos Reforçadores da Coluna	28
Figura 17 – Seção transversal dos Reforçadores dos Pontões.....	30
Figura 18 – Corte Horizontal do Flutuador	31
Figura 19 – Corte Longitudinal do Flutuador.....	31
Figura 20 - Corte transversal do Flutuador.....	31
Figura 21 - Coluna.....	32
Figura 22 - Corte longitudinal da coluna.....	32
Figura 23 - Corte Transversal da Coluna.....	33
Figura 24 - Corte superior do deck.....	34
Figura 25 - Corte direito do deck	34
Figura 26 - Plataforma semissubmersível	34
Figura 27 – Fluxograma do processo de simulação no Ansys	36
Figura 28 – Modelagem plataforma	39
Figura 29 – Malha da plataforma	40
Figura 30 – Malha coluna.....	41
Figura 31 – Malha coluna, visualização dos elementos	41

Figura 32 – Malha flutuador.....	41
Figura 33 – Malha flutuador, visualização dos elementos	41
Figura 34 – Malha deck.....	41
Figura 35 – Malha deck, visualização dos.....	41
Figura 36 – Condições de contorno.....	43
Figura 37 – Condição de Contorno aplicada na coluna.....	43
Figura 38 – Condição de contorno aplicada no deck.....	43
Figura 39 – Condição de Contorno aplicada no fundo do flutuador	44
Figura 40 – Condição de contorno aplicada no topo do flutuador	44
Figura 41 – Resultados relacionados à tensão equivalente de von Mises	44
Figura 42 – Malha, tensão secundária topo do convés	46
Figura 43 – Condição de contorno, análise local do topo do convés	46
Figura 44 – Análise de tensão local no topo do convés.....	46
Figura 45 – Malha da tensão secundária do fundo do pontão	47
Figura 46 - Condições de contorno, análise local do fundo do Pontão	47
Figura 47 - Análise de tensão local em uma unidade de chapeamento do fundo do pontão	47
Figura 48 – Condição de contorno análise de flambagem da coluna – fixação dos graus de liberdade	49
Figura 49 - Condição de contorno análise de flambagem da coluna – Forças aplicadas	49
Figura 50 – Malha de elementos finitos da coluna na análise de flambagem	50
Figura 51 – Resultados da análise global do deck.....	52
Figura 52 – Resultados da análise global do deck, corte longitudinal	52
Figura 53 – Resultado da análise global do deck, local de tensão máxima.....	53
Figura 54 – Resultados da Análise Global do Flutuador.....	54
Figura 55 – Resultados da Análise Global do Flutuador, Corte Longitudinal	54
Figura 56 - Resultados da análise global do flutuador, corte longitudinal	55
Figura 57 –Resultado da análise de flambagem da coluna, 1º modo de flambagem.....	56
Figura 58 - Resultado de análise de flambagem da coluna, 4º modo de flambagem	57
Figura 59 – Resultado de análise de flambagem da coluna, 6º modo de flambagem.....	57
Figura 60 – Elemento finito unidimensional de dois nós	63
Figura 61 - (a) Tetraedro de Tensão Constante - (b) Tetraedro de Tensão Linear - (c) Hexaedro Trilinear - (d) Hexaedro Quadrático	65
Figura 62 - Seção transversal do elemento hexaedro trilinear - (a) deformação real - (b) deformação hexaedro trilinear	65

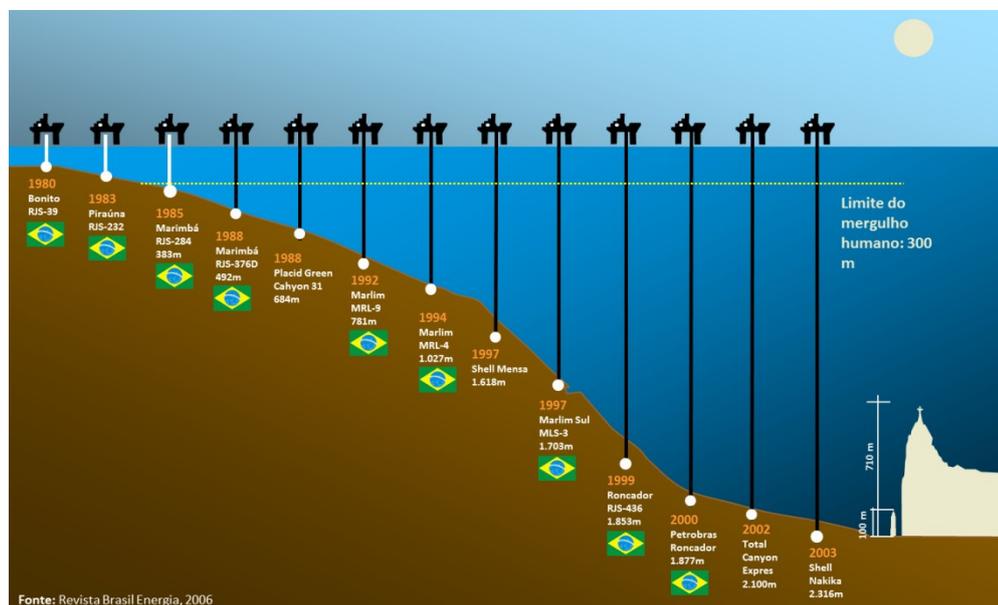
Figura 63 - Seção transversal do Elemento Hexaedro.....	66
Figura 64 - Coluna com os reforçadores	69
Figura 65 - Flambagem Local	70
Figura 66 - Flambagem entre Vãos	74
Figura 67 - Flambagem Geral.....	79
Figura 68 – Transporte de uma Plataforma Semi-Submersível.....	81

1. INTRODUÇÃO

O petróleo ganhou espaço no cenário econômico mundial no início do século XIX e hoje apresenta um papel fundamental na economia das grandes potências mundiais. Após a segunda guerra mundial, plataformas de extração de petróleo em alto mar (offshore) foram desenvolvidas para suprir a demanda desta matéria prima, possibilitando a extração das reservas localizadas em águas profundas. A Figura 1 apresenta o desenvolvimento da produção de petróleo no decorrer dos anos, nota-se a constante busca por tecnologia de produção em águas profundas.

No Brasil, a exploração de petróleo offshore iniciou com a Bacia de Sergipe em 1968, campo de Guaricema, sendo que hoje a exploração abrange grande parte da costa brasileira. Em 2006, com a descoberta de reservas no pré-sal, cresceu ainda mais o interesse no desenvolvimento de tecnologias para extração em águas com profundidade (acima de 2000 metros).

Figura 1 – Desenvolvimento da produção em águas profundas



Fonte: Revista Brasil Energia (2006)

Como pode ser visto na Figura 1, o uso de plataformas fixas (com ligação rígida com o leito marinho) se torna economicamente inviável para laminais d'água maior que 300 metros de profundidade; motivando a pesquisa e o desenvolvimento de novos conceitos de plataformas flutuantes.

Plataformas flutuantes são estruturas offshore apoiadas em flutuadores submersos, cuja geometria depende das características do mar associadas ao campo de petróleo a ser explorado.

Segundo a Diretoria de Portos e Costas, hoje o Brasil tem 170 plataformas offshore em operação (BRASIL, 2016), cuja grande maioria é constituída de plataformas do tipo semissubmersível e FPSO.

Por serem unidades flutuantes, essas plataformas requerem sistemas de posicionamento para manterem-se no espaço a despeito das ações ambientais externas. Tradicionalmente existem dois tipos de sistemas para o posicionamento de unidades flutuantes: o sistema de ancoragem, que restringe o movimento da plataforma por meio de cabos ou correntes presos ao fundo; e o sistema de posicionamento dinâmico, que utiliza propulsores ativos para a manutenção da posição.

É importante observar que essas ações (externas) também geram grandes esforços estruturais, que junto com as condições de carregamento, correspondem às forças atuantes na estrutura.

Com crescente aumento da exploração do petróleo e o alto nível de investimento na produção offshore em águas profundas, fica evidente a necessidade de sistemas de extração e refino desta matéria prima com alto nível de confiabilidade.

Neste cenário, este trabalho apresenta um método para o projeto estrutural de uma plataforma utilizada na extração e produção de petróleo em águas profundas do tipo semissubmersível. Em seguida, a estrutura projetada será analisada visando o entendimento do comportamento das tensões na estrutura quando esta se encontra em operação, de forma que se possa prever e corrigir possíveis problemas estruturais que possam afetar sua operação. Visto isso, a plataforma semissubmersível GVA 4000 é apresentada como um exemplo a ser estudado, utilizando suas dimensões principais para efetuar cálculos utilizados no projeto estrutural. Com base no projeto elaborado, de acordo com a norma, a análise computacional é realizada de forma a estudar o comportamento de tensões associado a estrutura.

Para tal análise é necessário conhecer as composições das forças e os modos de falha que englobam a plataforma. As especificações da norma American Bureau of Shipping (ABS, 2016) foram utilizadas para determinar as dimensões de todos os elementos que compõem a plataforma e através de um programa computacional robusto e confiável, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é aplicado para realizar uma análise preliminar da estrutura.

1.1. Objetivos

Com base nas dimensões principais de uma plataforma semissubmersível típica (GVA 4000) este estudo visa projetar e propor um método de análise estrutural, de forma a entender o comportamento dos esforços atuantes na estrutura devido às ações dos carregamentos em operação.

Para alcançar o objetivo principal, objetiva-se:

- ✓ Descrever as características da plataforma típica selecionada GVA 400
- ✓ Projetar os elementos estruturais da plataforma seguindo a norma (ABS, 2016);
- ✓ Definir os carregamentos atuantes na estrutura;
- ✓ Determinar os possíveis modos de falha da estrutura;
- ✓ Propor uma metodologia para a aplicação de uma análise computacional;
- ✓ Analisar os resultados obtidos;

1.2 Estrutura do Relatório

O presente trabalho desenvolve uma análise estrutural preliminar de uma estrutura offshore flutuante de extração de petróleo. Introduzindo um breve histórico e a situação no mercado atual, de forma a estabelecer a importância desta matéria prima na economia mundial.

A base teórica envolvida na análise como modos de falha, norma utilizada, características da estrutura seguida pelo processo desenvolvido pelo projeto e as discussões sobre os resultados obtidos são descritos nos capítulos seguintes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estruturas flutuantes apresentam esforços gerados pela excitação do mar, devido à interação hidrodinâmicas entre a água e a estrutura. Para o estudo em questão, são necessários conceitos associados as propriedades mecânicas dos materiais, os cálculos apresentados pela norma, conceitos de flambagem e de método de elementos finitos; os quais serão abordados neste capítulo.

2.1 Movimentos de Sistemas Flutuantes

Estruturas navais tem seu movimento composto por seis graus de liberdade, sendo três destes referentes ao movimento de rotação (jogo, arfagem e guinada), e três referentes ao movimento de translação (avanço, deriva e afundamento), Faltinsen (1998). Na Figura 2 são mostrados os respectivos movimentos nos seis graus de liberdade de uma unidade flutuante.

Figura 2 - Sistema de Movimento de Unidades Flutuantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

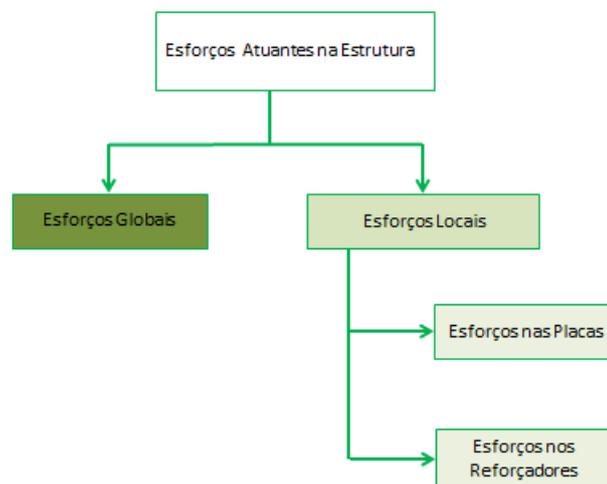
Segundo Alves (2006), dois grupos abrangem os deslocamentos lineares e angulares de uma plataforma:

- I. Avanço (surge), deriva (sway) e afundamento (heave): Nas plataformas estes movimentos apresentam restrições devido ao sistema de ancoragem;
- II. Jogo (roll), arfagem (pitch) e guinada (yaw): Estes movimentos são limitantes para a operação da plataforma. Para estes movimentos os limites operacionais apresentam relação direta com a distribuição de massa e a área de linha d'água.

2.2 Esforços Globais

O estudo das tensões atuantes nas estruturas possui duas vertentes os esforços globais e os locais. A análise global é seguida por estudos dos esforços locais os quais atuam diretamente nos reforçadores e nas unidades de chapeamento. Esta divisão da análise é devido à diferença dos raios de curvaturas das deformações globais e locais, assumindo um procedimento de análise conforme o fluxograma apresentado pela Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma dos esforços atuantes na estrutura

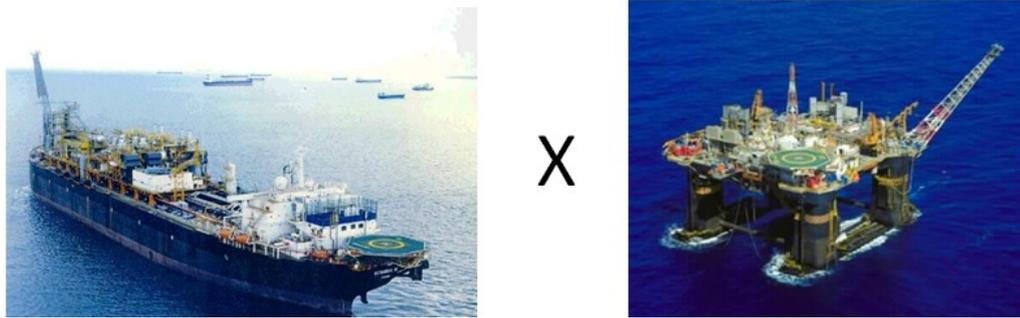


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A análise estrutural de navios, cujo comprimento é consideravelmente maior que sua boca e pontal, permite a utilização da Teoria Simples de Vigas na análise do comportamento global da estrutura. A análise dos elementos locais utiliza a Teoria Simples de Viga para os reforçadores e a Teoria de Placas de Kirchhoff para as unidades de chapeamento.

No caso das plataformas semi-submersíveis, a Teoria Simples de Viga não pode ser empregada devido à geometria peculiar destas estruturas; pois o comprimento, boca e pontal são dimensões relativamente próximas (ver Figura 4). Neste caso os esforços globais (também chamados de primários) são resultantes da interação entre ondas e estrutura flutuante.

Figura 4 – Comparação das dimensões principais do navio e a plataforma



Fonte: Aquatec (2017)

A interação hidrodinâmica entre onda e estrutura flutuante pode ser dividida em forças de excitação e forças de radiação. Segundo Faltisen (1998), as forças de excitação são advindas da excitação do corpo por uma onda passante, e as forças de radiação geradas pela inércia associada ao movimento da estrutura.

Forças de excitação são determinadas a partir da integração do campo de pressão próximo ao corpo, por outro lado a força de difração é gerada pelo campo de pressões atuante distante do corpo, os quais são considerados como uma massa adicional que se soma a massa original do corpo (FALTISEN, 1998). Estas duas forças geram esforços que atuam localmente na estrutura flutuante.

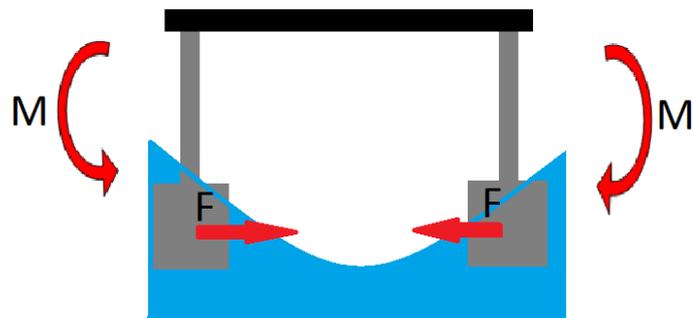
2.2.1 Split Forces ou Forças de Separação

Chakrabarti (2005), apresenta um detalhamento sobre os esforços atuantes nas estruturas flutuantes. Forças de separação são aquelas devido à interação da onda com a estrutura.

Quando os vales de uma onda passam ao mesmo tempo pelos pontões¹, a variação da flutuação nas colunas somada à força inercial referente ao peso da plataforma no centro do convés resulta em uma força que atrai os pontões, conforme pode ser visto na Figura 5. Essa força é denominada Força de Aproximação (Split in) e induz a flexão global do convés da plataforma.

¹ Pontões é a tradução usada para os Pontoons, são os elementos da estrutura flutuante responsáveis por maior parte da sustentação.

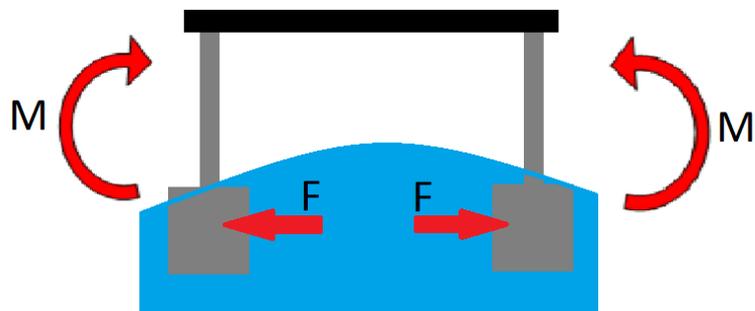
Figura 5 - Split In



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Por outro lado, quando as cristas de uma onda passam simultaneamente pelos pontões a variação da flutuação gera uma força que tende a separar os pontões (Figura 6), a qual também induz a flexão do convés.

Figura 6 - Split In



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Essa alternância de esforços fletores no convés provoca uma alteração nos campos de tração e compressão a cada passagem de onda; que podem levar a três modos de falhas estruturais: escoamento, flambagem e fadiga.

Usualmente são usados contraventamentos (ver Figura 7), entre colunas de maneira a reduzir o momento fletor atuante no convés. Em virtude da alternância entre as forças de aproximação e de separação, os contraventamentos podem falhar por escoamento devido a

altos níveis de tensões de tração ou de compressão, por flambagem (elevada compressão) ou ainda por fadiga (trincas propagadas pela alternância das tensões).

Figura 7 – Plataforma semi-submersível P-51 em construção



Fonte: Aquatec (2017)

2.2.2 Forças/Momento Torsional

Em determinadas situações, em que as ondas incidem a plataforma diagonalmente, a variação da flutuação em colunas alternadas induzem a torção da plataforma (Figura 8), provocando um momento torsor na estrutura do convés.

Figura 8 - Momento Torsional



Fonte: Tancredi (2004)

É importante observar que o momento torsor promove esforços de compressão e de tração nas colunas.

2.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Conforme os estudos apresentados por Callister (2007) os materiais que compõem as estruturas estão sujeitos a cargas quando estão em serviço. O conhecimento das características dos materiais se torna necessária a fim de prever e corrigir possíveis falhas estruturais.

Sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar a forma e o tamanho dele. Essas mudanças são denominadas deformações e podem ser altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas (Hibbeler, 2009).

No estudo de estruturas navais, as deformações são sempre consideradas pequenas, e a estrutura deformada se confunde com a estrutura indeformada (Augusto, 1987).

A resistência dos materiais depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Esta propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais (Hibbeler, 2009).

Um dos mais importantes testes são os ensaios de tração e compressão. Apesar de poder determinar diversas propriedades mecânicas com este teste, este procedimento é mais utilizado para determinar a relação entre tensão nominal média e deformação nominal média.

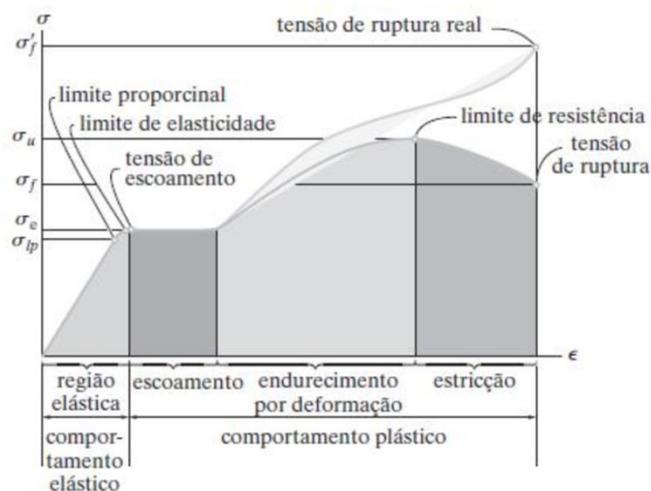
O ensaio de tração consiste em aplicar uma carga em um corpo de prova de determinado material. Sabendo do valor da carga aplicada e as dimensões do corpo de prova a tensão nominal (σ) pode ser calculada com a relação entre a carga aplicada (P) sobre a área de seção transversal (A) conforme a Equação 1. A deformação pode ser medida com extensômetros e sua deformação nominal (ϵ) pode ser calculada de acordo com a Equação 2,

sendo δ a deformação medida pelo extensômetro e L o comprimento original do corpo de prova. Com estes dois valores se contabilizam o valor da deformação à medida que se aumenta a força aplicada ao corpo de prova, permitindo a construção do diagrama tensão deformação (Figura 9).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 1}$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{Equação 2}$$

Figura 9 – Diagrama tensão deformação



Fonte: Hibbeler (2009)

Figura 9 exemplifica o diagrama tensão deformação de um material dúctil. Analisando este diagrama observa-se duas regiões essenciais para a análise estrutural: a região de comportamento elástico e a região de comportamento plástico.

