



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Estruturas

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL
GLOBAL DE UM MÓDULO DE PLATAFORMA DE
PETRÓLEO OFFSHORE TIPO FPSO

Tássia Rodrigues Pombo

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.

Rio de Janeiro

ABRIL de 2013

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL
GLOBAL DE UM MÓDULO DE PLATAFORMA DE
PETRÓLEO OFFSHORE TIPO FPSO

Tássia Rodrigues Pombo

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Aprovado por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger
D.Sc., Professor Associado, POLI/UFRJ (Orientador)

Prof^a. Maria Cascão Ferreira de Almeida
D.Sc., Professor Adjunto, POLI/ UFRJ, DES

Prof. José Renato Mendes de Sousa
D.Sc., Professor Adjunto, POLI/UFRJ, DEG

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL de 2013

Pombo, Tássia Rodrigues

Avaliação do Comportamento Estrutural Global de um Módulo de Plataforma de Petróleo Offshore Tipo FPSO / Tássia Rodrigues Pombo. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

xii, 67: il.;29,7 cm

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 67.

1. Análise Estrutural. 2. Módulo Offshore. 3. FPSO.
I. Ellwanger, Gilberto Bruno. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, Mário e Márcia, pelo constante apoio.
Aos meus tios, Newley e Rosa, pelo suporte essencial.
Aos meus avós, Antônio, Maria e Irene, por sua dedicação.
Ao meu irmão e primos, Caio, Christian e Richard.
Aos meus amigos e namorado, pelo incentivo sem medida.

Agradecimentos

Agradeço primeira e principalmente a Deus, por ser a essência, a motivação e a finalidade de todo o trabalho, esforço e sacrifício dedicados à conclusão dessa etapa.

Agradeço a toda a minha família, que sempre me impulsionou e torceu por mim. Em especial, aos meus pais, por terem incutido em mim o valor essencial da educação e pelo esforço incansável dispendido para que eu chegasse aqui; e ao meu irmão pelo companherismo. Aos meus tios, Newley e Rosa, pelo acolhimento e suporte que tornaram esse sonho possível e aos meus primos, Christian e Richard, pela paciência. Aos meus avós, por serem o exemplo que são em matéria de moral, trabalho, caráter e amor. E aos meus padrinhos, Manoel e Lygia, por serem meus anjos guardiões.

Ao meu namorado, Edgard, por ser sempre aquilo que falta. O conforto na aflição, o incentivo na preguiça, a opinião sincera, a compreensão das minhas ausências e até as broncas, que por inúmeras vezes corrigiram minha trajetória.

Aos meus amigos (Batata, Candê, Carol, Dão, Dja, Édipo, Flavi, Iza, Léo, Luara, Manu, Mary, Molina, Nat, Pedro, Pri, Victor e Waguinho), por toda a diversão e descontração, por todas as gargalhadas, mas também pelos conselhos e pelo apoio.

Aos colegas da faculdade, que trilharam junto comigo esse caminho. Por todas as dúvidas, horas de estudo, resumos, cópias dos cadernos, provas antigas, trabalhos mirabolantes e desespero pré-prova que compartilhamos.

A todos os professores, que dispuseram todo seu conhecimento e experiência para que me tornasse engenheira. Em especial ao professor Gilberto, pela dedicação e sabedoria que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

À Technip, por disponibilizar os softwares e boa parte do material utilizados nesse trabalho. E aos engenheiros Eliane Ramos, Jandilce Santos, Márcio Silva, Melissa Knetch, Sérgio Costa, Luiz Gustavo Rinke, João Alves, Eduardo Knothe, Maurício Vinagre, Lauro Sá, André Massa, Elson Nascimento, Gabriel Nascimento, Elton Galgou e Luana Carvalho, por terem contribuído enormemente para minha formação como profissional.

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

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL GLOBAL DE UM MÓDULO DE PLATAFORMA DE PETRÓLEO OFFSHORE TIPO FPSO

Tássia Rodrigues Pombo

Abril/2013

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Curso: Engenharia Civil

O objetivo desse trabalho é o de analisar estruturas complexas do convés de uma plataforma de petróleo offshore do tipo FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) para operar em águas profundas e ultraprofundas da costa brasileira. Será considerada uma plataforma convertida a partir de um navio petroleiro VLCC (Very Large Crude Carrier), sendo esse o caso da maioria dos FPSO's em operação no Brasil.

Esse trabalho é constituído pela descrição desse tipo de plataforma e como ela funciona, bem como dos diversos processos realizados por essa unidade. A análise de fato, será de uma das estruturas do topside. Tendo sido escolhido como exemplo um módulo de produção. O trabalho apresenta a descrição do modelo estrutural do módulo escolhido, os carregamentos básicos considerados (que são peso-próprio, peso de equipamentos e de tubulação, sobrecarga, vento e movimentos da unidade flutuante), a análise da estrutura em três situações distintas (operação sob condições ambientais extremas, plataforma em trânsito e operação com o navio adernado; sendo verificados os estados limite último e de serviço) e a apresentação dos resultados e conclusões das análises.

As análises serão realizadas de acordo com as normas DNV (Det Norske Veritas), AISC (American Institute of Steel Construction) e API (American Petroleum Institute), verificando que a estrutura está apta a operar durante os vinte e cinco anos ininterruptos de vida útil da plataforma.

Palavras-Chave: Plataforma de Petróleo Offshore, FPSO, Módulo de Produção, Análise Estática.

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

STRUCTURAL GLOBAL BEHAVIOR EVALUATION OF A FPSO TYPE OFFSHORE
OIL PLATFORM MODULE

Tássia Rodrigues Pombo

April/2013

Advisor: Gilberto Bruno Ellwanger

Course: Civil Engineering

The aim of this work is to analyze complex structures of an FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) type of offshore oil platform's deck designed to operate in deep and ultra-deepwater of the Brazilian coast. It will be considered a platform that was converted from a VLCC (Very Large Crude Carrier) oil tanker ship, which is generally the case of the FPSO's operating in Brazil.

This work describes this type of platform and how it works, and also the various processes performed by this unit. The actual analysis is related to one of the topside structures. A production module was chosen as example. The work describes the adopted model, the basic loads considered (which are self-weight, equipment and piping loads, live loads, wind and movements of the floating unit), the analysis of the structure for three distinct situations (operation under extreme environmental conditions, platform in transit condition and operation with the ship damaged, verifying ultimate and service limit states) and the presentation of results and conclusions of the analyses.

