



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Estruturas

**ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA
DE UM MÓDULO NO CONVÉS DE UM FPSO**

Bianca Cristine de Vasconcelos Dias

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

SETEMBRO DE 2012

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA
DE UM MÓDULO NO CONVÉS DE UM FPSO

Bianca Cristine de Vasconcelos Dias

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Gilberto Bruno Ellwanger

D.Sc., Professor Associado, EP/UFRJ (Orientador)

Bruno Martins Jacovazzo

D.Sc., Professor adjunto, UFRJ, DES

José Renato Mendes de Sousa

D.Sc., Professor, UFRJ, DEG

SETEMBRO DE 2012

Dias, Bianca Cristine de Vasconcelos

Análise Estrutural Estática de um Módulo no Convés de um FPSO / Bianca Cristine de Vasconcelos – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 73.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil.

A meus pais e irmãos,
Décio, Maruza, Rodrigo e Aline
pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida orientando e direcionando os meus caminhos.

Agradeço ao professor Gilberto Bruno Ellwanger pelo aprendizado, conhecimento, paciência, conselhos e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Dércio e Maruza pelo incentivo e condições de eu estar aqui hoje.

Aos meus irmãos, pela ajuda e presença em minha vida.

Às minhas avós Cícera e Orita, meus tios e tias, primos e primas pela compreensão nos vários momentos de ausência e pelo incentivo para que eu conquistasse meus objetivos.

Ao meu avô Bezerra (in memoriam) por ter me mostrado como é essencial o carinho, a atenção e o amor durante a longa caminhada da vida.

Ao meu namorado Marcus Vollmer pela ajuda, conhecimento, paciência, carinho, companheirismo, compreensão e muito amor dedicados a mim nestes últimos meses de projeto.

Aos meus amigos de faculdade por toda a ajuda, companheirismo e momentos de descontração para aliviar a pressão da Universidade.

As secretárias Eunice, Luzia e Márcia pela ajuda, compreensão e carinho ao longo dos anos de faculdade.

À Technip pelos softwares utilizados e aos engenheiros do setor de estruturas, Eliane Ramos, Sérgio Costa, Luiz Gustavo Rinke, João Alves e Rafael Três pelo conhecimento, incentivo, apoio, paciência e compreensão nos momentos que mais precisei.

Aos meus amigos e professores que me acompanharam desde antes da faculdade, nos estudos e na busca pelos meus sonhos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE UM MÓDULO NO CONVÉS DE UM FPSO

Bianca Cristine de Vasconcelos Dias

Setembro/2012

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Curso: Engenharia Civil

As plataformas flutuantes de produção, armazenamento e transferência de petróleo (FPSO) no Brasil são usualmente projetadas de acordo com as normas *Structural Design of Offshore Units* das Sociedades Classificadoras (como DNV-OS-C201, por exemplo), AISC – *Manual of Steel Constructions*, API RP 2A–WSD – *Best Practices for Project Planning and Construction (Fixed Offshore Structures)*, DNV-RP-C205 - *Environmental Conditions and Environmental Loads*.

Este trabalho contém a análise no campo de um módulo situado no convés principal de uma plataforma do tipo FPSO instalada na Bacia de Campos, onde serão considerados os carregamentos de peso próprio, peso de equipamentos e de tubulação instalados no módulo, vento e onda, que serão influenciados pelo local onde a plataforma será instalada.

O projeto tem como principal objetivo viabilizar a instalação do mesmo na plataforma que irá operar em águas profundas da costa brasileira, sem que haja avarias que prejudiquem seu bom funcionamento. O módulo ao qual foi realizada a análise estrutural é responsável pelo processamento do óleo proveniente do poço. As condições de análise serão as de operação para condições ambientais extremas (DEC), trânsito da Unidade até o Site (local onde será instalada) e em caso de algum dano que a plataforma venha sofrer devido às condições adversas do mar no Site. E por fim, são apresentados os resultados obtidos dos estudos e as conclusões sobre a viabilidade da estrutura metálica em operar durante a vida útil da plataforma suportando os carregamentos supracitados.

Palavras-Chave: Plataforma, FPSO, Módulo, Análise Estática

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

STRUCTURAL VERIFICATION OF A MODULE ON A FPSO'S DECK

Bianca Cristine de Vasconcelos Dias

September/2012

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger

Course: Civil Engineering

The floating oil platforms of production, storage and offloading (FPSO) in Brazil are usually designed according to the standards of Structural Design of Offshore Units from the Classification Societies (DNV-OS-C201, for example), AISC - Manual of Steel Constructions, API RP 2A-WSD - Best Practices for Project Planning and Construction (Fixed Offshore Structures), DNV-RP-C205 - Environmental Conditions and Environmental Loads.

This work contains the static analysis of a module located on the main deck of a platform-ship FPSO installed in the Campos Basin, where the considered loads are dead weight, equipment weight, piping installed in the module, wind and wave, which will be influenced by location where the platform will be installed.

The project's main objective is to enabling the installation of the module in the platform that will operate in deep waters off the Brazilian coast, without damage that might impair the proper functioning of the FPSO. The module which will perform the structural analysis is responsible for processing oil from the reservoir. The conditions of the analysis will be operating to extreme environmental conditions (DEC), the ship's transit to the Site location and damage that the platform will suffer due to the adverse conditions of the sea where it will be installed. Finally, we present the results of the studies and the findings on the viability of the structure to operate over the life of the platform supporting the loads above.

Key-words: Platforms, FPSO, Module, Static Analysis

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ASPECTOS GERAIS	1
1.1.1. <i>Offloading</i>	3
1.1.2. <i>Ancoragem</i>	4
1.1.2.1. <i>Spread-Mooring</i>	4
1.1.2.2. <i>Turret Interno e externo</i>	5
1.2. HISTÓRICO DE ACIDENTES	7
1.3. OBJETIVOS E MODELOS UTILIZADOS	10
1.4. ORGANIZAÇÃO	12
2. ETAPAS DE PROJETO	13
3. MODELO ESTRUTURAL	14
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NO PROJETO	15
3.2. PROPRIEDADES DAS SEÇÕES	16
3.3. NOME DOS PONTOS	17
3.4. GRUPOS DOS MEMBROS	18
3.5. GRUPOS DAS PLACAS	19
4. CARREGAMENTO BÁSICO	20
4.1. PESO PRÓPRIO (CASO DE CARREGAMENTO 1)	20
4.2. PESO DOS EQUIPAMENTOS	21
4.3. PESO DOS EQUIPAMENTOS EM OPERAÇÃO (CASO DE CARREGAMENTO 2)	22
4.4. PESO DOS EQUIPAMENTOS SECOS (CASO DE CARREGAMENTO 3)	23
4.5. PESO DOS EQUIPAMENTOS EM TESTE (CASO DE CARREGAMENTO 4)	24
4.6. PESO DA TUBULAÇÃO (CASO DE CARREGAMENTO 5)	25
4.7. SOBRECARGA (CASO DE CARREGAMENTO 6)	26
4.8. CARGAS AMBIENTAIS	27
4.8.1. <i>Carga de Vento</i>	27
4.8.1.1. <i>Cálculo da carga de Vento</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
4.8.2. <i>Condição de Movimentos Extremos</i>	32
4.8.3. <i>Condição de Trânsito</i>	38
4.8.4. <i>Condição de Avaria</i>	39
4.9. DESLOCAMENTOS PRESCRITOS	32
4.10. RESUMO DA CARGA APLICADA	40
4.11. MODELO ESTRUTURAL E CONDIÇÕES DE CONTOURNO	41
5. COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO	43
TABELA 17 – TABELA DE COMBINAÇÕES PARA A CONDIÇÃO ESTÁTICA	43
6. RESULTADOS DA ANÁLISE	45
6.1. REAÇÕES	45
6.2. DEFORMAÇÕES	46
6.2.1. <i>Flambagem</i>	46
6.2.2. <i>Flechas Máximas permitidas</i>	48

6.3.	VERIFICAÇÃO DE TENSÃO.....	51
6.3.1.	<i>Método dos estados limites últimos.....</i>	<i>51</i>
6.3.2.	<i>Método das tensões admissíveis.....</i>	<i>53</i>
6.4.	VERIFICAÇÕES ADICIONAIS.....	59
6.4.1.	<i>Análise de Flambagem de Placas.....</i>	<i>59</i>
7.	ANÁLISE DO MÓDULO EM ELEMENTOS FINITOS	62
7.1.	TIPOS DOS SUPORTES DO MÓDULO EM ANÁLISE	63
7.1.1.	<i>Material empregado.....</i>	<i>64</i>
7.1.2.	<i>Espessuras das placas.....</i>	<i>65</i>
7.1.3.	<i>Densidade da malha.....</i>	<i>66</i>
7.2.	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	68
7.3.	CARGAS APLICADAS.....	69
7.4.	RESULTADOS.....	70
8.	CONCLUSÃO	73
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Um moderno Shuttle tanker (navio aliviador) fazendo alívio de um FPSO no Brasil ..	3
Figura 2 – Sistema de Spread Mooring.	4
Figura 3 – <i>Fairlead</i> de um FPSO.	5
Figura 4 – Turret Externo de um FPSO.	6
Figura 5 – Turret Interno de um FPSO.	6
Figura 6 – Localização do Módulo em análise no convés do FPSO.	1
Figura 7 – Plataforma Semi-submersível Deep Horizon sendo levada até o local de operação.	8
Figura 8 – Plataforma Deep Horizon durante a explosão.	8
Figura 9 – Navio aliviador que abalroou a plataforma Marlin Sul.	8
Figura 10 – Plataforma FPSO Marlin Sul.	9
Figura 11 – Vista isométrica do Módulo de Processamento de Óleo da Plataforma FPSO.	10
Figura 12 – Planta de elevação 35.250 do Módulo em análise.	11
Figura 13 – Fluxo de processos para projeto de estrutura.	13
Figura 14 – Sistema de Coordenadas.	14
Figura 15 – Localização das Seções do Navio no Módulo.	15
Figura 16 – Vista Isométrica - Pontos.	17
Figura 17 – Vista Isométrica - Membros.	18
Figura 18 – Elevação 35.250 - Placas.	19
Figura 19 – Vista Isométrica – LC1.	20
Figura 20 – Vista Isométrica – LC2.	22
Figura 21 – Vista Isométrica - LC3.	23
Figura 22 – Vista Isométrica – LC4.	24
Figura 23 – Vista Isométrica – LC5.	25
Figura 24 – Vista Isométrica – LC6.	26
Figura 25 – Vista Isométrica – LC7.	30
Figura 26 – Vista Isométrica – LC8.	31
Figura 27 – Deslocamentos em X.	35
Figura 28 – Movimento da viga navio - Sagging(1) e hogging (2).	33
Figura 29 – Deslocamentos em X.	33
Figura 30 – Deslocamentos em Z.	34
Figura 31 – Rotação em Y.	34
Figura 32 – Pontos de apoio (no plano do convés).	41
Figura 33 – Rotações Liberadas no paliteiro.	42
Figura 34 – Coeficientes de flambagem k para diferentes formas de apoio.	46
Figura 35 – Variação de resistência de uma coluna comprimida em função do índice de esbeltez.	47
Figura 36 – Flambagem da barra.	47
Figura 37 – Modos de Flambagem, tendo a primeira figura $n=1$ e a segunda $n=2$	48
Figura 38 – Deformações da estrutura do módulo de processamento de óleo.	49

Figura 39 – Vista do plano XZ (-7.526) da deformada do módulo.	49
Figura 40 – Vista do plano YZ (194.040) da deformada do módulo.	50
Figura 41 – “Unit Checks”	55
Figura 42 – Análise do membro 017-117 assinalado na figura 41.	56
Figura 43 – Cálculo da tensão admissível pela norma AISC.	57
Figura 44 – Cálculo da tensão atuante no projeto pela norma API.	57
Figura 45 – Vista dos <i>unit checks</i> das vigas.	58
Figura 46 – Análise do membro 098-099 assinalado na figura 45.	58
Figura 47 – Tensões nas placas do módulo- elevação 35.250	59
Figura 48 – Análise da placa com maior tensão.	60
Figura 49 – Análise da placa com maior tensão.	60
Figura 50 – Análise da placa com maior tensão.	61
Figura 51 – Análise da placa com maior tensão.	61
Figura 52 – Vista dos suportes do módulo	62
Figura 53 – Vista isométrica do modelo de suporte tipo 3.	63
Figura 54 – Corte lateral do suporte tipo 3	64
Figura 55 - Vista isométrica do modelo com determinados valores de escoamento.	64
Figura 56 – Vista isométrica.	65
Figura 57 – Frames e longitudinais.	65
Figura 58 – Vista isométrica.	66
Figura 59 – Frames e longitudinais.	67
Figura 60 – Vista isométrica.	68
Figura 61 – Condição de carregamento 1 (LC1).	69
Figura 62 – Condição de carregamento 2 (LC2).	70
Figura 63 – Encontro da caverna com o deck principal.	71
Figura 64 – Encontro da Longitudinal com o deck principal.	72
Figura 65 – Encontro do gusset com o deck principal.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos membros tubulares	16
Tabela 2 – Propriedades dos membros	16
Tabela 3 – Propriedades das placas	16
Tabela 4 – Pesos dos equipamentos considerados para a análise.	21
Tabela 5 – Pesos das tubulações considerados para a análise.	25
Tabela 6 – Peso distribuído das sobrecargas consideradas na análise	26
Tabela 7 – Velocidade de referência do vento consideradas na análise - para a bacia de Campos	27
Tabela 8 – Amplitudes individuais para a condição de DEC na bacia de campos	36
Tabela 9 – Condição extrema de projeto – DEC:	36
Tabela 10 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise	36
Tabela 11 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise	37
Tabela 12 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise	37
Tabela 13– Amplitudes individuais para a condição de TRA consideradas na análise	38
Tabela 14– Amplitudes individuais para a condição de TRA consideradas na análise	38
Tabela 15 – Amplitudes individuais para a condição de TRA consideradas na análise	39
Tabela 16 – Rotações e deslocamentos aplicados	32
Tabela 17 – Tabela de combinações para a condição estática.	43
Tabela 18 – Tabela de combinações para a condição de DEC.	43
Tabela 19 – Tabela de combinações para a condição de trânsito.	44
Tabela 20 – Tabela de combinações para a condição de avarias.	44
Tabela 21 – Fatores modificadores de tensão admissível	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	<i>American Institute of Steel Construction, Inc.</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASD	<i>allowable stress design</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
FE	<i>Finite elements</i>
LRFD	<i>Load and resistance factor design</i>
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
SCF	<i>Stress concentration factor</i>
WSD	<i>Working stress design</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>
DEC	Cargas ambientais com período de 100 anos de retorno
DOC	Vento de referência para o período de retorno de 1 ano

1. Introdução

1.1. Aspectos Gerais

A sigla FPSO (*“Floating, Production, Storage and Offloading”*, em inglês) significa Unidade Flutuante de Produção, Processamento, Armazenamento e Transferência. Essa unidade de produção offshore normalmente se apresenta em forma de navio e armazena em seu casco petróleo bruto, que é periodicamente transferido para navios aliviadores e transportado até a costa.

Uma plataforma do tipo FPSO não necessita que seu casco tenha formato hidrodinâmico e nem máquinas que tenham a finalidade de movimentá-la, pois esta ficará permanente ancorado em uma determinada localidade (*site*), excetuando-se no reboque do estaleiro até este local. Não havendo conversão de navio, o casco é projetado com linhas retas se assemelhando a uma grande Barcaça. Esta escolha é feita devida à facilidade na construção dos blocos que futuramente serão unidos (soldados), e irão formar o casco da plataforma. A este tipo de navio se dá o nome de FPSO “Barcaça” ou Nova Construção (*“New Built”*). A unidade *offshore* deve ser adequada para pelo menos 25 anos de operação ininterrupta (vida de operação), sem docagem.

A plataforma deverá ser projetada de forma a resistir aos esforços a que serão submetidas, onde vento e as condições do mar representam os principais agentes dentre os carregamentos considerados, de modo a não serem interrompidas as extrações e não serem gerados problemas ambientais, lembrando que estamos tratando de estruturas metálicas flutuantes móveis, então, a correta estimativa dos carregamentos com a região na qual a plataforma se localiza é de grande importância.

Podemos verificar a seguir a disposição dos módulos no convés da plataforma

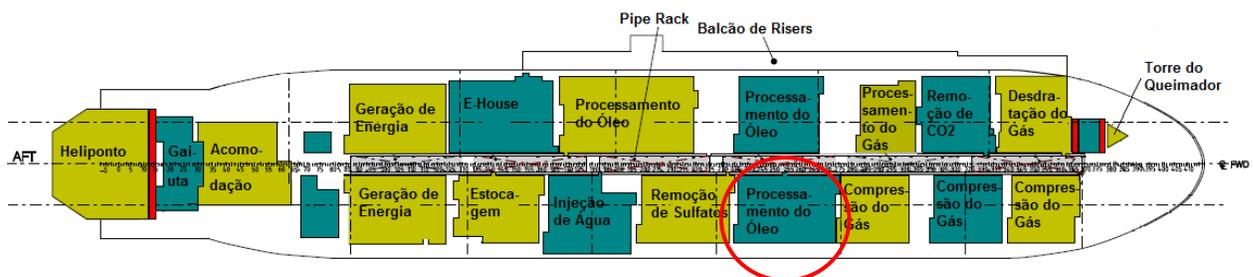


Figura 1 – Localização do Módulo em análise no convés do FPSO.

Nas últimas décadas o uso de navios como unidades *offshore* para a produção e armazenamento de petróleo tornou-se um método comum, mesmo em ambientes hostis, pois são projetados para sobreviver às condições ambientais mais críticas a que estiverem sujeitas. Nos últimos anos, plataformas do tipo FPSO têm se tornado as principais unidades de produção flutuantes para águas rasas e profundas.

A vantagem do uso desse tipo de plataforma é quando o campo não possui uma rede de tubulação (*Pipe Lines*) que faça o escoamento do óleo para terra; a plataforma tem a capacidade de armazenar o óleo cru retirado do poço, além é claro de poder realizar todo o processo de produção desse óleo até o seu transbordo ou transferência para um navio aliviador, processo este conhecido como *offloading* que será mais bem detalhado a seguir.

A plataforma em análise será ancorada com lâmina d'água máxima de 1580m, sua planta de processo terá capacidade de produzir e tratar de 300 mil barris / dia de líquidos, 180 mil barris/dia de petróleo bruto.

1.1.1. Offloading

Como dito anteriormente, uma vantagem de plataformas do tipo FPSO é sua capacidade de armazenar o óleo retirado do poço e estocá-lo em seus porões (tanques de carga). Porém, em um determinado momento quando se atinge a capacidade máxima de estocagem, é necessário transferir essa carga para outra embarcação, sem interromper a produção.

Esse processo de transferência é conhecido como *Offloading*. Dependendo do layout da plataforma, a transferência é feita pela proa (parte dianteira do casco) ou pela popa (parte traseira do casco).

O *offloading* é realizado através de um tubo de grande diâmetro (em torno de 1.5 metros) e flexível chamado Mangote. Quando o navio aliviador se aproxima da plataforma, esse tubo é lançado no mar e é conduzido por uma guia até ser conectado ao sistema de recepção do aliviador iniciando a transferência. Na conexão do Mangote com a recepção do aliviador, existe uma trava que impede vazamento de óleo, bem como se o tubo esticar demais, devido ao movimento relativo entre as duas embarcações, ele automaticamente se desconecta, fechando a válvula que regula o escoamento do óleo. A figura a seguir mostra um exemplo dessa operação.



Figura 2 – Um moderno Shuttle tanker (navio aliviador) fazendo alívio de um FPSO no Brasil.

1.1.2. Ancoragem

Não é desejável que os navios recebam condições ambientais severas de través (perpendicular ao eixo popa-proa), visto que a área do costado exposta às forças de arrasto devidas às ações da onda, vento e corrente é muito grande. Por isso, é preciso que a unidade tenha um sistema de ancoragem eficiente. Os mais comuns são do tipo *Spread-Mooring*, *Turret Externo* e *Turret Interno*.

1.1.2.1. Spread-Mooring

É caracterizado por utilizar um número elevado de linhas de amarração, distribuídas em 4 pontos nas extremidades do navio. Nesses pontos, ficam caracterizados os chamados *Fairleads*, onde as amarras (ou linhas) ficam apoiadas. Esse sistema transmite maior rigidez para o navio, diminuindo bastante seu deslocamento relativo às ondas, às correntes marinhas e ao vento.

Neste caso, as linhas que conduzem o óleo do poço à plataforma (*Risers*) ficam alocadas em uma estrutura como *Varal de Risers* ou *Riser Balcony*, que é posicionada na parte lateral do casco (conhecido como *Costado*) da plataforma.

A figura a seguir mostra o layout do sistema de amarração do tipo *Spread-Mooring*:

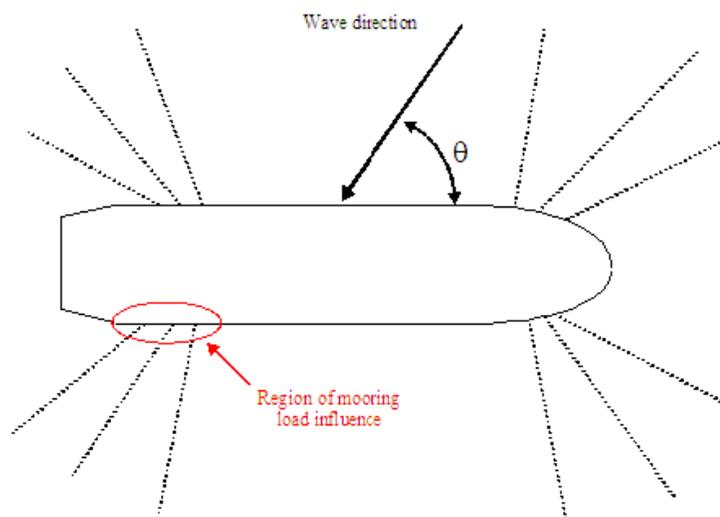


Figura 3 – Sistema de Spread Mooring.



Figura 4 – *Fairlead* de um FPSO.

1.1.2.2. Turret Interno e externo

O Sistema de *Turret*, tanto o Interno quanto o Externo, permite que o navio tenha maior liberdade de movimento, já que a amarração é feita em um ponto, sua principal característica é o fato do navio alinhar-se com o carregamento ambiental, diminuindo os esforços atuantes devido a uma menor carga projetada. Com isso, a plataforma pode girar até 360 graus em torno desse ponto.

Neste caso, as linhas de conduzem o óleo do poço à plataforma (*Risers*) ficam alocadas na estrutura do *Turret*.



Figura 5 – Turret Externo de um FPSO.



Figura 6 – Turret Interno de um FPSO.

1.2. Histórico de Acidentes

Não é muito comum acontecerem acidentes com plataformas de petróleo. Porém, é muito preocupante, pois além de graves riscos de explosão onde perigo são as perdas humanas o vazamento afeta o meio ambiente do entorno ameaçando grandes ecossistemas e o turismo da região.