O comportamento elástico de um material tem como característica a conservação de suas propriedades mecânicas. Assim o material apresenta deformações elásticas, ou seja, o material deforma enquanto a carga é aplicada, no entanto ao ser retirada a carga o material tende a voltar à configuração original (não deformado). Para um material dúctil, como o aço, na maior parte da região a tensão apresenta uma relação proporcional a deformação, em outras palavras o material é linearmente elástico.

Quando o material é linearmente elástico, ou seja, possui uma proporcionalidade linear entre a tensão e a deformação, pode-se determinar uma constante que rege a proporção tensão/deformação, denominada de módulo de elasticidade do material.

O módulo de elasticidade pode ser definido como a resistência do material ao se deformar e também é conhecido como módulo de Young. Pode ser calculado através da relação tensão deformação como mostrado na equação 3.

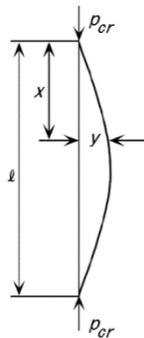
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Equação 3}$$

O comportamento plástico do material tem seu início quando a tensão do material ultrapassa o limite de elasticidade, ocorrendo assim o escoamento do material. A esta tensão limite é dada o nome de tensão de escoamento. Quando o material escoar ele muda de propriedades mecânicas e suas deformações se tornam definitivas, ou seja, mesmo com retirada da carga o material não retorna ao seu tamanho original.

2.4 Flambagem

Flambagem é o nome dado ao modo de falha da estrutura causada pela flexão transversal das estruturas decorrente de uma compressão axial. Este fenômeno é considerado uma instabilidade elástica, desta forma a estrutura pode perder sua estabilidade sem que o material tenha atingido sua tensão de escoamento.

Figura 10 – Viga sobre compressão



Fonte: Okumoto, Y.

A Figura 10 apresenta uma viga com extremidades livre sujeita à compressão, sendo P_{cr} a carga crítica de flambagem. Assim o momento fletor interno deve ser igual ao produto de $P_{cr} * y$, conforme apresentado pela Equação 4. Sendo I o momento de inercia, E o módulo de elasticidade do material.

$$-E * I * \frac{d^2y}{dx^2} = P_{cr} * y \quad \text{ou} \quad \frac{d^2y}{dx^2} + \left(\frac{P_{cr}}{E * I}\right) * y = 0 \quad \text{Equação 4}$$

A resolução desta equação diferencial homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes pode ser obtida através de métodos de diferenciação de equações ou por substituição direta, tendo assim a solução geral de acordo com a Equação 5.

$$y = C_1 * \text{sen} \left(\sqrt{\frac{P_{cr}}{E * I}} * x \right) + C_2 * \text{cos} \left(\sqrt{\frac{P_{cr}}{E * I}} * x \right) \quad \text{Equação 5}$$

As duas constantes de integração são determinadas pelas condições de contorno, sabe-se que como a aplicação da carga é de forma concêntrica então $y = 0$ quando $x = 0$, logo C_2 tem valor nulo. De forma semelhante, a Equação 6 é determinada quando $x = \ell$, $y = 0$. Tendo em vista que ambas as constantes não podem assumir um valor nulo, a solução da Equação 6 deve ser dada pela Equação 7, que só poderá ser satisfeita se estiver de acordo com a Equação 8.

$$0 = C_1 * \text{sen} \left(\sqrt{\frac{P_{cr}}{E * I}} * \ell \right) \quad \text{Equação 6}$$

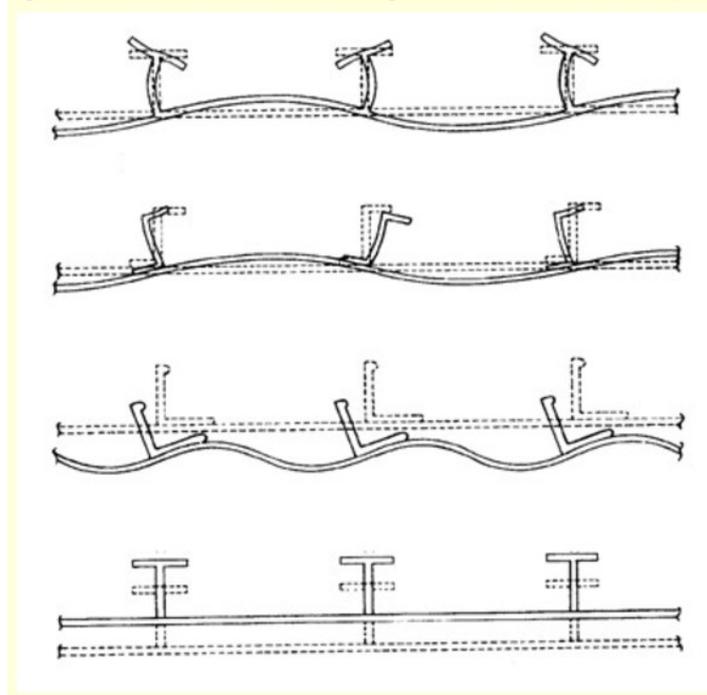
$$\text{sen} \left(\sqrt{\frac{P_{cr}}{E * I}} * \ell \right) = 0 \quad \text{Equação 7}$$

$$\sqrt{\frac{P_{cr}}{E * I}} * \ell = n * \pi \quad \text{Equação 8}$$

$$P_{cr} = \frac{n^2 * \pi^2 * E * I}{l^2} \quad \text{Equação 9}$$

Os cálculos apresentados acima determinam a carga crítica de uma viga sobre compressão. Analisando a Equação 9 pode-se observar a incógnita n que representa os inúmeros modos de flambagem que a viga pode assumir. Alguns modos de flambagem são representados pela Figura 11.

Figura 11 – Modos de Flambagem em Painéis Reforçados



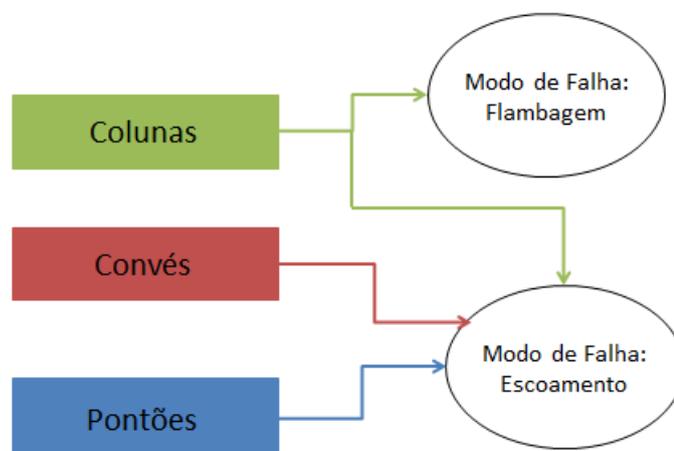
Fonte: Estabilidade de Estruturas (2017)

3. DESENVOLVIMENTO

A fim de compreender o comportamento das tensões associadas à geometria de uma plataforma semissubmersível este presente trabalho tem como objetivo realizar o projeto de uma plataforma típica por meio da aplicação da norma ABS (2016) além de realizar a análise das tensões oriundas dos carregamentos operacionais por meio da aplicação do método dos elementos finitos.

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento realizado utilizando a plataforma GVA 4000 como caso de estudo. Tendo em vista que os possíveis modos de falha de cada elemento da estrutura conforme a Figura 12.

Figura 12 – Modos de falha em referencia aos elementos estruturais da plataforma



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A GVA 4000 (GARCIA, 2014) é uma estrutura offshore semissubmersível composta por um convés, quatro colunas e dois pontões. Construída na Suécia, ela foi projetada para perfurações no norte do oceano atlântico sobre condições ambientais severas, sendo capaz de operar em águas de até 460 metros de profundidade. As dimensões principais utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

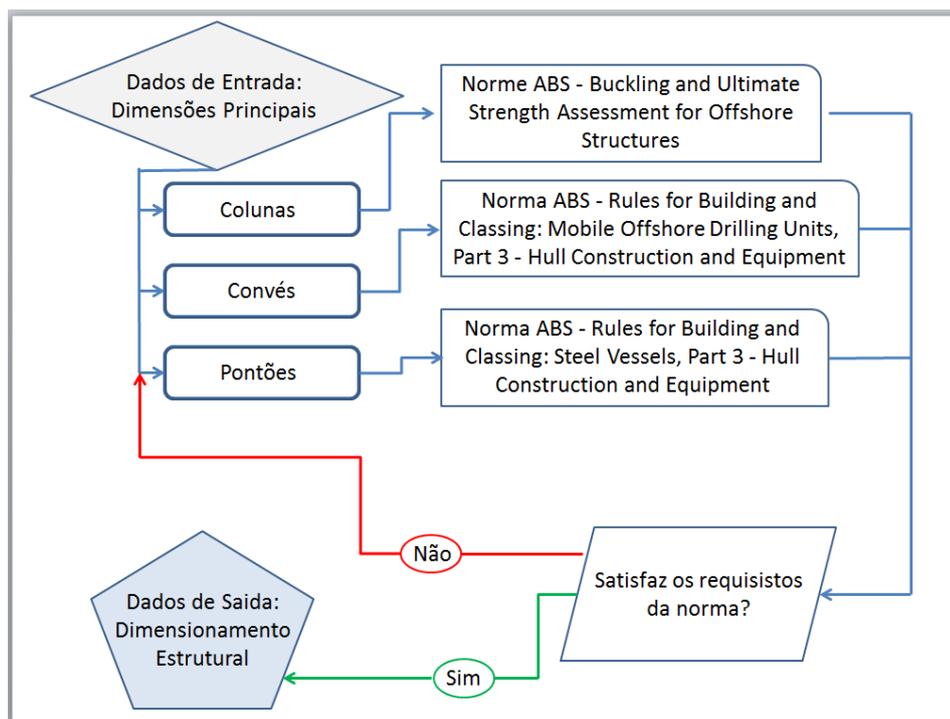
Tabela 1 - Dimensões Principais GVA 4000

Dimensões Principais	
Comprimento Total	85,60 m
Largura Total	76,80 m
Espaçamento entre o centro das Colunas	54,72 m
Altura desde a quilha até o Convés Superior	41,00 m
Altura desde a quilha até o Convés Inferior	33,00 m
Comprimento dos Flutuadores	85,60 m
Largura dos Flutuadores	16,00 m
Altura dos Flutuadores	7,50 m
Diâmetro das Colunas	12,90 m
Calado em Operação	20,50 m
Deslocamento em Operação	25310 m ³

Fonte: GARCIA (2014)

A aplicação da norma ABS para determinar as dimensões estruturais é um processo iterativo onde o projetista deve impor medidas ao projeto e analisar os resultados, observando se o mesmo está de acordo com a norma. O fluxograma representado na Figura 13 mostra este processo iterativo.

Figura 13 – Fluxograma do processo de determinação do dimensionamento estrutural



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para os pontões, algumas das variáveis como espaçamentos entre reforçadores e anteparas são estipulados pelo projetista, no entanto esta distância impacta diretamente no dimensionamento dos elementos estruturais, em especial o módulo da seção mestra dos pontões.

O módulo de seção por sua vez tem um limitante estipulado pela norma, o módulo de seção requerido. Assim, quanto maior for a distância entre os reforçadores, menor será a quantidade destes, diminuindo assim o módulo de seção. Por outro lado se a distância for pequena, a quantidade de reforçadores aumenta, juntamente com o módulo de seção. Entretanto, problemas com peso estrutural e de custos devem ser levados em conta para que não torne o projeto inviável.

No caso do projeto estrutural das colunas, a norma apresenta intervalos onde os cálculos das tensões associadas aos modos de flambagem devem ser verificados. De forma

semelhante aos pontões, essas tensões estão diretamente ligas as distâncias entre reforçadores longitudinais e radiais, assim como suas dimensões.

Para a aplicação da norma ABS, foi desenvolvida uma planilha eletrônica no programa Excel, que permite dimensionar os elementos estruturais a partir das dimensões da plataforma e das variáveis de projeto por meio das equações da norma descritas no capítulo 3.4. Nesse processo iterativo, as variáveis de projeto são ajustadas até que se chegue a uma solução que atenda aos requisitos de projeto.

3.1 Dimensionamento Estrutural do Convés

A partir das dimensões principais da plataforma GVA 4000 e das variáveis descritas na Tabela 2, seguindo as equações apresentadas na seção de Norma e Regulamentos deste trabalho, o programa Excel retorna as espessuras do chapeamento e o dimensionamento dos reforçadores do convés, cujos valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2 - Dados de Entrada para o Convés

Convés		Comentarios	
Dados gerais	$S_{Ref. Leve - Convés}$	1500 mm	Espaçamento entre Reforçadores Transversais do Convés
	$S_{Ref. Pesado - Convés}$	3000 mm	Espaçamento entre Reforçadores Longitudinais do Convés
	$H_{duplo-Convés}$	8 m	Altura do chapeamento duplo
	$P_{carreg. de projeto}$	37768,19 N/m ²	Carregamento de projeto
	Y	235 N/mm ²	Tensão de escoamento do material utilizado
	B	76,8 m	Boca
	L	85,6 m	Comprimento
	ρ	1000 kg/m ³	Densidade da água
Antepara	$S_{antepara}$	3,5 m	Espaçamento entre reforçadores da antepara
	$S_{antep. Transversal}$	6 m	Distância entre anteparas transversais
	$S_{antep. Longitudinal}$	6 m	Distância entre anteparas longitudinais

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tabela 3 - Dados de Saída do Convés

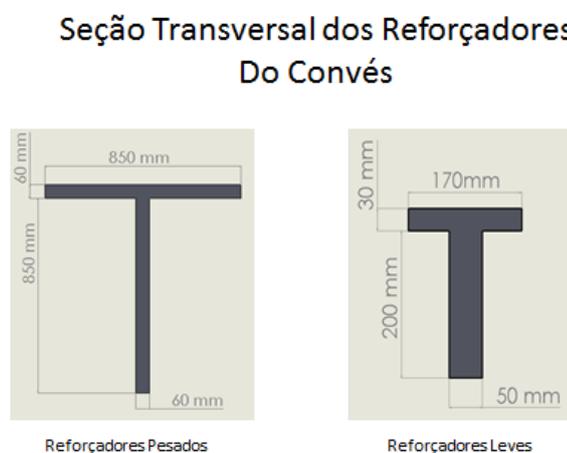
Convés	
SM - Ref. Leve - entre tanques	561,6 cm ³
SM - Ref. Leve	336,96 cm ³
SM - Ref. Pesado - entre tanques	12286,08 cm ³
SM - Ref. Pesado	8190,72 cm ³
$t_{Convés - armazenamento}$	15,04 mm
$t_{Convés - Tanques}$	19,20 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A fim de obter um arranjo estrutural mais robusto todo o convés foi configurado como sendo destinado ao armazenamento de produtos e insumos. Assim, as espessuras e módulos de seção apresentam configuração destinada a tanques.

A seção transversal dos reforçadores pesados e leves selecionados para o projeto são mostradas na Figura 14. As anteparas possuem dois reforçadores leves e um pesado, seguindo o mesmo modulo de seção proposto na tabela 3.

Figura 14 – Seção Transversal dos Reforçadores do Convés



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

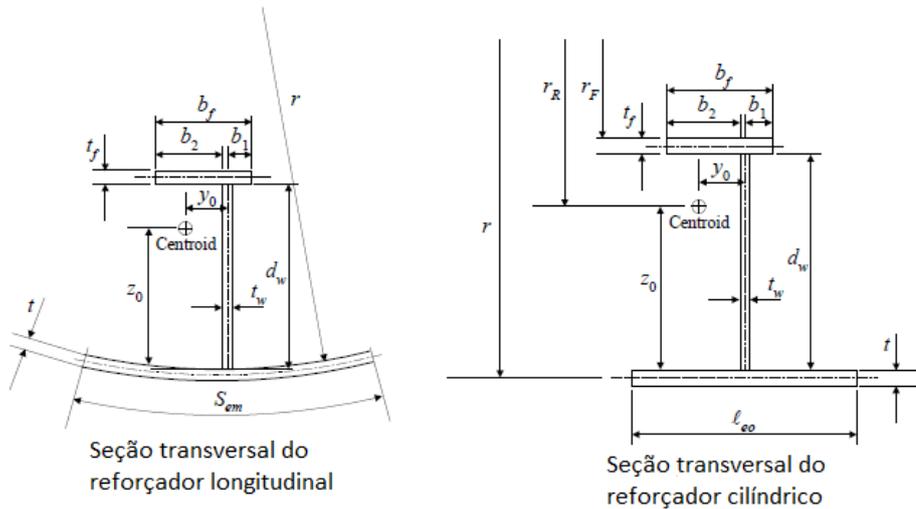
3.2 Dimensionamento Estrutural da Coluna

As colunas da plataforma devem seguir as equações prescritas na norma referente aos modos de flambagem. Diferente dos projetos do convés e dos pontões, no caso das colunas a norma apresenta limites de tensões associados aos diferentes modos de flambagem. Para tal é necessário obter uma estrutura com todas as dimensões definidas e só então é efetuado os cálculos de tensão impostos pela norma. Assim, na rotina do Excel elaborada, a partir do dimensionamento dos reforçadores e das distâncias entre os mesmos, é verificada, para cada modo de flambagem definido pela norma, se a estrutura está dentro dos limites estipulados pela norma. A Tabela 4 apresenta os dados de entrada para a execução da rotina elaborada. A nomenclatura dos parâmetros geométricos da secção transversal dos reforçadores longitudinais (stringer²) e radiais (ring³) é mostrada na

² Stringer são as estruturas que reforçam as colunas da sua base ao topo, sendo traduzido como reforçadores longitudinais.

Figura 15.

Figura 15 – Incógnitas da Seção transversal dos reforçadores da coluna



Fonte: ABS (2016)

Tabela 4 - Dados de Entrada da Coluna

Coluna		Comentarios	
Dados gerais	σ_0	23500 N/cm ²	Tensão de escoamento do material utilizado
	E	20600000 N/cm ²	Módulo de Elasticidade do materia
	ν	0,3	Coefficiente de Poisson
	r	645,00 cm	Raio externo da coluna
	t	6,00 cm	Espessura da chapa cilíndrica
	L	2550,00 cm	Altura das colunas
	s	80,00 cm	distância entre reforçadores longitudinal
Reforçador cilíndrico (Ring Stiffeners)	t_w -radial	3,00 cm	Espessura alma
	d_w -radial	80,00 cm	Comprimento alma
	t_f -radial	2,00 cm	Espessura flange
	b_1 -radial	20 cm	Parte do comprimento da flange
	b_2 -radial	20 cm	Parte do comprimento da flange
Reforçador Longitudinal (Stringer Stiffeners)	t_w -longitudinal	5,00 cm	Espessura alma
	d_w -longitudinal	90,00 cm	Comprimento da alma
	t_f -longitudinal	2,00 cm	Espessura flange
	b_1 -longitudinal	30 cm	Parte do comprimento da flange
	b_2 -longitudinal	30 cm	Parte do comprimento da flange

Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

Seguindo as equações descritas no apêndice C, na Tabela 5 são mostradas as espessuras da chapa cilíndrica e o dimensionamento dos reforçadores longitudinais e radiais

³ Rings são estruturas que reforçam a coluna ao longo do seu raio, traduzido como reforçadores radiais.

que compõe a estrutura das colunas da plataforma em projeto; além da verificação do projeto de acordo com a norma utilizada. O dimensionamento do reforçador longitudinal e radial é ilustrado pela Figura 16.

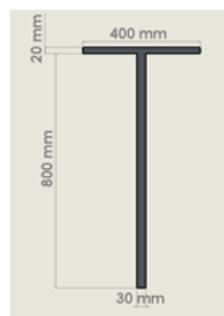
Tabela 5 - Dados de Saída da Coluna

Colunas		Comentários
r	645,00 cm	Raio externo da coluna
t	6,00 cm	Espessura da chapa cilíndrica
L	2550,00 cm	Altura das colunas
s	80,00 cm	distância entre reforçadores longitudinal
ℓ	251,00 cm	Distância entre reforçadores transversais
tw-radial	3,00 cm	Espessura alma
dw-radial	80,00 cm	Comprimento alma
tf-radial	2,00 cm	Espessura flange
b1-radial	20 cm	Parte do comprimento da flange
b2-radial	20 cm	Parte do comprimento da flange
tw-longitudinal	5,00 cm	Espessura alma
dw-longitudinal	90,00 cm	Comprimento da alma
tf-longitudinal	2,00 cm	Espessura flange
b1-longitudinal	30 cm	Parte do comprimento da flange
b2-longitudinal	30 cm	Parte do comprimento da flange
Modos de Flambagem		Satisfaz a Norma?
Flambagem Local		Sim
Flambagem entre Vãos		Sim
Flambagem Geral		Sim

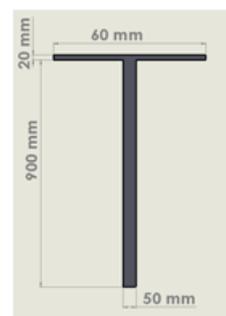
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 16 – Seção Transversal dos Reforçadores da Coluna

Seção Transversal dos Reforçadores Da Coluna



Reforçadores Radiais



Reforçadores Longitudinais

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.3 Dimensionamento Estrutural dos Pontões

Os pontões tiveram o dimensionamento estrutural efetuado de forma semelhante ao dimensionamento do convés da plataforma. Assim conforme as equações obtidas no apêndice E, a Tabela 6 é composta por dados de entrada para a rotina proposta, tendo como saída a Tabela 7 que apresenta os módulos de seção dos reforçadores e as espessuras do chapeamento dos elementos da estrutura dos pontões.