The analyses will be performed in accordance with the DNV (Det Norske Veritas), AISC (American Institute of Steel Construction) and API (American Petroleum Institute) standards, in order to verify that the structure is able to operate throughout the twenty five years of the platform's life span.

Keywords: Offshore Oil Platform, FPSO, Production Module, Structural Analysis.

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Ambientação.....	2
1.4	Descrição dos Capítulos.....	3
2	PLANTA DE PROCESSO.....	4
2.1	Módulos de Produção.....	4
2.2	Descrição Simplificada do Processamento da Produção	5
3	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA.....	7
3.1	Materiais e Perfis Utilizados.....	7
3.2	Modelo Estrutural.....	8
3.3	Principais Dimensões	9
3.4	Grupos de Propriedades dos Perfis	11
3.5	Condições de Contorno	16
3.6	Comprimento Efetivo	22
3.7	Carregamentos Básicos.....	24
3.7.1	Peso Próprio.....	24
3.7.2	Pesos dos Equipamentos	26
3.7.3	Carga de Tubulação	32
3.7.4	Sobrecarga.....	33
3.7.5	Carga de Vento	36
3.7.6	Deslocamentos Prescritos – Efeito Viga-Navio	40
3.7.7	Forças de Inércia.....	42
3.7.8	Sumário dos Carregamentos Aplicados.....	45
3.8	Combinações de Carga	46
4	METODOLOGIA.....	53
4.1	Elementos Não Cilíndricos – AISC [1] (unidades: ksi e in).....	53

4.2	Elementos Cilíndricos – API RP 2A [2] (unidades S.I.)	55
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	58
5.1	Deformações – Verificação da Flecha Máxima	58
5.2	Verificação dos Esforços	59
6	CONCLUSÕES.....	65
7	BIBLIOGRAFIA.....	67

Índice de Figuras

Figura 1. FPSO Barcaça ou Nova Construção (New Built) x FPSO convertido a partir de um navio. Fontes [3] e [4].....	2
Figura 2. Operação de alívio. Fonte [5].....	3
Figura 3. Distribuição dos Topsides no Convés do FPSO. Fonte: [6].....	5
Figura 4. Esquema da produção de óleo e gás.....	6
Figura 5. Dimensões dos perfis soldados.	8
Figura 6. Barra de pórtico espacial com 6 graus de liberdade por nó.....	8
Figura 7. Modelo estrutural e sistema de coordenadas.....	9
Figura 8. Dimensões – 1º piso.	10
Figura 9. Dimensões – 2º piso.	10
Figura 10. Dimensões – corte longitudinal.	11
Figura 11. Dimensões – corte transversal.....	11
Figura 12. Grupos de propriedade do módulo.....	12
Figura 13. Grupos das barras do primeiro piso do módulo.....	13
Figura 14. Grupos das barras do segundo piso do módulo.....	13
Figura 15. Grupos das barras do corte L1.....	14
Figura 16. Grupos das barras do corte L2.....	14
Figura 17. Grupos das barras do corte L3.....	14
Figura 18. Grupos das barras do paliteiro.....	14
Figura 19. Chapas do primeiro piso.	15
Figura 20. Chapas do segundo piso.	15
Figura 21. Suporte do módulo – vista em planta.	16
Figura 22. Suporte do módulo – seção A.....	16
Figura 23. Suporte do módulo – seção B.....	17
Figura 24. Suporte do módulo – seção C.....	17
Figura 25. Suporte do módulo – conexão tipo 1 – vista transversal.	17
Figura 26. Suporte do módulo – conexão tipo 2 – vista transversal.	18
Figura 27. Suporte do módulo – conexão tipo 3 – vista transversal.	18
Figura 28. Suporte do módulo – conexão tipo 4 – vista transversal.	18
Figura 29. Suporte do módulo – conexões tipos 3 e 4 – vista longitudinal.	19
Figura 30. Suporte do módulo.....	19
Figura 31. Rótulas nas extremidades das barras - isométrico.....	20
Figura 32. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção A.	20
Figura 33. Rótulas nos nós superiores das barras – seção A.	20

Figura 34. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção B.	20
Figura 35. Rótulas nos nós superiores das barras – seção B.	20
Figura 36. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção C.	21
Figura 37. Rótulas nos nós superiores das barras – seção C.	21
Figura 38. Vista em corte – seção L1.....	21
Figura 39. Vista em corte – seção L3.....	21
Figura 40. Rotações liberadas – seção L1.....	22
Figura 41. Rotações liberadas – seção L3.....	22
Figura 42. Fatores de comprimento efetivo K_y – 1º piso.	23
Figura 43. Fatores de comprimento efetivo K_y – 2º piso.	23
Figura 44. Carregamento 1 – Peso Próprio.....	25
Figura 45. Layout dos equipamentos – 1º piso.	27
Figura 46. Layout dos equipamentos – 2º piso.	28
Figura 47. Carregamento 2 – Peso dos equipamentos em operação.....	29
Figura 48. Carregamento 3 – Peso seco dos equipamentos.....	30
Figura 49. Carregamento 4 – Peso de teste dos equipamentos.....	31
Figura 50. Carregamento 5 – Peso da tubulação.....	32
Figura 51. Carregamento 6 – Rota de fuga – 1º piso.	33
Figura 52. Carregamento 6 – Área entre equipamentos – 1º piso.....	34
Figura 53. Carregamento 6 – Rota de fuga – 2º piso.	35
Figura 54. Carregamento 6 – Área entre equipamentos – 5º piso.....	36
Figura 55. Área de obstrução para vento na direção X.	37
Figura 56. Área de obstrução para vento na direção Y.	37
Figura 57. Carregamento 7 – Vento na direção X.....	38
Figura 58. Carregamento 8 – Vento na direção Y.....	39
Figura 59. Efeito viga-navio.	40
Figura 60. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – deslocamento em Z.....	41
Figura 61. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – deslocamento em X.	41
Figura 62. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – rotação em Y.....	42
Figura 63. Movimentos das embarcações. Fonte: [10].....	42
Figura 64. Deformada do módulo - isométrico.	58
Figura 65. Deformada do módulo – vista em corte transversal.	58
Figura 66. Unity Checks.....	60
Figura 67. Localização da barra não cilíndrica mais solicitada – plano do 2º piso.....	62
Figura 68. Resultados da barra não cilíndrica mais solicitada.....	62
Figura 69. Localização da barra cilíndrica mais solicitada – paliteiro.	62
Figura 70. Resultados da barra cilíndrica mais solicitada.....	63