Um dos maiores acidentes dos últimos tempos (2010), segundo o site da internet <http://infopetro.wordpress.com/2010/06/21/acidente-em-plataforma-operada-pela-bp-e-iniciativas-de-contencao-do-vazamento/>, ocorreu com uma plataforma de perfuração Semi-submersível chamada *Deep Horizon*, que era de propriedade da empresa Transocean, mas estava sendo operada pela BP – formalmente conhecida como *British Petroleum*, que opera em águas profundas e estava localizada no Golfo do México (EUA). A explosão matou 11 pessoas e estima-se que o vazamento de óleo da mesma chegou a 40 mil barris por dia. As causas são basicamente duas. A primeira se dá devido a problemas no processo de cimentação do poço e a segunda falha do Blowout Preventer (BOP) - um sistema de segurança na saída para o solo oceânico. A explosão ocorreu porque a tampa do poço teria falhado devido a uma bolha de metano que escapou do poço, foi lançada pela coluna de perfuração e se expandiu rapidamente, porque rompeu várias barreiras de segurança e lacres de cimento até explodir. Tudo isso teria ocorrido ao longo da cimentação. De fato, a fase de cimentação envolve um elevado risco de blowout. Depois da explosão, o BOP deveria ter sido ativado automaticamente para evitar o derramamento de petróleo. Em caso de falha, também poderia ser ativado manualmente pelo operador de perfuração. Mas nenhum destes procedimentos foram adotados pois pode ter ocorrido um vazamento hidráulico impossibilitando o uso do BOP.



Figura 7 – Plataforma Semi-submersível Deep Horizon sendo levada até o local de operação.



Figura 8 – Plataforma Deep Horizon durante a explosão.

Outro acidente que ocorreu (jun/2012), segundo o site www.blogmercante.com/2012/06/fps0-marlin-sul-e-abalroado-por-navio-da-transpetro/, foi com o FPSO Marlin Sul. O Aliviador S/T Cartola, abalroou o navio, que está instalado no campo de Marlin Sul na bacia de Campos (RJ). Segundo a Petrobras, não houve vítimas nem derramamento do óleo armazenado no FPSO, afretada da SBM. Somente o heliporto do FPSO sofreu uma avaria, obrigando a realização dos transbordo pela plataforma P-40, que é a mais próxima do local. As causas do acidente estão sendo investigadas. O FPSO está em operação desde junho de 2004. A unidade tem capacidade para produzir 100 mil barris por dia de óleo e 2,3 milhões de m³ de gás natural. A Petrobras não informou se a produção da unidade foi paralisada.



Figura 9 – Navio aliviador que abalroou a plataforma Marlin Sul.



Figura 10 – Plataforma FPSO Marlin Sul.

1.3. Objetivos e modelos utilizados

Os objetivos do presente trabalho podem ser assim descritos:

- 1) Mostrar o escopo de construção de um dos módulos posicionados sobre um convés de um FPSO, isto é, os materiais e perfis utilizados, os carregamentos aplicados,...
- 2) Efetuar a verificação de segurança estrutural de um módulo no convés de um navio FPSO (*Floating Production Storage Offloading*) com a ajuda do programa SACS e do programa de elementos finitos GENIE, segundo o método das tensões admissíveis, fornecendo um nível de segurança aceitável através da definição dos mínimos requisitos para a estrutura como um todo e seus componentes;
- 3) Análise de resultados obtidos do modelo estrutural e verificação da estrutura com os carregamentos atuantes no campo em que ela irá operar conforme ilustra as Figuras a seguir.

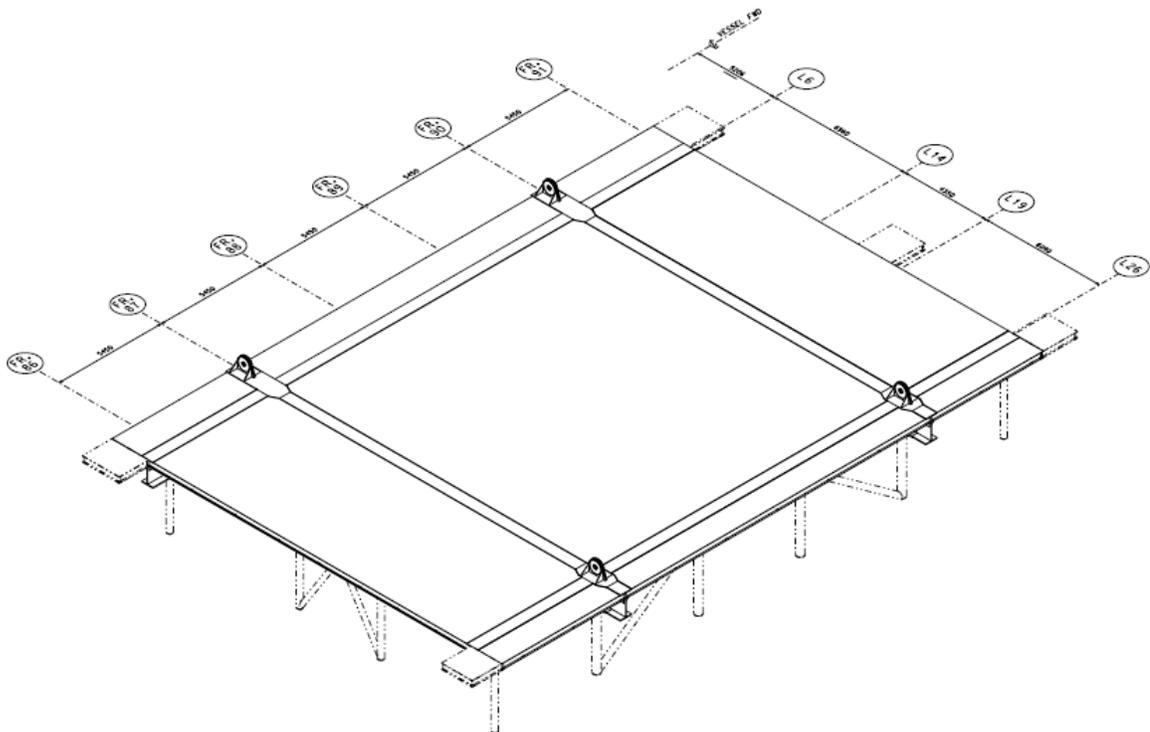


Figura 11 – Vista isométrica do Módulo de Processamento de Óleo da Plataforma FPSO.

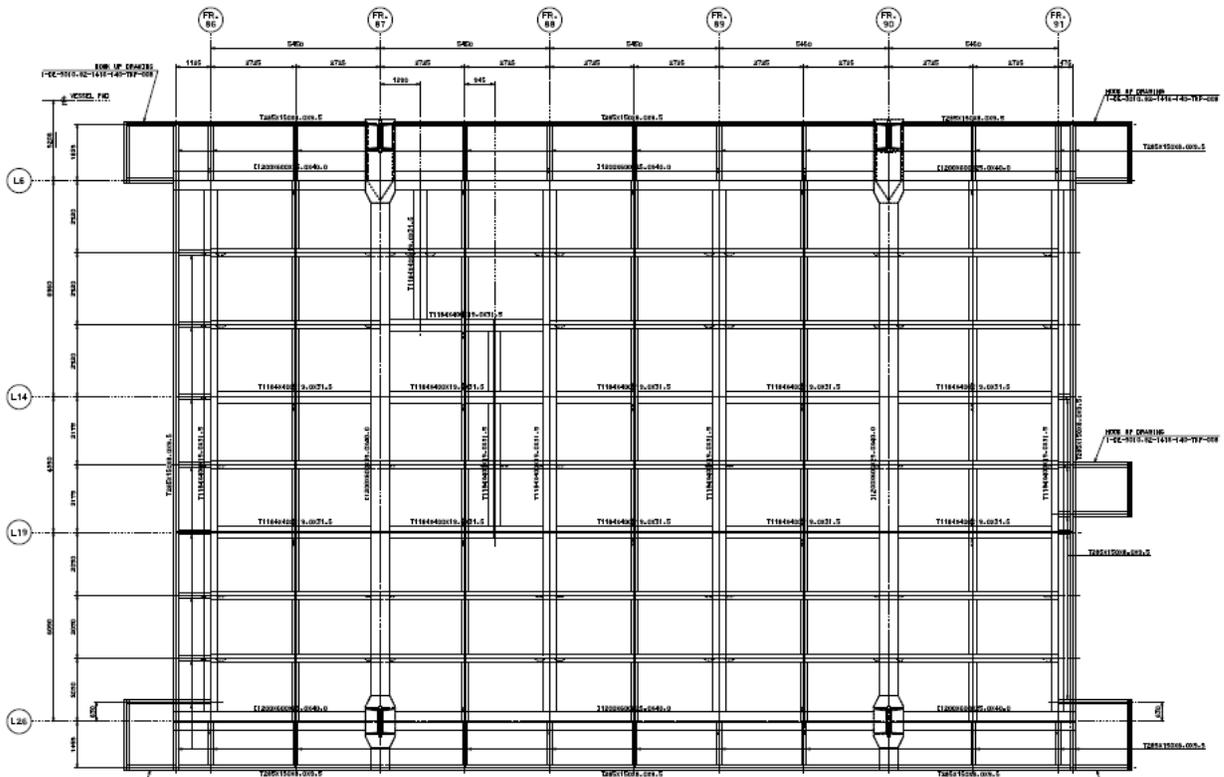


Figura 12 – Planta de elevação 35.250 do Módulo em análise.

As seguintes normas foram utilizadas para a análise do projeto:

- DnV - OS - C201 – Structural Design of Offshore Units (WSD method)
- AISC – Manual of Steel Construction - 9th edition
- API RP 2A – WSD – 21st edition - Recommended Practices for Planning, Designing and Constructing - Fixed Offshore Structures – Working Stress Design
- DNV Classification Notes 30.5 – Environmental Conditions and Environmental Loads
- Petrobras N-2684 – Estruturas Oceânicas – Cargas de Projeto – Equipamentos e Sobrecargas

A estrutura foi modelada e analisada no programa SACS 5.2 - Structural Analysis Computer System - Engineering Dynamics, Inc - Kenner, Louisiana e o programa GENIE desenvolvido pela DNV Software SESAM.

1.4. Organização

Após a introdução presente no Capítulo 1, no Capítulo 2 é mostrada a estrutura a ser analisada com suas características físicas e geométricas.

No Capítulo 3, são apresentados os carregamentos atuantes no modelo.

São contempladas no Capítulo 4 as combinações dos carregamentos atuantes no módulo do FPSO devidos as normas.

No Capítulo 5, são apresentadas as condições de contorno impostas de modo a tornar viável a instalação do modelo na plataforma.

No capítulo 6, são mostrados os resultados da análise do modelo feito pelo programa computacional SACS.

No Capítulo 7, é mostrada a análise em elementos finitos.

No Capítulo 8, são apresentadas as considerações finais, e no Capítulo 9, são apresentadas as referências bibliográficas segundo diretriz do Colegiado do Departamento de Estruturas, da UFRJ.

2. Etapas de projeto

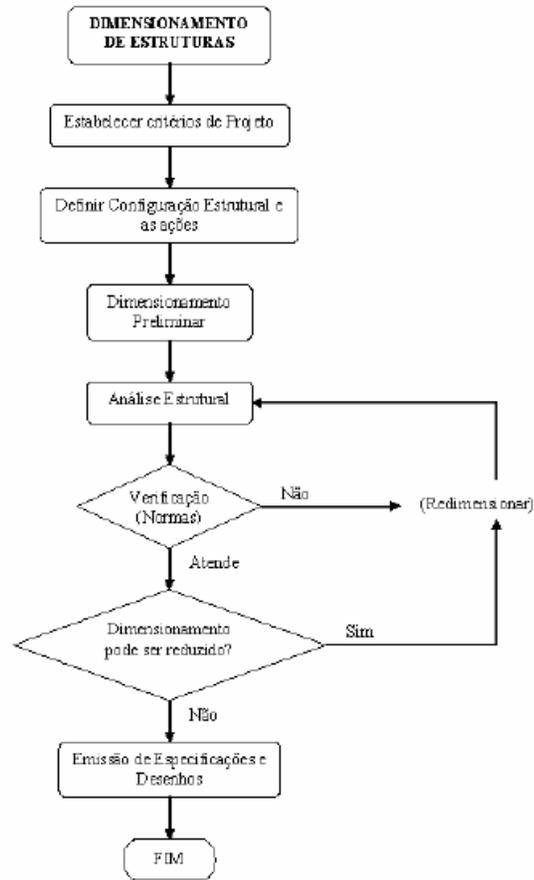


Figura 13 – Fluxo de processos para projeto de estrutura.

3. Modelo Estrutural

O modelo Estrutural foi desenvolvido de acordo com os eixos globais de orientação xyz de acordo com a figura a seguir:

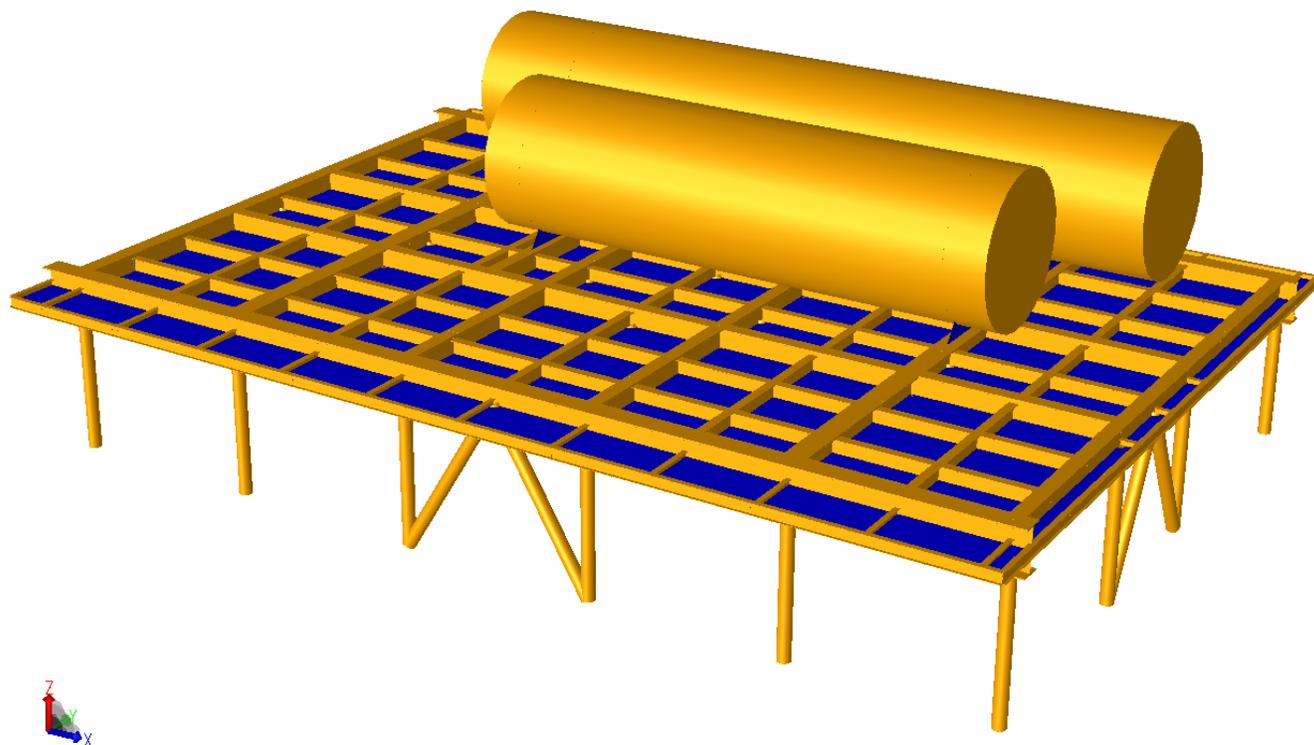


Figura 14 – Sistema de Coordenadas.

Onde:

Eixo global x – alinha com o eixo longitudinal do FPSO e a origem na perpendicular à ré(eixo do leme);

Eixo global y – alinha com o eixo transversal do FPSO e a origem na Linha de Centro – positivo a bombordo;

Eixo Global z – alinha com o eixo vertical do FPSO e a origem a partir da Linha de Fundo ou quilha do navio.

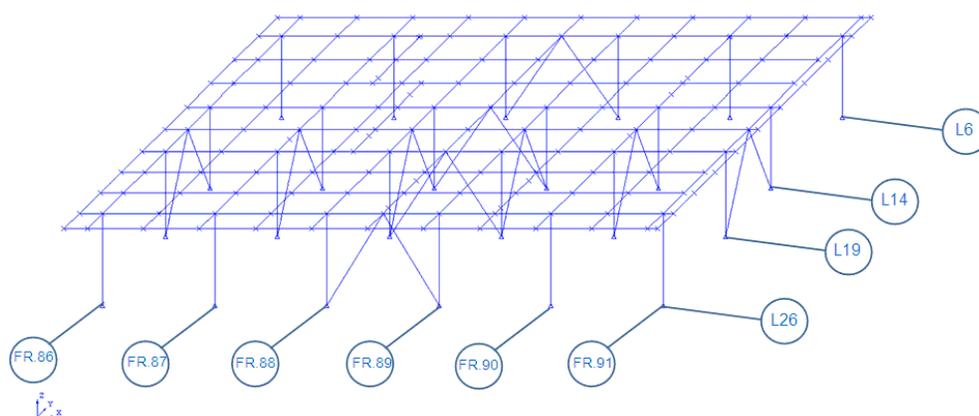


Figura 15 – Localização das Seções do Navio no Módulo.

As figuras dos itens 2.4, 2.5 e 2.6 mostram o número dos pontos, os nomes grupos utilizados para classificar os membros e as condições de contorno.

O programa do SACS identifica cada membro pelos pontos e o grupo utilizado contendo as propriedades dos perfis, a análise é feita por elementos de barras.

3.1. Materiais utilizados no projeto

- Limites de escoamento utilizados no modelo:
- Placas de aço / seções soldadas / perfis de aço $t < 50$ milímetros $F_y = 355$ Mpa;
- Perfis Laminados Soldados $F_y = 345$ Mpa;
- Tubo laminado / fundação dos topsides $F_y = 240$ Mpa;
- Tubo laminado / nos topsides $F_y = 355$ Mpa;
- Já, para a solda, utilizamos o limite de escoamento para Eletrodos - E70XX – tensão de ruptura – $F_w = 490$ Mpa;

3.2. Propriedades das Seções

Nas tabelas a seguir serão mostrados alguns perfis metálicos utilizados como certo padrão no estaleiro para a construção deste módulo. Caso o perfil exigido por cálculo não esteja dentro da tabela de perfis podemos soldar outras placas ao perfil padrão para que ele se aproxime das metragens calculadas.

Tabela 1 – Propriedades dos membros tubulares

GRUPO	Espessura da parede CM	Diâmetro do tubo CM	E 1000 KN/CM2	G 1000 KN/CM ²	AXIAL AREA CM ²	YIELD STRESS KN/CM ²	KY	KZ	SHEAR AREA CM ²
C35	1.9	35.6	21.0	8.0	201.9	24.0	1	1	201.9
D35	1.9	35.6	21.0	8.0	201.9	24.0	1	1	201.9
TO	0.0	429.0	21.0	8.0	131480.0	+10 35.5	1	1	*****

Tabela 2 – Propriedades dos membros

Grupo	** FLANGE **		WEB	Comprimento total do perfil CM	E 1000 KN/CM2	G 1000 KN/CM2	AXIAL AREA CM**2	YIELD STRESS KN/CM2	KY	KZ
	Espessura CM	Largura CM	Espessura CM							
I1B	4.0	60.0	2.5	120.0	21.0	8.0	760.0	35.5	1	1
T03	1.0	15.0	0.8	30.0	21.0	8.0	51.0	35.5	1	1
T1A	3.2	40.0	1.9	120.0	21.0	8.0	468.0	35.5	1	1
T8A	1.9	25.0	1.0	80.0	21.0	8.0	167.4	35.5	1	1

Tabela 3 – Propriedades das placas

PLATE GROUP	THICK CM	ELAST MOD 1000 KN/CM2	POIS. RATIO	YIELD STRESS KN/CM2
P16	1.6	21	0.3	35.5
PEQ	1.6	20	0.3	24.8

3.3. Nome dos Pontos

Com estes pontos a seguir podemos analisar cada partezinha da estrutura e em qual parte do membro identificado estou com problemas.

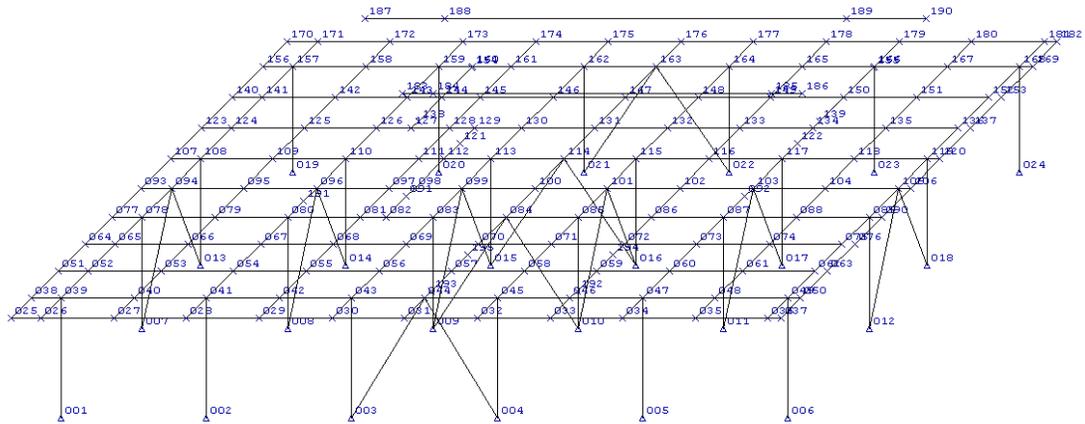


Figura 16 – Vista Isométrica - Pontos.

3.4. Grupos dos Membros

Desta forma poderei visualizar todas as propriedades aplicadas nos membros e modificar caso alguma esteja errada.