Tabela 6 - Dados de entrada do Pontão

Potoon		Comentários
distancia entre Anteparas	8,00 m	Reforçadores Pesados Transversais
distancia entre cavernas	1,00 m	Reforçadores Leves Transversais
distancia entre reforçadores pesados	4,00 m	Reforçadores Pesados Longitudinais
distancia entre reforçadores leves	1,33 m	Reforçadores Leves Longitudinais
Cb	1,00	Coefficiente de bloco
distância entre convés	3,75 m	
a	16,00 m	Largura do flutuador
b	7,50 m	Altura do flutuador
L	85,60 m	Comprimento do Flutuador

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tabela 7 - Dados de Saída do Pontão

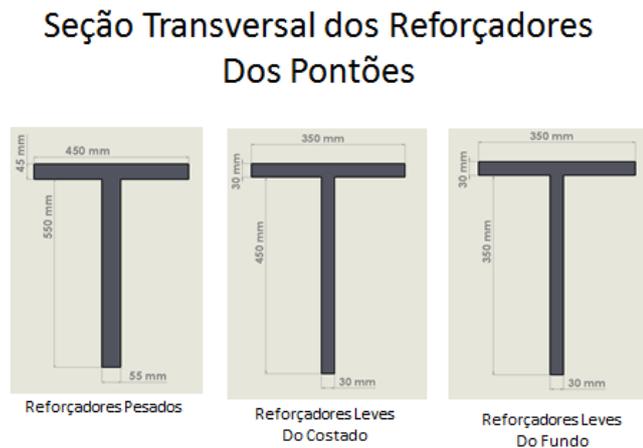
Potoon		Comentários
distancia entre Anteparas	8,00 m	Reforçadores Pesados Transversais
distancia entre cavernas	1,00 m	Reforçadores Leves Transversais
distancia entre reforçadores pesados	4,00 m	Reforçadores Pesados Longitudinais
distancia entre reforçadores leves	1,33 m	Reforçadores Leves Longitudinais
Espessuras	t(costado)	40,95 mm
	t(topo)	33,19 mm
	t(fundo)	41,04 mm
	t(convés)	16,43 mm
Módulo de Seção	SM(fundo)	1622,40 cm ³
	SM(quilha)	4434,56 cm ³
	SM(convés)	1248,00 cm ³
	SM(costado)	976,90 cm ³

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O arranjo estrutural dos pontões teve o projeto efetuado para promover uma configuração robusta, semelhante ao realizado com o convés, assim as chapas e os reforçadores do topo dos pontões tiveram o mesmo dimensionamento do fundo dos pontões.

Para o costado dos pontões, os reforçadores leves apresentam os mesmos valores dos reforçadores do fundo. Todos os reforçadores pesados do flutuador assumiram a mesma configuração dos reforçadores pesados do fundo dos pontões. Assim a Figura 17 apresenta as seções transversais dos reforçadores pesados, leves do costado e leves do fundo, respectivamente.

Figura 17 – Seção transversal dos Reforçadores dos Pontões



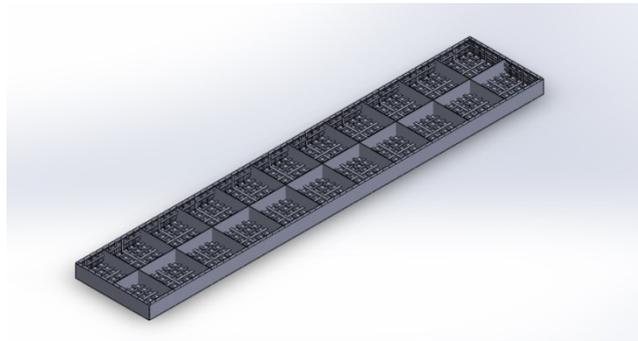
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.4 Modelagem no Programa CAD

O programa Solidworks é um programa CAD (*Computer Aided Design*) com reconhecida robustez e que oferece ferramentas que permitem criar, simular, analisar e gerenciar dados. Desta maneira, a partir das dimensões principais, do dimensionamento estrutural obtido pela norma ABS e utilizando os recursos desse programa, a estrutura da plataforma pode ser modelada computacionalmente.

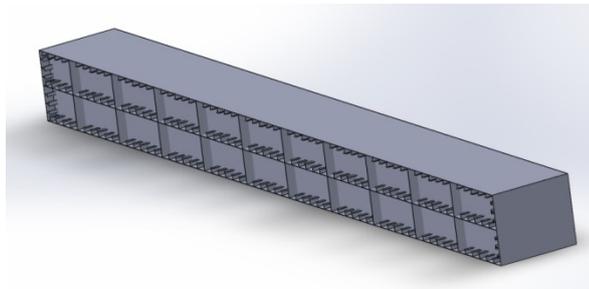
Os pontões foram modelados com um coeficiente de bloco igual a 1, possuindo uma forma de paralelepípedo, assumindo as dimensões principais estabelecidas pelo projeto da plataforma GVA 4000, com a seção mestra estabelecida pela norma constante ao longo de seu comprimento. A Figura 18 e Figura 19 apresentam um corte horizontal e longitudinal, respectivamente, da modelagem feita de um dos pontões incluindo as anteparas longitudinais e transversais assim como os reforçadores leves e pesados tanto na direção longitudinal, quanto na direção transversal, que junto com as chapas constituem a estrutura de grelha chapeada. A Figura 20 apresenta a seção mestra de um dos pontões em um corte transversal.

Figura 18 – Corte Horizontal do Flutuador



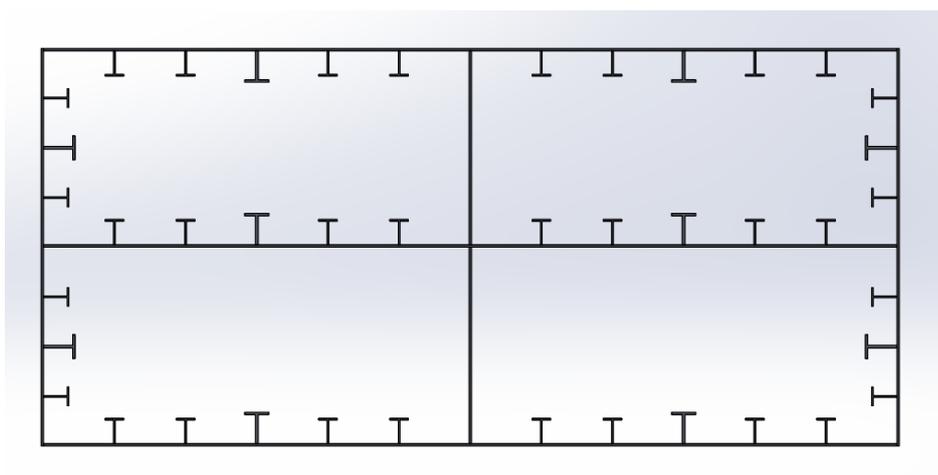
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017)

Figura 19 – Corte Longitudinal do Flutuador



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017)

Figura 20 - Corte transversal do Flutuador



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017)

A coluna (figura 21) teve a modelagem descrita anteriormente. Da mesma forma que os pontões, a coluna apresenta onze reforçadores radiais e quarenta e sete reforçadores

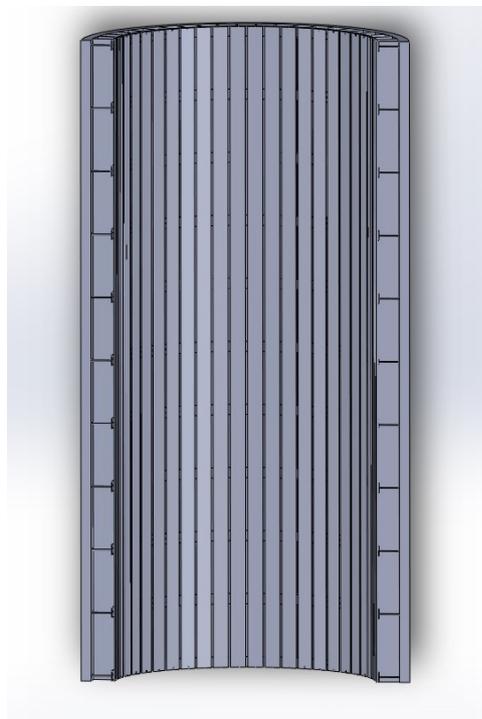
longitudinais, formando a grelha chapeada para cada uma das colunas. As figuras 22 e 23 apresentam cortes da coluna para melhor visualização dos reforçadores.

Figura 21 - Coluna



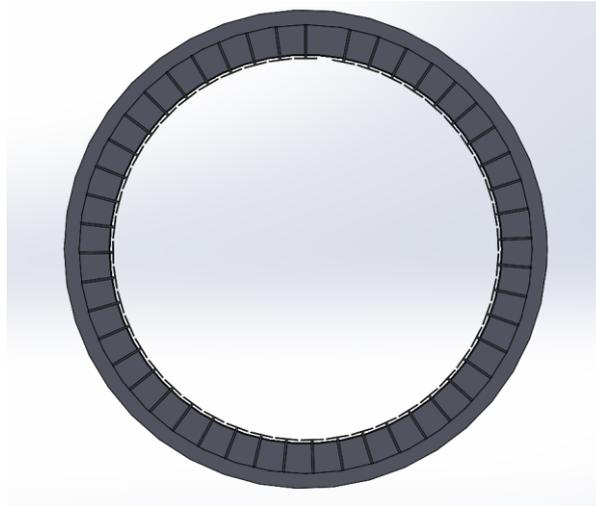
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 22 - Corte longitudinal da coluna



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 23 - Corte Transversal da Coluna



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A modelagem estrutural do convés obteve o mesmo procedimento dos demais componentes da plataforma. Apresentando estrutura semelhante ao dos pontões, o convés possui reforçadores em seu costado assim como no topo e no seu fundo.

Os reforçadores leves (beams⁴) e pesados (grider⁵) apresentam dimensões iguais no costado, fundo e topo. Esta estratégia foi elaborada com a finalidade de reduzir custos de fabricação e de modelagem, e justificada pelo fato dos módulos de seção apresentarem valores próximos entre si.

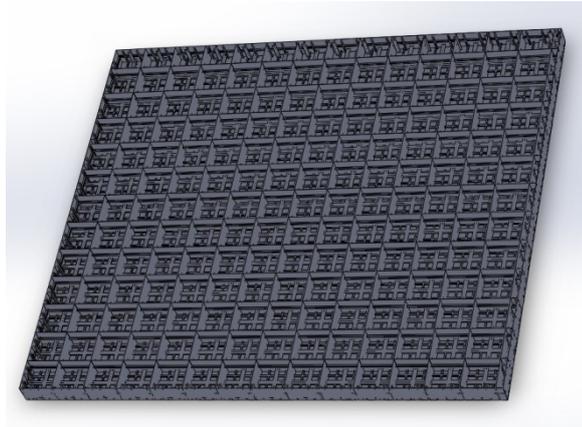
Nota-se uma estrutura similar à dos pontões, porém com reforçadores nas direções longitudinal e transversal em todos os componentes do convés, tendo como diferença a adição de reforçadores nas anteparas.

Na Figura 24 e na Figura 25 são mostrados o corte horizontal e longitudinal, visando a melhor visualização da estrutura do convés. Sendo uma estrutura com dimensões longitudinais e transversais muito próximas o arranjo estrutural do convés apresenta forma semelhante tanto longitudinalmente como transversalmente. A plataforma completa pode ser visualizada na figura 26.

⁴ Beams são os reforçadores leves do convés.

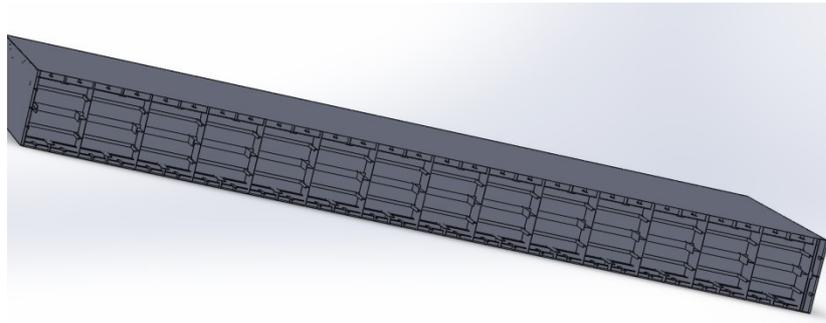
⁵ Grider são os reforçadores pesados do convés.

Figura 24 - Corte superior do deck



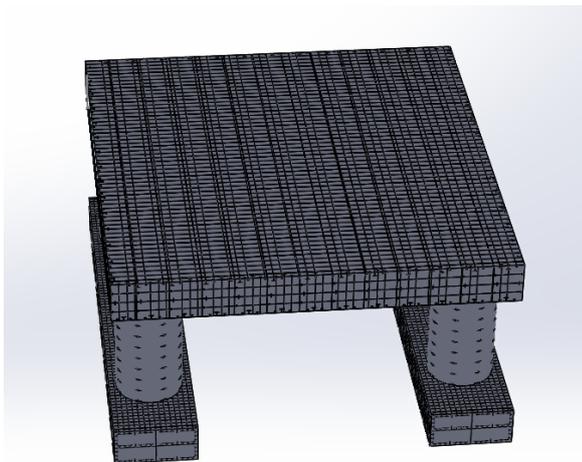
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 25 - Corte direito do deck



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 26 - Plataforma semissubmersível



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.5 Simulação no Programa de Elementos Finitos

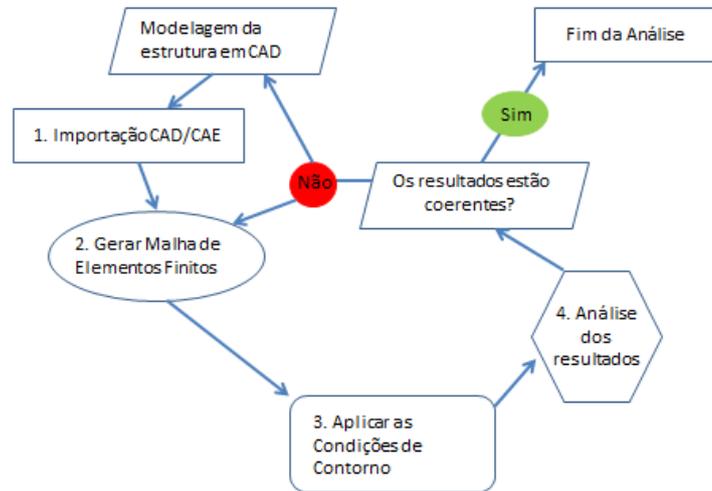
O comportamento das tensões associadas à plataforma, modelada anteriormente, foi analisada pelo programa Ansys. Este programa auxilia computacionalmente a engenharia (CAE – *Computer Aided Engineering*) de forma a resolver cálculos baseados no método de elementos finitos a fim de simular diversos problemas tais como: térmicos, estruturais, fluidos dinâmicos entre outros.

Conforme discutido na fundamentação teórica, para a simulação do estudo das tensões na plataforma é necessário informar ao programa dados sobre a geometria, condições de contorno, modelo de malha, tipo de análise de tensões, entre outros. Desta forma, a seguir são enumerados os tópicos para a apresentação dos dados de entrada para o programa de simulação.

1. Importação CAD/CAE: A primeira etapa a ser efetuada no estudo das tensões utilizando o Ansys é a importação da geometria modelada no Solidworks. Os dois programas utilizados neste estudo tem funções de modelagem (CAD) e de simulação (CAE) permitindo facilmente a troca de modelos geométricos.
2. Geração da malha de elementos finitos: Com a geometria importada e pronta para a análise, a etapa seguinte é a criação da malha de elementos finitos. Como citado anteriormente o programa computacional Ansys resolve os problemas de engenharia com base no método de elementos finitos, subdividindo a estrutura em elementos finitos formando a malha. O programa sugere um tamanho e o tipo de elemento a ser utilizado com base na complexidade da estrutura, cabendo ao usuário analisar se, e onde, é adequado utilizar o procedimento adotado pelo programa. Neste passo, um estudo de convergência de malha foi realizado e concluiu que os elementos triangulares de tensão linear, hexaedro quadrático e prisma triangular quadrático respondem de maneira coerente com o comportamento das tensões. Mesclando estes elementos com tamanho de 0,3 metros.
3. Aplicação dos carregamentos: Com base no deslocamento e nas dimensões estruturais da plataforma estudada foram efetuados os cálculos referentes aos carregamentos que atuam na estrutura. Com os cálculos realizados foram aplicadas as pressões correspondentes em cada área da estrutura, como pode ser observado no detalhamento de cada análise nos capítulos seguintes.

4. Análise de resultados: Após todas as etapas a geração dos resultados pode ser efetuada.

Figura 27 – Fluxograma do processo de simulação no Ansys



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.5.1 Análise Global

Um estudo global das tensões na estrutura foi o primeiro passo para a análise estrutural da plataforma. Assim a estrutura obteve uma modelagem em que todos os reforçadores foram incorporados em suas respectivas chapas, efetuando uma técnica de análise chamada chapa equivalente. Esta técnica tem como princípio simplificar a estrutura de forma a preservar a contribuição estrutural dos elementos que a compõe, preservando o comportamento global da estrutura em detrimento ao comportamento local.

Para o entendimento do cálculo da chapa equivalente é proposto um exemplo referente ao fundo dos pontões. Assim o volume da chapa com os reforçadores leves e pesados do fundo do pontão foi igualado ao volume da chapa equivalente. Como as dimensões principais da estrutura foram preservadas, somente a espessura da chapa equivalente é modificada. As equações Equação 10, Equação 11, Equação 12 e Equação 13 mostram o cálculo realizado para a determinação da espessura do exemplo proposto.

$$V_{total} = (A_{t. Chapa} + N_{Leve} * A_{t. Ref. leve} + N_{Pesado} * A_{t. Ref. Pesado}) * L \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

V_{total} = Volume total do fundo do flutuador

$A_{t. Chapa}$ = Área transversal da chapa do fundo do flutuador

$A_{t. Ref. Leve}$ = Área transversal do reforçador leve do fundo do flutuador

N_{Leve} = Número de reforçadores leves do fundo do flutuador

$A_{t. Ref. Pesado}$ = Área transversal do reforçador pesado do fundo do flutuador

N_{Pesado} = Número de reforçadores pesados do fundo do flutuador

L = Comprimento longitudinal do flutuador

$$V_{chapa eq.} = B * L * t_{chapa eq.} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$V_{chapa eq.}$ = Volume total da chapa equivalente do fundo do flutuador

B = Boca do flutuador

L = Comprimento longitudinal do flutuador

$t_{chapa eq.}$ = Espessura da chapa equivalente do fundo do flutuador

$$V_{chapa eq.} = V_{total} \quad \text{Equação 12}$$

$$t_{chapa eq.} = \frac{(A_{t. Chapa} + N_{Leve} * A_{t. Ref. leve} + N_{Pesado} * A_{t. Ref. Pesado}) * L}{B * L} \quad \text{Equação 13}$$

Este procedimento foi realizado para todas as partes de cada elemento da plataforma. A Tabela 8 apresenta as espessuras reais em comparação com a espessura da chapa equivalente de cada parte de cada elemento da plataforma.

Tabela 8 - Espessura Real x Espessura das Chapas Equivalentes

Espessuras Reais		Espessuras Chapas Equivalentes	
Flutuadores		Flutuadores	
t(costado)	40,95 mm	t(costado)	81,51 mm
t(topo)	41,04 mm	t(topo)	73,77 mm
t(fundo)	41,04 mm	t(fundo)	73,77 mm
t(convés)	41,04 mm	t(convés)	73,77 mm
Coluna		Coluna	
t(coluna)	60 mm	t(coluna)	127,00 mm
Deck		Deck	
t(costado)	19,20 mm	t(costado)	58,43 mm
t(topo)	19,20 mm	t(topo)	184,71 mm
t(fundo)	19,20 mm	t(fundo)	184,71 mm
Antepara - Deck		Antepara - Deck	
t(costado)	35,64 mm	t(costado)	52,09 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Em geral a modelagem de embarcações usando a técnica de elementos finitos apresenta dificuldades por se tratarem de estruturas livre-livre.

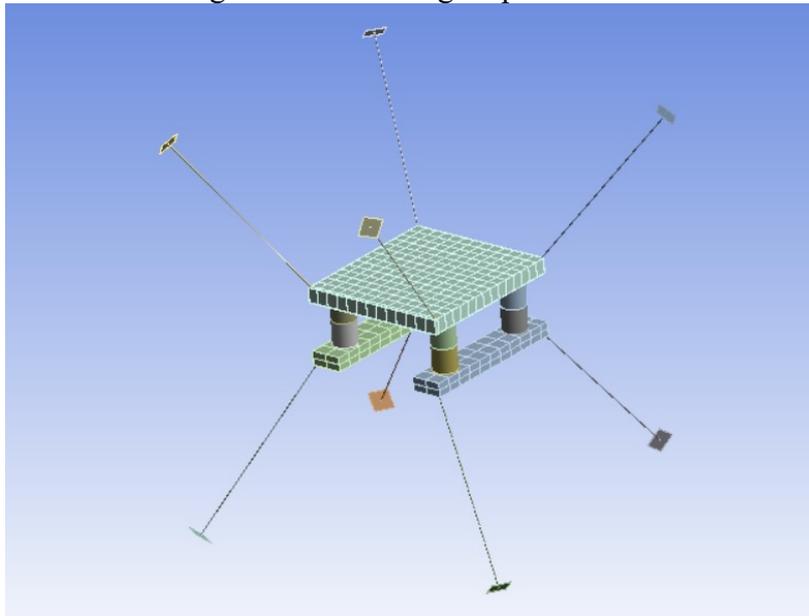
Este problema geralmente ocorre quando a estrutura modelada não possui vínculos, possibilitando a movimentação da estrutura como um corpo rígido. Com isso a condição de equilíbrio estático para a resolução do método de elementos finitos não é satisfeita, impossibilitando a resolução do modelo numérico.