Índice de Tabelas

Tabela 1. Chapa de piso.....	7
Tabela 2. Perfis laminados.....	7
Tabela 3. Perfis soldados.	8
Tabela 4. Carregamentos básicos.	24
Tabela 5. Pesos e identificação dos equipamentos.	26
Tabela 6. Velocidade do vento.....	39
Tabela 7. Deslocamentos prescritos aplicados.	40
Tabela 8. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 1.	43
Tabela 9. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 2.	43
Tabela 10. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 3.	43
Tabela 11. Combinações dos movimentos do navio – DEC.....	44
Tabela 12. Combinações dos movimentos do navio – TRA.	44
Tabela 13. Combinações dos movimentos do navio – DAM.	44
Tabela 14. Sumário dos Carregamentos.....	45
Tabela 15. Combinações de Carga Estáticas.	46
Tabela 16. Combinações de Carga em Serviço – Parte I.....	47
Tabela 17. Combinações de Carga em Serviço – Parte II.....	48
Tabela 18. Combinações de Carga em Serviço – Parte III.....	49
Tabela 19. Combinações de Carga para Plataforma em Trânsito – Parte I.....	50
Tabela 20. Combinações de Carga para Plataforma em Trânsito – Parte II.....	51
Tabela 21. Combinações de Carga para Navio Adernado.	52
Tabela 22. Fatores modificadores de tensão admissível.....	59
Tabela 23. Tensões atuantes nas barras.	60
Tabela 24. Resumo dos resultados.....	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com o crescimento da população mundial e o desenvolvimento do planeta como um todo aumenta a demanda energética da Terra. A geração de energia é um dos temas de maior relevância da atualidade, pois é essencial para assegurar o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida das pessoas. A energia é o combustível do desenvolvimento de qualquer país.

As fontes de energia não perecíveis (sol, ventos, marés) ainda não são suficientes para suprir a necessidade da população, logo, para garantir o suprimento de energia, muitas vezes é necessário que se faça uma combinação de diversas fontes, fazendo uso inclusive das fontes esgotáveis. Este é o caso do petróleo.

Quando novos pontos de prospecção, como o pré-sal, são descobertos, torna-se primordial o desenvolvimento de tecnologias que permitam a utilização desta energia. Não se pode abrir mão de recursos energéticos que estão na natureza, mas não existem soluções tecnológicas que permitam a exploração desses recursos de forma econômica e ecologicamente viável.

Dessa forma, a busca de recursos energéticos, explorados de modo seguro e eficiente, será o diferencial na obtenção do desenvolvimento, o que confere extrema importância ao estudo dos sistemas de geração de energia.

1.2 Objetivo

O principal objetivo desse trabalho é analisar o comportamento estrutural de um módulo da planta de processo de uma plataforma de petróleo offshore, avaliando o comportamento da estrutura durante o período de operação da plataforma, correspondente a 25 anos ininterruptos.

Os critérios de verificação são os do Método das Tensões Admissíveis de acordo com as normas AISC [1] e API RP-2A [2]. A avaliação estrutural foi feita com auxílio de um modelo digital desenvolvido em um programa de computador próprio a essa verificação. Esse modelo foi elaborado de forma a representar, da maneira mais fiel possível, o comportamento real da estrutura.

Ao fim do estudo espera-se concluir que o módulo pode operar com segurança durante toda a vida útil da plataforma.

1.3 Ambientação

Quando se começou a utilização de navios na exploração de petróleo, eles eram usados somente para as operações de perfuração e/ou completação, estes eram chamados de navios sonda. Posteriormente os navios foram usados para produção através da conversão de navios petroleiros ou graneleiros em FPSO's (Floating Production Storage and Offloading ou, em português, Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Alívio). Essa unidade de produção offshore armazena o óleo bruto em tanques localizados em seu casco e, periodicamente ele é transferido para navios aliviadores para o transporte até a costa.

Uma plataforma do tipo FPSO não necessita ter nem casa de máquinas nem um casco hidrodinâmico, pois ficará permanentemente ancorada em uma determinada localidade (*site*), excetuando-se no reboque do estaleiro até este local. Quando não há conversão, o casco é projetado com linhas retas se assemelhando a uma grande barcaça. Esta escolha é feita devido à facilidade na construção dos blocos que futuramente serão soldados, e irão formar o casco da plataforma.



Figura 1. FPSO Barcaça ou Nova Construção (New Built) x FPSO convertido a partir de um navio. Fontes [3] e [4].

Ancorados permanentemente em um determinado local no mar, estas unidades devem ser capazes de sobreviver às condições ambientais mais críticas a que estiverem sujeitas. 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. Alguns exemplos de tipos de ancoragem mais comuns no mercado são: *Spread-Mooring* (ancoragem distribuída), *Turret Externo* e *Turret Interno*.

A vantagem do uso desse tipo de plataforma é que quando o poço não possui uma rede de tubulação (flow lines) que faça o escoamento do óleo para terra (situação que é frequente quando os *sites* se encontram a uma grande distância da costa), a plataforma tem a capacidade de armazenar o óleo cru retirado do poço, além de poder realizar todo o processo de produção desse óleo até o seu transbordo ou transferência para um navio aliviador através de um processo conhecido como alívio (*offloading*).



Figura 2. Operação de alívio. Fonte [5].

Nos últimos anos, plataformas do tipo FPSO têm se tornado as principais unidades de produção flutuantes para águas rasas e profundas.

1.4 Descrição dos Capítulos

Esse trabalho foi dividido da seguinte forma: a princípio foi feita uma breve explanação sobre a planta de processo e o processamento da produção num FPSO (Capítulo 2); a seguir é feita uma descrição da estrutura e do modelo computacional utilizado na análise, contemplando a função do módulo na plataforma, os materiais e perfis utilizados na estrutura, a configuração estrutural, as condições de contorno e os carregamentos atuantes bem como as combinações de carga (Capítulo 3); segue-se uma descrição simplificada da metodologia de cálculo (Capítulo 4); por fim é feita a apresentação dos resultados obtidos e das conclusões finais (Capítulos 5 e 6, respectivamente).