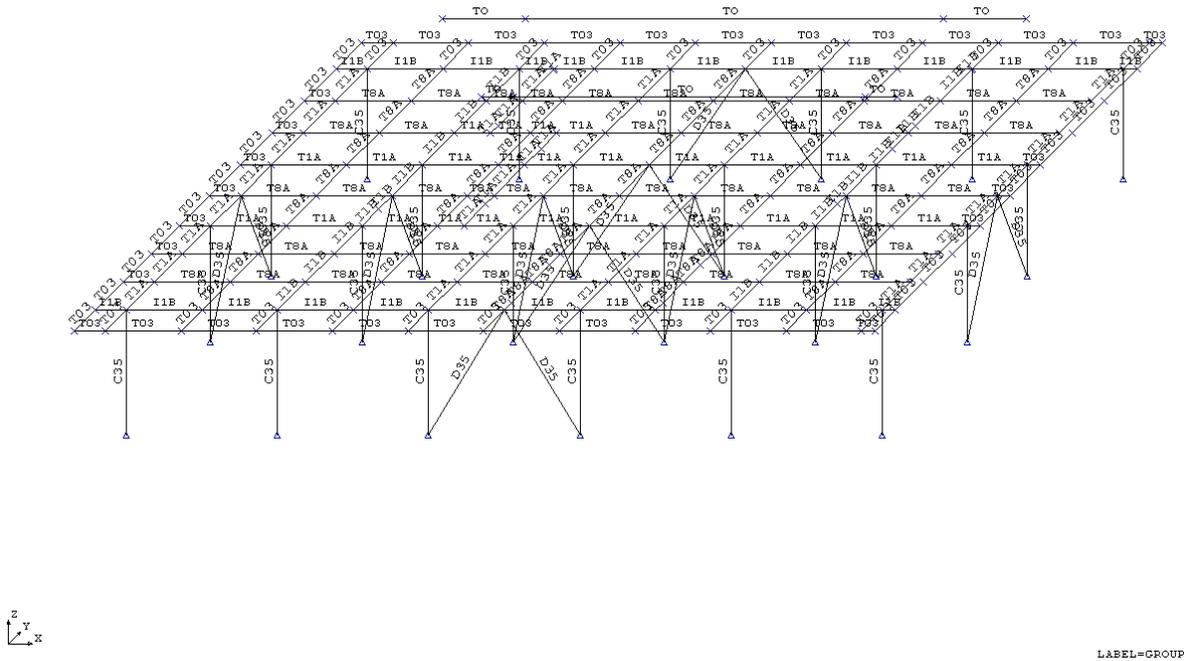


Figura 17 – Vista Isométrica - Membros.

3.5. Grupos das Placas

As Placas foram modeladas de modo a restringir a distorção no plano do convés. As placas travam os perfis dando estabilidade e rigidez ao módulo.

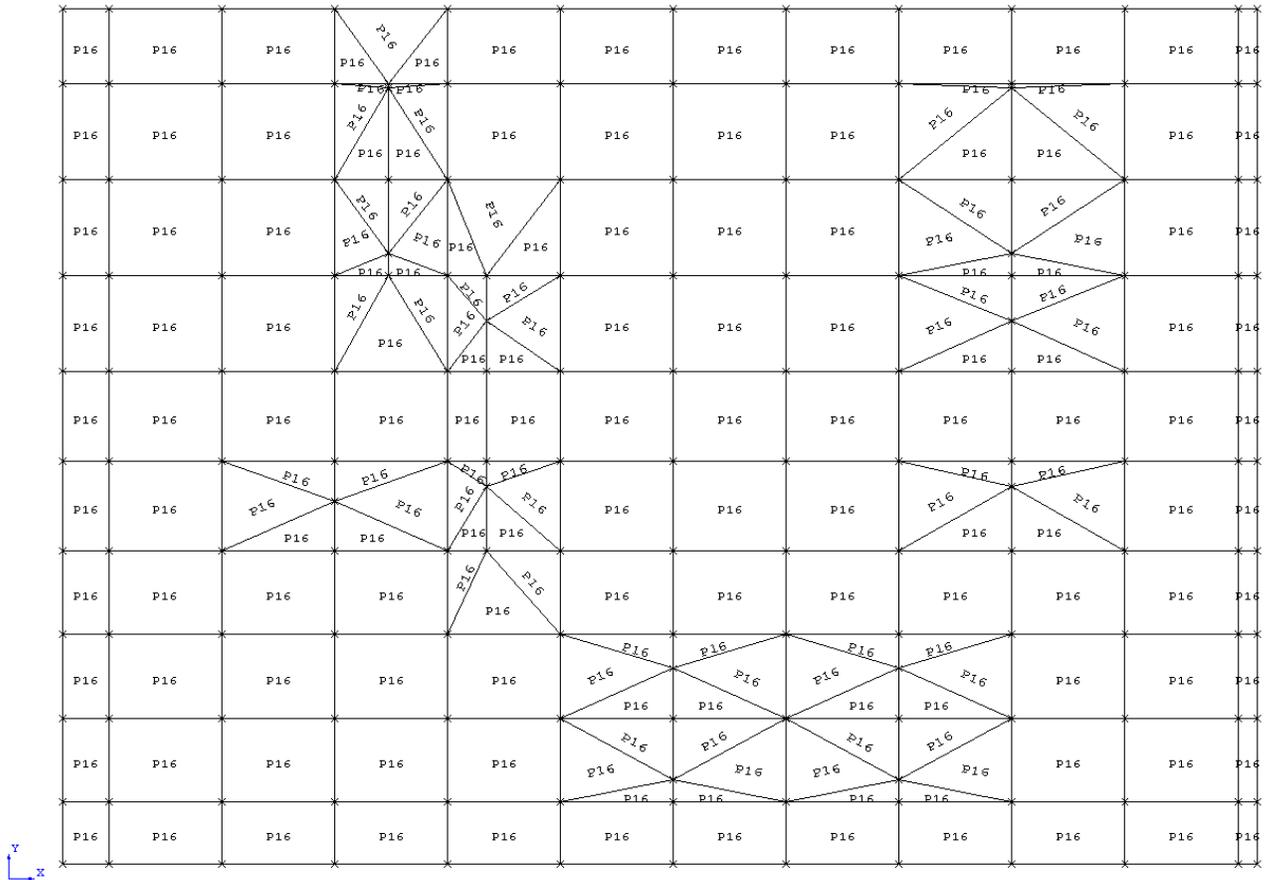


Figura 18 – Elevação 35.250 - Placas.

4. Carregamento Básico

Esta seção contém a descrição dos casos de carregamento básico considerados na análise. A soma dos carregamentos será mostrada no fim de cada item.

4.1. Peso Próprio (caso de carregamento 1)

O peso do perfil de aço é gerado automaticamente baseado nas características da seção e do material. A densidade do aço é considerada $8,1 \text{ kN/m}^3$ para considerar os pesos da soldagem e a pintura.

LOAD CONDITION 1

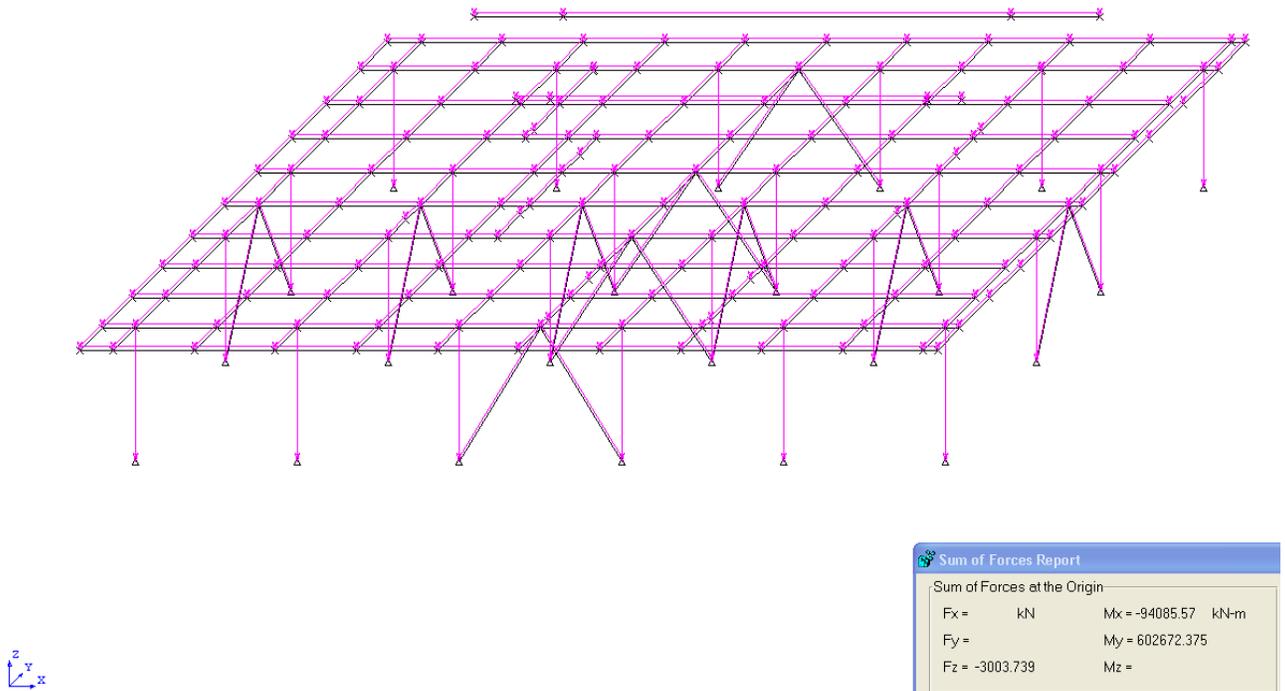


Figura 19 – Vista Isométrica – LC1.

4.2. Peso dos Equipamentos

Os pesos dos equipamentos são considerados como distribuídos ou carga pontual como mostrado a seguir. Estes pesos são entregues para o engenheiro especializado acompanhados de uma planta de localização com o posicionamento de cada um sobre o módulo em análise.

Tabela 4 – Pesos dos equipamentos considerados para a análise.

Tag Number	Identification Service	Discipline	Dry Weight Nett (t)	Operating weight (t)	Test weight (t)
P-1223001A	Oil / Oil Pre-Heater A	Mechanical	9,90	12,50	12,50
P-1223001B	Oil / Oil Pre-Heater B	Mechanical	9,90	12,50	12,50
P-1223001C	Oil / Oil Pre-Heater C	Mechanical	9,90	12,50	12,50
P-1223002A	Production Heater A	Mechanical	9,78	12,40	12,40
P-1223002B	Production Heater B	Mechanical	9,78	12,40	12,40
P-1223003	Crude Oil Cooler	Mechanical	9,73	12,40	12,40
PN-TO-1223001	Pre Oil Dehydrator Panel	Mechanical	0,19	0,19	0,19
PN-TO-1223002	Oil Dehydrator Panel	Mechanical	0,19	0,19	0,19
TF-TO-1223001 A/D	Pre Oil Dehydrator Transformer	Mechanical	0,68	0,95	0,95
TF-TO-1223002 A/D	Oil Dehydrator Transformer	Mechanical	0,91	1,28	1,28
TO-1223001	Pre-Oil Dehydrator	Mechanical	80,99	328,42	315,33
TO-1223002	Oil Dehydrator	Mechanical	112,47	462,19	444,36

4.3. Peso dos Equipamentos em Operação (caso de carregamento 2)

Este é o peso do equipamento mais o fluido que está circulando por seu interior que em quase 100% das vezes será óleo.

LOAD CONDITION 2

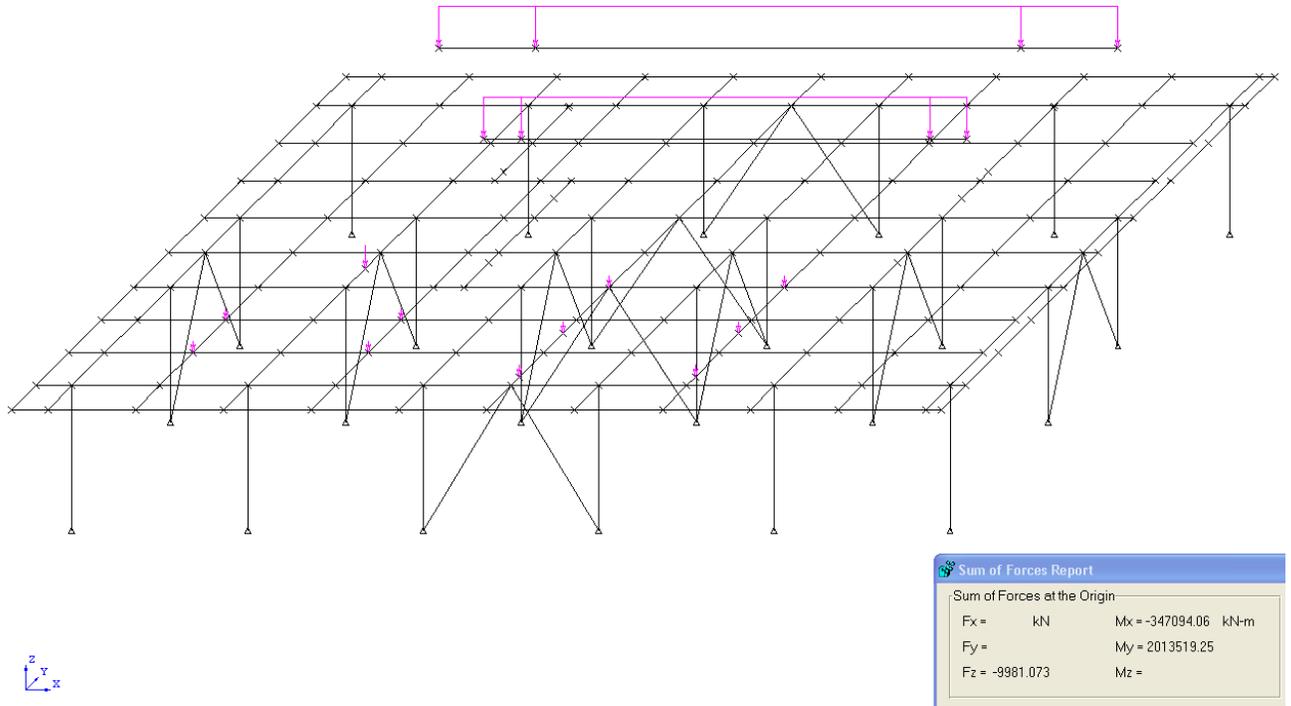


Figura 20 – Vista Isométrica – LC2.

4.4. Peso dos Equipamentos Secos (caso de carregamento 3)

Este é o peso do equipamento puro e simples sem nenhum tipo de fluido em seu interior.

LOAD CONDITION 3

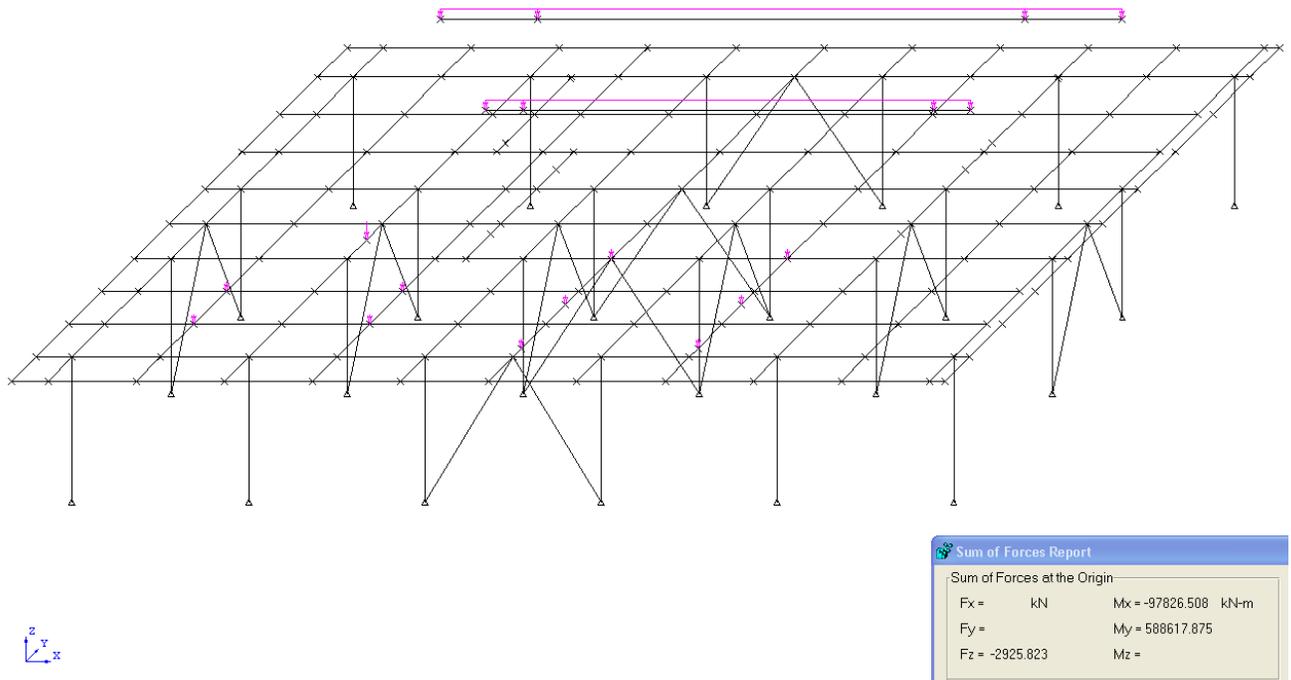


Figura 21 – Vista Isométrica - LC3.

4.5. Peso dos Equipamentos em Teste (caso de carregamento 4)

Este é o peso do equipamento mais o fluido que está circulando por seu interior para que o equipamento seja testado antes que comece a ser utilizado em plena função. Quase 100% das vezes será água, que por sua vez é mais densa que o óleo e então será o com maior peso dentre os 3 tipos.

LOAD CONDITION 4

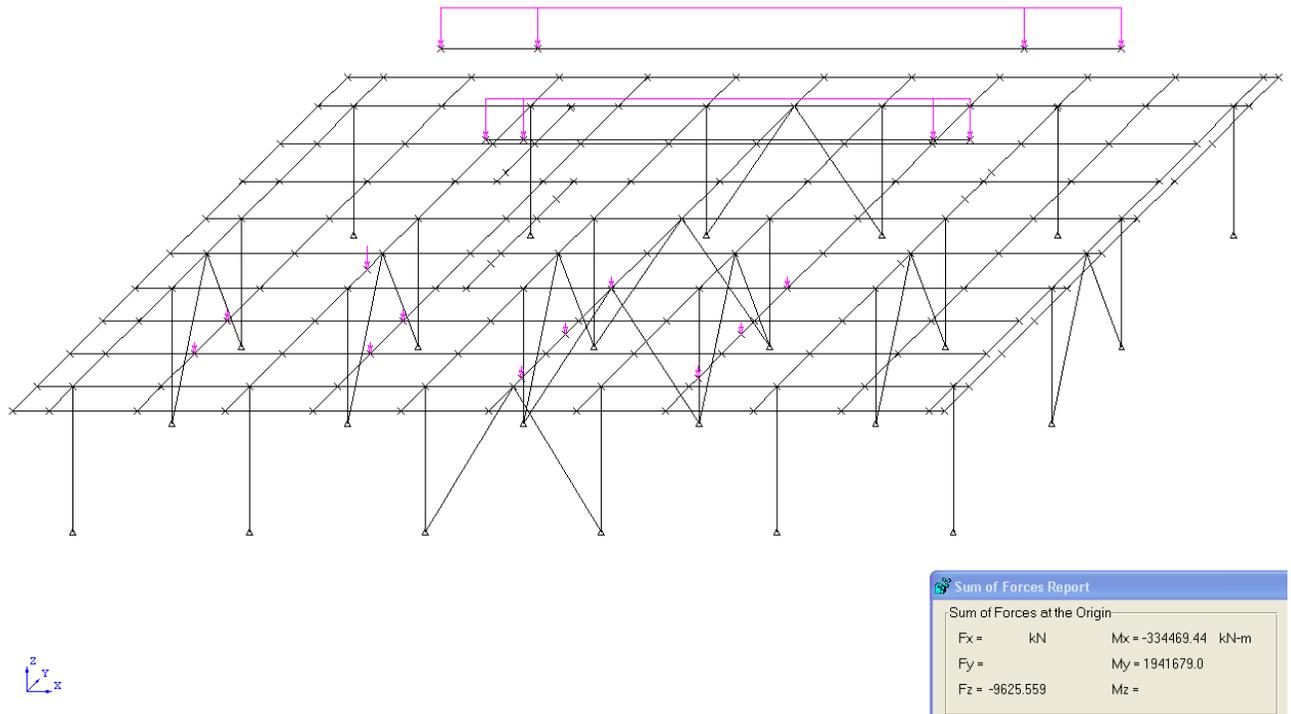


Figura 22 – Vista Isométrica – LC4.

4.6. Peso da Tubulação (caso de carregamento 5)

O peso da tubulação foi uniformemente distribuído pelo piso.

Tabela 5 – Pesos das tubulações considerados para a análise.

Tag Number	Identification Service	Mod	Discipline	Operating Weight (t)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Weight Consideration Source of Datas	Weight Consideration Drawing Number	Drawing Rev
Bulks										
PN-5520002F	CCS Remote I/O Panel	M06	Instruments	0,800	187,900	-12,100	38,100	PNBV WCR Rev B	I-RL-3010.82-1320-960-PPC-001	B
-	Lighting / Grounding Electrical Cables	M06	Electrical	0,162	200,600	-12,300	38,100			
-	Electrical Cable Trays	M06	Electrical	1,917	200,600	-12,300	38,100			
-	Lighting Fixture	M06	Electrical	0,578	200,600	-12,300	38,100			
-	Miscellaneous Materials	M06	Electrical	4,239	200,600	-12,300	38,100			
-	Instrument/Valves - M06	M06	Instruments	7,000	200,600	-12,300	38,100	PNBV WCR Rev B	I-RL-3010.82-1320-960-PPC-001	B
-	Multicables & tray - First deck	M06	Instruments	2,000	200,600	-12,300	38,100			
-	Multicables & tray support - First deck	M06	Instruments	0,500	200,600	-12,300	38,100			
-	Branch trays and cables - First Deck	M06	Instruments	0,300	200,600	-12,300	38,100			
-	Instrumentation Cables Integration First Deck	M06	Instruments	0,300	200,600	-12,300	38,100			
-	Misc Bulks - First deck	M06	Instruments	0,200	200,600	-12,300	38,100			
-	Instrument tagged items - First Deck	M06	Instruments	0,700	200,600	-12,300	38,100			
-	Instrument JB - First Deck	M06	Instruments	0,150	200,600	-12,300	38,100			
-	Supports for Instrumentt & JB - First Deck	M06	Instruments	0,038	200,600	-12,300	38,100			
-	PIPING - M06	M06	Piping	150,000	200,600	-12,300	38,100	PNBV WCR Rev C	I-RL-3010.82-1320-960-PPC-001	C
-	Safety Bulk First Deck	M06	Safety	0,350	200,600	-12,300	38,100			
-	Misc Signs and Notices	M06	Safety	0,100	200,600	-12,300	38,100			
-	Deluge/Misc (spray nozzles)	M06	Safety	0,300	200,600	-12,300	38,100			
-	Telecom Cable Trays & Accessories	M06	Telecomms	0,454	200,600	-12,300	38,100			
-	Telecom system Junction boxes etc	M06	Telecomms	0,100	200,600	-12,300	38,100			
-	Telecom Cables	M06	Telecomms	0,068	200,600	-12,300	38,100			
-	Telecom Miscellaneous	M06	Telecomms	0,750	200,600	-12,300	38,100			
Total (Bulks):				171,005						

LOAD CONDITION 5

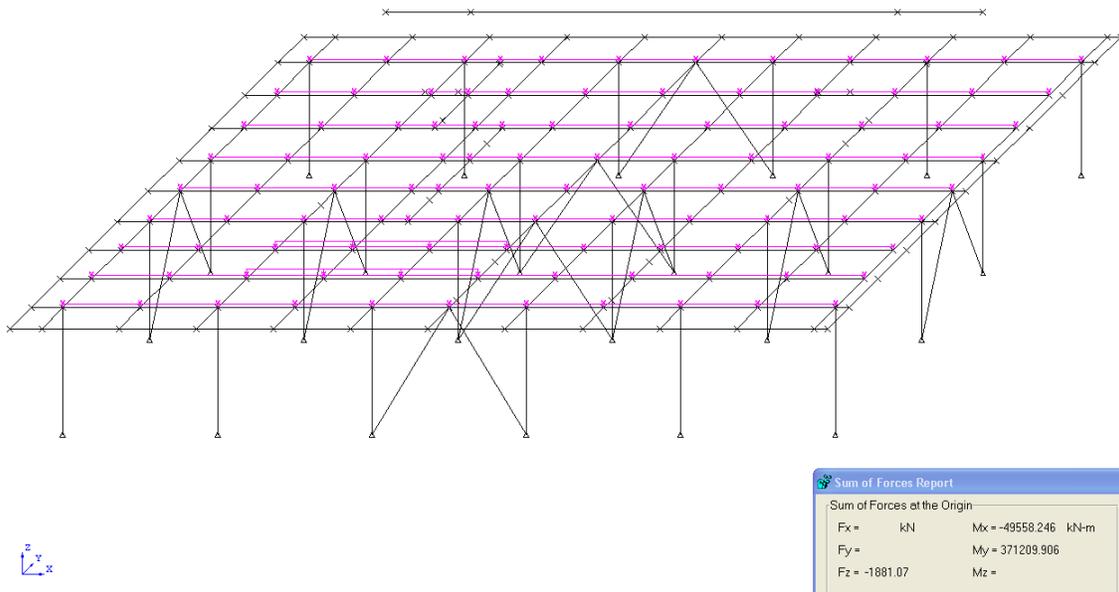


Figura 23 – Vista Isométrica – LC5.