O programa Ansys possui rotinas que automaticamente incorpora elementos a geometria para impedir problemas de corpo rígido, denominado de “molas fracas”, que permitem zerar resíduos numéricos na soma dos esforços, sem modificar os campos de tensão e deformação na estrutura. No entanto, para manter um maior controle na modelagem, para evitar problemas de movimento de corpo rígido na análise, foram adicionados cabos, de forma a fixar a plataforma pelas extremidades dos cabos. Os cabos foram modelados longos e finos, para que a rigidez da plataforma não sofra mudança significativa.

As forças atuantes na plataforma em mar calmo (sem a ação de ondas e de ventos) correspondem ao carregamento em operação e as forças de empuxo.

A geometria então modelada no Solidworks foi importada para o Ansys, com suas devidas modificações. Analisando a estrutura no programa Ansys observamos que os pontos de contato entre os elementos são reconhecidos como soldada (bonded), condizendo com a realidade. A Figura 28 representa a modelagem importada já com a estratégia de “molas fracas” modelada.

Figura 28 – Modelagem plataforma

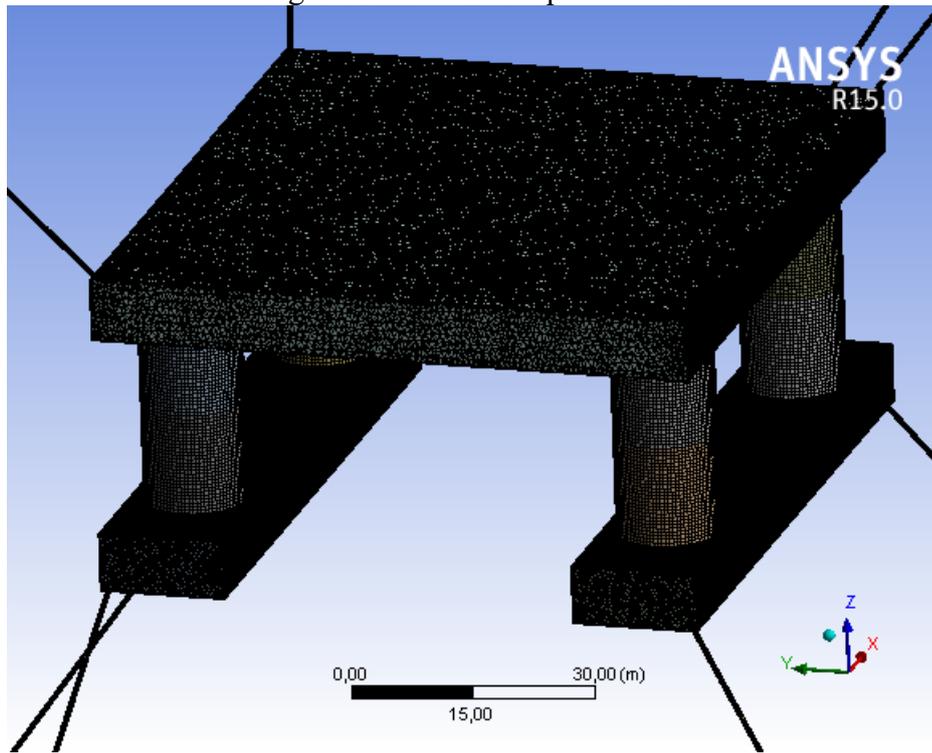


Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

Com a geometria importada, a geração de malha pode ser realizada seguindo a formulação do programa. Este procedimento auxilia o usuário indicando possíveis locais e tipos de elementos que podem ser utilizados na geometria importada, assim um estudo foi realizado modificando o tamanho e o tipo de elemento e determinando os melhores locais de aplicação para estes.

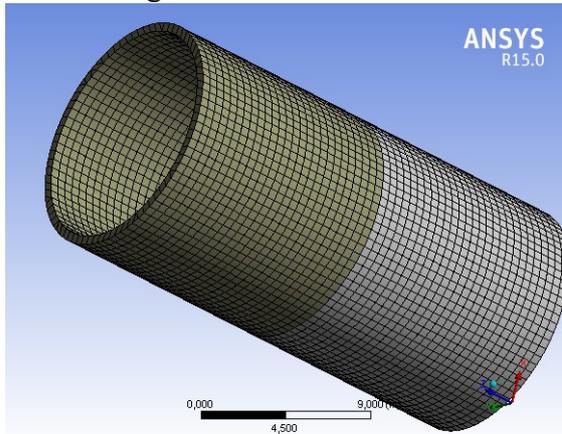
A escolha dos elementos foram o tetraedro de tensão linear, hexaedro quadrático e o prisma triangular quadrático, pois possuem função de forma com elevado grau representando os efeitos de tensão de forma coerente. O tamanho da malha escolhido foi 0,5 metros, pois de acordo com o estudo efetuado de convergência de malha, foram os que melhor se adequaram com a estrutura. Como os cabos apresentam uma dimensão muito menor que as dimensões da estrutura os elementos adotados para os cabos geravam erros de compatibilidade na geração da malha.

Figura 29 – Malha da plataforma



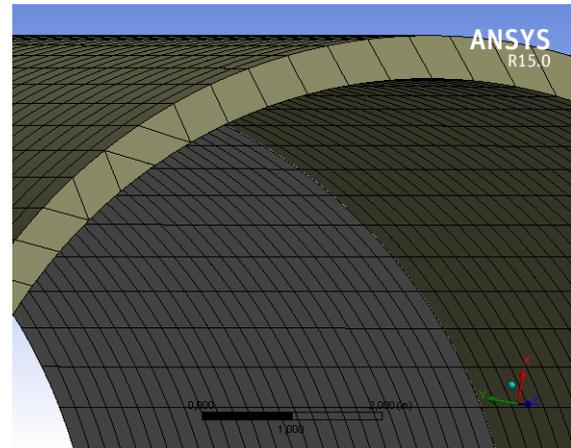
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 30 – Malha coluna



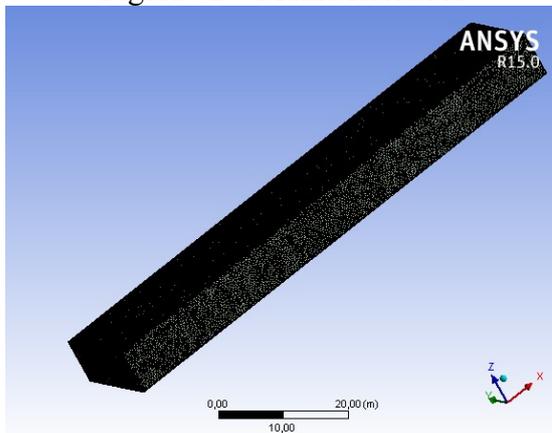
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 31 – Malha coluna, visualização dos elementos



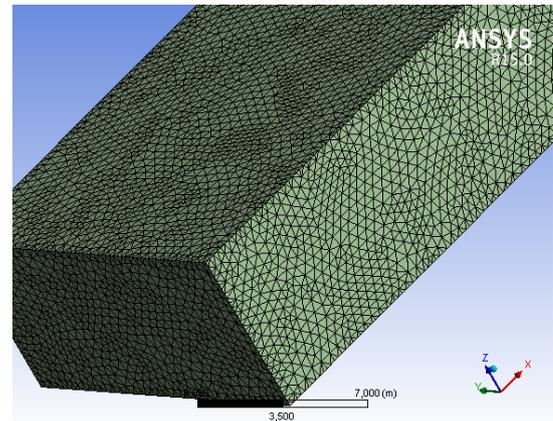
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 32 – Malha flutuador



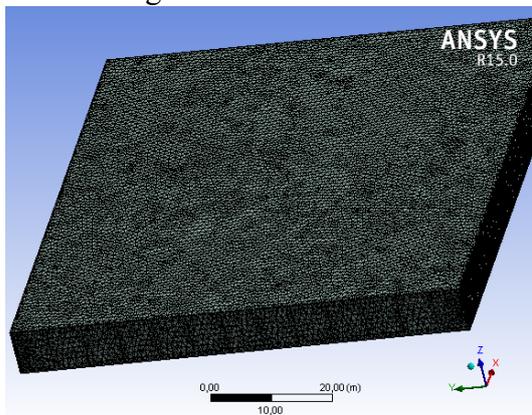
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 33 – Malha flutuador, visualização dos elementos



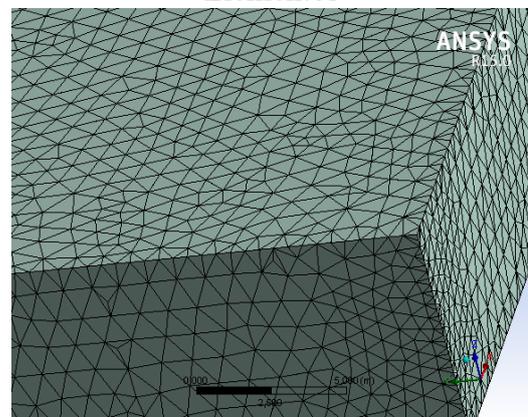
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 34 – Malha deck



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 35 – Malha deck, visualização dos Elementos



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Seguindo com o processo da análise estrutural, é necessário aplicar as condições de contorno de acordo com a operação da plataforma. Conhecendo o calado e o deslocamento

quando a plataforma encontra-se em operação é efetuado o cálculo de forma a igualar a força exercida pelo deslocamento com o empuxo gerado pela parte submersa da plataforma.

Com a finalidade de simplificar e tornar a análise mais conservadora foi determinado um modelo assumindo uma força de empuxo constante em todo o costado do pontão e igual à pressão exercida no fundo. Da mesma forma, a pressão exercida nas colunas foi adotada como uma constante de maneira a ser igual a aquela observada no topo do pontão. Este modelo de análise se justifica visto que a força de empuxo é proporcional à profundidade, tornando assim o modelo conservador, pois foi adotada a maior pressão dentro das limitações geométricas de cada componente.

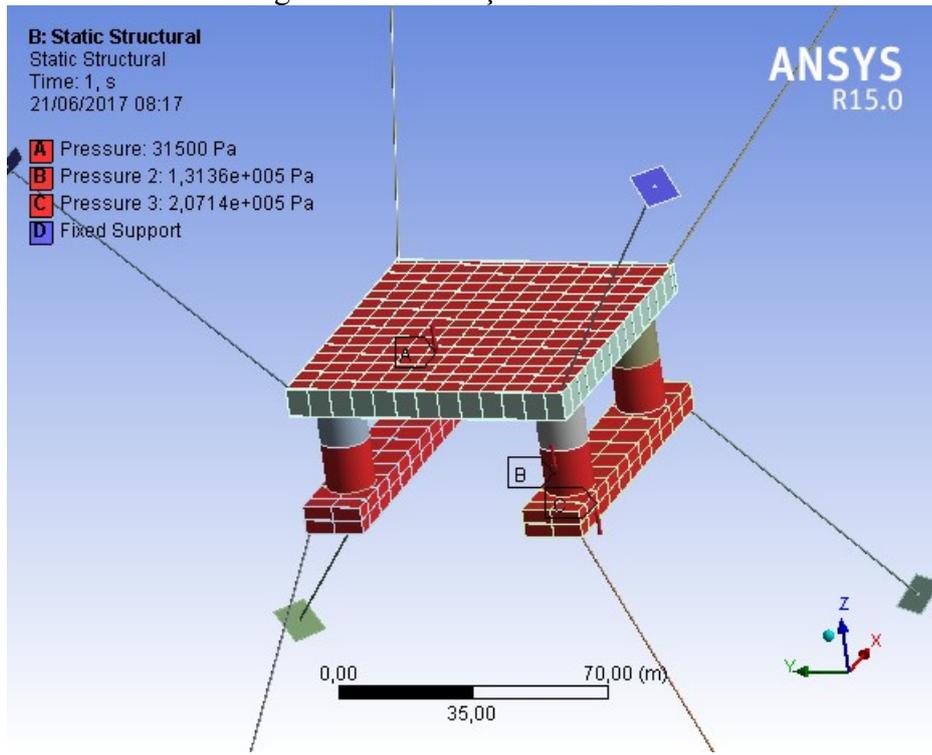
Sendo o calado em operação de 20,5 metros e a altura do pontão igual a 7,5 metros, tem-se 13 metros de coluna submersos. Seguindo a Equação 14 obteve-se uma pressão de empuxo agindo normal ao fundo do pontão igual a 207,14 kPa, para uma profundidade de 20,5 metros, e uma pressão no topo do pontão de 131,35 kPa para uma profundidade de 13 metros.

$$F_{empuxo} = \rho * g * h \quad \text{Equação 14}$$

O deslocamento em operação dado nas dimensões principais foi dividido pela área do convés. Sendo assim, obteve-se uma pressão atuando na área superior do convés com um valor de 31,5 kPa, correspondendo ao peso da planta de processos.

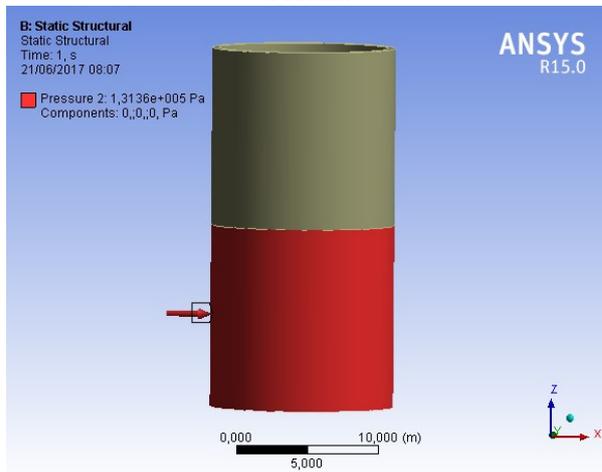
Nas extremidades livres dos cabos usados como “molas fracas” foram impostas restrições de movimento nos 6 graus de liberdade. A Figura 36 – Condições de contorno, Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40 representam a aplicação da condição de contorno nos elementos afetados da plataforma.

Figura 36 – Condições de contorno



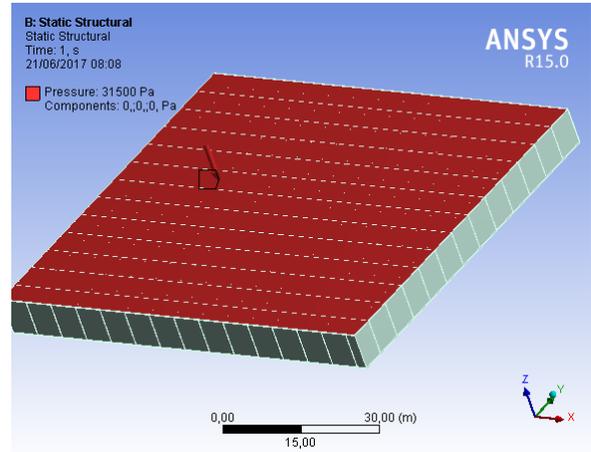
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 37 – Condição de Contorno aplicada na coluna



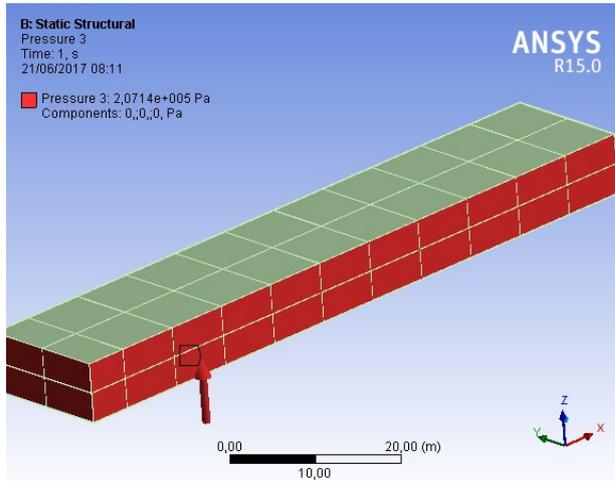
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 38 – Condição de contorno aplicada no deck



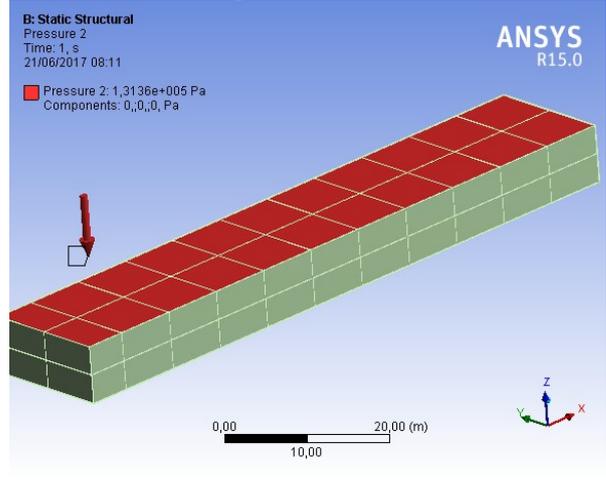
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 39 – Condição de Contorno aplicada no fundo do flutuador



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 40 – Condição de contorno aplicada no topo do flutuador

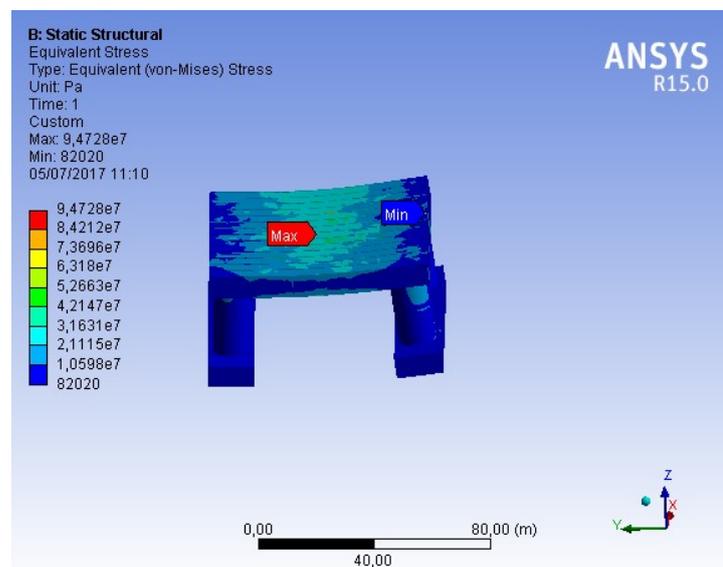


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Como etapa final foi determinada o tipo de análise em que a plotagem será realizada. O Ansys apresenta diversas opções de plotagem, tais como: deformação, tensão, tensão de von Mises, tensões principais, tensão normal, entre outras. Para este caso foi escolhido um estudo das tensões equivalentes de von Mises, pois de acordo com a literatura, é o critério que melhor se aplica à materiais dúcteis como o aço.

Assim, para atender ao limite de projeto, a tensão equivalente de von Mises deverá estar sempre abaixo do limite de escoamento do material. Na figura abaixo é mostrada a distribuição da tensão equivalente de von Mises obtida no modelo construído neste trabalho..

Figura 41 – Resultados relacionados à tensão equivalente de von Mises



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.5.2 Análise Local

No projeto estrutural a análise global apresenta o comportamento das tensões de forma geral, incorporando os reforçadores nas chapas utilizando a técnica de chapa equivalente para a análise. Neste item serão apresentadas as análises referentes aos campos de tensões locais, representando a influência de chapas e reforçadores ao longo da estrutura.

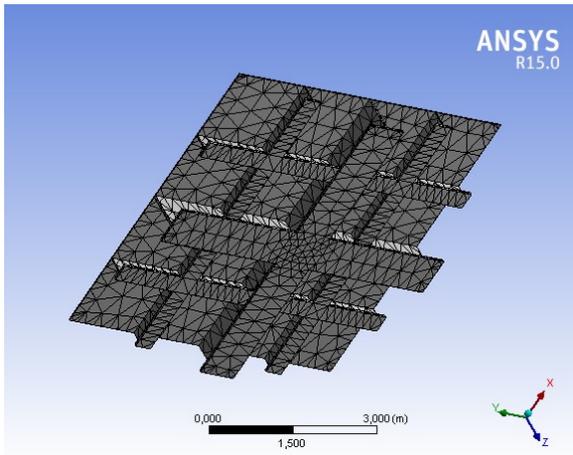
O modelo de análise começa de forma a separar uma seção entre anteparas de uma unidade de chapeamento. Conforme o carregamento aplicado, descrito na análise global, é analisado o comportamento das tensões na estrutura selecionada engastada nas suas extremidades.

A explicação de se modelar as unidades de chapeamento engastadas em suas extremidades se dá pelo fato de que a estrutura é considerada como contínua em sua totalidade, ou seja, as unidades de chapeamento são simétricas e não se separam. Confirmando assim a hipótese de rotação nula nos apoios (as anteparas).

A malha selecionada foi gerada conforme a Figura 42, e utilizou elementos do tipo Tetraedro de Tensão Linear com 300 mm em toda a geometria das unidades de chapeamento tanto do fundo do pontão como no topo do convés.

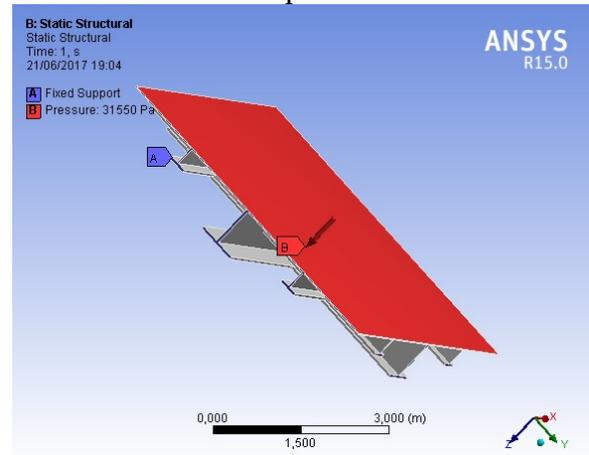
Desta forma foi modelada uma unidade de chapeamento do topo do convés e do fundo do pontão, aplicando a condição de engaste em suas extremidades e o mesmo carregamento usado na análise global.