2 PLANTA DE PROCESSO

As plataformas do tipo FPSO contam com uma planta de processamento da produção, que permite a separação do óleo, gás e água; bem como o condicionamento e a compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água produzida, para descarte dentro dos parâmetros regidos pela legislação ambiental.

2.1 Módulos de Produção

As unidades que efetuam os diversos processos de produção da unidade flutuante são chamadas de módulos de produção ou *topsides* e ficam localizadas no convés da embarcação. Em geral, os módulos são divididos em:

a. E-house (planta de utilidades)

É composta por equipamentos de média e baixa voltagem que auxiliam na quebra de circuitos para eventuais reparos e manutenção, transformadores, inversores de frequência e equipamentos para gerenciamento de energia.

b. Módulos de Geração de Energia

Produzem a energia necessária para o funcionamento de todos os módulos que constituem os *topsides* do FPSO, logo é de vital importância para os processos ocorridos na planta do navio.

c. Módulos de Processo

São os módulos de separação e tratamento do óleo, tratamento do gás, tratamento da água, injeção de gás e injeção de água.

d. Módulo de Compressão de Gás

Módulo que faz a compressão do gás retirado do poço, necessária tanto para a re-injeção do gás no poço, para aumento da produtividade do mesmo, ou para queima do gás no queimador.

e. Flare (queimador)

É constituído por uma torre alta, geralmente posicionada na proa do navio, destinada à queima do excesso de gás produzido pelo FPSO.

Uma típica distribuição dos módulos no convés é apresentada na figura abaixo.

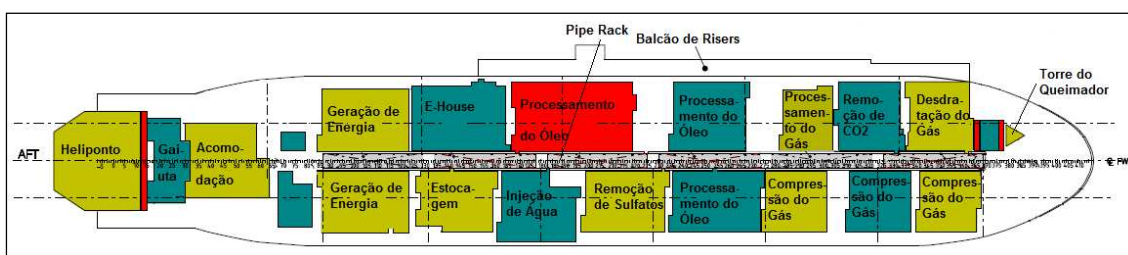


Figura 3. Distribuição dos Topsides no Convés do FPSO. Fonte: [6].

2.2 Descrição Simplificada do Processamento da Produção

Os fluidos recuperados do reservatório chegam às instalações de superfície do FPSO nos manifolds de produção a uma temperatura de cerca de 40°C e são encaminhados ao pré-aquecedor de produção.

Esta etapa é importante para facilitar a separação da água, do óleo e do gás. Em seguida, os fluidos são encaminhados ao separador de primeiro estágio, onde se processa a separação primária do óleo, gás e água a uma temperatura de 90°C. Os gases são encaminhados à planta de compressão de gás de alta pressão e desidratação, sendo nesta fase inicial, o gás direcionado para o compressor de gás combustível.

A água é direcionada à planta de tratamento de água produzida para retirada do óleo residual e posterior descarte.

O fluxo de óleo do separador de primeiro estágio é direcionado ao separador de segundo estágio, passando antes pelo degasseificador. O segundo estágio opera a 109°C, onde mais gás é removido, a fim de alcançar a especificação desejada do óleo. Nesta fase o gás separado é direcionado para o compressor de recuperação de gás de baixa pressão.

O fluxo de óleo do separador de segundo estágio é encaminhado para o tratador eletrostático. O óleo ainda contém até 5% da água produzida e é aquecido a até 120°C. Mas antes de entrar no tratador eletrostático, o óleo entra em um aquecedor elétrico e é diluído com água doce. Isso é necessário para atingir a especificação de salinidade do óleo. O gás separado nesta fase é direcionado para o compressor de recuperação de baixa pressão. Neste estágio, também ocorre separação de água do óleo, que, da mesma maneira que a água separada no separador de primeiro estágio, é direcionada para tratamento nos hidrociclones.

O óleo já tratado é bombeado pelas bombas de transferência de óleo para um trocador óleo/óleo, que ao mesmo tempo em que baixa a sua temperatura, também eleva a temperatura do óleo que está chegando dos poços. Então é direcionado para os resfriadores de óleo bruto para 60°C, sendo então medido e posteriormente é encaminhado para os tanques de carga.

O gás, depois de processado, é utilizado para a geração da energia utilizada pela plataforma. O gás sobressalente é re-injetado no poço ou queimado no queimador.

Um diagrama simplificado do processo de produção é apresentado abaixo.

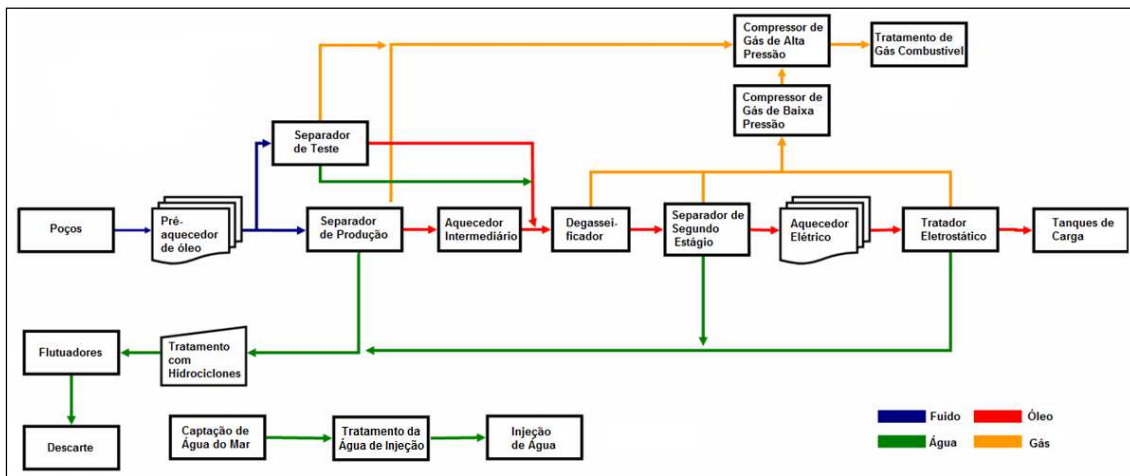


Figura 4. Esquema da produção de óleo e gás.