4.7. Sobrecarga (caso de carregamento 6)

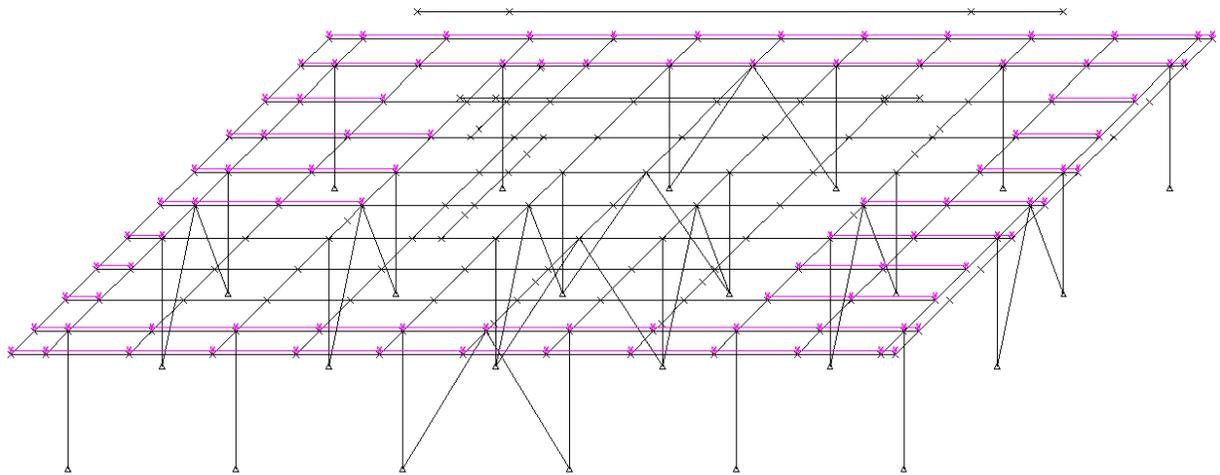
A sobrecarga é um carregamento aplicado com forças distribuídas em áreas que não possuem incidência de peso de equipamento (área livres) seus valores estão de acordo com a norma Petrobras N-268.

Tabela 6 – Peso distribuído das sobrecargas consideradas na análise

Table D1 Variable functional loads on deck areas	
Area	Local design
	Distributed load, q (kN/m^2)
Lifeboat platforms	9.0
Area between equipment	5.0
Walkways, staircases and platforms, crew spaces	4.0
Walkways and staircases for inspection only	3.0
Areas not exposed to other functional loads	2.5

Foi usado 4,5 kN/m^2 como valor médio entre 5,0 kN/m^2 (Área entre equipamentos) e 4,0 kN/m^2 (Corredores, escadas e plataformas).

LOAD CONDITION 6



Sum of Forces Report			
Sum of Forces at the Origin			
Fx =	kN	Mx = -31852.711	kN-m
Fy =		My = 202661.719	
Fz =	-1006.545	Mz =	

Figura 24 – Vista Isométrica – LC6.

4.8. Cargas Ambientais (casos de carregamentos 7 e 8)

4.8.1. Cálculo da Carga de Vento

De acordo com a norma da DnV 30.5 já citada as forças do vento são determinadas como a seguir:

Tabela 7 – Velocidade de referência do vento consideradas na análise - para a bacia de Campos

Velocidade de Referência do Vento (m/s)		
Duração	1 ano de Retorno (m/s)	100 anos de retorno (m/s)
10 min.	18,64	31,88

De modo conservador, a área obstruída será considerada a partir de 5 metros do convés ou primeiro piso do módulo que possui uma elevação de 35,25m como mostrado em $D_{Elevação}$. Considerando a pressão como $1,0\text{kN/m}^2$ a carga total foi aplicada como se segue.

Para combinar os carregamentos básicos de vento os fatores a seguir foram aplicados à pressão de vento:

$$D_{Largura} = 20.72 \text{ m (eixo transversal Y)}$$

$$D_{Comprimento} = 28.85 \text{ m (eixo longitudinal X)}$$

$$D_{Altura} = 5 \text{ m (distancia entre o primeiro e ultimo deck)}$$

$$D_{Elevação} = 35,5 + 5,0 = 40.25 \text{ m (elevação máxima)}$$

$$Z_{Calado} = 10.78 \text{ m (altura mínima do calado)}$$

$$P_{Básica} = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ (Pressão Básica do vento)}$$

- Área e força de incidência do vento em X

$$A_x = D_{\text{Largura}} * D_{\text{Altura}} = 20.72 * 5 = 103.6 \text{ m}^2$$

$$F_x = A_x * P_{\text{Básica}} = 103.6 * 1 = 103.6 \text{ kN}$$

- Área e força de incidência do vento em Y

$$A_x = D_{\text{Comprimento}} * D_{\text{Altura}} = 28.85 * 5 = 144.25 \text{ m}^2$$

$$F_x = A_y * P_{\text{Básica}} = 144.25 * 1 = 144.25 \text{ kN}$$

- Força básica do vento por nó

Será aplicada a força do vento por nó pois serão as vigas principais longitudinais a incidência da força de vento que irão resistir aos esforços da mesma.

$$F_{xj} = \frac{F_x}{J_{nx}} = \frac{103.6}{9} = 11.51 \text{ m/s}$$

$$F_{yj} = \frac{F_y}{J_{ny}} = \frac{144.25}{11} = 13.11 \text{ m/s}$$

- Altura média de incidência do vento

$$Z_{\text{médio}} = D_{\text{Elevação}} - Z_{\text{Calado}} = 40.25 - 10.78 = 29.47 \text{ m}^2$$

- Taxa de velocidade do vento

Interpolação linear para achar a taxa de velocidade do vento da elevação do $Z_{\text{médio}}$ usando uma tabela que contém várias elevações e as taxas de velocidade do vento correspondentes.

$$W_{sr_table} := \begin{pmatrix} 20 & 1.203 \\ 30 & 1.259 \\ 40 & 1.298 \end{pmatrix}$$

Para $Z_{\text{médio}}=29.47$ teremos $W_{sr} = 1.256$.

- Referência da velocidade do vento

$V_{rw_1ano} = 18.64$ m/s (vento de referência para o período de retorno de 1 ano – DOC)

$V_{rw_100anos} = 31.88$ m/s (vento de referência para o período de retorno de 100 anos – DEC)

- Coeficiente de Forma

$$C_s = 1.0$$

- Densidade do ar

$$\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3} \text{ (Nível do mar e temperatura padrão)}$$

- Velocidade do vento

$$V_{w_1ano} = V_{rw_1ano} * W_{sr} = 18.64 * 1.256 = 23.41 \text{ m/s}$$

$$V_{w_100anos} = V_{rw_100anos} * W_{sr} = 31.88 * 1.256 = 40.04 \text{ m/s}$$

- Pressão do vento (os valores a seguir serão adotados como fatores na combinação de carga)

$$P_{w_1ano} = \frac{\rho \cdot V_{w_1ano}^2 \cdot C_s}{2} = 0.336 \frac{kN}{m^2}$$

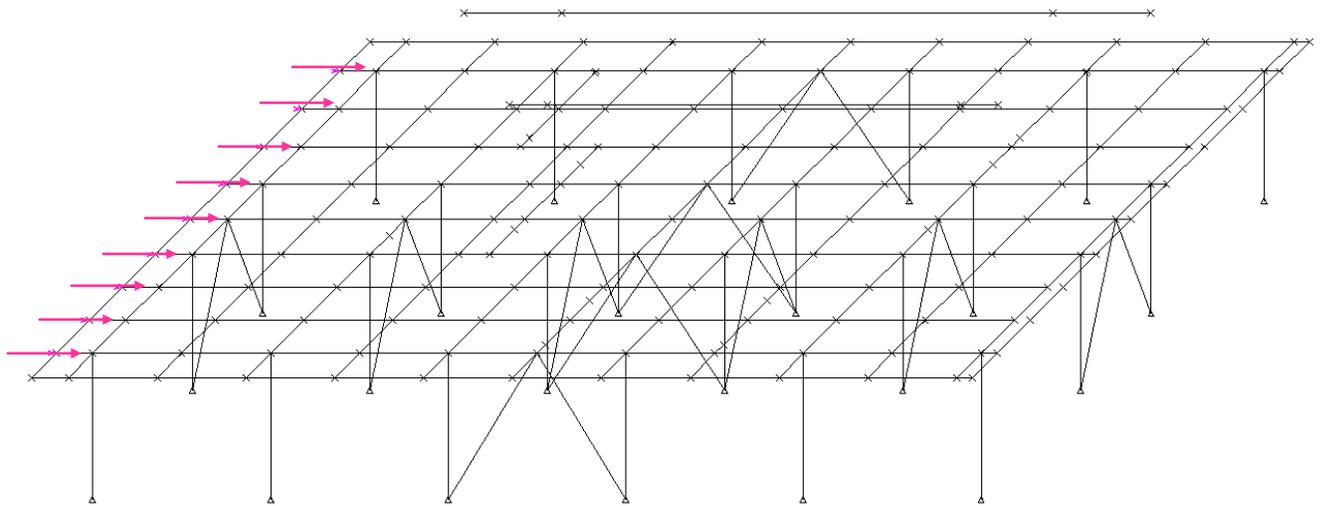
$$P_{w_100anos} = \frac{\rho \cdot V_{w_100anos}^2 \cdot C_s}{2} = 0.982 \frac{kN}{m^2}$$

Vento na direção X (caso de carregamento 7)

$$A_x = 103.60 \text{ m}^2$$

$$F_x = 103.60 \text{ kN}$$

LOAD CONDITION 7



Sum of Forces Report	
Sum of Forces at the Origin	
Fx = 103.599 kN	Mx = kN-m
Fy =	My = 3651.865
Fz =	Mz = -3218.234

Figura 25 – Vista Isométrica – LC7.

Vento na direção Y (caso de carregamento 8)

$$A_y = 144.25 \text{ m}^2$$

$$F_y = 144.25 \text{ kN}$$

LOAD CONDITION 8

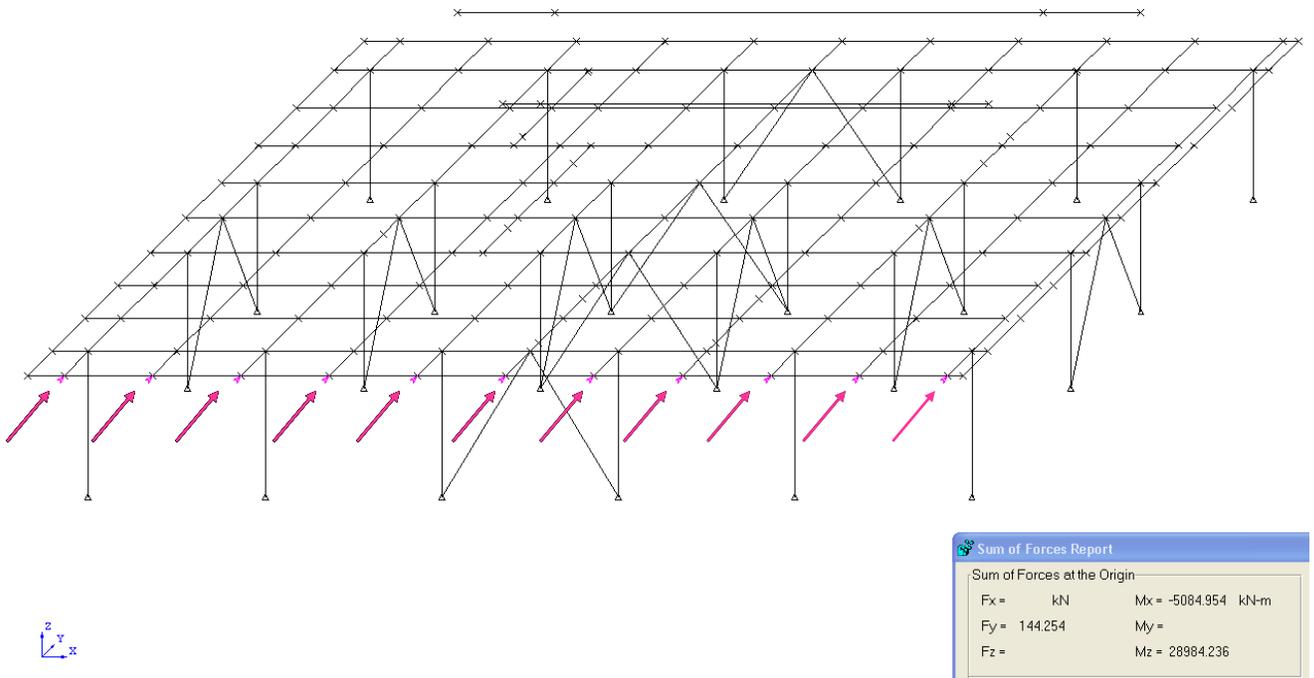


Figura 26 – Vista Isométrica – LC8.

4.9. Deslocamentos Prescritos (caso de carregamento 9)

Em uma viga biapoiada temos nos apoios as forças no eixo da viga que seria classificada como a normal, no eixo perpendicular que é classificada como esforço cortante e a rotação em torno do eixo y. O FPSO é analisado como uma viga, esta é chamada de viga-navio, e suas deformações e rotações verticais e longitudinais foram incluídas nesta análise, pois impõem deslocamentos aos apoios dos módulos. Como os apoios estão alocados em cima das cavernas e estas estão posicionadas transversalmente ao longo da viga-navio cada caverna possui sua respectiva deformação e são estas deformações das respectivas cavernas que são mostradas nas figuras 28, 29 e 30.

Tabela 8 – Rotações e deslocamentos aplicados

Frame Section (n°)	Coord X a partir da popa Perpendicular(m)	Vertical Displacement (Z) (m)	Horizontal Displacement (X) (m)	Rotation (Y) (rad)
86	187.3	0.488394	0.013227	0.00077
87	192.75	0.483095	0.019299	0.001124
88	198.2	0.475868	0.02537	0.001477
89	203.65	0.466714	0.031442	0.001831
90	209.1	0.455635	0.037501	0.002184
91	214.55	0.442657	0.043402	0.002528

Todos os Deslocamentos e rotações estão de acordo com o modelo estrutural global de eixos.

Os deslocamentos e rotações aplicados para as resultantes da condição de sagging – extremidades do navio estão na crista da onda enquanto o meio do navio está no cavado da onda (parte baixa da onda, com isso analisando o convés do navio que é o local onde os módulos ficarão alocados vemos que o meio do navio está comprimido enquanto as extremidades estão tracionadas formando um “U”) ou hogging – que seria o movimento contrário ao supracitado, isto é, meio do navio está na crista da onda enquanto as extremidades do navio estão no cavado da onda, tais movimentos são mostrados na figura 27 para facilitar a visualização:

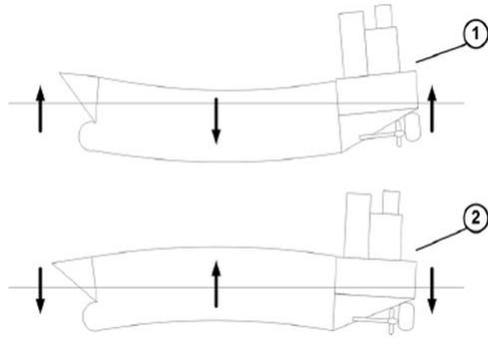


Figura 27 – Movimento da viga navio - Sagging(1) e hogging (2).



DISPLACEMENT X LC= 9

Figura 28 – Deslocamentos em X.

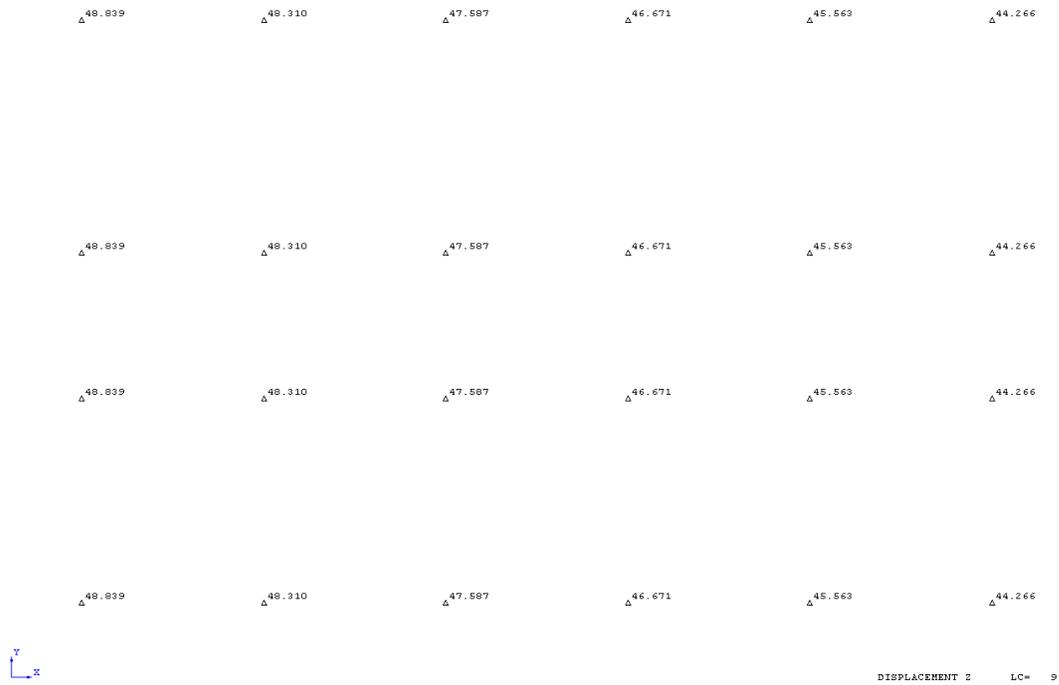


Figura 29 – Deslocamentos em Z.

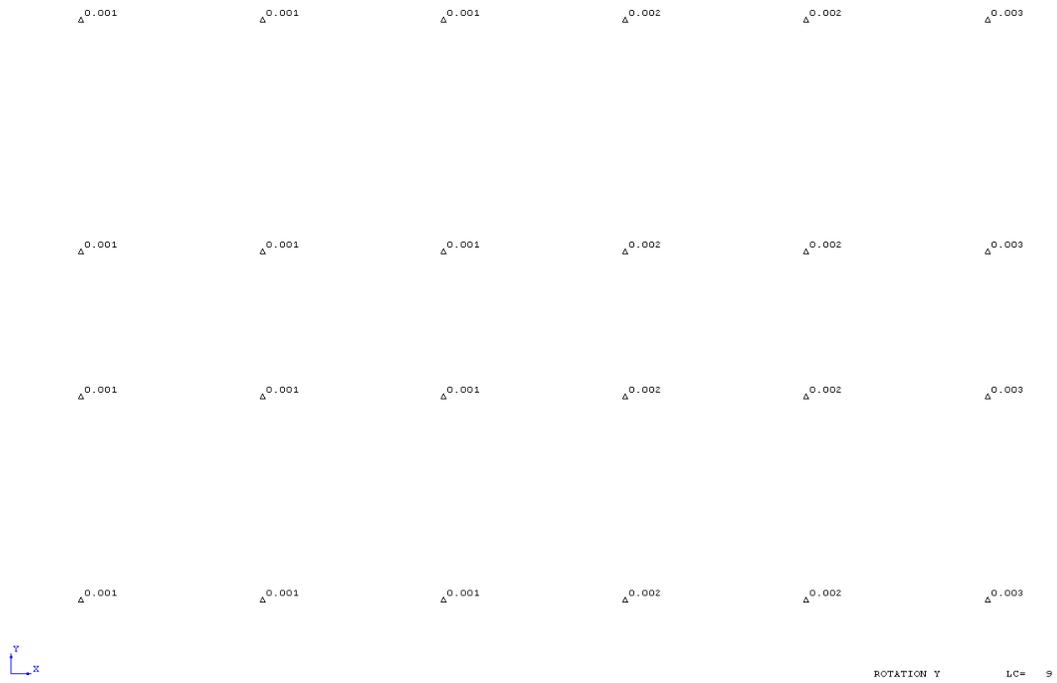


Figura 30 – Rotação em Y.

4.10. Cálculo das acelerações

Os movimentos do navio de roll (período da oscilação em torno do eixo X, definido pelo ângulo de rotação do navio), *pitch*(período da oscilação em torno do eixo Y, definido pelo ângulo de rotação do navio) e *heave* (oscilação vertical e é definido por uma aceleração), aceleram verticalmente e horizontalmente as massas de todos os módulos da plataforma, gerando forças de inércia. Dessa forma, foi utilizado um módulo do programa SACS chamado TOW, que acelerou os carregamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do módulo analisado. Considerando o calado mínimo do navio como 10.78 m, o centro de rotação está localizado nas coordenadas:

$$X = 167.25 \text{ m}; Y = 0; Z = 10.78 \text{ m.}$$

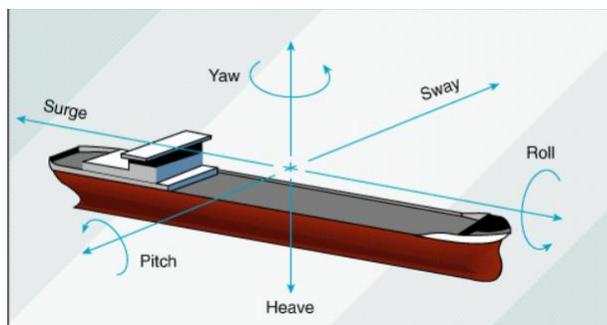


Figura 31 – Deslocamentos em X.

O programa TOW cria os casos de carregamento de inércia baseado nas acelerações definidas pela entrada de dados de movimento.