Figura 42 – Malha, tensão secundária topo do convés



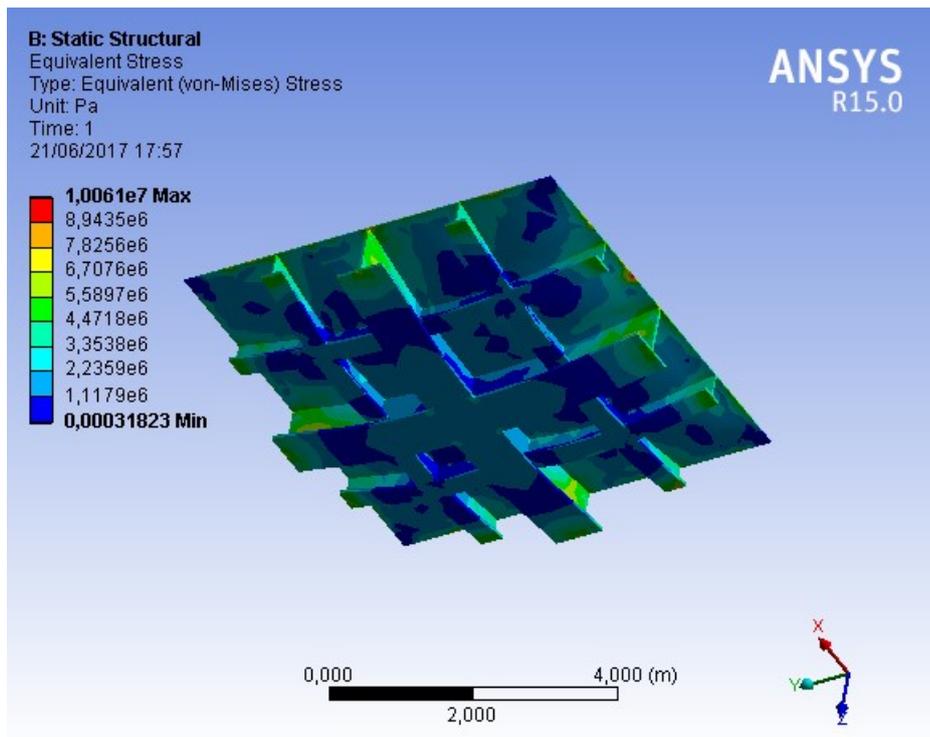
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 43 – Condição de contorno, análise local do topo do convés



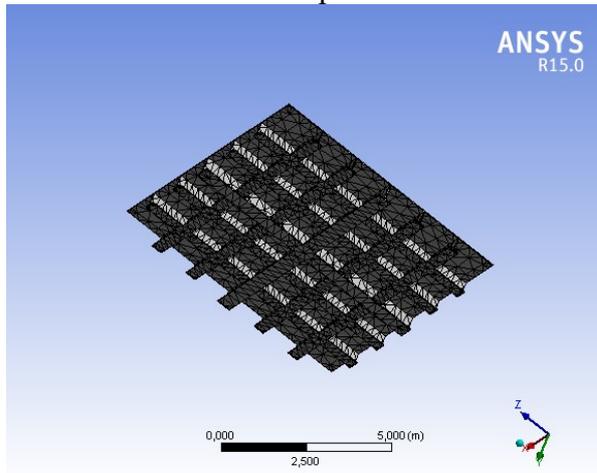
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 44 – Análise de tensão local no topo do convés



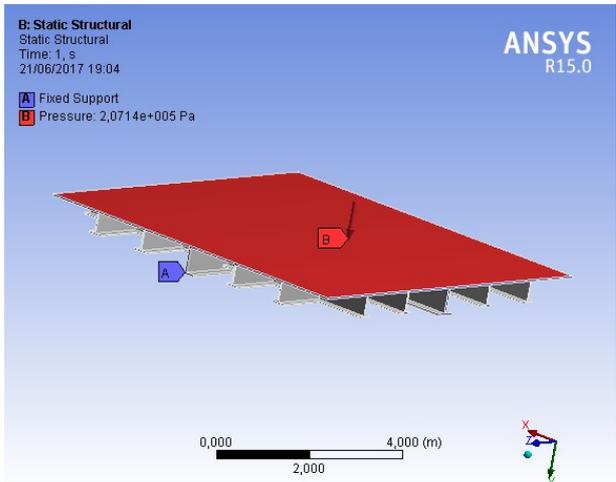
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 45 – Malha da tensão secundária do fundo do pontão



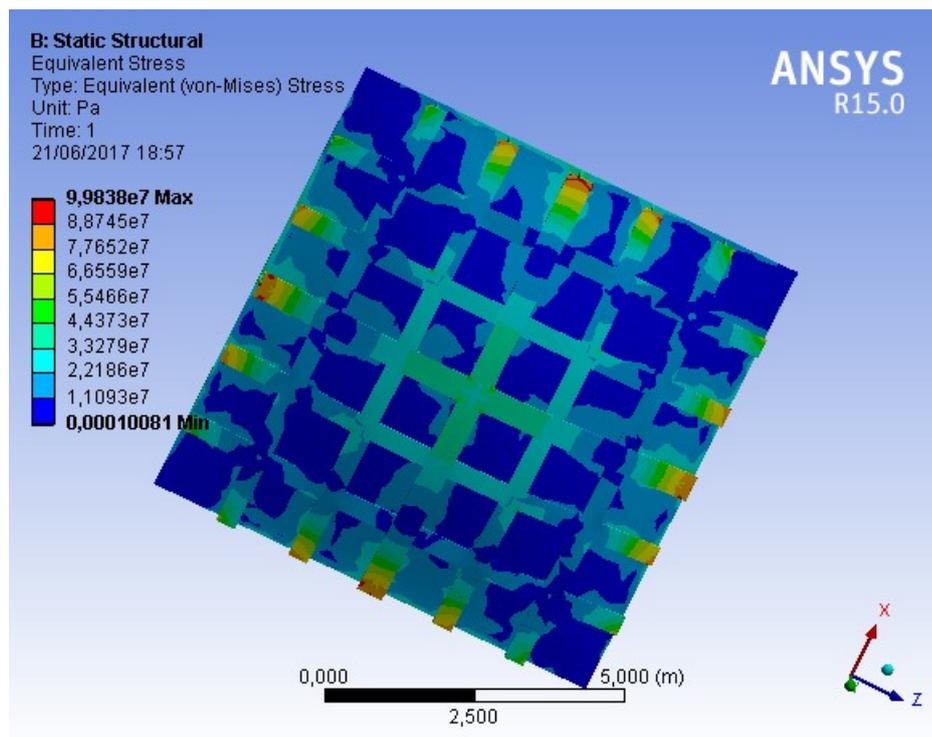
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 46 - Condições de contorno, análise local do fundo do Pontão



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 47 - Análise de tensão local em uma unidade de chapeamento do fundo do pontão



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.5.3 Análise de Flambagem

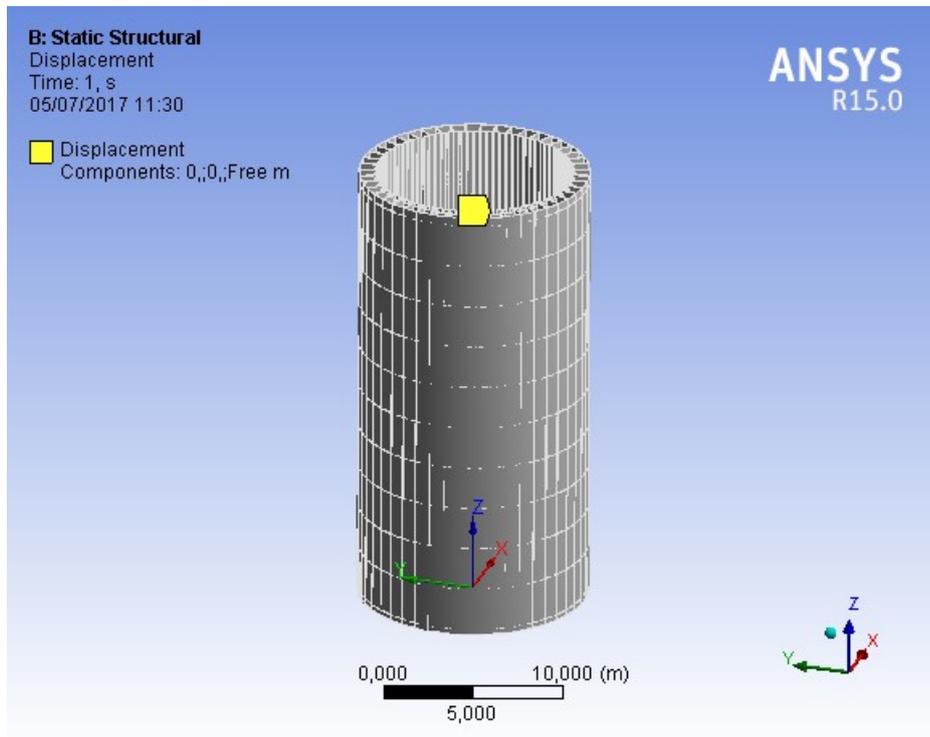
A geometria da coluna foi projetada de acordo com a norma ABS, cujo dimensionamento dos elementos estruturais da coluna são determinados a partir de equações que relacionam os possíveis modos de flambagem com os elementos da estrutura.

De forma a estabelecer um estudo no comportamento de flambagem e obter um parâmetro de qualidade para o modelo proposto foi realizada uma análise de flambagem usando o programa Ansys.

A análise de flambagem é abordada junto com a análise estrutural. Assim, coluna foi modelada separadamente da estrutura, aplicando os passos feitos na análise estrutural citado anteriormente e introduzindo ao processo a análise de Flambagem Linear (Linear Buckling).

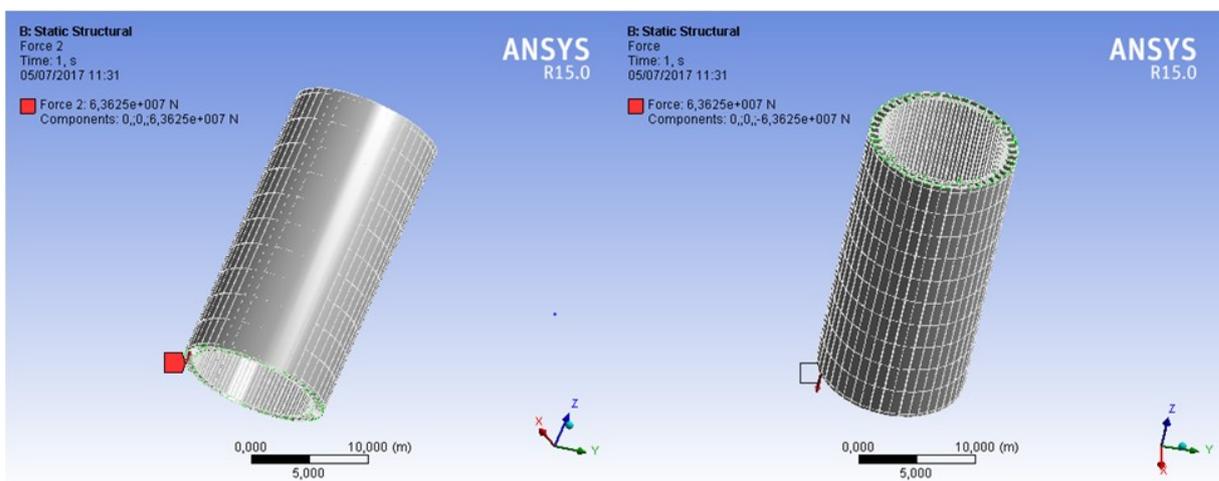
As condições de contorno foram determinadas de acordo com a aplicação do carregamento em operação da plataforma, desta forma o carregamento foi dividido entre as quatro colunas da plataforma. A força que o carregamento de 25942 toneladas exerce no topo do deck da plataforma foi dividido entre suas quatro colunas. Resultando em uma força de 63624,6 kN aplicada na extremidade de cada coluna. Foi imposta a outra extremidade da coluna a restrição de movimento no eixo a todos os seus graus de liberdade no plano da face, tendo o grau de liberdade vertical livre. Esta condição de contorno é aplicada nas duas extremidades da coluna. A Figura 48 representam as condições de contorno aplicadas na coluna.

Figura 48 – Condição de contorno análise de flambagem da coluna – fixação dos graus de liberdade



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 49 - Condição de contorno análise de flambagem da coluna – Forças aplicadas

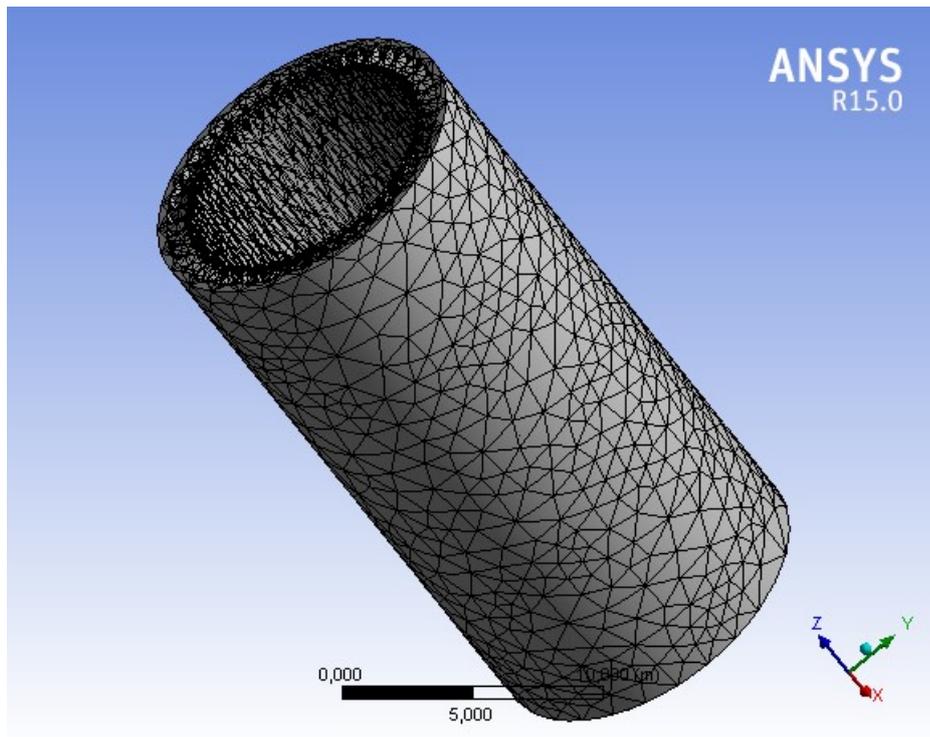


.Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A malha gerada no processo foi estabelecida pelo programa assim como nas análises estruturais anteriores. Os elementos escolhido pelo software foram o Prisma Triangular Quadrático e o Hexaedro Quadrático. De acordo com a teoria de métodos de elementos finitos

estes elementos representam as tensões na estrutura com uma aproximação aceitável dos resultados obtidos analiticamente pela mecânica dos sólidos. A escolha destes elementos se deu pela forma peculiar da coluna, casca cilíndrica com reforçadores. A Figura 50 mostra a malha gerada pelo programa.

Figura 50 – Malha de elementos finitos da coluna na análise de flambagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise proposta por este trabalho teve como base a teoria de mecânica dos sólidos, resistência dos materiais e método de elementos finitos. A análise foi efetuada a fim de conhecer os campos de tensões atuantes em uma plataforma submersível, sendo seus elementos estruturais projetados de acordo com a norma ABS.

Com a análise global e local dos elementos da estrutura estudada, pode-se obter um valor aproximado do campo de pressão associados as duas análises.

Devido ao objetivo principal do trabalho, os cabos introduzidos na modelagem foram suprimidos para a análise dos resultados. Este procedimento tem como função retirar os componentes que não são de interesse para a análise estrutural proposta.

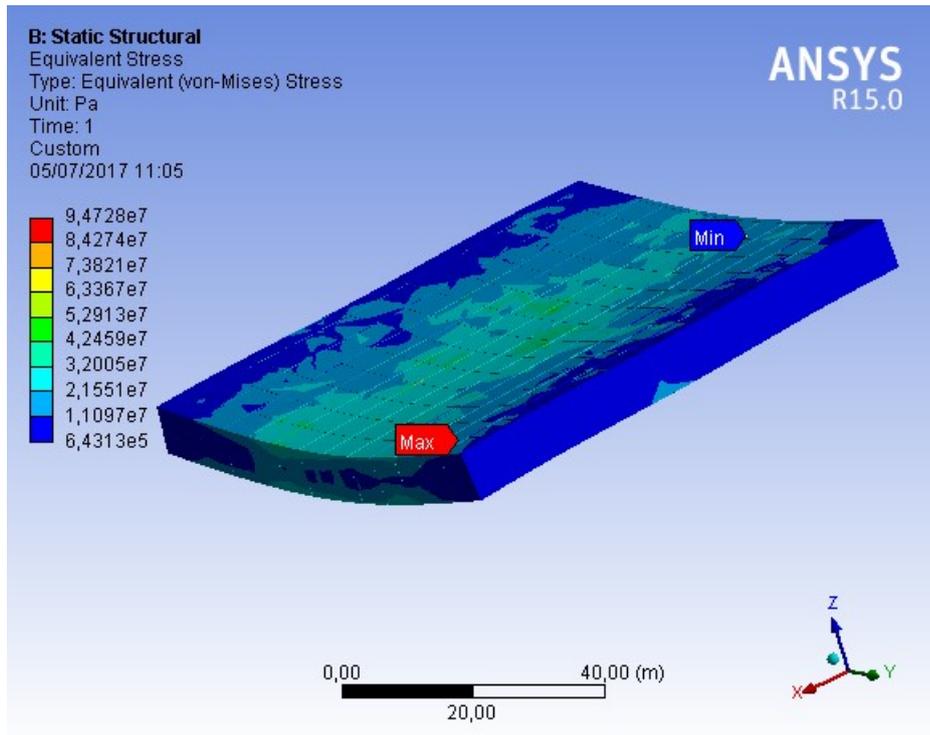
Tendo em vista o material adotado para a estrutura, o aço naval, com uma tensão de escoamento de 235 MPa de acordo com a norma ABS. As plotagens dos resultados são apresentas e detalhadas pelos tópicos descritos neste capítulo.

4.1 Resultados da Análise Global do Deck

As tensões do deck apresentaram valores abaixo da tensão de escoamento. Para representar as tensões no deck foram escondidos todos os outros elementos, deixando apenas a análise do deck. A resposta total da análise ao esconder os elementos não se modifica, apenas é separado o elemento analisado da estrutura total identificando assim as regiões de maiores tensão atuantes no elemento estudado.