3 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA

A estrutura analisada corresponde a um módulo de produção, a sua localização no convés do FPSO está indicada na figura 3, estando o módulo em questão destacado pela cor vermelha.

Conforme será visto mais detalhadamente adiante, esse módulo é composto basicamente por painéis de controle dos poços e por lançadores e recebedores de pigs. Pigs são dispositivos inseridos na tubulação que se deslocam livremente através dela, impulsionados pelo fluxo do produto, para realizar uma tarefa específica dentro do duto. Existem diversas tarefas que um pig pode realizar, tais como a limpeza, separação de produtos na linha, drenagem da linha, fornecimento de informações sobre a condição do duto e a extensão e localização de um eventual problema (tal como a corrosão) e até tampões para isolamento de dutos. Sendo assim, todas essas tarefas podem ser realizadas no módulo que é objeto desse estudo.

Será feita a análise estrutural estática da estrutura para as condições de operação sob condições ambientais extremas, plataforma em trânsito e operação com o navio adernado. Nos itens a seguir será apresentado como o modelo computacional foi elaborado.

3.1 Materiais e Perfis Utilizados

As chapas e perfis soldados utilizados na estrutura estão listados nas tabelas a seguir, bem como suas dimensões, massa por unidade de comprimento ou de área, especificação do material e tensão de escoamento.

Tabela 1. Chapa de piso.

Chapa de Piso	Espessura mm	Massa por Unidade de Área kg/m ²	Especificação do Material	σ_y MPa	Grupo
Chapa 16mm	16	125.6	NV A36	355	P16

Tabela 2. Perfis laminados.

Perfis Laminados	Diâmetro mm	Espessura mm	Massa Linear kg/m	Especificação do Material	σ_y MPa	Grupo
Tubo ϕ 355.6X19.1	355.6	19.4	158.5	NV A36	355	D35

Tabela 3. Perfis soldados.

Perfis Soldados	H mm	B mm	T _w mm	T _f mm	Massa Linear kg/m	Especificação do Material	σ_y MPa	Grupo
I1200X600X25.0X40.0	1200	600	25.0	40.0	596.6	NV A36 (alma) / NV D36 (flanges)	355	I1B
T1184X400X16.0X25.0	1184	400	16.0	25.0	224.1	NV A36	355	I1C
T784X250X16.0X25.0	784	250	16.0	25.0	144.5	NV A36	355	I08
T484X250X8.0X12.5	484	250	8.0	12.5	54.2	NV A36	355	I05
T284X150X8.0X9.5	284	150	8.0	9.5	28.5	NV A36	355	I03
H500X500X19.0X31.5	500	500	19.0	31.5	312.5	NV A36 (alma) / NV D36 (flanges)	355	H05

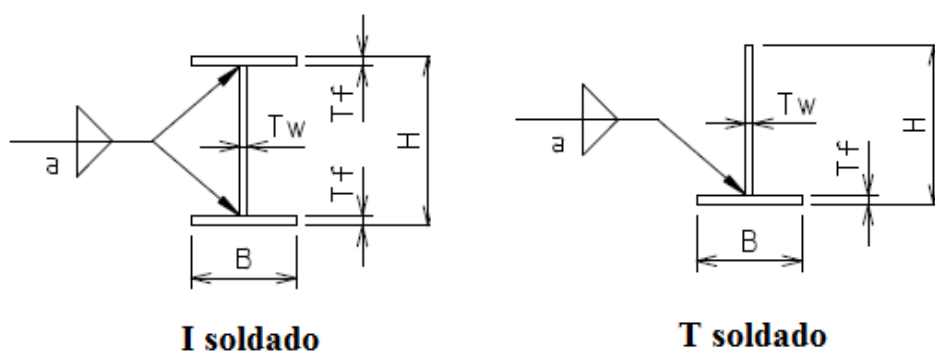


Figura 5. Dimensões dos perfis soldados.

Foi considerado para todos os perfis e chapas um Módulo de Elasticidade de 210 MPa, um Módulo de Cisalhamento de 80MPa e um Coeficiente de Poisson de 0.3.

3.2 Modelo Estrutural

A estrutura foi modelada e analisada no programa SACS 5.3 [7]. Os elementos utilizados na modelagem foram elementos de pórtico espacial convencionais com 6 graus de liberdade por nó (ver Figura 6 abaixo).

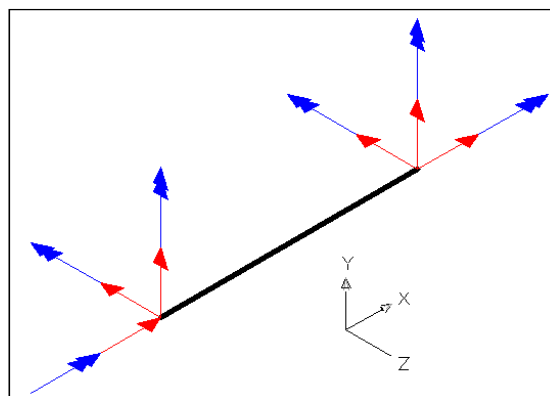


Figura 6. Barra de pórtico espacial com 6 graus de liberdade por nó.

O modelo estrutural foi elaborado de acordo com o sistema de coordenadas globais descrito a seguir. Vale ressaltar que, para efeito de simplificação, de acordo com a prática de projeto usual, os elementos foram modelados por suas linhas de centro.