4.10.1. Condição de Movimentos Extremos

Cargas ambientais com período de 100 anos de retorno (DEC). Os valores que serão mostrados a seguir funcionam como dados de entrada para a condição extrema de projeto e são calculados por engenheiros navais e sugeridos para uso nos módulos alocados no convés da plataforma:

Tabela 9 – Amplitudes (angulação total da onda) individuais para a condição de DEC na bacia de campos consideradas na análise

Roll		Pitch		Heave
θ	T	θ	T	
20°	15 s	5°	15 s	

Tabela 10 – Esta tabela mostra a combinação dos movimentos do navio durante a condição extrema de projeto – DEC, estas combinações serão usadas na tabela de combinação de cargas que será mostrada mais a frente.

Condição extrema de projeto			
DEC	ROLL	PITCH	HEAVE
1	+		+
2	-		+
3	+		-
4	-		-
5		+	+
6		-	+
7		+	-
8		-	-
9	+		
10		+	
11			+

A máxima aceleração resultante é mostrada a seguir. Os resultados estão de acordo com a análise hidrodinâmica.

Tabela 11 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise

No.	POINT	X(m) Ms	Y(m) CL	Z(m) BL
8	Módulo de Processamento de óleo	200.6	-12.255	38.075

Tabela 12 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise

Points	Acceleration 1 year			Acceleration 10 years		
	Ax (m/s ²)	Ay (m/s ²)	Az (m/s ²)	Ax (m/s ²)	Ay (m/s ²)	Az (m/s ²)
Pt8	0.73	2.55	11.06	0.86	3.10	11.30

Tabela 13 – Amplitudes individuais para a condição de DEC consideradas na análise

Points	Acceleration 30 years			Acceleration 100 years		
	Ax (m/s ²)	Ay (m/s ²)	Az (m/s ²)	Ax (m/s ²)	Ay (m/s ²)	Az (m/s ²)
Pt8	0.90	3.34	11.40	0.95	3.59	11.50

Os resultados apresentados a seguir devem estar com valores aproximados aos das tabelas 12 e 13, porém divididos pela aceleração da gravidade e se tivéssemos atribuído um ponto com as coordenadas da tabela 11 no SACS este ponto deveria estar com acelerações iguais às mostradas nas tabelas 12 e 13. Lembrando que a condição de DEC é de 100 anos de retorno enquanto a condição de trânsito é de 10 anos de retorno.

```

*** SELECTED JOINT DATA FOR INERTIA LOAD CASE DEC1 ***

```

JOINT	COORDINATES (M)						ACCELERATIONS (G'S)					
	***** X	STRUCTURAL Y	***** Z	***** X	GLOBAL Y	***** Z	***** X	STRUCTURAL Y	***** Z	***** X	GLOBAL Y	***** Z
039	187.30	-22.61	35.25	20.05	-22.61	24.47	0.00	0.49	1.28	0.00	0.49	1.28
049	214.55	-22.61	35.25	47.30	-22.61	24.47	0.00	0.49	1.28	0.00	0.49	1.28
157	187.30	-5.21	35.25	20.05	-5.21	24.47	0.00	0.49	1.18	0.00	0.49	1.18
168	214.55	-5.21	35.25	47.30	-5.21	24.47	0.00	0.49	1.18	0.00	0.49	1.18

4.10.2. Condição de Trânsito

Cargas ambientais com período de 1 ano de retorno (TRA). Dados de entrada para condição de projeto.

Tabela 14– Amplitudes individuais para a condição de TRA consideradas na análise

Roll		Pitch		Heave
θ	T	θ	T	
25°	15 s	5°	15 s	

Tabela 15– Esta tabela mostra a combinação dos movimentos do navio durante a condição a condição de trânsito (TRA) do FPSO, estas combinações serão usadas na tabela de combinação de cargas que será mostrada mais a frente.

Transit Conditions			
TRA	ROLL	PITCH	HEAVE
1	+	+	
2	+	-	
3	-	+	
4	-	-	
5			+
6			-

A resultante máxima da aceleração está mostrada a seguir. Estes resultados estão de acordo com a análise hidrodinâmica.

*** SELECTED JOINT DATA FOR INERTIA LOAD CASE TRA1 ***

JOINT	COORDINATES (M)						ACCELERATIONS (G'S)					
	STRUCTURAL X	STRUCTURAL Y	STRUCTURAL Z	GLOBAL X	GLOBAL Y	GLOBAL Z	STRUCTURAL X	STRUCTURAL Y	STRUCTURAL Z	GLOBAL X	GLOBAL Y	GLOBAL Z
039	187.30	-22.61	35.25	20.05	-22.61	24.47	-0.12	0.61	0.11	-0.12	0.61	0.11
049	214.55	-22.61	35.25	47.30	-22.61	24.47	-0.12	0.61	0.15	-0.12	0.61	0.15
157	187.30	-5.21	35.25	20.05	-5.21	24.47	-0.12	0.61	-0.03	-0.12	0.61	-0.03
168	214.55	-5.21	35.25	47.30	-5.21	24.47	-0.12	0.61	0.02	-0.12	0.61	0.02

*** SELECTED JOINT DATA FOR INERTIA LOAD CASE TRA5 ***

JOINT	COORDINATES (M)						ACCELERATIONS (G'S)					
	STRUCTURAL X	STRUCTURAL Y	STRUCTURAL Z	GLOBAL X	GLOBAL Y	GLOBAL Z	STRUCTURAL X	STRUCTURAL Y	STRUCTURAL Z	GLOBAL X	GLOBAL Y	GLOBAL Z
039	187.30	-22.61	35.25	20.05	-22.61	24.47	0.00	0.00	1.31	0.00	0.00	1.31
049	214.55	-22.61	35.25	47.30	-22.61	24.47	0.00	0.00	1.31	0.00	0.00	1.31
157	187.30	-5.21	35.25	20.05	-5.21	24.47	0.00	0.00	1.31	0.00	0.00	1.31
168	214.55	-5.21	35.25	47.30	-5.21	24.47	0.00	0.00	1.31	0.00	0.00	1.31

4.10.3. Condição de Avaria

Dados de entrada para condição de projeto – DAM. As estruturas do convés foram analisadas para um alagamento acidental dos tanques do FPSO que poderia dar origem a ângulos de *trim* (inclinação longitudinal do casco do navio) a *Heel* (inclinação transversal do casco do navio):

Heel angle: 25° Trim angle: 10°

Tabela 16 – Combinação dos movimentos do navio durante a condição a condição de avaria (DAM) do FPSO, estas combinações serão usadas na tabela de combinação de cargas que será mostrada mais a frente.

Damage		
DAM	HEEL	TRIM
1	+	+
2	-	+
3	+	-
4	-	-

Os seguintes valores foram tirados do seno e do cosseno dos ângulos supracitados com a horizontal.

$$\text{sen } 25 = 0.422 \quad \text{cos } 25 = 0.906 \quad \text{sen } 10 = 0.174 \quad \text{cos } 10 = 0.985$$

```

*** SELECTED JOINT DATA FOR INERTIA LOAD CASE DAM1 ***
JOINT          ***** STRUCTURAL ***** COORDINATES ( M ) ***** GLOBAL ***** ***** STRUCTURAL ***** ACCELERATIONS (G'S) ***** GLOBAL *****
                X           Y           Z           X           Y           Z           X           Y           Z           X           Y           Z
039            187.30      -22.61      35.25      20.05      -22.61      24.47      0.00      0.42      0.91      0.00      0.42      0.91
049            214.55      -22.61      35.25      47.30      -22.61      24.47      0.00      0.42      0.91      0.00      0.42      0.91
157            187.30       -5.21      35.25      20.05       -5.21      24.47      0.00      0.42      0.91      0.00      0.42      0.91
168            214.55       -5.21      35.25      47.30       -5.21      24.47      0.00      0.42      0.91      0.00      0.42      0.91

```

```

*** SELECTED JOINT DATA FOR INERTIA LOAD CASE DAM2 ***
JOINT          ***** STRUCTURAL ***** COORDINATES ( M ) ***** GLOBAL ***** ***** STRUCTURAL ***** ACCELERATIONS (G'S) ***** GLOBAL *****
                X           Y           Z           X           Y           Z           X           Y           Z           X           Y           Z
039            187.30      -22.61      35.25      20.05      -22.61      24.47      0.17      0.00      0.98      0.17      0.00      0.98
049            214.55      -22.61      35.25      47.30      -22.61      24.47      0.17      0.00      0.98      0.17      0.00      0.98
157            187.30       -5.21      35.25      20.05       -5.21      24.47      0.17      0.00      0.98      0.17      0.00      0.98
168            214.55       -5.21      35.25      47.30       -5.21      24.47      0.17      0.00      0.98      0.17      0.00      0.98

```

4.11. Resumo da carga aplicada

A seguir é mostrado o resumo do carregamento aplicado nas determinadas condições de carregamento. A importância deste resumo se dá para termos uma ideia geral do carregamento aplicado e assim, compararmos posteriormente com as reações fornecidas pelo SACS verificando a terceira lei de Newton (ação e reação).

APPLIED LOAD SUMMARY				
LOAD CASE	TOTAL FORCE (X)	TOTAL FORCE (Y)	TOTAL FORCE (Z)	
NO. ID	KN	KN	KN	
1 1	-2.528395E-16	3.757337E-06	-3.003585E+03	
2 2	0.000000E+00	0.000000E+00	-9.980556E+03	
3 3	0.000000E+00	0.000000E+00	-2.925672E+03	
4 4	0.000000E+00	0.000000E+00	-9.625061E+03	
5 5	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.880972E+03	
6 6	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.006494E+03	
7 7	1.035939E+02	0.000000E+00	0.000000E+00	
8 8	0.000000E+00	1.442468E+02	0.000000E+00	
9 9	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	
10 DEC1	5.056790E-16	-8.011468E+03	-1.937022E+04	
11 DEC2	-1.264198E-15	8.011510E+03	-1.693435E+04	
12 DEC3	0.000000E+00	-8.011468E+03	-1.289476E+04	
13 DEC4	0.000000E+00	8.011510E+03	-1.045867E+04	
14 DEC5	2.029078E+03	1.926419E-06	-1.988495E+04	
15 DEC6	-2.029086E+03	1.755874E-06	-1.821306E+04	
16 DEC7	2.029078E+03	3.352115E-07	-1.340927E+04	
17 DEC8	-2.029086E+03	5.124974E-07	-1.173747E+04	
18 DEC9	-4.345679E-17	-8.011468E+03	-2.608380E+02	
19 DE10	2.029078E+03	7.891773E-08	-7.755137E+02	
20 DE11	-1.264198E-15	2.034158E-06	-1.910937E+04	
21 TRA1	9.241177E+02	-4.836698E+03	-5.129613E+02	
22 TRA2	-9.241179E+02	-4.836698E+03	2.869530E+02	
23 TRA3	9.241177E+02	4.836684E+03	1.230433E+03	
24 TRA4	-9.241179E+02	4.836684E+03	2.030349E+03	
25 TRA5	5.056790E-16	2.859659E-06	-1.020019E+04	
26 TRA6	0.000000E+00	1.434233E-06	-5.420268E+03	
27 DAM1	5.056790E-16	-6.666132E+03	-1.444308E+04	
28 DAM2	-2.698173E+03	1.859289E-06	-1.555429E+04	
29 DAM3	2.698173E+03	1.859289E-06	-1.555429E+04	
30 DAM4	5.056790E-16	6.666078E+03	-1.444308E+04	

4.12. Modelo Estrutural e condições de contorno

O modelo estrutural adotado nesta análise é descrito no item 2. O posicionamento da fundação é estratégico coincidindo com as cavernas do navio. Locais estes que possuem uma resistência bem alta tornando, dessa maneira, possível o engastamento dos módulos nos conveses.

As condições de contorno assumidas são:

As translações e rotações de todos os suportes estão restringidas na direção X, Y e Z(engastado).

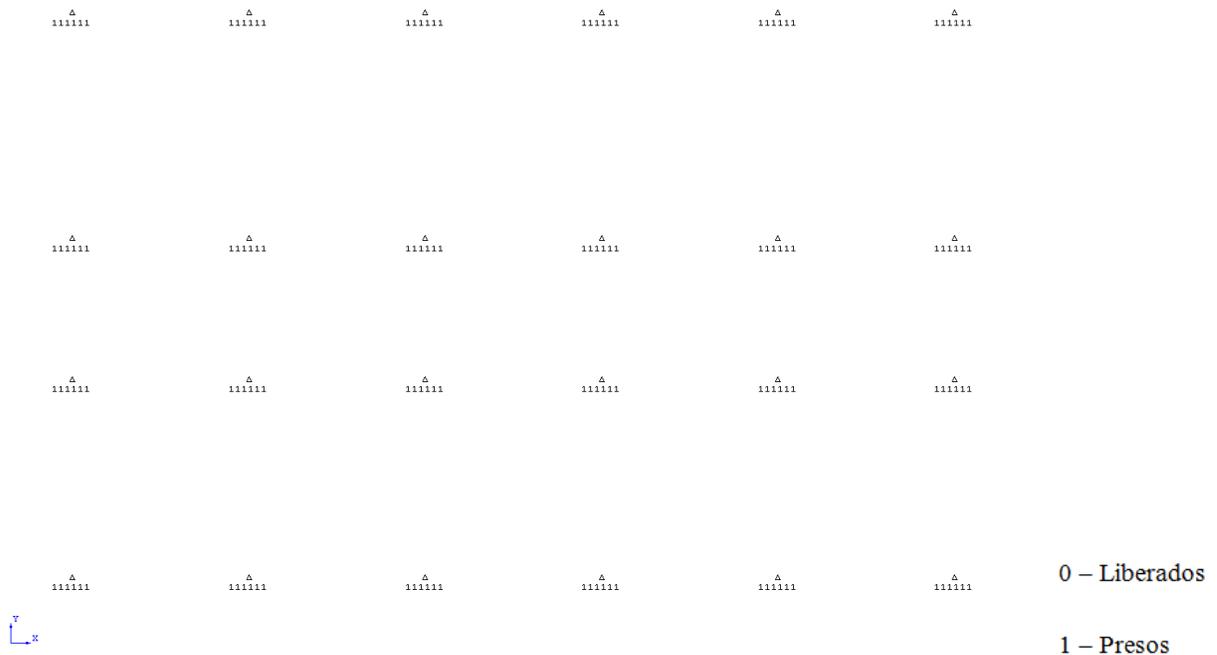
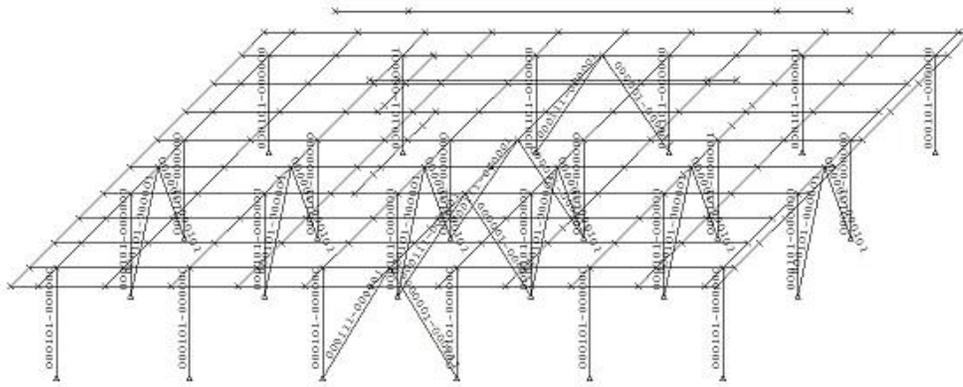


Figura 32 – Pontos de apoio (no plano do convés).

As características dos membros a seguir seguem de acordo com o eixo local de cada barra.

Todos os elementos apoiados com chapa de reforço (*gusset*) devem ter reforço no plano da rotação restrita.



0 – Presos

1 - Liberados



LABEL=AB RELEASE

Figura 33 – Rotações Liberadas no paliteiro.

5. Combinações de carregamento

A seguir, são mostradas as combinações de carregamento que devemos considerar para conseguirmos englobar todos os possíveis movimentos do navio.

Se tenho a incidência do vento a 90° terei uma uma onda a 90°, esta onda transmitirá para o navio um deslocamento vertical, horizontal e uma angulação, todos mostrados no item 4.10. Por exemplo, na tabela 10, tenho 11 combinações de movimento que entram na combinação com os devidos carregamentos e incidências do vento mostrados na tabela 18, 19 e 20 cada qual com sua determinada condição e período de retorno.

Tabela 17 – Tabela de combinações para a condição estática.

Load Combinations		Static		
		101	102	103
1	Dead Load	1	1	1
2	Equipment Operation	1		
3	Equipment Dry		1	
4	Equipment Test			1
5	Piping Operation	1	1	1
6	Live load	1	1	1
7	Wind X			
8	Wind Y			
9	Ship - Sagging			

Tabela 18 – Tabela de combinações para a condição de DEC.

Load Combinations	In service Conditions												In service Conditions											
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
1 Dead Load	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 Equipment Operation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3 Equipment Dry																								
4 Equipment Test																								
5 Piping Operation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6 Live load	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7 Wind X					0,982	-0,982	0,982	-0,982	0,694	-0,694	0,694	-0,694					0,982	-0,982	0,982	-0,982	0,694	-0,694	0,694	-0,694
8 Wind Y	-0,982	0,982	-0,982	0,982					-0,694	-0,694	0,694	0,694	-0,982	0,982	-0,982	0,982					-0,694	-0,694	0,694	0,694
9 Ship - Sagging	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Dec 1	1												1											
Dec 2		1												1										
Dec 3			1												1									
Dec 4				1												1								
Dec 5					1												1							
Dec 6						1												1						
Dec 7							1												1					
Dec 8								1												1				
Dec 9									0,707	0,707	-0,707	-0,707									0,707	0,707	-0,707	-0,707
Dec 10									0,707	-0,707	0,707	-0,707									0,707	-0,707	0,707	-0,707
Dec 11									1	1	1	1									1	1	1	1

Tabela 19 – Tabela de combinações para a condição de trânsito.

Load Combinations	Transit Conditions															
	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316
1 Dead Load	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 Equipment Operation																
3 Equipment Dry	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4 Equipment Test																
5 Piping Operation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6 Live load																
7 Wind X	0,336	-0,336	-0,336	0,336	0,336	-0,336	-0,336	0,336	0,336	-0,336	-0,336	0,336	0,336	-0,336	-0,336	0,336
8 Wind Y	-0,336	-0,336	-0,336	-0,336	0,336	0,336	0,336	0,336	-0,336	-0,336	-0,336	-0,336	0,336	0,336	0,336	0,336
9 Ship - Sagging	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Tran 1	1				1				1				1			
Tran 2		1				1				1				1		
Tran 3			1				1				1				1	
Tran 4				1				1				1				1
Tran 5	1	1	1	1					1	1	1	1				
Tran 6					1	1	1	1					1	1	1	1

Tabela 20 – Tabela de combinações para a condição de avarias.

Load Combinations	Damage Conditions							
	401	402	403	404	405	406	407	408
1 Dead Load	1	1	1	1	1	1	1	1
2 Equipment Operation	1	1	1	1	1	1	1	1
3 Equipment Dry								
4 Equipment Test								
5 Piping Operation	1	1	1	1	1	1	1	1
6 Live load	1	1	1	1	1	1	1	1
7 Wind X								
8 Wind Y								
9 Ship - Sagging	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
Dam 1	1				1			
Dam 2		1				1		
Dam 3			1				1	
Dam 4				1				1

6. Resultados da Análise

6.1. Reações

Nos itens a seguir, estão representados os resultados da análise e a viabilidade de instalação do módulo no convés do FPSO.

SACS-IV SYSTEM REACTION FORCES AND MOMENTS SUMMARY						
*** MOMENTS SUMMED ABOUT ORIGIN ***						
LOAD	KN			KN-M		
CASE	FORCE (X)	FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
101	0.000	0.000	15872.395	-195032.797	-3190047.750	-0.010
102	0.000	0.000	8817.160	-125318.711	-1765154.000	-0.001
103	0.000	0.000	15516.883	-191583.922	-3118208.500	-0.009
201	0.000	8153.524	19371.180	-541162.625	-3892866.000	1638870.625
202	0.000	-8153.565	16935.189	95047.922	-3404021.000	-1638879.000
203	0.000	8153.523	12895.400	-461590.531	-2591358.750	1638870.375
204	0.000	-8153.564	10459.187	174621.906	-2102468.000	-1638879.000
205	-2130.913	0.000	19885.932	-244256.516	-4076178.250	-26263.244
206	2130.921	0.000	18213.965	-223897.984	-3581172.500	26263.352
207	-2130.913	0.000	13409.933	-164682.406	-2774625.750	-26263.246
208	2130.921	0.000	11738.048	-144324.547	-2279637.250	26263.318
209	-1506.527	5764.502	19843.055	-458074.062	-4044006.250	1140105.875
210	1506.527	5764.502	18746.418	-444730.281	-3711214.750	1177241.375
211	-1506.527	-5764.501	19474.209	-24907.318	-3970401.250	-1177241.125
212	1506.527	-5764.502	18377.578	-11563.538	-3637609.000	-1140105.500
213	0.000	8153.524	19371.180	-541162.688	-3892866.000	1638870.250
214	0.000	-8153.565	16935.191	95047.945	-3404020.750	-1638879.000
215	0.000	8153.523	12895.403	-461590.500	-2591358.750	1638870.500
216	0.000	-8153.565	10459.187	174621.953	-2102467.750	-1638879.000
217	-2130.913	0.000	19885.930	-244256.516	-4076177.250	-26263.242
218	2130.921	0.000	18213.963	-223897.938	-3581173.000	26263.334
219	-2130.913	0.000	13409.933	-164682.406	-2774625.500	-26263.246
220	2130.921	0.000	11738.047	-144324.641	-2279637.500	26263.340
221	-1506.527	5764.502	19843.051	-458074.031	-4044007.250	1140106.000
222	1506.527	5764.501	18746.420	-444730.219	-3711215.250	1177241.500
223	-1506.527	-5764.501	19474.209	-24907.320	-3970401.250	-1177241.250
224	1506.527	-5764.501	18377.578	-11563.538	-3637609.500	-1140105.875
301	-958.973	4885.408	10713.681	-330851.094	-2177922.000	963792.875
302	958.973	4885.407	9913.726	-319564.312	-1947786.625	991109.062
303	-889.354	-4788.455	8970.199	46174.688	-1827437.375	-970643.688
304	889.354	-4788.454	8170.244	57461.484	-1602210.375	-945297.438
305	-958.973	4788.469	5933.524	-259095.016	-1221664.375	944315.375
306	958.973	4788.469	5133.570	-247808.125	-991529.625	971631.375
307	-889.354	-4885.394	4190.043	117930.789	-871180.000	-990121.062
308	889.354	-4885.394	3390.088	129217.609	-645952.938	-964774.875
309	-958.973	4885.407	10713.679	-330851.094	-2177921.750	963792.812
310	958.973	4885.408	9913.727	-319564.250	-1947786.625	991108.875
311	-889.354	-4788.455	8970.199	46174.688	-1827437.375	-970643.688
312	889.354	-4788.455	8170.244	57461.500	-1602210.375	-945297.500
313	-958.973	4788.469	5933.525	-259095.031	-1221664.625	944315.375
314	958.973	4788.469	5133.570	-247808.125	-991529.312	971631.562
315	-889.354	-4885.393	4190.043	117930.781	-871180.188	-990121.125
316	889.354	-4885.394	3390.088	129217.555	-645953.062	-964774.875
401	0.000	6666.462	14443.791	-423063.875	-2902926.500	1339831.750
402	2698.307	0.000	15555.059	-191133.078	-3026868.000	33155.496
403	-2698.307	0.000	15555.059	-191133.109	-3225673.000	-33155.570
404	0.000	-6666.409	14443.793	68103.500	-2902926.250	-1339820.625
405	0.000	6666.464	14443.793	-423063.812	-2902926.250	1339831.625
406	2698.307	0.000	15555.060	-191133.062	-3026867.750	33155.492
407	-2698.307	0.000	15555.057	-191133.094	-3225672.500	-33155.586
408	0.000	-6666.409	14443.794	68103.500	-2902926.250	-1339820.750

6.2. Deformações

6.2.1. Flambagem

A flambagem é um fenômeno que ocorre em peças onde a área de secção transversal é pequena em relação ao seu comprimento (esbeltas), quando estas estão submetidas a um esforço de compressão axial, que faz com que a peça sofra uma deflexão lateral. Esta deflexão ocorrerá na direção do eixo de menor momento de inércia de sua seção transversal.