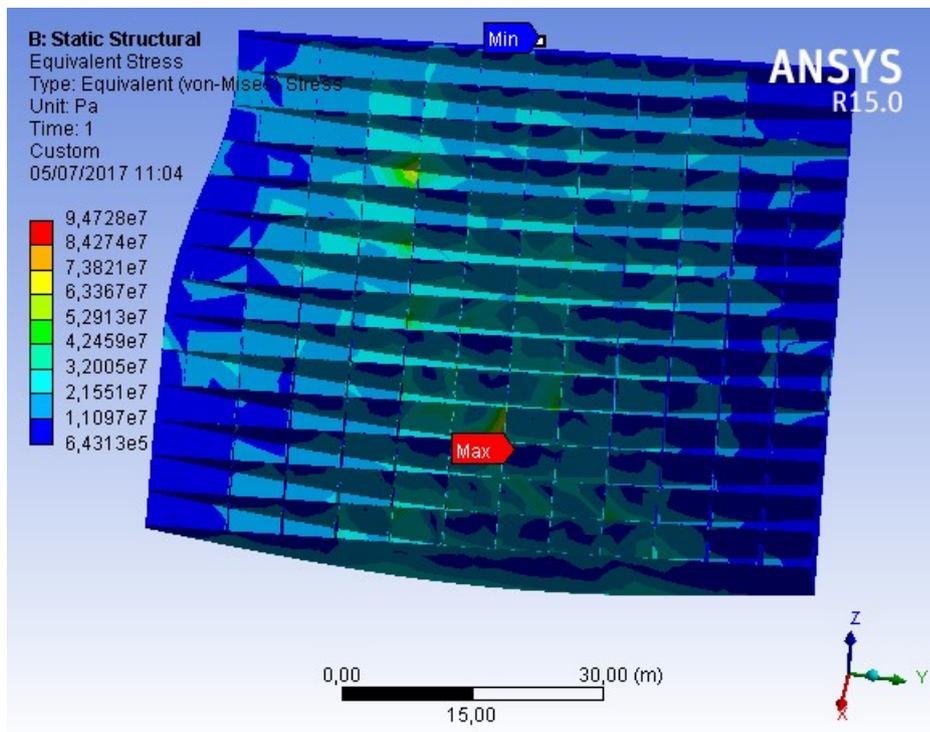
Para o comportamento de tensões do deck, destaca-se o local da tensão máxima atuante, nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Figura 51 – Resultados da análise global do deck



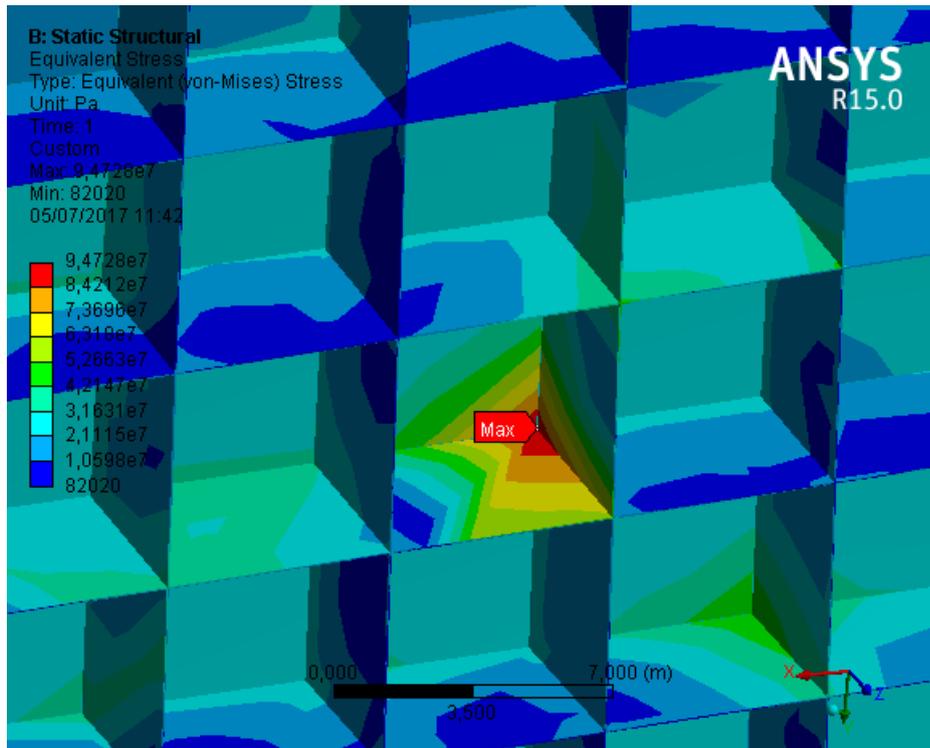
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 52 – Resultados da análise global do deck, corte longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 53 – Resultado da análise global do deck, local de tensão máxima



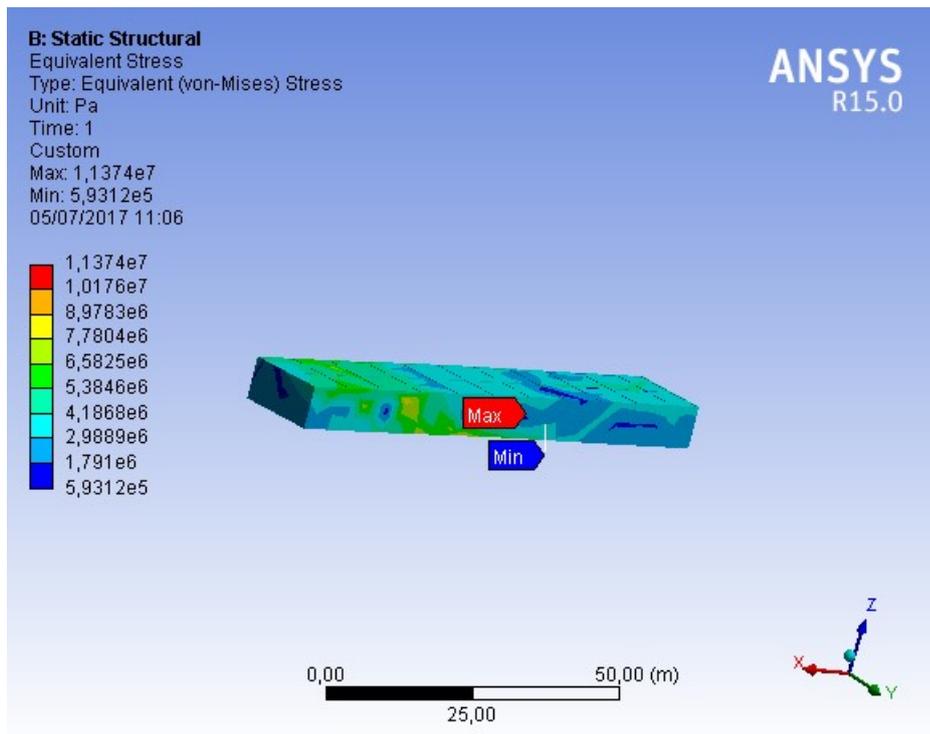
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A análise global do deck obteve uma tensão máxima atuante de 94,72 MPa. Observe-se na Figura 52 as tensões na região de contato com as colunas.

4.2 Resultados da Análise Global do Flutuador

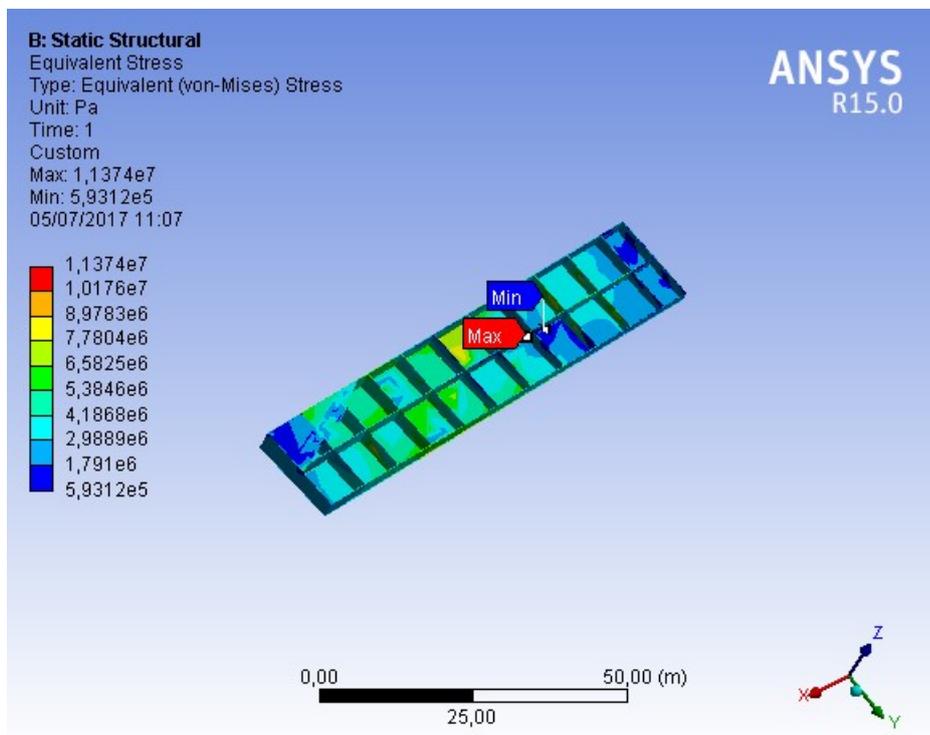
Da mesma forma efetuada na análise do deck, o flutuador foi separado da estrutura e ajustando os resultados de tensão para este elemento. Assim os resultados apresentados pelas figuras 54, 55 e 56 mostram o local da tensão máxima de von Mises.

Figura 54 – Resultados da Análise Global do Flutuador



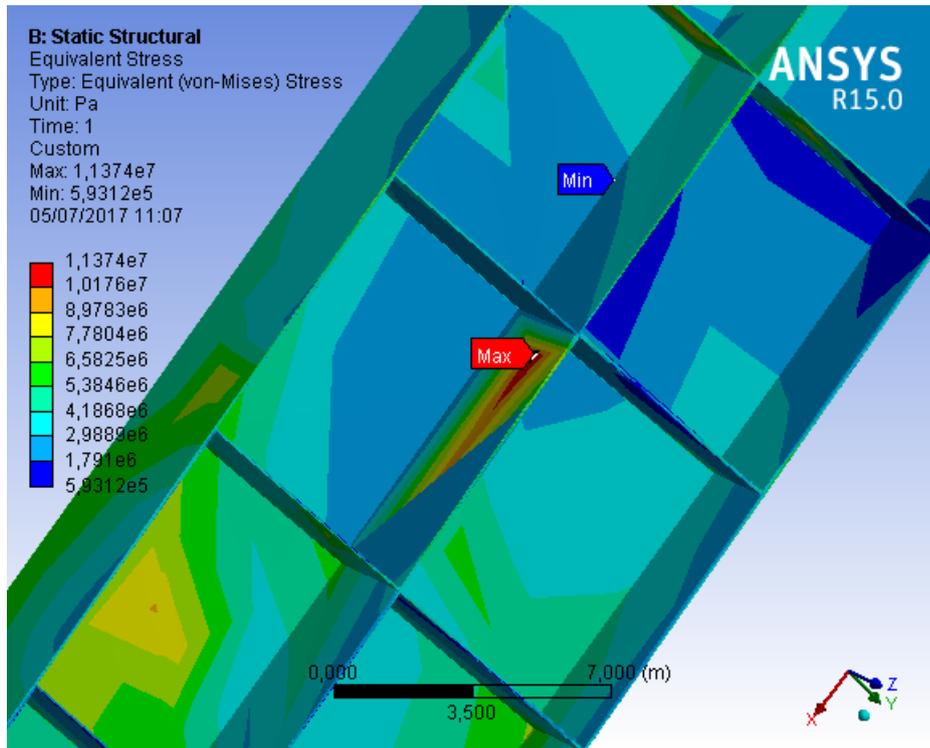
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 55 – Resultados da Análise Global do Flutuador, Corte Longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 56 - Resultados da análise global do flutuador, corte longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.3 Resultados da Análise Local

Na análise local para uma unidade de chapeamento do topo do deck apresentou um resultado de resultados conforme a Figura 44. O local de maior tensão foi observado nas extremidades da unidade de chapeamento condizendo com a literatura de mecânica dos sólidos, o valor da tensão observada foi de 10 MPa. Desta forma uma tensão máxima foi constatada na análise local da unidade de chapeamento do deck.

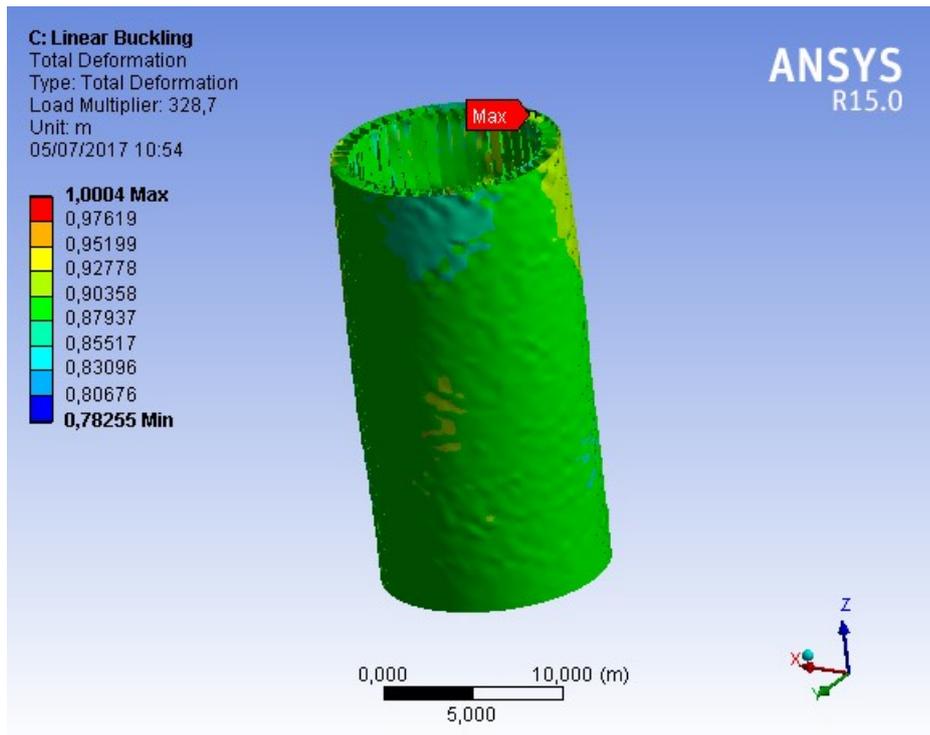
Do mesmo modo como no deck, uma unidade de chapeamento do fundo do flutuador foi analisada localmente. Uma tensão máxima de 99,98 MPa foi observada nas extremidades da unidade de chapeamento. Os resultados da análise estrutural são ilustrados conforme a Figura 47.

4.4 Resultados da Análise de Flambagem

A flambagem foi simulada com as condições de contorno prescritas nos capítulos anteriores. Os modos de flambagem são representados pela Figura 57, Figura 58 e Figura 59.

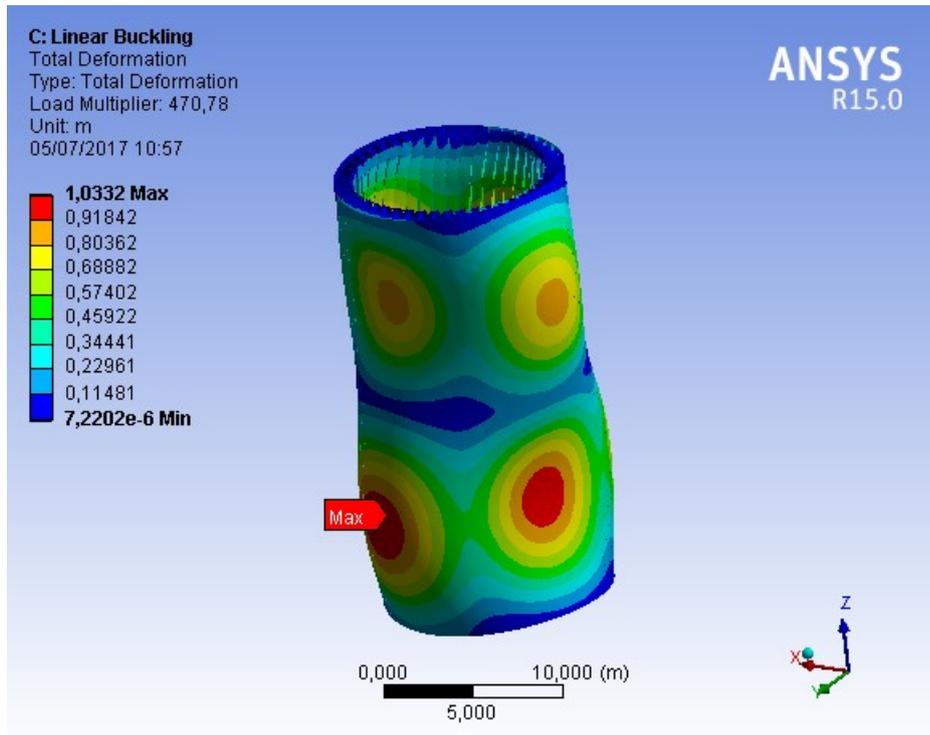
O programa apresenta um multiplicador de carga aplicada ao projeto (load multiplier), este faz uma referência da quantidade de vezes que a carga aplicada deve ser multiplicada para que o modo de flambagem seja apresentado na estrutura. Tendo em vista um colapso estrutural na decorrência de qualquer flambagem na estrutura, foram destacados os primeiros modos de flambagem obtidos na análise, conforme as figuras apresentadas a baixo.

Figura 57 –Resultado da análise de flambagem da coluna, 1º modo de flambagem



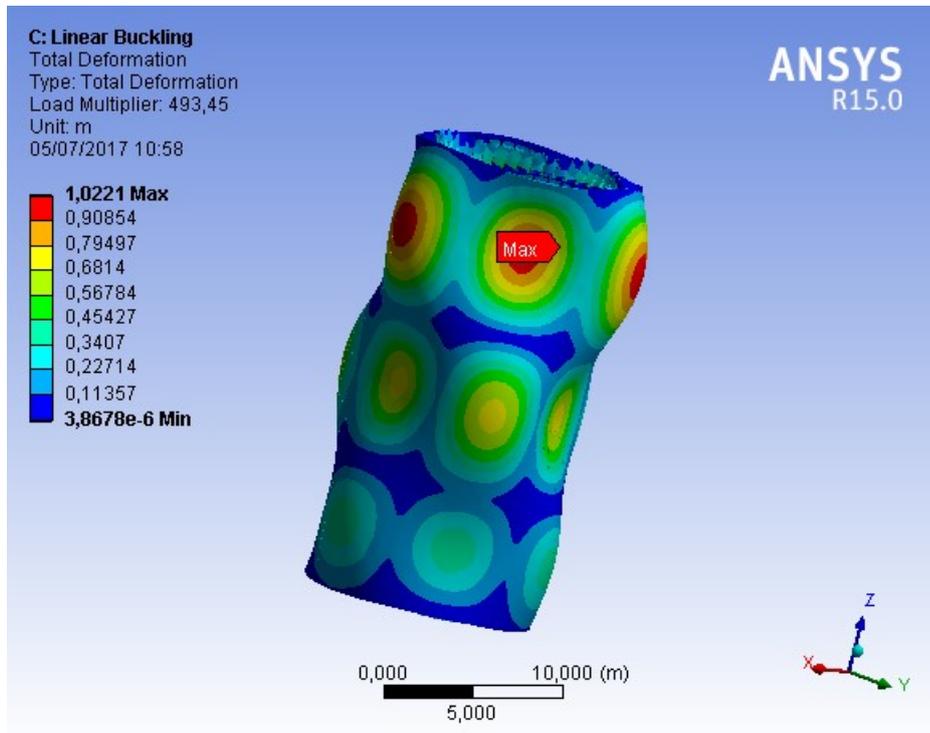
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 58 - Resultado de análise de flambagem da coluna, 4º modo de flambagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 59 – Resultado de análise de flambagem da coluna, 6º modo de flambagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O primeiro e o segundo modo de flambagem apresentaram um fator multiplicador de carga muito próximos, 328,7 vezes a carga de projeto. Representando uma flambagem global, estes dois modos foram destacados por serem as primeiras flambagens apresentadas na estrutura. Apresentando as cargas críticas de flambagem para este arranjo estrutural projetado.

Para que ocorram os outros modos de flambagem, a estrutura deverá apresentar cargas superiores à apresentada nestes primeiros modos. Desta forma os primeiros modos se tornam críticos ao projeto.

5. CONCLUSÃO

O modelo de análises de tensões que este presente trabalho teve como objetivo de apresentar teve como base a literatura de mecânica dos sólidos, ciências dos materiais entre outros conceitos da engenharia naval. O problema estudado tem uma alta complexidade e apresenta diferentes modos de falha que ocasionar danos estruturais a estrutura. As simplificações feitas para esta análise teve como principio uma primeira abordagem sobre o assunto e simulando um estudo de tensões através de recursos computacionais estabelecendo um parâmetro de análise para o projeto.

Tendo em vista as simplificações efetuadas na análise, as tensões topo do deck da plataforma estão de acordo com a literatura, ficando abaixo da tensão de escoamento. Esta faixa de valores para o deck já era esperada, visto que seu projeto estrutural teve uma abordagem conservacionista, aplicando as maiores espessuras chapeamento obtidas pela norma assim como os maiores módulos de seção dos reforçadores.

Neste caso um coeficiente de segurança pode ser calculado de modo a verificar um possível superdimensionamento do deck. Caso o coeficiente de segurança esteja em um nível muito acima do recomendado pelas normas classificadoras o projeto estrutural deve ser refeito contendo mudanças como a redução da espessura das unidades de chapeamento, aumento das distâncias entre reforçadores e anteparas, entre outras modificações a fim de obter um valor aceitável de tensão para o projeto.

A tensão obtida nos flutuadores foram as maiores registradas na análise, o projeto deve ser refinado a fim de obter valores abaixo da tensão de escoamento. Caso não se consiga estabelecer tensões abaixo do limite de escoamento o projeto estrutural deverá ser refeito aumentando o dimensionamento estrutural do flutuador.

As colunas foram projetadas de acordo com a norma e apresentaram valores de multiplicação de carga elevados para o carregamento de projeto. Esta análise tende a verificar os modos de flambagem atuantes na geometria, visualizando a deformada final da estrutura após a aplicação da carga critica de flambagem.

Concluindo, a análise estrutural proposta pelo trabalho teve como objetivo apresentar um modelo para um estudo de tensões em uma plataforma semissubmersível. Apresentando um conceito dos modos de falha e apresentando parâmetros de comparação para o projeto efetuado.

REFERÊNCIAS

<<http://www.aquatecsub.com.br/obras-realizadas.php?cc=32>>. Acesso em 25 de Junho de 2017

ALVES, G. T. A. **Projeto integrado de estabilidade de unidades flutuantes**. 2006. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Buckling and Ultimate Strength Assessment for Offshore Structures**, 2014.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Rules for Building and Classing: Mobile Offshore Drilling Units, Part 3 - Hull Construction and Equipment**, 2016.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Rules for Building and Classing: Steel Vessels, Part 3 - Hull Construction and Equipment**, 2016.

Aquatecsub, Obras Realizadas – Disponível em:

AUGUSTO, Oscar Brito. **Flambagem não Axissimétrica de Cascas de Revolução pelo Método dos Elementos Finitos**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Naval, Doutorado em Engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1987.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, abril 2003.

BRASIL. MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Portos e Costas. **Relatório de Plataformas, Navios Sonda, FPSO e FSO**. 20/07/2016. Disponível em: <https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/ssta/gevi/conformidades/plataformas/Dec_conf_plat.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2016.

CALLISTER, W.D., *Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução*, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Plainfield: Elsevier, 2005.

COOK, Robert D. **Modeling for Stress Analysis**. Madison: University of Wisconsin, 1995.

FALTINSEN, O. M. **Sea loads on ship and offshore structure**. New York: Cambridge University Press, 1998.

GARCIA, Edgard E. M. **Procedimento para determinação experimental de carregamentos externos para o projeto estrutural de uma plataforma Semi-Submersível**. 2014, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010

NEVES, Cheyenne. **Seleção de um conceito de plataforma offshore para atuação na Bacia de Santos, baseada na análise do movimento de heave**. Trabalho de Conclusão de Curso, Santa Catarina.