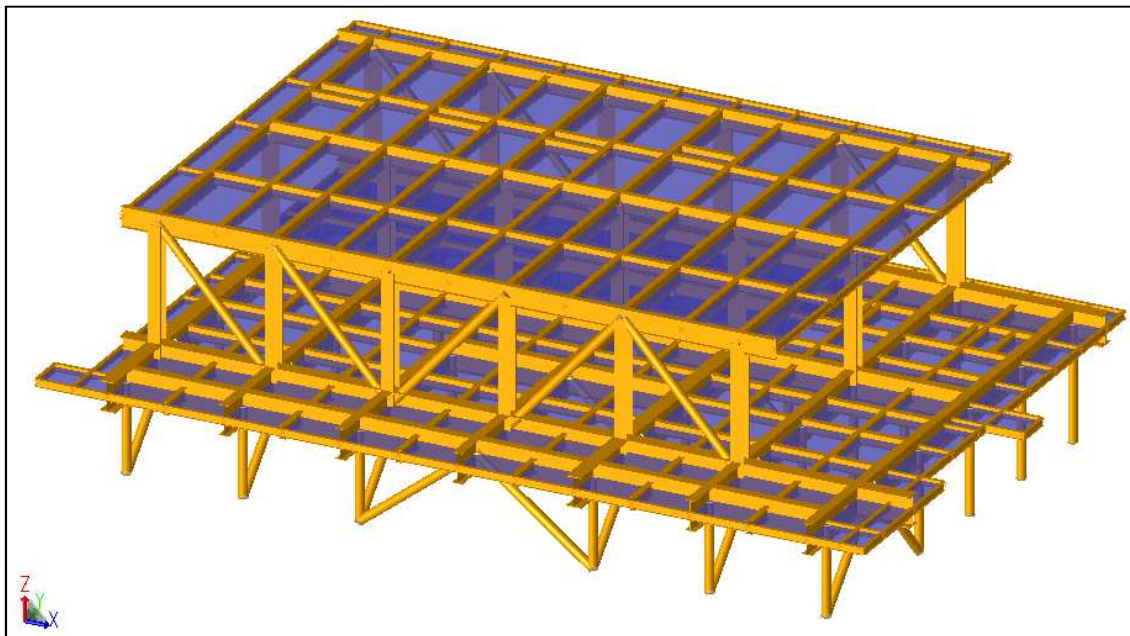


Figura 7. Modelo estrutural e sistema de coordenadas.

Sendo:

Eixo global X – alinhado com o eixo longitudinal do FPSO, da popa para a proa;

Eixo global Y – alinhado com o eixo transversal do FPSO, da linha de centro para bombordo;

Eixo global Z – alinhado com o eixo vertical do FPSO, da linha de fundo para cima.

3.3 Principais Dimensões

As figuras 8 a 11 a seguir mostram, em milímetros (mm), as principais dimensões do módulo. Vale ressaltar que o primeiro piso está na elevação 35.650m e o segundo piso na elevação 40.650m, em relação à linha de fundo do navio.

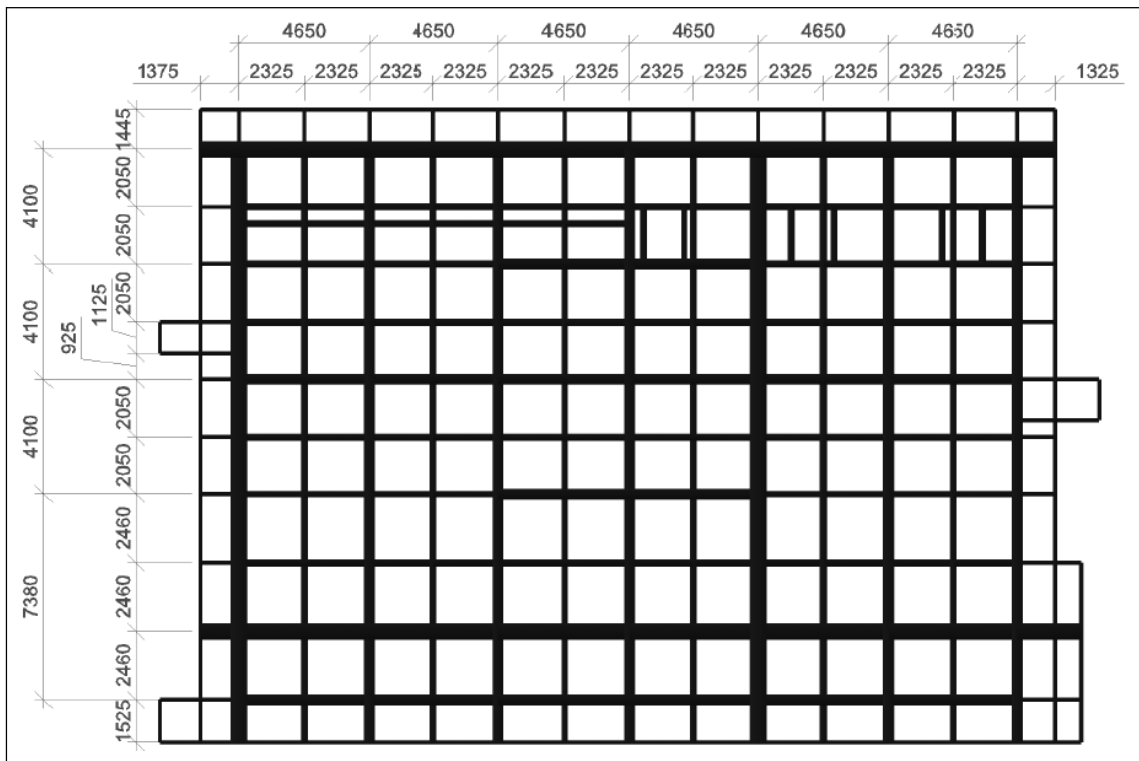


Figura 8. Dimensões – 1º piso.