A tensão crítica para ocorrer a flambagem depende do seu módulo de elasticidade ou módulo de Young (E), do momento de inércia, do comprimento de flambagem do elemento e das condições de contorno e não da tensão de escoamento do material (f_y). Primeiramente, temos que calcular o seu índice de esbeltez (τ) e compará-lo ao índice de esbeltez crítico, para determinar se uma peça irá sofrer flambagem. Esse índice de esbeltez é padronizado para todos os materiais. Se o índice de esbeltez crítico for maior que o índice de esbeltez padronizado do material, a peça sofre flambagem, se for menor, a peça sofre compressão. A forma geral do índice de esbeltez é:

$$\tau = K \cdot \frac{L}{r}$$

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados para o dimensionamento	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Figura 34 – Coeficientes de flambagem k para diferentes formas de apoio.

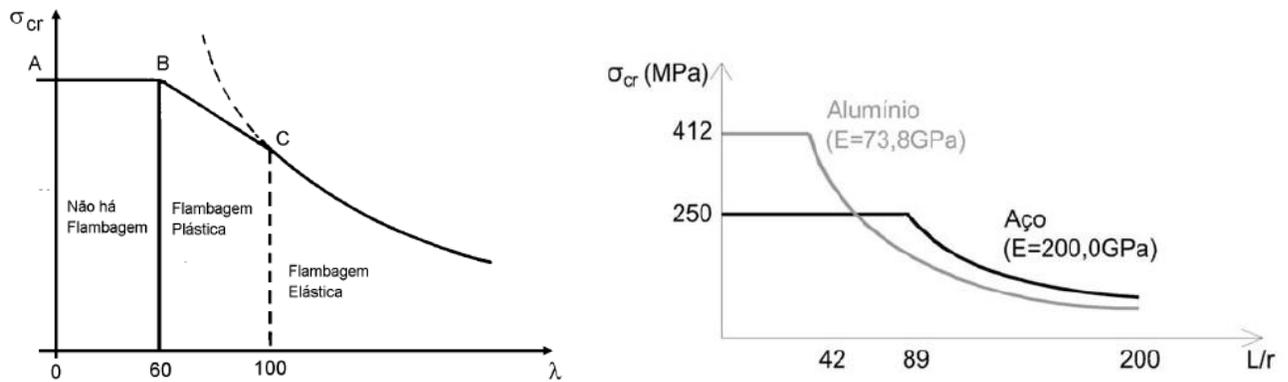
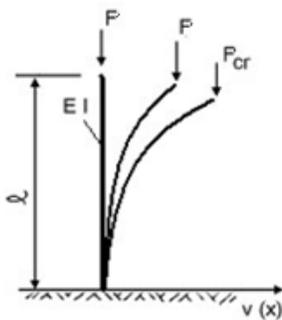


Figura 35 – Variação de resistência de uma coluna comprimida em função do índice de esbeltez.

Carga crítica (P_{cr}) ou carga de Euler ou carga de flambagem é o valor da carga P que provoca o fenômeno da mudança do estado de equilíbrio estável para o instável.



Equilíbrio Estável (não há flambagem)	Equilíbrio Neutro	Equilíbrio Instável
$P < P_{cr}$	$P = P_{cr}$	$P > P_{cr}$

Figura 36 – Flambagem da barra.

O valor da carga crítica (P_{cr}) no qual a flambagem ocorre na fase elástica do material é dada pela equação de Euler :

$$P_{cr} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{fl}^2}, \text{ dividindo pela área teremos } \frac{P_{cr}}{A} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot A \cdot r^2}{L_{fl}^2 \cdot A} \rightarrow \sigma_{cr} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot r^2}{L_{fl}^2}$$

E = módulo de elasticidade longitudinal do material [Pa]

I = menor dos momentos de inércia da área da seção para iguais condições de contorno [m^4]

$L_{fl} = K \cdot L$ = comprimento de flambagem da peça [m]

σ_{cr} = tensão crítica (de flambagem elástica);

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = raio de giração

A = Área

n = número inteiro, positivo; para cada valor de n existe um valor de P que muda o estado de equilíbrio.

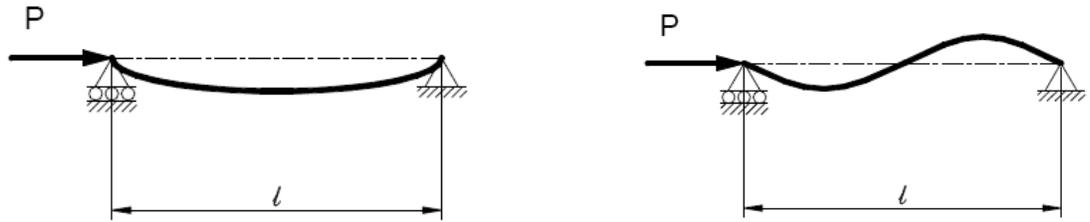


Figura 37 – Modos de Flambagem, tendo a primeira figura $n=1$ e a segunda $n=2$.

6.2.2. Flechas Máximas permitidas

As condições estáticas máximas de deformações permitidas segundo a Norma AISC para um vão (L) de uma viga são:

- $\frac{L}{360}$ - Viga biapoiada de uma estrutura primária
- $\frac{2.L}{360}$ - Viga em balanço de uma estrutura primária
- $\frac{L}{240}$ - Viga biapoiada de uma estrutura secundária
- $\frac{2.L}{240}$ - Viga em balanço de uma estrutura secundária

MAX. VIEW DEFL. AT 144 WITH DX,DY,DZ= -0.001 0.000 -0.445 DEFL SHAPE LC 101

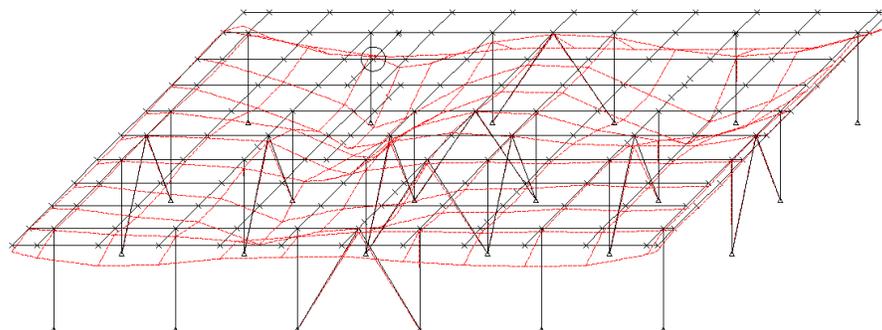
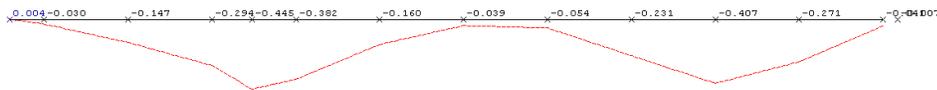


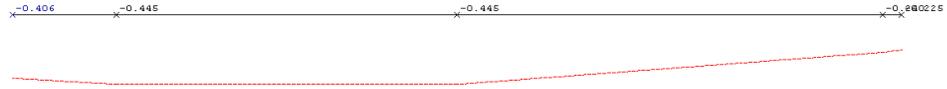
Figura 38 – Deformações da estrutura do módulo de processamento de óleo.

MAX. VIEW DEFL. AT 144 WITH DX,DY,DZ= 0.000 0.000 -0.445 DEFL SHAPE LC 101



DISPLACEMENT Z LC= 101

Figura 39 – Vista do plano XZ (-7.526) da deformada do módulo.



DISPLACEMENT Z LC= 101

Figura 40 – Vista do plano YZ (194.040) da deformada do módulo.

Direção Global:

MAXIMUM JOINT DISPLACEMENTS

LOAD	DEFL(X)		DEFL(Y)		DEFL(Z)		DEFL(T)	
COND	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)
101	151	-0.002	155	0.006	144	-0.445	144	0.445

$$\delta_{144} = 0.445 \text{ cm}$$

$$L_{\text{transv}} = 464.0 \text{ cm (vão do nó com maior deformação vertical)}$$

$$\delta_{\text{max}} = L/360 = 1.289 \text{ cm (Flecha máxima admissível)} \quad \delta_{\text{max}} > \delta_{144} \quad \text{Ok!}$$

6.3. Verificação de Tensão

Foi utilizado, pelo programa SACS, o método das tensões admissíveis para os cálculos deste modelo estrutural.

A estrutura será designada de modo que todos os membros estruturais sejam compatíveis a tensão admissível permitida como especificado pelo AISC Manual of Steel Construction 13th Edition e API RP 2A- WSD 21st.

Antes de darmos continuidade a apresentação do modelo, veremos a diferença entre os métodos de cálculo possíveis de serem empregados na análise.

6.3.1. Método dos estados limites últimos

Neste método, o nível de segurança de uma estrutura é determinado pela capacidade que ela possui de suportar as várias ações que vierem a solicitá-la durante sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite último ou estado limite de serviço. Os estados limites últimos estão relacionados ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura, ou seja, ao colapso. Estes deverão ter uma probabilidade de ocorrência pequena, pois pode resultar em perda de vidas humanas.

A garantia de segurança no método dos estados limites é traduzida pela equação de conformidade para cada seção da estrutura:

$$S_d = S(\sum Y_{fi} F_i) < R_d = R\left(\frac{f_k}{Y_m}\right)$$

S_d = Solicitação de projeto que é obtida através de uma combinação de ações F_i , cada uma majorada pelo coeficiente Y_{fi} .

R_d = Resistência de projeto que é função da resistência característica de cada material f_k minorada pelo coeficiente Y_m .

Os estados limites últimos podem ter origem nas seguintes causas:

1. Perda de estabilidade de uma parte ou do conjunto da estrutura, assimilada a um corpo rígido;
2. Transformação da estrutura original em uma parcial ou totalmente hipostática, instabilidade por deformação;
3. Deformações elásticas ou plásticas, deformação lenta e fissuração que provoquem uma mudança de geometria que exija uma substituição da estrutura;
4. Ruptura das seções críticas da estrutura;
5. Propagação de um colapso (colapso progressivo ou falta de integridade estrutural);
6. Grandes deformações, transformação de mecanismo e instabilidade global.

Uma maior probabilidade de ocorrência é permitida para os estados limites de serviço, em comparação com os últimos, pelo fato de não representarem situações de risco. Podem ter origem nos seguintes fenômenos:

1. Deformações excessivas para uma utilização normal da estrutura;
2. Danos locais excessivos por fissuração, corrosão, etc., e que afetam a aparência, a utilização ou a durabilidade da estrutura;
3. Deslocamentos excessivos sem perda de equilíbrio;
4. Vibrações excessivas;

O método dos estados limites permite um processo mais racional para o dimensionamento, pois envolve a identificação de todos os modos de colapso ou situações em que a estrutura deixaria de atender aos requisitos para os quais foi projetada, e a determinação de níveis satisfatórios de segurança para cada estado limite. Além de considerar as reservas de resistência após o início da plastificação.

6.3.2. Método das tensões admissíveis

Este foi o método utilizado na análise da estrutura, pois neste método só temos a inclusão de um coeficiente de segurança no final da análise sendo assim mais fácil de analisar, além de ser o método mais antigo e como grande parte dos engenheiros que estão frente a esses projetos utilizam o método das tensões admissíveis continuamos analisando por ele.

No método das tensões admissíveis as cargas de projeto são deterministicamente admitidas como os valores máximos concebidos para atuarem ao longo da vida útil da estrutura.

As máximas tensões solicitantes σ que poderão ocorrer na estrutura em cada seção devem ser inferior a uma tensão resistente reduzida por um coeficiente de segurança interno γ , maior que a unidade. No caso de o elemento estrutural ser submetido à flexão simples sem flambagem lateral, a tensão resistente é tomada igual a tensão de escoamento f_{yk} , o que corresponde ao início de plastificação da seção. O quociente da tensão de ruptura, ou de escoamento do material pelo coeficiente de segurança interno é denominado tensão admissível.

$$\sigma_{m\acute{a}x} < \bar{\sigma} = \frac{f_{yk}}{\gamma} \quad (\text{início da plastificação da seção})$$

O método das tensões admissíveis possui as seguintes limitações:

-Possui somente um coeficiente de segurança para expressar todas as incertezas, independentemente de sua origem. Por exemplo, em geral a incerteza quanto a um valor especificado de carga de peso próprio é menor que a incerteza associada a uma carga proveniente do uso da estrutura.

-Em sua origem o método previa a análise estrutural em regime elástico com o limite resistência associado ao início de plastificação da seção mais solicitada. Não se consideravam reservas de resistência existentes após o início da plastificação, nem a redistribuição de momentos fletores causada pela plastificação de uma ou mais seções de estrutura hiperestática.

Este método também é conhecido como ASD (Allowable Stress Design) ou WSD (Working Stress Design).

Os fatores modificadores de tensão admissível ou AMOD foram calculados de acordo com a norma da DnV OS C201 e apresentam os valores a seguir.

Tabela 21 – Fatores modificadores de tensão admissível

Condition	AMOD
Static	1,000
DEC	1,333
Damage	1,666

Análise in loco: $1,00 \times 0,6 = 0,6 \times F_y$

DEC análise: $1,33 \times 0,6 = 0,6 \times F_y$

Análise de avaria: $1,666 \times 0,6 = 1 \times F_y$

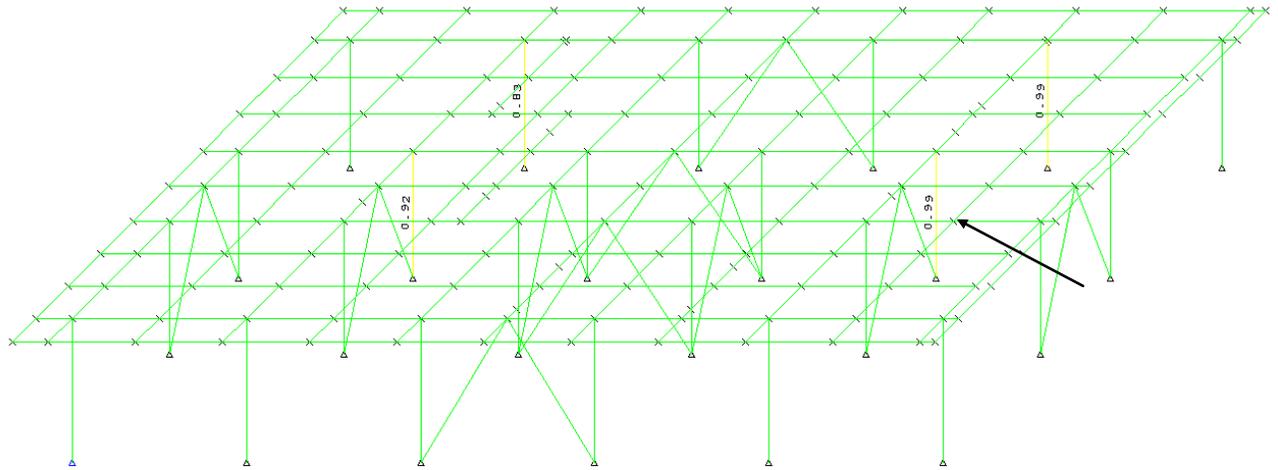
O valor multiplicado pelo AMOD é um valor da norma AISC

```

*** MEMBER GROUP SUMMARY ***
API RP2A 21ST/AISC 9TH

```

GRUP ID	CRITICAL MEMBER	LOAD COND	UNITY CHECK	MAX. DIST FROM END	* APPLIED STRESSES *			*** ALLOWABLE STRESSES ***				CRIT COND	EFFECTIVE LENGTHS			CM VALUES	
					AXIAL M	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2	AXIAL N/MM2	EULER N/MM2	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2		KLY	KLZ	Y	Z	
C35	017-	117	201	0.99	4.0	-129.23	66.10	0.00	175.91	291.51	239.94	239.94	>.15A	4.0	4.0	0.85	0.85
D35	011-	103	213	0.79	4.7	-109.46	-37.12	0.00	172.00	923.96	239.94	239.94	>.15A	4.7	4.7	0.85	0.85
I1B	155-	166	211	0.45	0.1	-1.78	-4.47	-0.26	261.27	*****	312.32	354.91	SHEAR	0.1	0.1	0.85	0.85
T03	163-	176	223	0.33	0.0	0.08	-93.64	-0.43	283.93	454.67	283.93	354.91	TN+BN	1.8	1.8	0.85	0.85
T1A	154-	160	202	0.52	0.1	-5.70	0.17	2.95	265.39	*****	312.32	354.91	SHEAR	0.1	0.1	0.85	0.85
T8A	098-	099	209	0.48	1.8	-1.36	-71.58	-9.92	196.27	1346.28	312.32	354.91	SHEAR	1.8	1.8	0.85	0.85
TO	188-	189	101	0.00	15.1	0.00	-0.15	0.00	205.62	5980.17	266.25	266.25	SHEAR	15.1	15.1	0.85	0.85



UC MAX COMB

LC LIST

Figura 41 – “Unit Checks”

Unity check :

- Verdes $UC < 0,80$
- Amarelos $0,80 < UC < 1,0$
- Vermelhos $UC > 1,0$

Todos os membros da estrutura estão seguros para receber o carregamento aplicado.

A seguir um exemplo de como o programa analisa com base nas normas já citadas.

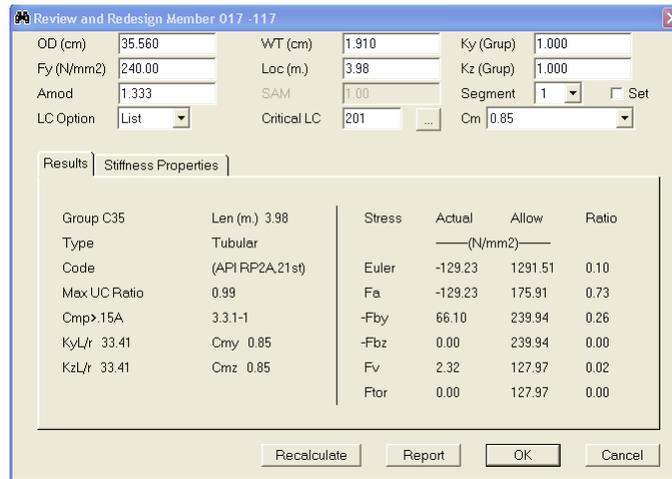


Figura 42 – Análise do membro 017-117 assinalado na figura 41.

O membro está com um unit check de 0.99 no topo da coluna. Sua condição de carregamento crítica é a 201. O membro está sendo comprimido e o que está predominante no valor do seu *unit check* é a força axial, mas também temos a flambagem do perfil com uma parcela menor de contribuição. A flexão é maior em função da deformação longitudinal de viga-navio e que isso pode ser determinante para o cálculo de fadiga embora não seja alvo da análise.

Como o perfil utilizado é tubular o programa está usando a norma API RP2A item 3.3.1-1 para cálculo das tensões.

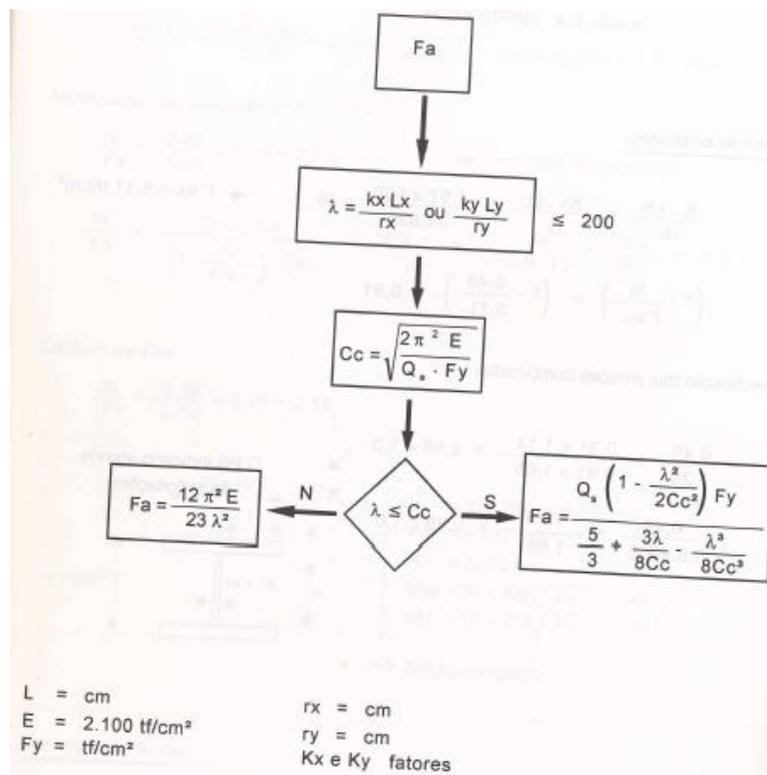


Figura 43 – Cálculo da tensão admissível pela norma AISC.

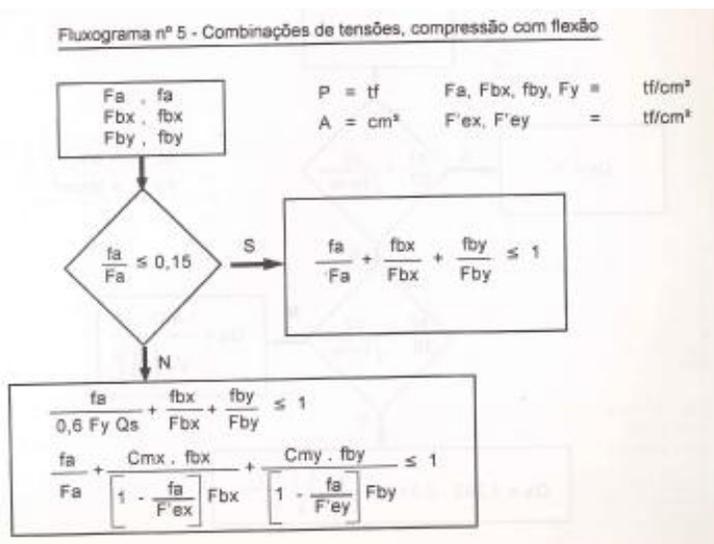


Figura 44 – Cálculo da tensão atuante no projeto pela norma API.