APÊNDICE A – ENGENHARIA ASSISTIDA POR COMPUTADOR

Muitos fenômenos em engenharia e ciências podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Em geral, solucionar essas equações por meios analíticos clássicos para geometrias arbitrárias é quase impossível. O método de elementos finitos (MEF) é uma aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais podem ser resolvidas de forma aproximada (FISH, 2009).

Segundo Zienkiewicz (2000), o método de elementos finitos subdivide o sistema estudado em elementos individuais, sendo que o comportamento destes elementos é facilmente compreendido, e em seguida, reconstrói o sistema original a fim de entender o comportamento da estrutura como um todo. Em alguns sistemas as subdivisões são bem definidas e finitas, formulando assim problemas discretos. Já em outros sistemas, devido a sua complexidade, necessitam de infinitas subdivisões para ser caracterizada, assim a formulação do problema só é possível por funções matemáticas infinitesimais, ou seja, por equações diferenciais. Tais sistemas são chamados de contínuos.

Com o desenvolvimento dos computadores digitais, os problemas discretos geralmente podem ser resolvidos prontamente mesmo que o número de divisões seja grande. Porém devido a sua natureza os computadores apenas efetuam cálculos discretos, necessitando assim manipulações matemáticas para discretizar os problemas contínuos. Assim vários métodos de discretização foram desenvolvidos a fim de aproximar os resultados discretos com os contínuos. De acordo com FISH (2009) o método dos elementos finitos consiste nos seguintes passos:

1. Pré-processamento: subdivisão do domínio do problema em elementos finitos.
2. Formulação dos elementos: desenvolvimento de equações para os elementos.
3. Montagem: obtenção do sistema global de equações para os elementos.
4. Resolução das equações.
5. Pós-processamento: análise de valores de interesse, tais como deformações e tensões, e a visualização da resposta.

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise estrutural, a primeira questão que abordada é a geometria, material e forças associadas à estrutura. AZEVEDO (2003). No entanto, o MEF depende das simplificações associadas a cada tipo de problema estrutural, que são impostas anteriormente do método propriamente dito.

Em análises de estruturas geralmente é necessário considerar efeitos dinâmicos como as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos componentes fica sujeito. No entanto, segundo AZEVEDO (2003), em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia.

É habitual considerar também que os deslocamentos provocados pelo carregamento são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas situações, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Também é comum considerar que o material que compõe a estrutura apresenta relação entre tensão e deformação linear.

Os modelos estruturais podem ser classificados quanto a sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. Todos os tipos têm características que permitem enquadrar diversos modelos de estruturas em uma análise, sendo a mais genérica a sólida que apresenta características que não se encaixam em nenhum dos outros tipos.

Neste presente trabalho serão abordadas análises estáticas usando elementos sólidos com um comportamento linear entre tensão e deformação.

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral em um domínio complexo (de volume V) por uma somatória de integrais estendidos a subdomínios de geometrias simples (de volume V_i). Esta técnica é ilustrada com a Equação 15, (AZEVEDO, 2003).

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad \text{Equação 15}$$

Com a Equação 15 pressupõe-se que;

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{Equação 16}$$

Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples. Assim sendo possível calcular as integrais relacionadas a cada elemento V_i , basta efetuar o somatório para obter o valor da integral do domínio como um todo.

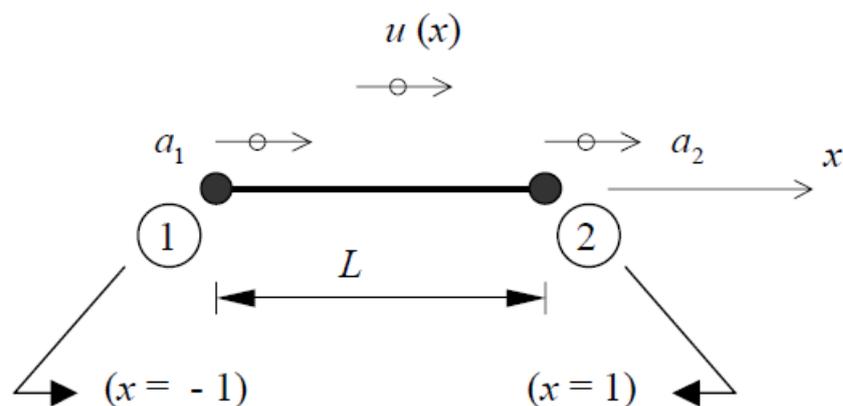
As integrais que determinam o comportamento dos elementos finitos baseiam-se no Princípio de Trabalhos Virtuais (PVT). O PVT estabelece que o trabalho interno de deformação seja igual ao trabalho externo das forças aplicadas.

As integrais que correspondem aos elementos finitos que subdividem o sistema dão origem às chamadas funções de forma, ou funções de interpolação, que contém informações do comportamento de deslocamentos referentes a cada tipo de elemento. Cada elemento apresenta uma característica específica referente aos seus nós e graus de liberdades.

Para melhor entendimento das funções de forma, seguindo o livro de Métodos de Elementos Finitos publicado por AZEVEDO (2003), será apresentado o procedimento de determinação da função de forma de um elemento finito unidimensional, sendo apenas considerados explicitamente os deslocamentos generalizados dos nós. A função de forma representa o deslocamento nos restantes dos pontos que compõe o elemento de forma.

Na Figura 60 encontra-se representado um elemento finito com dois nós e com comprimento (L). Os parâmetros a_1 e a_2 representam os deslocamentos nos respectivos nós, enquanto $u(x)$ é a função que descreve o deslocamento dentro do elemento correlacionando os deslocamentos nodais a_1 e a_2 conforme a Equação 17.

Figura 60 – Elemento finito unidimensional de dois nós



Fonte: Azevedo (2003)

$$\begin{cases} u(-1) = a_1 \\ u(+1) = a_2 \end{cases}$$

Equação 17

Considerando que a lei de variação do deslocamento entre os nós 1 e 2 é linear, pode-se determinar a função deslocamento $u(x)$ conforme a Equação 18. Reagrupando a Equação 18, colocando os deslocamentos nodais em evidência chegamos a Equação 19. A Equação 19 é representada de forma matricial pela Equação 20.

$$u(x) = \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_2 - a_1}{2} * x \quad \text{Equação 18}$$

$$u(x) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} * x\right) * a_1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} * x\right) * a_2 \quad \text{Equação 19}$$

$$u(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} * x & \frac{1}{2} + \frac{1}{2} * x \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 20}$$

Desta forma tem-se o produto de funções de forma, lineares pelos deslocamentos. A função de forma é também representada pela letra N.

$$\begin{cases} N_1(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} * x \\ N_2(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} * x \end{cases} \quad \text{Equação 21}$$

Tanto para os elementos planos quanto para os elementos sólidos sendo uni-, bi- ou tridimensionais o procedimento de determinação da função de forma é similar.

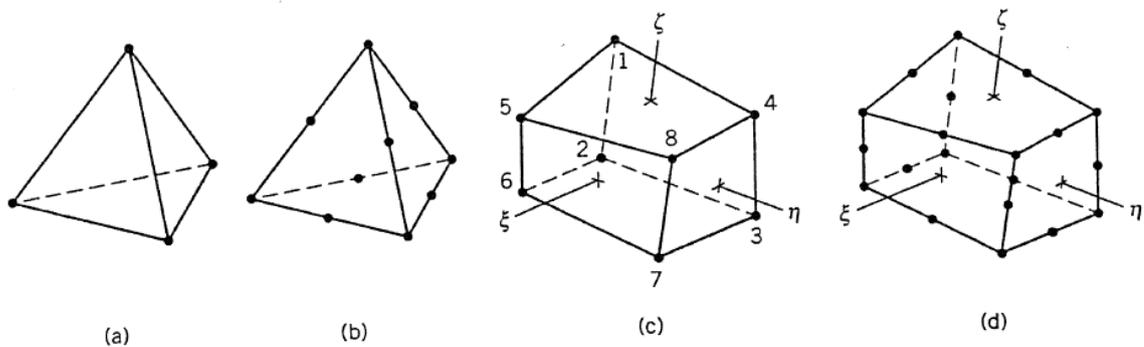
Para a análise de estruturas de elementos sólidos a interpolação quadrática é a que melhor aproxima o comportamento de campo de tensões. A quantidade de nós no elemento também representa impacto significativo na convergência dos resultados de tensão.

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho apresenta elementos sólidos em sua análise computacional. Alguns elementos sólidos existentes no método de elementos finitos serão detalhados a seguir; seguindo a abordagem descrita por COOK (1995).

- Tetraedro de Tensão Constante:

Este elemento apresenta três graus de liberdade translacional em seus quatro nós, como ilustrado pela Figura 13-a. Possui a característica de representar bem as tensões constantes ao longo do elemento, porém perde informações quando aplicado a casos em que os carregamentos geram momentos fletores no elemento.

Figura 61 - (a) Tetraedro de Tensão Constante - (b) Tetraedro de Tensão Linear - (c) Hexaedro Trilinear - (d) Hexaedro Quadrático



Fonte: COOK (1995)

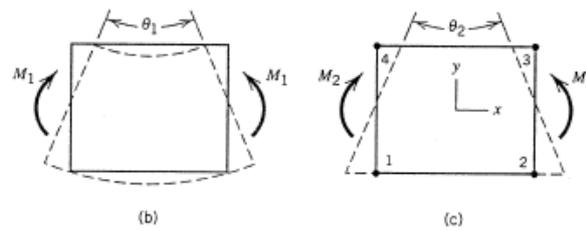
- Tetraedro de Tensão Linear:

Este elemento apresenta configuração conforme a Figura 13-b. Possui três graus de liberdade translacional em cada um dos seus dez nós. Semelhante ao tetraedro de deformação constante, mas com adição de um nó entre dois adjacentes, proporcionando uma representação de campos de tensão constantes. Com a adição dos nós sua função de forma se torna quadrática, desta forma o tetraedro de deformação linear consegue representar as informações de momentos fletores.

- Hexaedro Trilinear:

Como ilustrado pela Figura 13-c, os oitos nós do hexaedro possuem três graus de liberdade cada. No entanto este elemento possui uma peculiaridade de que seus lados não conseguem representar a curvatura dado um carregamento (ver Figura 14), assim não representam de forma adequada as flexões.

Figura 62 - Seção transversal do elemento hexaedro trilinear - (a) deformação real - (b) deformação hexaedro trilinear

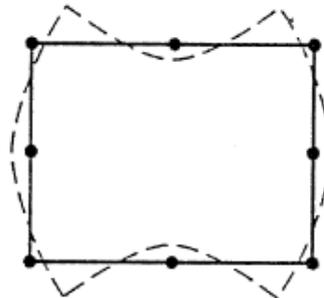


Fonte: COOK (1995)

- Hexaedro Quadrático:

Com a adição de nós entre os nós adjacentes, conforme Figura 13-d, o hexaedro quadrático possui a capacidade de deformar seus lados, conforme Figura 14. Desta forma consegue transmitir a informação de momentos fletores. A representação de corpos retangulares é adequada quando se analisa campos de tensões lineares.

Figura 63 - Seção transversal do Elemento Hexaedro



Fonte: COOK (1995)

- Prisma Triangular Quadrático

Possuindo uma base triangular regular, o prisma triangular quadrático apresenta os nós nas pontas do triângulo e mais um entre os nós adjacentes. Formando quinze nós ao todo, seis na base, seis no topo e mais três entre a base e o meio. Desta configuração ele apresenta função de forma com uma elevada ordem.

Os elementos utilizados na análise apresenta configuração de elementos sólidos conforme descritos neste capítulo. A escolha de cada elemento é detalhada nos capítulos seguinte no desenvolvimento da análise estrutural da plataforma.

APÊNDICE B – NORMA E REGULAMENTOS AMERICAN BUREAU OF SHIPPING: MOBILE OFFSHORE DRILING UNITS

A ABS apresenta uma norma que se refere as regras de construção e classificação de Unidades de Perfuração Offshore Móveis (MODU), a qual identifica cada elemento estrutural, tipos de unidades de perfuração, dimensões e fundamentos necessários para o projeto estrutural, além de conter também os cálculos de dimensionamento desses elementos.

Uma plataforma semi-submersível é dividida em convés, colunas e pontões. Cada um desses componentes apresenta uma configuração estrutural semelhante, em forma de grelha chapeada.

As grelhas chapeadas são chapas reforçadas longitudinalmente e transversalmente por vigas e anteparas. Esta configuração reduz o peso da estrutura mantendo a mesma resistência estrutural em relação a outros arranjos estruturais conhecidos.

Desta forma as áreas no convés de armazenamento devem obter uma espessura de chapeamento igual ou superior a obtida na Equação 22, não podendo ser menor que 5 milímetros. Sendo esta dependente da distância entre reforçadores do convés (S_b) e da altura do convés (h).

$$t_{tanques} = 0.0039 * S_b * \sqrt{h} + 1.5 [mm] \quad \text{Equação 22}$$

Existem dois tipos de reforçadores no convés, os reforçadores pesados e os leves. A norma apresenta equações que determinam o módulo de seção mínimo que cada um desses reforçadores.

Os reforçadores leves devem obter um módulo de seção (SM) igual ou maior que o obtido pela Equação 23. Onde c é uma constante que especifica o local onde o reforçador é incorporado, s a distância entre os reforçadores leves e l é a distância entre suportes (neste caso os reforçadores pesados).

$$SM_{Deck Leve} = 7.8 * c * h * s * l^2 [cm^3] \quad \text{Equação 23}$$

Os reforçadores pesados do convés devem obter um modulo de seção (SM) maior que o obtido pela Equação 24. As equações dos módulos de seção para os reforçadores leves e pesados são semelhantes, modificando apenas a referencia de cada distância. Desta forma a equação do módulo de seção dos reforçadores pesados é uma função da distância entre

reforçadores pesados b , da distância da quilha até a linha de carga h (ou $2/3$ da do pontal, o qual for maior) e da distância entre suportes (neste caso as anteparas).

$$SM_{Deck\ pesado} = 4.74 * c * h * b * l^2 [cm^3] \quad \text{Equação 24}$$

As anteparas do convés são anteparas estanques, não permitem a passagem de água, e devem ter uma espessura de acordo com a Equação 25. Esta equação é uma função da distância entre anteparas s , do parâmetro k (determinado pela Equação 26), da resistência ao escoamento do material Y e da altura do convés h . O parâmetro α é a razão de aspecto da chapa, pode ser obtida pela divisão entre a maior distância entre anteparas pela menor distância entre anteparas.

$$t_{antepara\ deck} = s * k * \frac{\sqrt{\left(\frac{235}{Y}\right) * h}}{254} + 2.5 [mm] \quad \text{Equação 25}$$

$$k = \begin{cases} \frac{3.075 * \sqrt{\alpha} - 2.077}{\alpha - 0.272} & \text{para } 1 \leq \alpha \leq 2 \\ 1.0 & \text{para } \alpha > 2 \end{cases} \quad \text{Equação 26}$$

Tendo em vista que o convés tem anteparas longitudinais e transversais, a relação de aspecto da chapa (α) constitui a razão entre a maior distância entre suportes (anteparas) pela menor distância desta, levando em conta a região do convés que está sendo aplicado o cálculo.

Da mesma forma como os reforçadores do convés, os reforçadores leves e pesados da antepara devem obter um módulo de seção conforme especificado pela Equação 23 e pela Equação 24, respectivamente.

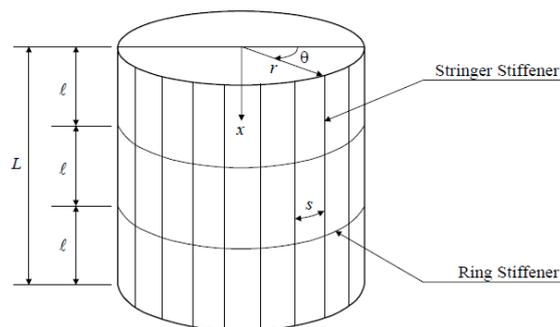
APÊNDICE C – NORMA E REGULAMENTOS AMERICAN BUREAU OF SHIPPING: BUCKLING AND ULTIMATE STRENGTH ASSESSMENT FOR OFFSHORE STRUCTURE

A ABS apresenta um guia de Flambagens e Tensão de Escoamento para Estruturas Offshore que estabelece um intervalo de valores para as tensões internas e para as dimensões de cada elemento.

As colunas apresentam configuração estrutural semelhante ao apresentado anteriormente, uma chapa circular com anéis de reforço (ring stiffeners) e reforçadores longitudinais (stringer stiffeners), conforme apresentado na Figura 64.

Essa configuração estrutural apresenta diversos padrões de deformações transversais. Assim, a norma identifica os prováveis modos de falha e determina equações que devem ser analisadas para a definição do fator de segurança em cada modo analisado.

Figura 64 - Coluna com os reforçadores



Fonte: ABS (2016)

Para estabelecer um padrão de segurança foi determinado um fator máximo de tensão admissível, representado por η de forma a prevenir tensões acima da tensão de projeto. Em geral, esse fator depende do parâmetro de ajuste (ψ). Esse por sua vez é diretamente ligado ao tipo de flambagem e ao tipo de carregamento.

Analogamente ao coeficiente de segurança, o fator máximo de tensão admissível diminui a tensão crítica de flambagem, aproximando o valor de tensão crítica com a projetada, assim cria-se uma situação mais próxima do limite tornando o projeto mais conservativo.

A Equação 27 apresenta o cálculo do fator máximo de tensão admissível para os dois tipos de carregamento. O carregamento estático é referente aos esforços obtido de esforços estáticos apenas; incluindo ações gravitacionais e o peso da estrutura em operação

em mar calmo. Os carregamentos combinados são os carregamentos estáticos combinados com os carregamentos relevantes devido à ação da natureza, tais como as ações do vento, correntezas e ondas.

$$\eta = \begin{cases} 0.6 * \psi, & \text{para carregamentos estáticos} \\ 0.8 * \psi, & \text{para carregamentos combinados} \end{cases} \quad \text{Equação 27}$$

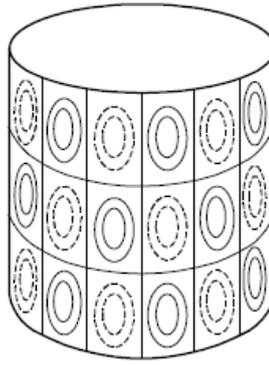
Para o dimensionamento estrutural da coluna a norma apresenta possíveis modos de flambagem que devem ser evitados para que a estrutura não perca sua integridade estrutural. Desta forma a ABS determina os seguintes modos de flambagem para uma casca cilíndrica com reforçadores longitudinais e radiais que serão detalhados no decorrer deste capítulo:

- Flambagem Local;
- Flambagem entre Vãos;
- Flambagem Geral;
- Flambagem local dos Reforçadores;
- Flambagem da Coluna;

A flambagem local é o modo de falha que ocorre quando a chapa entre os reforçadores flamba antes que seus respectivos reforçadores tenham apresentado alguma deformação. Ou seja, a chapa alcançou sua carga limite de flambagem e se tornou instável estruturalmente antes dos reforçadores. A representação deste modo de falha pode ser observada na Figura 65.

Este tipo de flambagem não necessariamente vai causar uma ruptura na chapa, pois os esforços são redistribuídos para os suportes, porém é importante o estudo deste modo de falha a fim de verificar as deformações locais e determinar uma largura efetiva associada aos reforçadores longitudinais.

Figura 65 - Flambagem Local



Fonte: ABS rules (2016)

Conforme a norma, as tensões relacionadas com as flambagens locais são definidas e equacionadas de acordo com a Equação 28. As tensões de compressão longitudinal e circunferencial são representadas por σ_x e σ_θ respectivamente.

$$\left(\frac{\sigma_x}{\eta * \sigma_{CxP}}\right)^2 - \varphi_P * \left(\frac{\sigma_x}{\eta * \sigma_{CxP}}\right) * \left(\frac{\sigma_\theta}{\eta * \sigma_{C\theta P}}\right) + \left(\frac{\sigma_\theta}{\eta * \sigma_{C\theta P}}\right)^2 \leq 1 \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

σ_{CxP} = Tensão crítica de Flambagem Local devido as forças de compressão ou momentos [N/cm²]

$\sigma_{C\theta P}$ = Tensão crítica de Flambagem Local devido a pressão externa [N/cm²]

σ_x = Tensão de compressão na direção longitudinal [N/cm²]

$$= \sigma_a + \sigma_b$$

σ_a = Tensão devido a força axial, [N/cm²]

$$= \frac{P}{2 * \pi * r * t * (1 + \delta)}$$

σ_b = Tensão devido ao Momento Fletor [N/cm²]

$$= \frac{M}{\pi * r^2 * t * (1 + \delta)}$$

σ_θ = Tensão de compressão na direção circunferencial, referente ao meio da chapa entre os reforçadores [N/cm²]

$$= \frac{q * (r + 0.5 * t)}{t} * K_\theta$$

K_θ = Coeficiente de reforço estrutural do anel

$$= 1 - \frac{1 - k * \vartheta}{1 + \frac{t * (t_w + \ell * \omega)}{A_R}} * G_\alpha$$

φ_P = Coeficiente de interação dos reforçadores longitudinais e radiais (valores negativos são aceitos)

$$= \frac{0.4 * (\sigma_{CxP} + \sigma_{C\theta P})}{\sigma_0} - 0.8$$

σ_0 = Tensão de escoamento do material [N/cm²]

η = Fator Máximo de tensão admissível (equação 12)

Ψ = Fator de ajuste (para a flambagem local)

$$= \begin{cases} 0.833 & \text{se } \sigma_{ij} \leq 0.55 * \sigma_0 \\ 0.629 + 0.371 * \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} & \text{se } \sigma_{ij} > 0.55 * \sigma_0 \end{cases}$$

O valor de σ_{ij} é o termo genérico para a tensão crítica de flambagem local, podendo ser adotado tanto o valor referente à flambagem devido uma carga axial de compressão ou pela pressão externa em seus respectivos modos de flambagem. É importante notar que o fator máximo da tensão de flambagem depende da tensão crítica de flambagem que implica que este valor será diferente para as cargas de compressão axial e para as cargas de pressão externa. Assim, para o projeto estrutural estar de acordo com a norma, o menor valor do fator máximo de tensão admissível desse ser empregado nos correspondentes modos de falha.