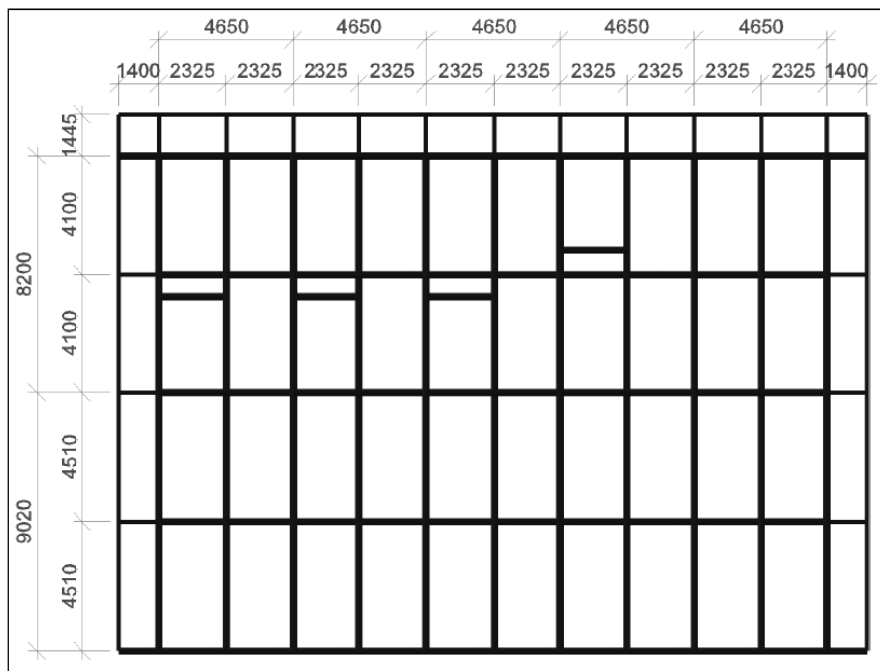


Figura 9. Dimensões – 2º piso.

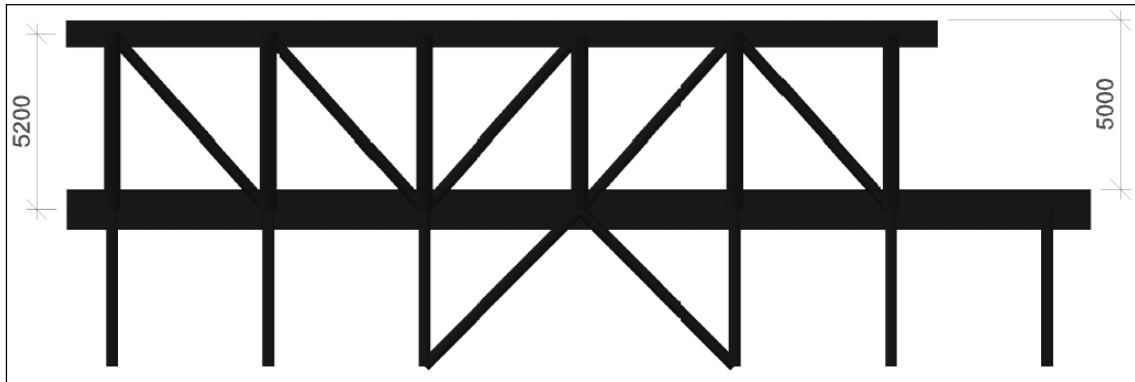


Figura 10. Dimensões – corte longitudinal.

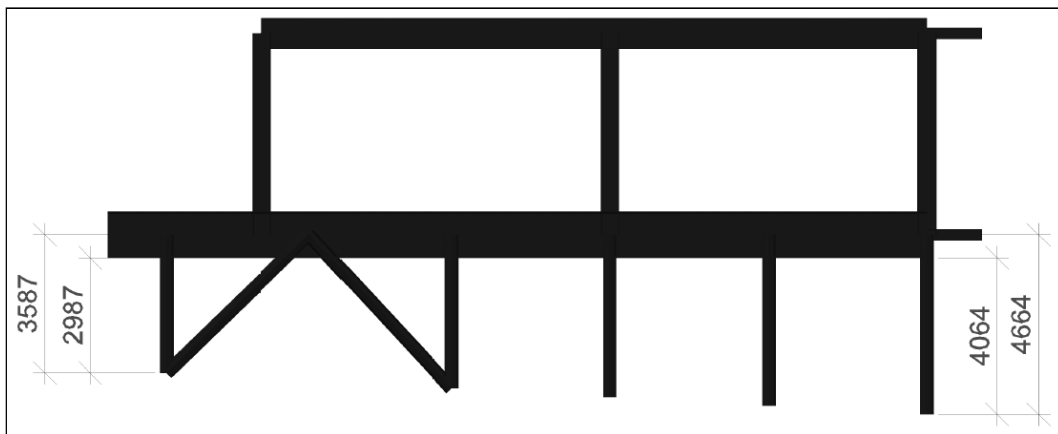


Figura 11. Dimensões – corte transversal.

3.4 Grupos de Propriedades dos Perfis

A figura 12 abaixo identifica por cores os diversos perfis utilizados no modelo e também indica três cortes longitudinais L1, L2 e L3.