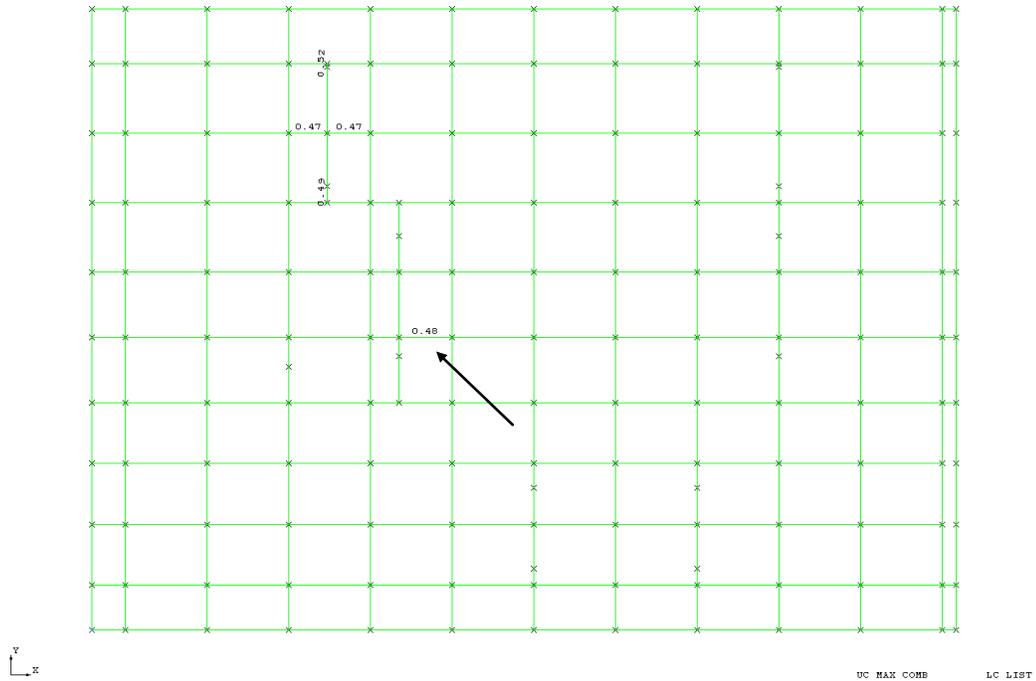


Figura 45 – Vista dos *unit checks* das vigas.

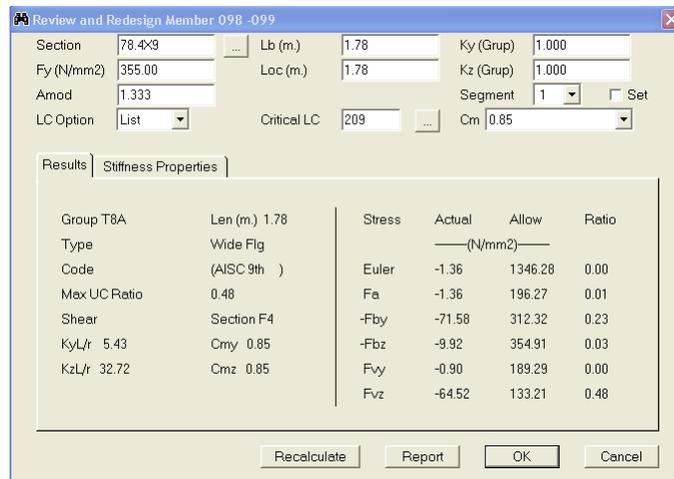


Figura 46 – Análise do membro 098-099 assinalado na figura 45.

O membro está com um unit check de 0.48 no fim do membro. Sua condição de carregamento crítica é a 209. O membro está sendo comprimido e o que está predominante o valor do seu unit check é a flambagem no plano do perfil.

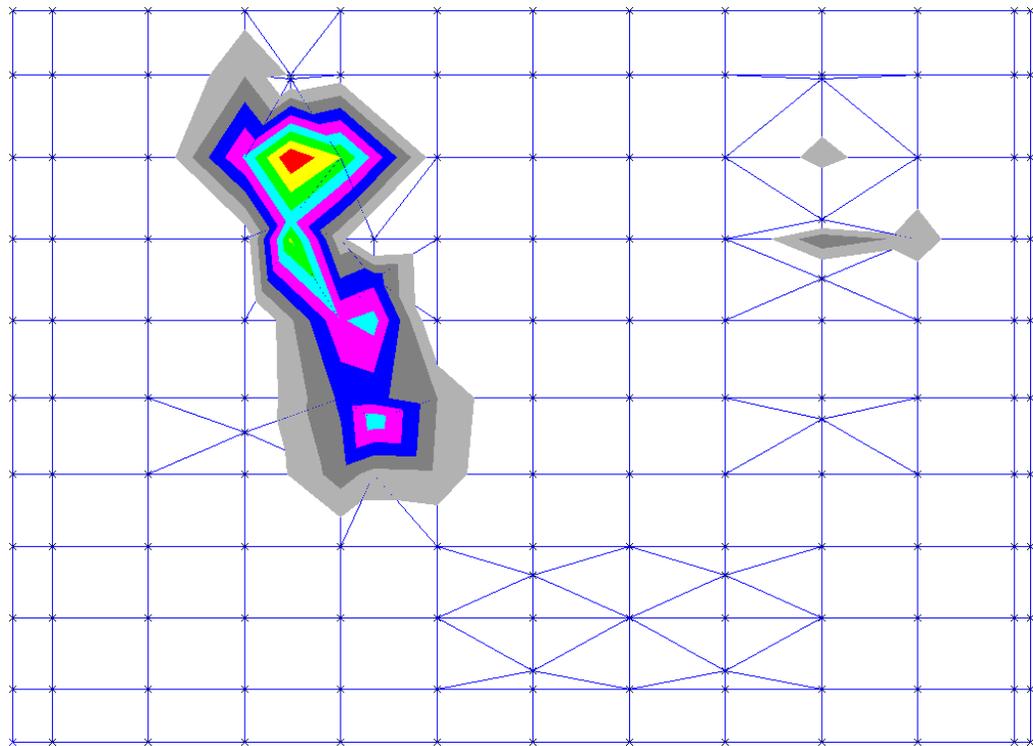
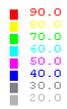
6.4. Verificações Adicionais

6.4.1. Análise de Flambagem de Placas

PLATE STRESS SUMMARY - N/mm2

PLATE	TYPE	MAXIMUM	LOAD	***** MEMBRANE *****						**** BENDING-UPPER SURFACE ****					SECOND-HIGHEST		THIRD-HIGHEST	
		UNITY	COND	SX	SY	TXY	SP	TMAX	SX	SY	TXY	SP	TMAX	UNITY	LOAD	UNITY	LOAD	
		CHECK	NO.												CHECK	COND	CHECK	COND
A112	ISO	0.159	402	-0.9	2.8	-2.0	3.7	2.7	-60.8	-37.3	9.6	-64.2	15.1	0.158	406	0.156	407	

MAX 65.1981 N/MM2
 PLATE=A112 LC= 402
 MAX PRINCIPAL STRESS: FOR ALL LCS



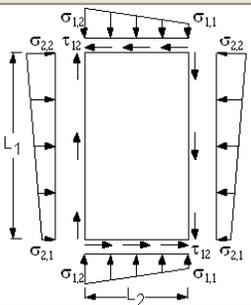
UC MAX COMB

LC LIST

Figura 47 – Tensões nas placas do módulo- elevação 35.250

Considerando 100% de tensão máxima principal.

Panel particulars



Geometry	Material	Loads	Boundary conditions
Dimensions			
Panel length [mm]:	$L_1 =$	<input type="text" value="2320"/>	
Panel width [mm]:	$L_2 =$	<input type="text" value="1290"/>	
Plate thickness [mm]:	$t_p =$	<input type="text" value="16"/>	

Geometry	Material
Material classification:	<input type="text" value="Steel"/>
Plate material:	<input type="text" value="User"/>
Modulus of elasticity [MPa]:	$E =$ <input type="text" value="210000"/>
Poissons ratio:	$\nu =$ <input type="text" value="0.3"/>
Shear modulus [MPa] (not	$G =$ <input type="text" value="80769"/>
Yield strength plate [MPa]:	$\sigma_{Fp} =$ <input type="text" value="355"/>

Figura 48 – Análise da placa com maior tensão.

Geometry	Material	Loads	Boundary conditions
Axial stress [MPa]:	$\sigma_{1,1} =$	<input type="text" value="-2.8"/>	$\sigma_{1,2} =$ <input type="text" value="-2.8"/>
Transverse stress [MPa]:	$\sigma_{2,1} =$	<input type="text" value="0.9"/>	$\sigma_{2,2} =$ <input type="text" value="0.9"/>
Shear stress [MPa]:	$\tau_{12} =$	<input type="text" value="2.0"/>	
Lateral pressure [MPa]:	$p =$	<input type="text" value="0"/>	<input type="checkbox"/> Only pressure computation - membrane <input type="checkbox"/> Only pressure computation - bending
Compression: positive			

Figura 49 – Análise da placa com maior tensão.

Geometry	Material	Loads	Boundary conditions
Location of panel			
<input checked="" type="radio"/> Integrated panel, continuous plating. (Default option)			
<input type="radio"/> Girder panel, free edge plating:			
<input checked="" type="radio"/> Free upper/lower edges			
<input type="radio"/> Free left/right edges			
Rotational support			
Rotation stiffness [MNm/m] :			
Left side :	Simply supported		<input type="checkbox"/> Vertical corrugated panel
Right side :	Simply supported		<input type="checkbox"/> Horizontal corrugated panel
Upper side :	Simply supported		
Lower side :	Simply supported		

Figura 50 – Análise da placa com maior tensão.

General
Identification
A112
Allowable usage factor
$\eta_{allowable}$ = 1.00
$\eta_{allowable}$ = 1.00
Comments
Actual usage factor
Ultimate capacity
γ = 0.01 Status OK
Buckling strength
γ = 0.01 Status OK

Figura 51 – Análise da placa com maior tensão.

7. Análise do módulo em elementos finitos

A tensão com as conexões são causados pelas reações verticais sobre suportes do módulo. As cargas consideradas nesta análise são retiradas do relatório de análise estática. Os suportes de módulos são divididos em quatro tipos diferentes, conforme descrito na figura a seguir:

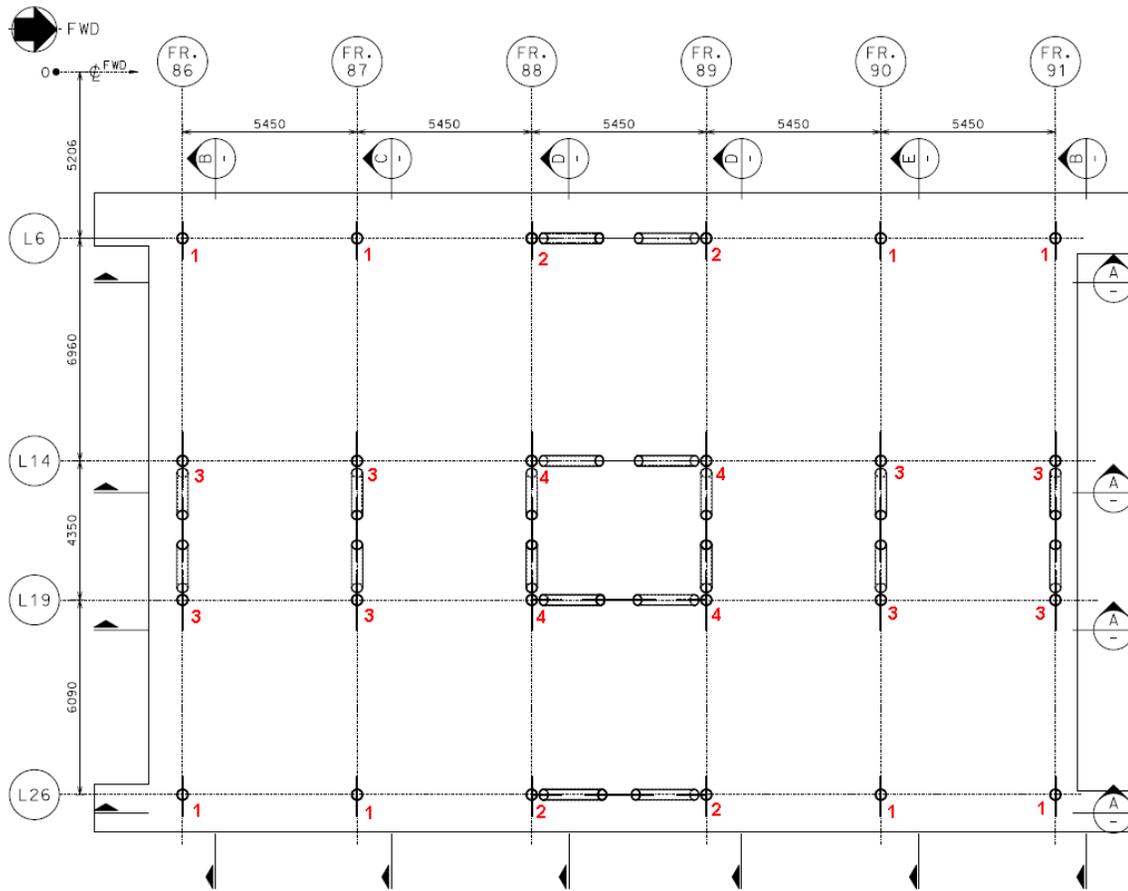


Figura 52 – Vista dos suportes do módulo

7.1. Tipos dos suportes do módulo em análise

Suporte do tipo 1 tem apenas a coluna tubular transferindo as cargas. Suporte do tipo 2 tem a coluna tubular e uma braçadeira tubular de seção alinhada com longitudinal. Tipo de suporte 3 tem a coluna tubular e uma braçadeira tubular alinhada com a frame. E, finalmente, o suporte do tipo 4 tem a coluna tubular e duas braçadeiras.

Será apresentado a seguir o pior caso dentre estes que acabamos de apresentar.

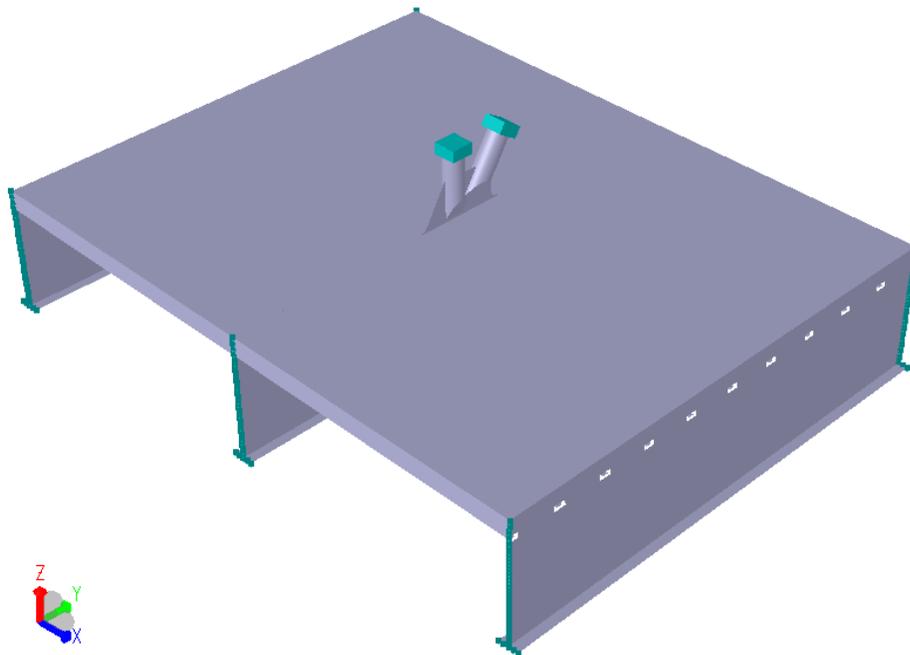


Figura 53 – Vista isométrica do modelo de suporte tipo 3.

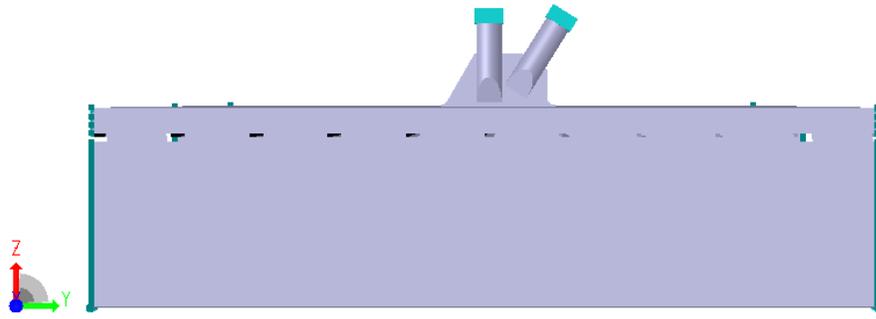


Figura 54 – Corte lateral do suporte tipo 3

7.1.1. Material empregado

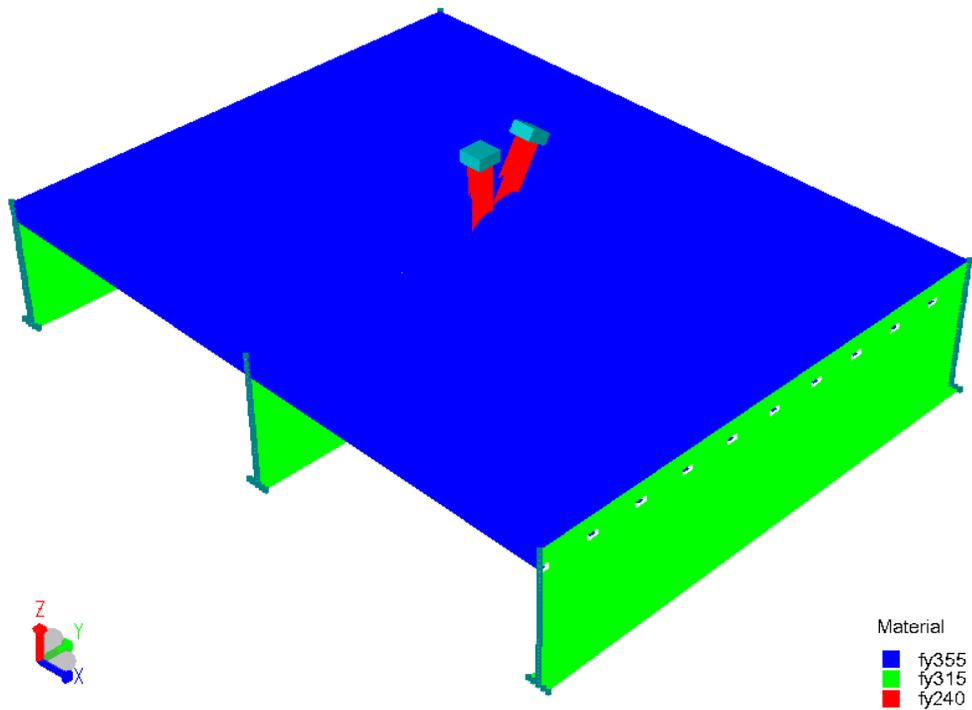


Figura 55 - Vista isométrica do modelo com determinados valores de escoamento.

7.1.2. Espessuras das placas

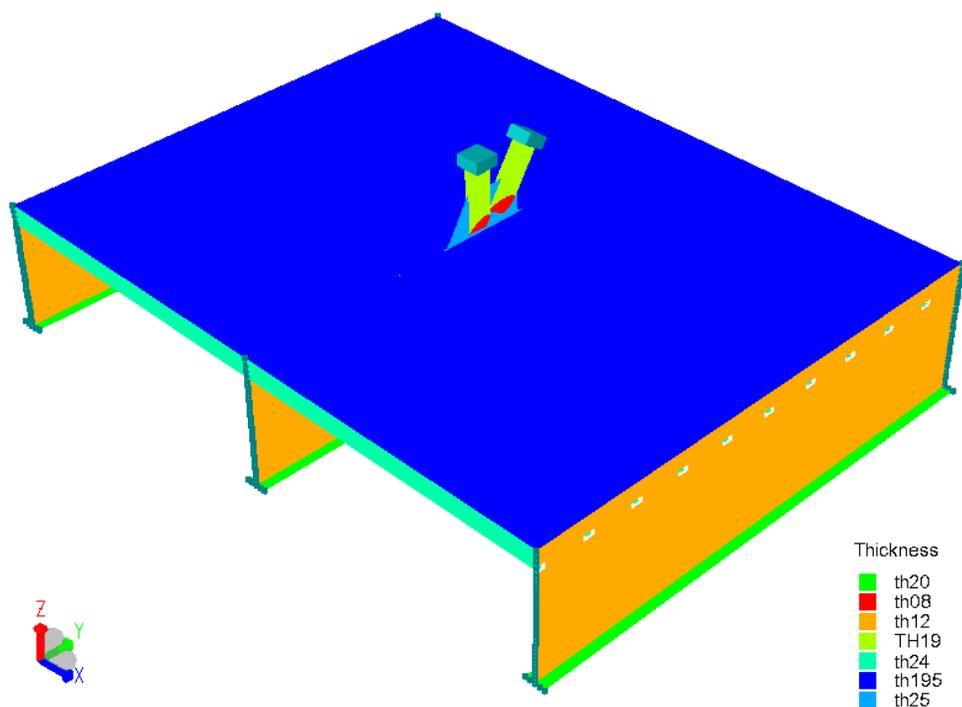


Figura 56 – Vista isométrica.

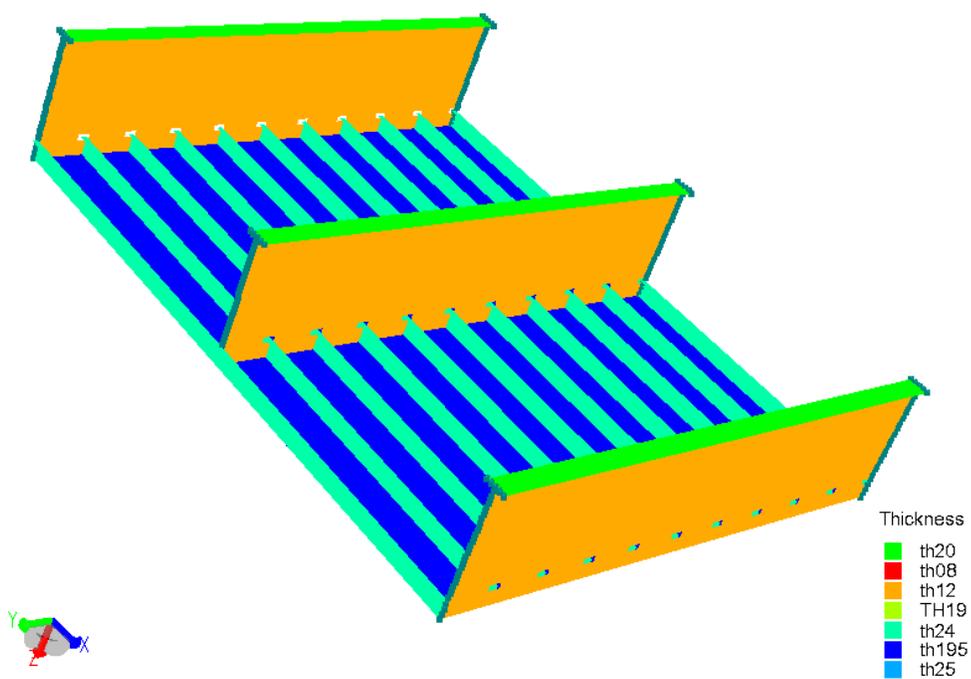


Figura 57 – Frames e longitudinais.