A tensão crítica de flambagem para uma placa de um painel curvo suportado por pares de reforçadores radiais e longitudinais sujeita a compressão axial ou momentos fletores (σ_{CxP}) deve ser calculada de acordo com a Equação 29.

$$\sigma_{CxP} = \begin{cases} \sigma_{Exp} & \sigma_{Exp} \leq P_r * \sigma_0 \\ \sigma_0 * \left[1 - P_r * (1 - P_r) * \frac{\sigma_0}{\sigma_{Exp}} \right] & \sigma_{Exp} \geq P_r * \sigma_0 \end{cases} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

P_r = Limite proporcional elástico da estrutura, para aços adotar 0.6

$\sigma_{Exp} = B_x * \rho_{xP} * \sigma_{CEXP}$

ρ_{xP} = Fator de imperfeições na forma

$$= \begin{cases} 1 - 0.019 * z_s^{1.25} + 0.0024 * z_s * \left(1 - \frac{r}{300 * t} \right) & \text{para } z_s \leq 11.4 \\ 0.27 + \frac{1.5}{z_s} + \frac{27}{z_s^2} + 0.008 * \sqrt{z_s} * \left(1 - \frac{r}{300 * t} \right) & \text{para } z_s > 11.4 \end{cases}$$

B_x = Fator de compensação de forma imperfeita

$$= \begin{cases} 1.15 & \text{para } \lambda_n > 1 \\ 1 + 0.15 * \lambda_n & \text{pra } \lambda_n > 1 \end{cases}$$

$$\lambda_n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\rho_{xP} * \sigma_{CEXP}}\right)}$$

σ_{CEXP} = Tensão elástica de para uma placa curva suportada por reforçadores

$$= K_{xP} * \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \vartheta^2)} * \left(\frac{t}{s}\right)^2$$

$$K_{xP} = \begin{cases} 4 + \frac{3 * z_s^2}{\pi^4} & \text{para } z_s \leq 11.4 \\ 0.702 * z_s & \text{para } z_s > 11.4 \end{cases}$$

$$z_s = \sqrt{(1 - \vartheta^2)} * \left(\frac{s^2}{r * t}\right)$$

s = Distância entre os reforçadores longitudinais, em centímetros

t = Espessura do chapeamento, em centímetros

E = Módulo de elasticidade 2.06×10^7 N/cm² para o aço

ϑ = Coeficiente de Poisson, 0.3 para o aço

σ_0 = Tensão de escoamento do material [N/cm²]

A tensão de flambagem em painéis curvos suportados por pares de reforçadores longitudinais e radiais ($\sigma_{C\theta P}$) pode ser calculada de acordo com a Equação 30.

$$\sigma_{C\theta P} = \Phi * \sigma_{E\theta P} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

Φ = Fator de redução plástico

$$= \begin{cases} 1 & \text{para } \Delta \leq 0.55 \\ \frac{0.45}{\Delta} + 0.18 & \text{para } 0.55 < \Delta \leq 1.6 \\ \frac{1.31}{1 + 1.15 * \Delta} & \text{para } 1.6 < \Delta \leq 6.25 \\ \frac{1}{\Delta} & \text{para } \Delta \geq 6.25 \end{cases}$$

$$\Delta = \sigma_{E\theta P} / \sigma_0$$

$\sigma_{E\theta P}$ = Tensão de flambagem elástica cicunferencial em painéis curvos [N/cm²]

$$= \frac{q_{CE\theta P} * (r + 0.5 * t)}{t} * K_\theta$$

K_θ = Coeficiente de reforço estrutural do anel

$$k = \begin{cases} \frac{N_x}{N_\theta} & \text{para pressões laterais} \\ \frac{N_x}{N_\theta} + 0.5 & \text{para pressões hidrostáticas} \end{cases}$$

t_w = Espessura do flange do reforçador [cm]

ℓ = Espaçamento entre reforçadores radiais [cm]

N_x = Carregamento axial por unidade de comprimento [N/cm]

N_θ = Carregamento circunferencial por unidade de comprimento [N/cm]

$$\overline{A}_R = A_R * \left(\frac{r}{r_R}\right)^2 \quad [cm^2]$$

A_R = Área transversal dos reforçadores radiais [cm²]

r_R = Raio até o centroide do reforçador radial

$$\varpi = \frac{\cosh(2*\tilde{\alpha}) - \cos(2*\tilde{\alpha})}{\tilde{\alpha} * [\sinh(2*\tilde{\alpha}) + \sin(2*\tilde{\alpha})]} \geq 0$$

$$\tilde{\alpha} = \frac{\ell}{1.56 * \sqrt{(r*t)}}$$

$$G_\alpha = 2 * \frac{\sinh(\tilde{\alpha}) * \cos(\tilde{\alpha}) + \cosh(\tilde{\alpha}) * \sin(\tilde{\alpha})}{\sinh(2*\tilde{\alpha}) + \sin(2*\tilde{\alpha})} \geq 0$$

r = Raio médio da coluna [cm]

$q_{CE\theta P}$ = Pressão elástica de flambagem [N/cm²]

$$= \frac{\frac{E*t}{r}}{n^2 + \tilde{k}*\tilde{\alpha}^2 - 1} * \left[\frac{(n^2 + \tilde{\alpha} - 1)^2}{12*(1 - \vartheta^2)} * \left(\frac{t}{r}\right)^2 + \left(\frac{\tilde{\alpha}^4}{(n^2 + \tilde{\alpha}^2)^2}\right) \right]$$

n = Número de onda circunferencial, começando com $0.5 * N_s$ crescendo até o menor valor de $q_{CE\theta P}$

N_s = Número de reforçadores longitudinais

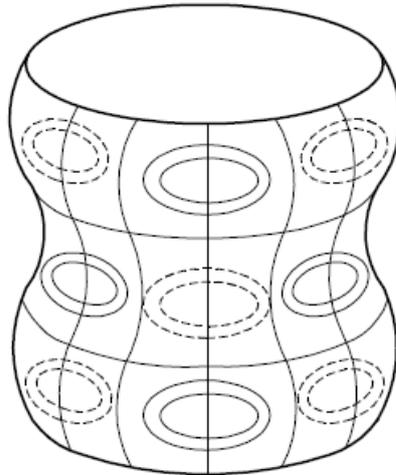
$$\tilde{\alpha} = \frac{\pi*r}{\ell}$$

$$\tilde{k} = \begin{cases} 0, & \text{para pressão lateral} \\ 0.5, & \text{para pressão hidrostática} \end{cases}$$

A flambagem entre vãos apresenta apenas deformações nos elementos de chapa e nos reforçadores longitudinais, enquanto os anéis não deformam, conforme ilustrado na

Figura 66. A Equação 31 apresenta o cálculo que define o padrão de segurança para este tipo de modo de falha.

Figura 66 - Flambagem entre Vãos



Fonte: ABS (2016)

$$\left(\frac{\sigma_x}{\eta * \sigma_{CxB} * \frac{A_e}{A}} \right)^2 - \varphi_B * \left(\frac{\sigma_x}{\eta * \sigma_{CxB} * \frac{A_e}{A}} \right) * \left(\frac{\sigma_\theta}{\eta * \sigma_{C\theta B}} \right) + \left(\frac{\sigma_\theta}{\eta * \sigma_{C\theta B}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

σ_x = tensão de compressão na direção longitudinal

σ_θ = tensão de compressão na direção circunferencial

σ_{CxB} = Tensão de Flambagem entre vãos decorrentes à cargas axiais de compressão e/ou momentos fletores

$\sigma_{C\theta B}$ = Tensão de Flambagem entre vãos decorrentes das pressões externas

η = Fator Máximo de tensão admissível

A_e = área de seção transversal efetiva [cm²]

$$= A_s + S_{em} * t$$

A = área total da seção transversal [cm²]

$$= A_s + s * t$$

A_s = área de seção transversal do reforçador longitudinal [cm²]

t = espessura da chapa cilíndrica [cm]

s = espaçamento entre os reforçadores longitudinais [cm]

S_{em} = largura específica da chapa modificada [cm]

$$= \begin{cases} \left(\frac{1.05}{\lambda_m} - \frac{0.28}{\lambda_m^2} \right) * s & \text{para } \lambda_m > 0.53 \\ s & \text{para } \lambda_m \leq 0.53 \end{cases}$$

λ_m = taxa de esbeltes reduzida modificada

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{CxB}}{\sigma_{Exp}}\right)}$$

σ_{Exp} = tensão elástica de flambagem para uma chapa cilíndrica imperfeita entre reforçadores longitudinais adjacentes

A tensão crítica de flambagem entre vão para uma carga axial de compressão e/ou momento fletor atuante em uma estrutura com reforçadores longitudinais e radiais é dada pela Equação 32.

$$\sigma_{CxB} = \begin{cases} \sigma_{Exp} \\ \sigma_0 * \left[1 - P_r * (1 - P_r) * \frac{\sigma_0}{\sigma_{Exp}} \right] \end{cases} \quad \begin{array}{l} \sigma_{Exp} \leq P_r * \sigma_0 \\ \sigma_{Exp} \geq P_r * \sigma_0 \end{array} \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

P_r = Limite proporcional elástico da estrutura, para aços adotar 0.6

σ_{Exp} = Tensão de flambagem elástica para uma compressão do reforçador com imperfeições em sua geometria [N/cm²]

$$= \sigma_s + \sigma_c$$

σ_s = Tensão elástica de flambagem do reforçador longitudinal [N/cm²]

$$= \rho_{xB} * \left(\frac{0.605 * E * \left(\frac{t}{r}\right)}{1 + \left(\frac{A_s}{s_e * t}\right)} \right)$$

$$\rho_{xB} = 0.75$$

σ_c = Tensão de flambagem elástica da coluna [N/cm²]

$$= \frac{\pi^2 * E * I_{se}}{l^2 * (A_s + s_e * t)}$$

E = Módulo de elasticidade

I_{se} = Momento de Inércia do reforçador longitudinal associado a chapa colaborante [cm⁴]

$$= I_s + A_s * (z_{st})^2 * \frac{s_e * t}{A_s + s_e * t} + \frac{s_e * t^3}{12}$$

I_s = Momento de Inércia do reforçador longitudinal em relação ao eixo do seu centroide [cm⁴]

z_{st} = Distância da linha central da coluna até o centroide do reforçador longitudinal [cm]

A_s = Área da seção transversal do reforçador longitudinal [cm²]

s_e = Fator de redução efetivo da chapa cilíndrica [cm]

$$= \begin{cases} \frac{0.53}{\lambda_{xP}} * s & \text{para } \lambda_{xP} > 0.53 \\ s & \text{para } \lambda_{xP} \leq 0.53 \end{cases}$$

s = Distância entre os reforçadores longitudinais adjacentes [cm]

λ_{xP} = Razão de redução de esbeltes da casca cilíndrica

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{Exp}}\right)}$$

ℓ = Distância entre reforçadores radiais [cm]

r = Raio principal da chapa cilíndrica [cm]

t = Espessura da chapa cilíndrica [cm]

σ_0 = Tensão de escoamento do material [N/cm²]

A tensão crítica de flambagem entre vãos decorrente das pressões externas para uma chapa cilíndrica com reforçadores longitudinais e radiais deve estar de acordo com a Equação 33. Tendo em vista que esta tensão não pode ser menor que a tensão de escoamento do material da estrutura.

$$\sigma_{C\theta B} = (\sigma_{C\theta R} + \sigma_{sp}) * K_p \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

$\sigma_{C\theta B}$ = Tensão de flambagem entre vãos para uma chapa cilíndrica com reforçadores longitudinais e radiais sobre ação de pressão externa

$\sigma_{C\theta R}$ = Tensão crítica de flambagem entre vãos para uma chapa cilíndrica sem reforçadores

σ_{sp} = Tensão de colapso estrutural de um reforçador longitudinal associado à chapa colaborante [N/cm²]

$$= \frac{q_s * (r + 0.5 * t)}{t} * K_\theta$$

K_θ = Coeficiente de reforço estrutural do anel

q_s = Pressão de colapso de um reforçador longitudinal associado à chapa colaborante [N/cm²]

$$= \frac{16}{s * \ell^2} * A_s * |Z_{st}| * \sigma_0$$

A_s = Área de seção transversal do reforçador longitudinal [cm²]

z_{st} = Distância da linha central até o centroide do reforçador longitudinal [cm]

ℓ = Distância entre os reforçadores radiais [cm]

K_p = Fator de correção da pressão efetiva

$$= \begin{cases} 0.25 + \frac{0.85}{500} * g & \text{para } g \leq 500 \\ 1.10 & \text{para } g > 500 \end{cases}$$

g = Parâmetro de geometria

$$= 2 * \pi * \frac{\ell^2 * A_s}{N_s * I_s}$$

I_s = Momento de Inércia do reforçador longitudinal em relação ao eixo do seu centroide [cm⁴]

N_s = Número de reforçadores longitudinais

r = Raio principal da chapa cilíndrica [cm]

t = Espessura da chapa cilíndrica [cm]

σ_0 = Tensão de escoamento do material [N/cm²]

Uma chapa cilíndrica sem reforçadores, ou com apenas anéis de reforço, sujeita a esforços de compressão axial ou momentos fletores, sua tensão crítica de flambagem entre vãos pode ser calculada de acordo com a Equação 34.

$$\sigma_{CxR} = \begin{cases} \sigma_{ExR} & \sigma_{ExR} \leq P_r * \sigma_0 \\ \sigma_0 * \left[1 - P_r * (1 - P_r) * \frac{\sigma_0}{\sigma_{ExR}} \right] & \sigma_{ExR} \geq P_r * \sigma_0 \end{cases} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

P_r = Limite proporcional elástico da estrutura, para aços adotar 0.6

σ_0 = Tensão de escoamento do material [N/cm²]

σ_{ExR} = Tensão elástica de flambagem para uma chapa cilíndrica imperfeita [N/cm²]

$$= \rho_{xR} * C * \sigma_{CExR}$$

σ_{CExR} = Tensão de flambagem para uma chapa cilíndrica perfeita [N/cm²]

$$= 0.605 * \frac{E * t}{r}$$

C = Coeficiente de comprimento

$$= \begin{cases} 1.0 & \text{para } z \geq 2.85 \\ \frac{1.425}{z} + 0.175 * z & \text{para } z < 2.85 \end{cases}$$

ρ_{xR} = Fator de imperfeições de forma

$$\rho_{xR} = \begin{cases} 0.75 + 0.003 * z * \left(1 - \frac{r}{300*t}\right) & \text{para } z < 1 \\ 0.75 - 0.142 * (z - 1)^{0.4} + 0.003 * z * \left(1 - \frac{r}{300*t}\right) & \text{para } 1 \leq z < 20 \\ 0.35 - 0.0002 * \left(\frac{r}{t}\right) & \text{para } 20 \leq z \end{cases}$$

z = Parâmetro de Batdorf

$$z = \frac{\ell^2}{r*t} * \sqrt{1 - \vartheta^2}$$

ℓ = Distância entre os reforçadores radiais [cm]

r = Raio principal da chapa cilíndrica [cm]

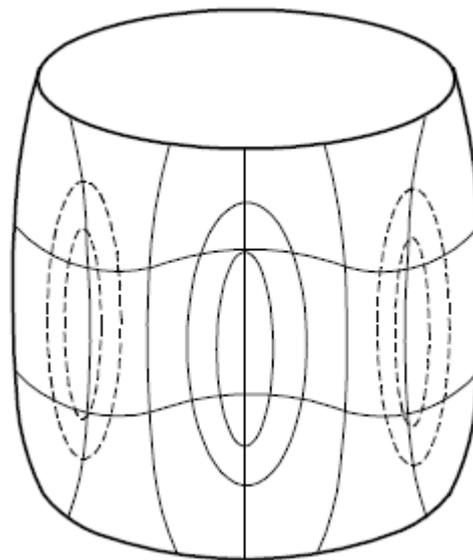
t = Espessura da chapa cilíndrica [cm]

ϑ = Coeficiente de Poisson, 0.3 para o aço

E = Módulo de elasticidade

Na Flambagem Geral os reforçadores radiais junto com suas chapas anexadas flambam acompanhados com os reforçadores longitudinais, conforme a Figura 67.

Figura 67 - Flambagem Geral



Fonte: ABS Rules (2016)

Para que não ocorra o colapso de uma coluna, a estrutura formada por uma chapa cilíndrica com reforçadores longitudinais e anéis de reforço, deve-se atender as restrições de dimensionamento relacionados com os reforçadores associados as placas. Desta forma a

norma determina que os momentos de inercia para cada reforçador longitudinal associado à sua chapa colaborante (i_s), deve estar de acordo com a Equação 35. De forma semelhante ao reforçador longitudinal, o momento de inércia do reforçador radial associado com sua chapa colaborante deve obter um valor compatível com a Equação 36.

$$i_s = \frac{s * t^3}{12 * (1 - \vartheta^2)} * \gamma_0 \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

$$\gamma_0 = (2.6 + 4.0) * \alpha^2 + 12.4 * \alpha - 13.2 * \alpha^{1/2}$$

$$\alpha = \ell / s$$

ℓ = Distância entre dois anéis de reforço [cm]

s = Distância entre dois reforçadores longitudinais [cm]

ϑ = Coeficiente de Poisson,

t = Espessura da chapa cilíndrica [cm]

$$i_r = \frac{\sigma_x * r_e^4 * (1 + \delta)}{500 * E * \ell} + \frac{\sigma_\theta * r_e^2 * \ell * t}{2 * E * K_\theta} * \left(1 + \frac{z_e * E}{100 * r * (\eta * \sigma_0 - \sigma_{\theta R})} \right) \quad \text{Equação 36}$$

Onde:

σ_x = Tensão de compressão axial

σ_θ = Tensão de compressão na direção circunferencial

K_θ = Coeficiente de reforço estrutural do anel

r_e = Raio até o centroide do reforçador radial, associado com sua chapa colaborante

$$\delta = \frac{A_s}{s * t}$$

i_r = Momento de inércia do reforçador radial associado com sua chapa colaborante

APÊNDICE E – NORMA E REGULAMENTOS AMERICAN BUREAU OF SHIPPING: STEEL VESSELS

Nos pontões, dada a semelhança com a estrutura de navios, as espessuras das chapas, assim como os módulos de seção são determinados pela ABS, dentro da parte 3, capítulo 2 referente às Regras de Construção e Classificação – Embarcação de Aço.

Esta seção determina um valor teórico para o módulo de seção que a estrutura deve respeitar para estar dentro da norma, conhecido por Módulo de Seção Requerido ($SM_{\text{requerido}}$).

Esse módulo de seção é dependente do maior momento fletor associado à estrutura e do fator de tensão nominal permissível conforme demonstrado pela Equação 37. Tendo as dimensões estruturais da seção mestra, dada pelas equações da norma descritas no decorrer deste capítulo, o cálculo do módulo de seção pode ser obtido com a relação dada pela Equação 38. (Módulo de Seção calculado), este por sua vez deve ser maior que o requerido pela norma. Tendo em vista que este projeto refere-se a plataforma em transporte com um calado no meio dos pontões. A Figura 68 representa o transporte de uma plataforma semi-submersível.

Figura 68 – Transporte de uma Plataforma Semi-Submersível



Fonte: Mercado Marítimo (2017)

$$SM_{Requerido} = \frac{M_t}{f_p} \quad \text{Equação 37}$$

Onde:

$SM_{Requerido}$ = Módulo de Seção Requerido [m³]

M_t = Maior momento fletor [kN*m]

f_p = Fator de Tensão permissível [kN*m]

$$SM_{Calculado} = \frac{I}{\bar{y}} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

$SM_{Calculado}$ = Módulo de Seção calculado [m³]

I = Momento de Inércia [m⁴]

\bar{y} = Distância até a Linha Neutra [m]

No mesmo capítulo, na seção 2, é especificada a espessura do chapeamento do costado, o qual é mostrado na Equação 39. De forma semelhante, a espessura do chapeamento do fundo é definida pela Equação 40.

$$t_{costado} = \left(\frac{s}{645}\right) * \sqrt{(L - 15,2) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \text{ [mm]} \quad \text{Equação 39}$$

$$t_{fundo} = \left(\frac{s}{671}\right) * \sqrt{(L - 18,3) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \text{ [mm]} \quad \text{Equação 40}$$

Onde:

$t_{costado}$ = espessura mínima do chapeamento do costado [mm]

t_{fundo} = espessura mínima do chapeamento do fundo [mm]

s = distância entre reforçadores longitudinais presente na região de cálculo [mm]

L = comprimento longitudinal da estrutura [mm]

Os reforçadores leves do costado apresentam módulo de seção de acordo com a Equação 41. Onde o c é o coeficiente que designa a localidade do reforçador, h é a distância entre a quilha e a linha de carga (ou $2/3$ do pontal, o que for maior), s é a distância entre reforçadores leves do costado e l o comprimento entre suportes (neste caso a distância entre reforçadores pesados).

$$SM_{ref. \text{ leve costado}} = 7.8 * c * h * s * l^2 [cm^3] \quad \text{Equação 41}$$

O módulo de seção dos reforçadores pesados também é determinado pela Equação 41, no entanto as distâncias relacionadas aos reforçadores e aos suportes são em relação aos reforçadores pesados. Assim, o parâmetro s refere-se a distância entre reforçadores pesados, enquanto o parâmetro l refere-se a distância entre anteparas.