7.1.3. Densidade da malha

As regiões críticas da análise tem uma densidade de malha de 12 mm, os elementos de malha possuem o mesmo tamanho da espessura da chapa. A densidade da malha aumenta gradualmente, até atingir o tamanho de 200 mm.

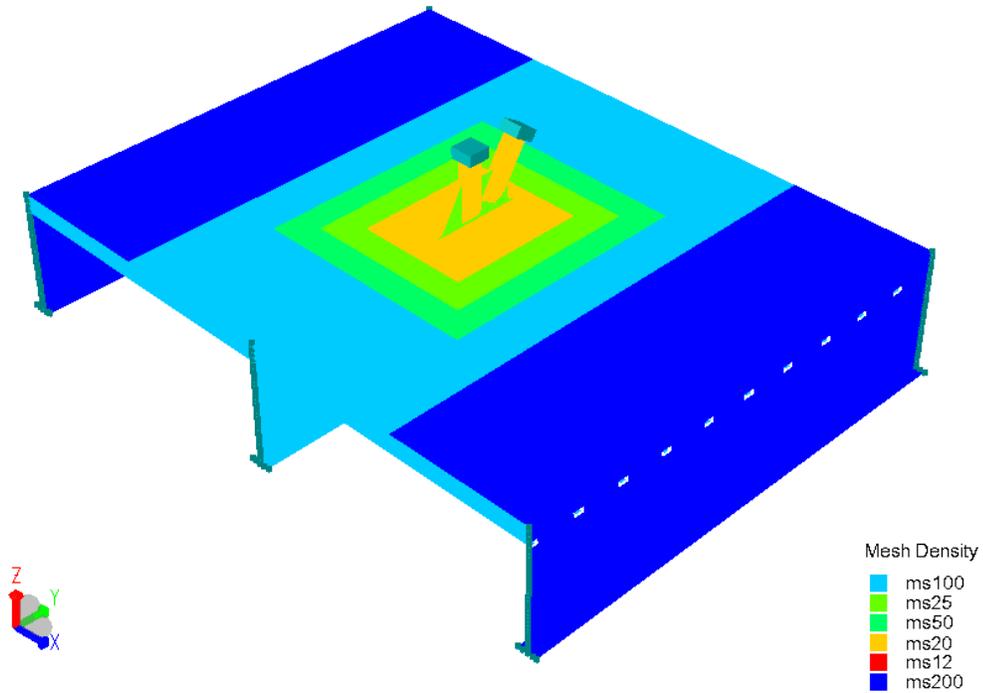


Figura 58 – Vista isométrica.

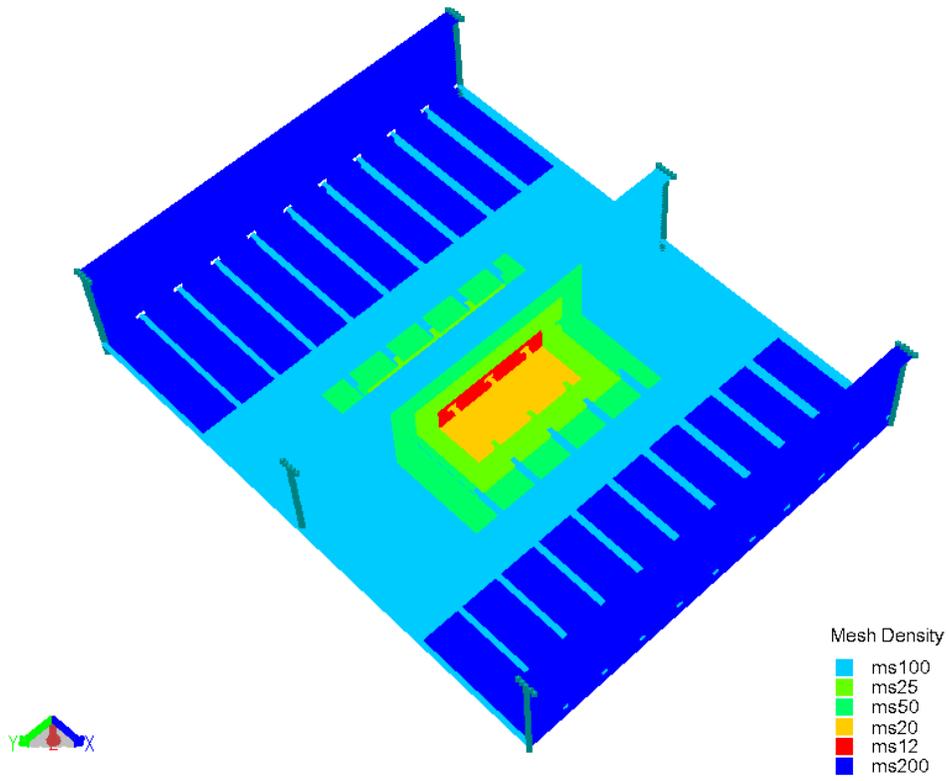


Figura 59 – Frames e longitudinais.

7.2. Condições de contorno

Nas bordas das cavernas do navio as curvas de apoio são criadas. Por essas curvas, as translações em X, Y e Z globais são restringidas e as rotações nas mesmas direções são liberados.

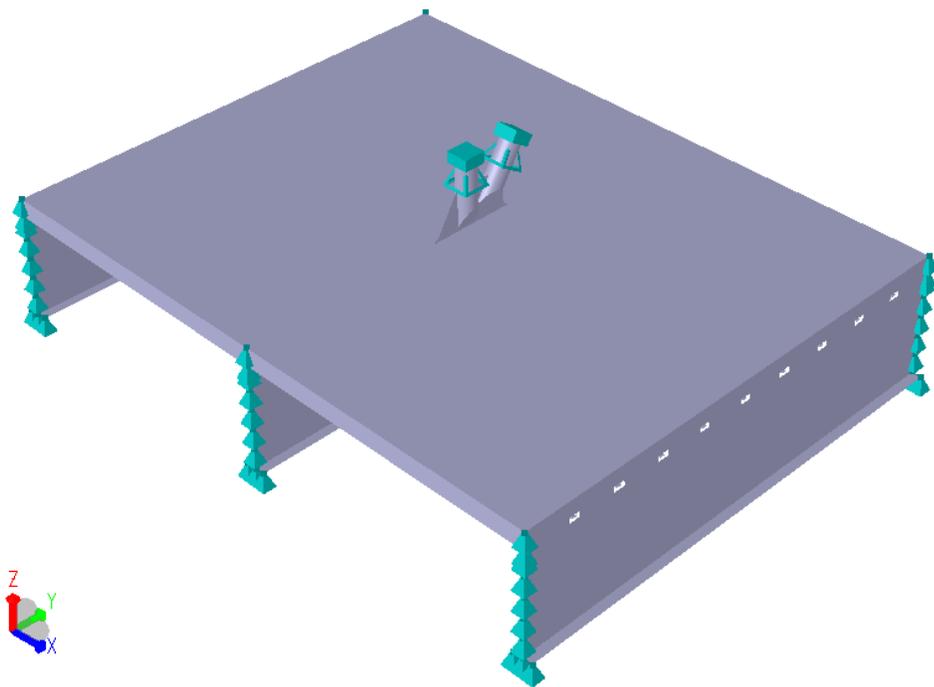


Figura 60 – Vista isométrica.

7.3. Cargas Aplicadas

As cargas LC1 e LC2 são tomadas a partir do modelo do SACS de análise estática também podendo ser incluído posteriormente uma LC3 e uma LC4 para análise de fadiga. As cargas são definidas respeitando a definição a seguir:

LC1: carga axial máximo da coluna.

LC2: carga axial máxima para a cinta.

As figuras a seguir mostram as cargas aplicadas.

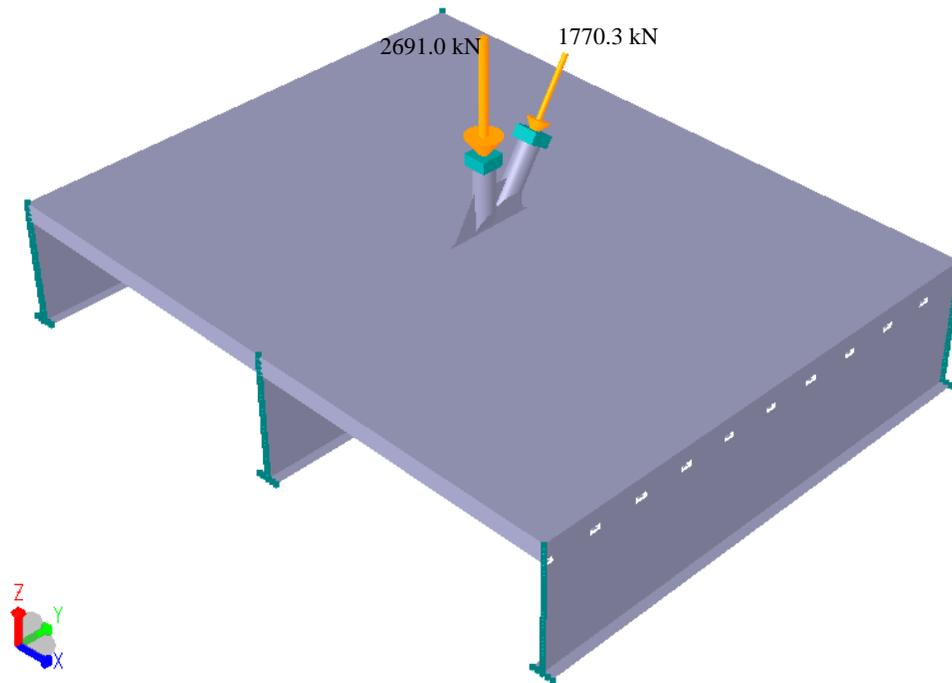


Figura 61 – Condição de carregamento 1 (LC1).

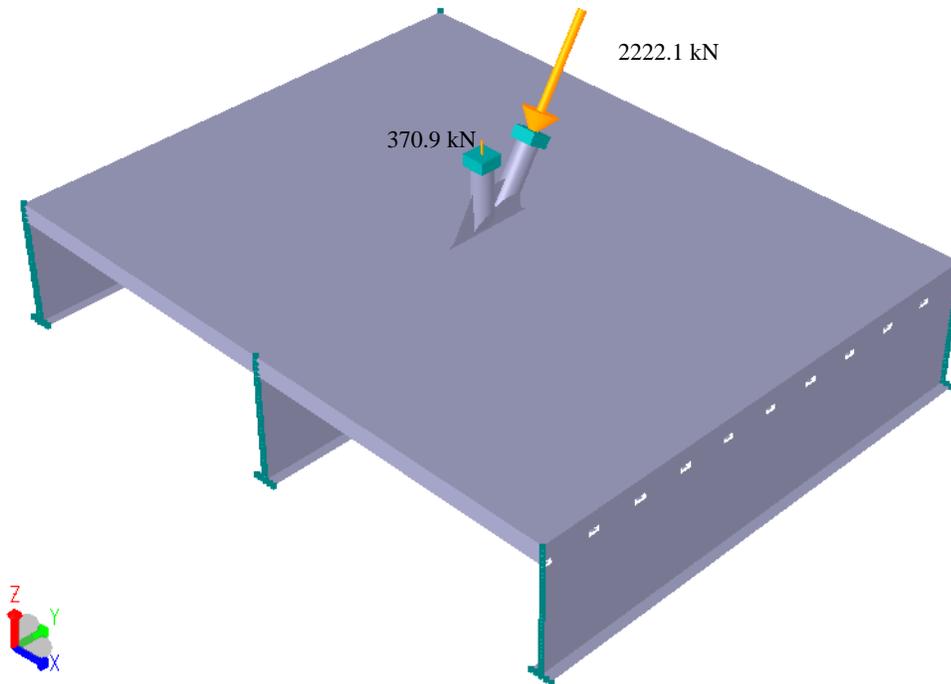


Figura 62 – Condição de carregamento 2 (LC2).

7.4. Resultados

Para a verificação estática, a tensão admissível na chapa soldada é definido como se mostra a seguir:

- Placa do deck, placa longitudinal e reforço (“gusset“)

$$\sigma_{\text{admissível}} = 1.333 \times 0.66 \times F_y = 1.333 \times 0.66 \times 355 = 312 \text{ MPa}$$

- Caverna

$$\sigma_{\text{admissível}} = 1.333 \times 0.66 \times F_y = 1.333 \times 0.66 \times 315 = 277 \text{ MPa}$$

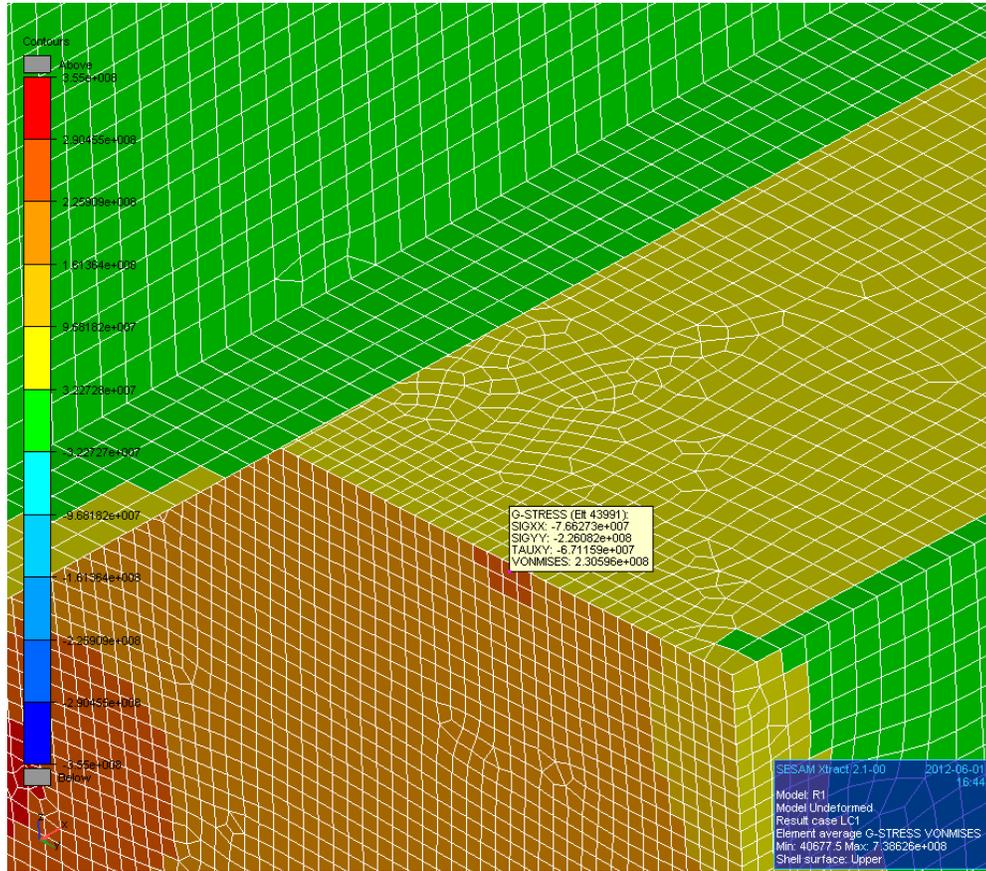


Figura 63 – Encontro da caverna com o deck principal.

Tensão máxima nas placas : $\sigma = 230.6 \text{ MPa}$

Unity check: $UC = 230.60 / 277.00 = 0.83 < 1.0 \text{ OK!}$

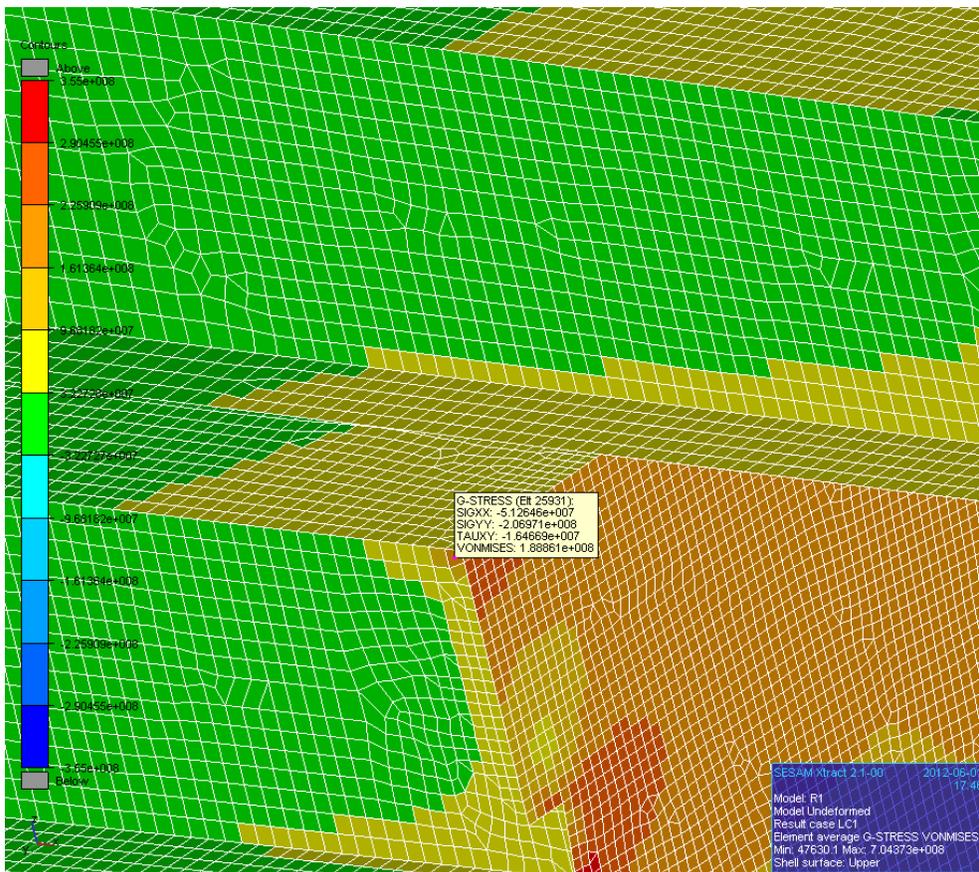


Figura 64 – Encontro da Longitudinal com o deck principal.

Tensão máxima nas placas: $\sigma = 206.97 \text{ MPa}$

Unity check: $UC = 206.97 / 312.00 = 0.66 < 1.0 \quad \text{OK!}$

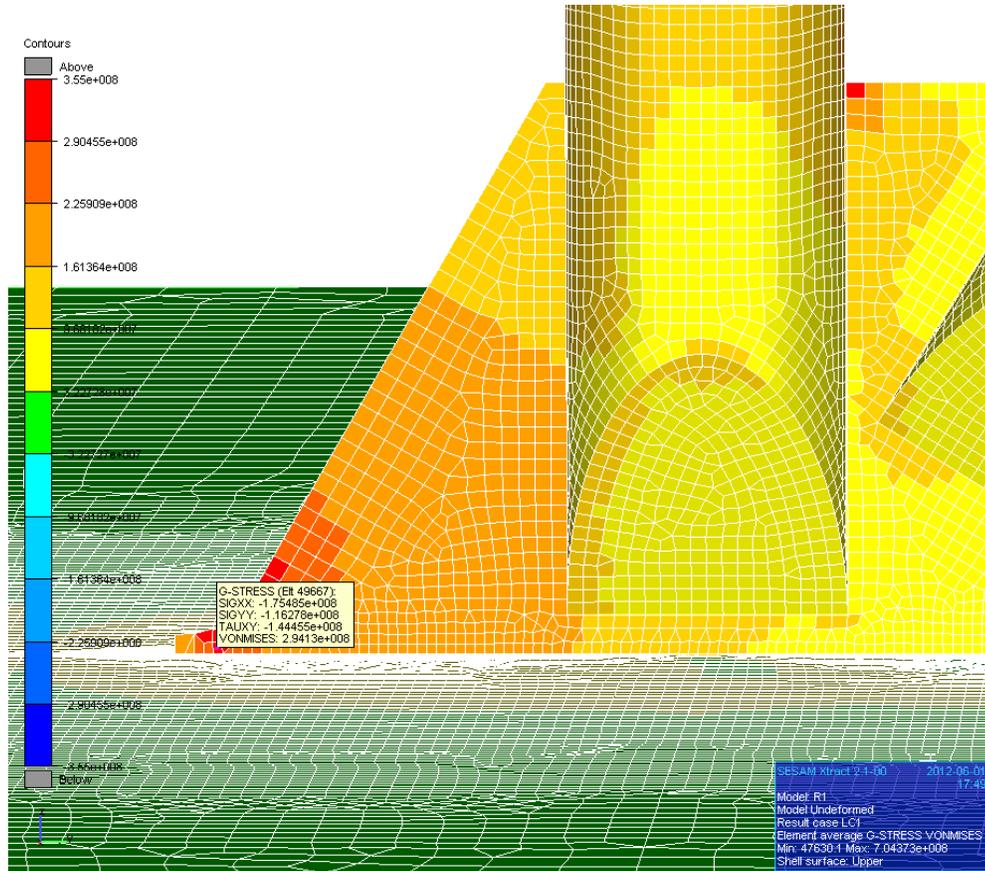


Figura 65 – Encontro do gusset com o deck principal.

Tensão máxima nas placas: $\sigma = 294.13 \text{ MPa}$

Unity check: $UC = 294.13 / 312.00 = 0.94 < 1.0 \quad \text{OK!}$

8. Conclusão

Os resultados da análise de esforços mostram que a estrutura está adequada para receber as cargas de projeto.

9. Referências Bibliográficas

- I. **Offshore Standart DNV – OS – C201.** Structural Design of Offshore Units (WSD method).April 2004.
- II. **AISC – Manual of Steel Construction –Allowable Stress Design - 9th edition.**
- III. **API Recommended Practice 2A – WSD - Recommended Practices for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Structures – Working Stress Design– 21st edition, December 2000.**
- IV. **DNV Classification Notes 30.5 – Environmental Conditions and Environmental Loads.**
- V. **Petrobras N-2684 – Estruturas Oceânicas – Cargas de Projeto – Equipamentos e Sobrecargas.**
- VI. **Edifícios industriais em aço - Ildony H. Bellei – 2^a edição.**
- VII. **Estruturas de aço – Walter Pfeil e Michele Pfeil – 8^a edição.**