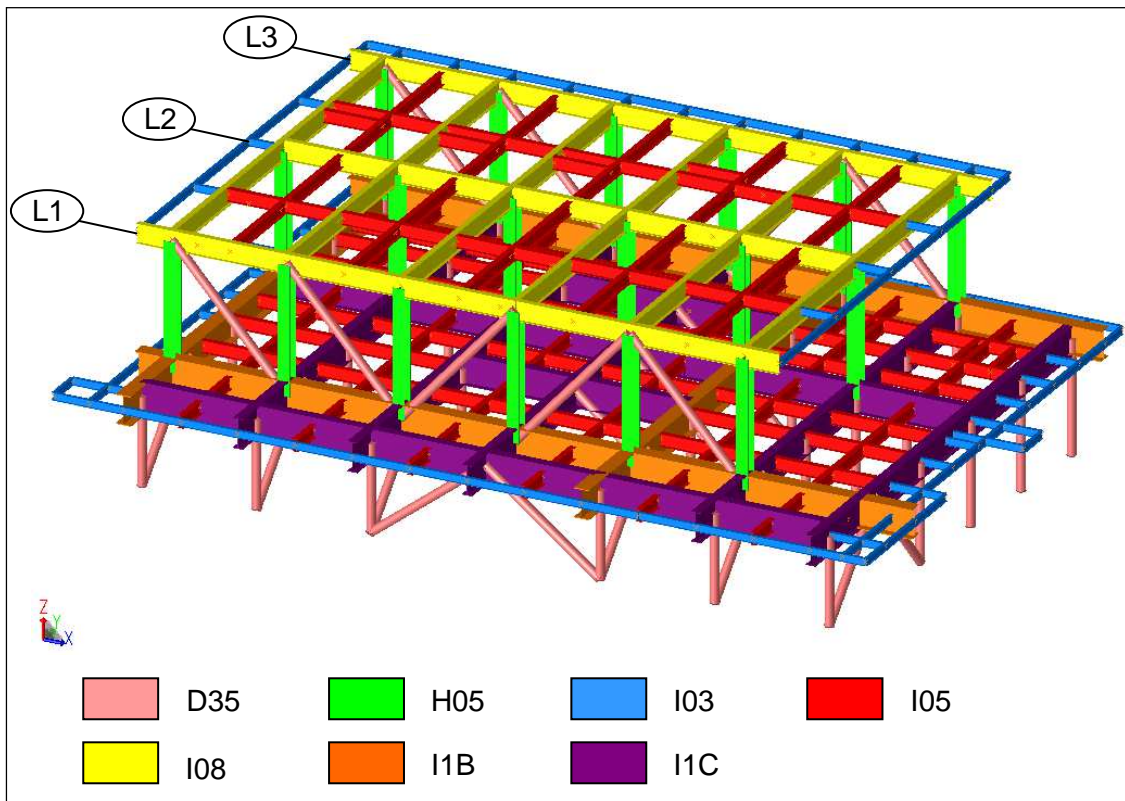


Figura 12. Grupos de propriedade do módulo.

As figuras 13 a 18 a seguir mostram de forma mais detalhada os perfis aplicados aos diversos elementos do modelo. A legenda apresentada na figura 12 também é válida para as figuras 13 a 18.

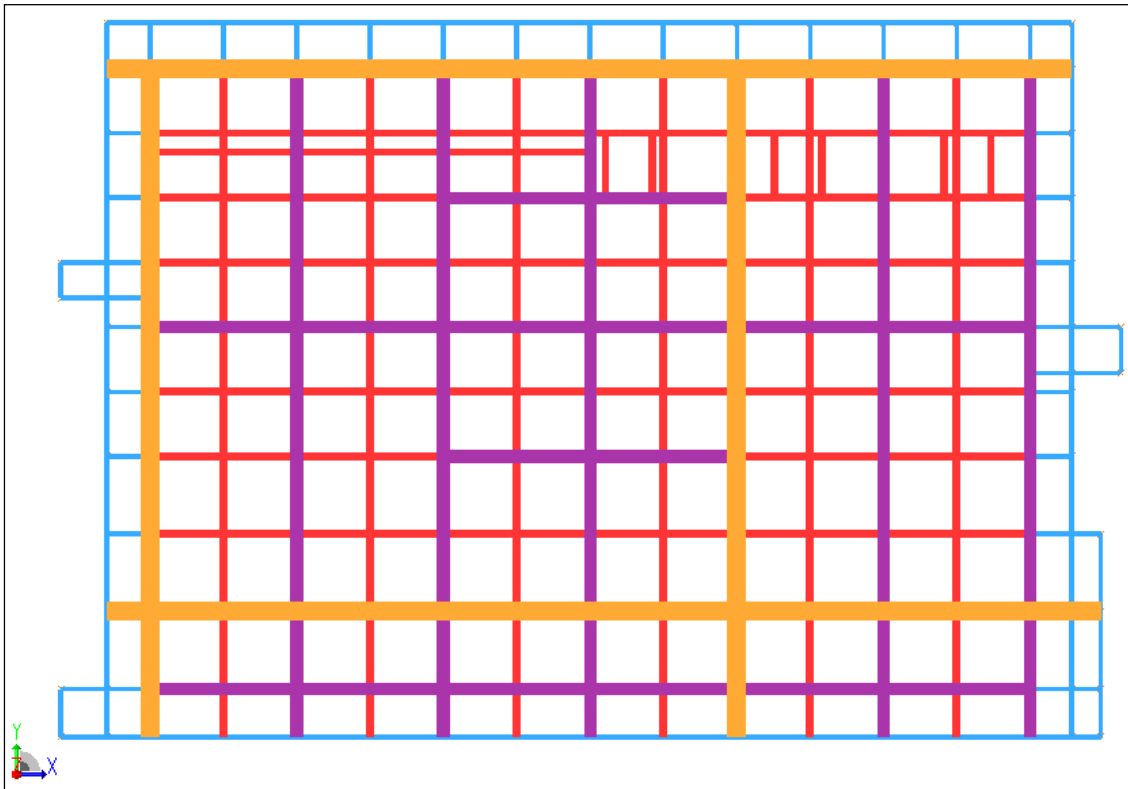


Figura 13. Grupos das barras do primeiro piso do módulo.

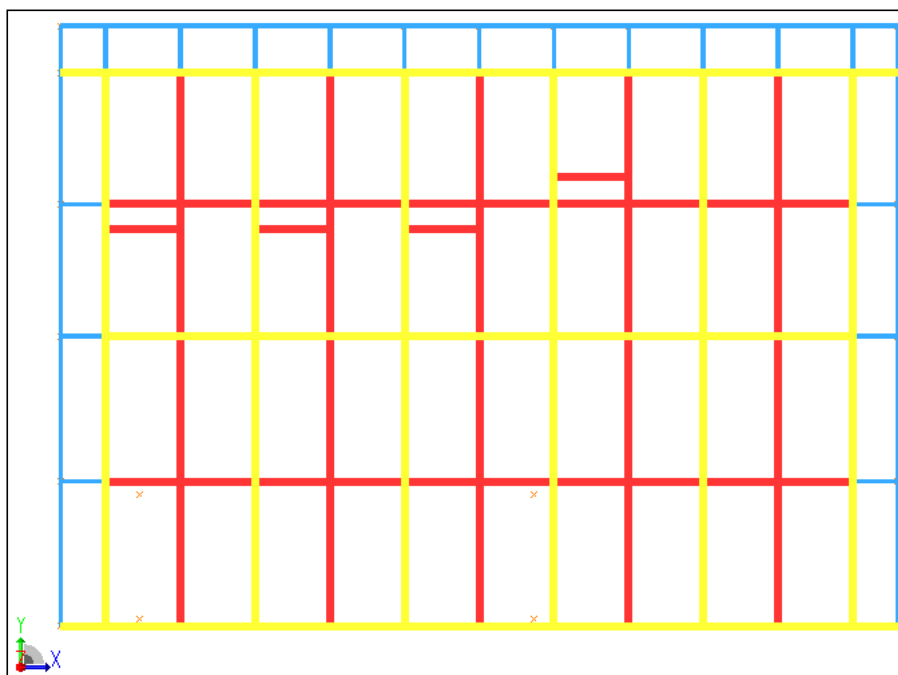


Figura 14. Grupos das barras do segundo piso do módulo.

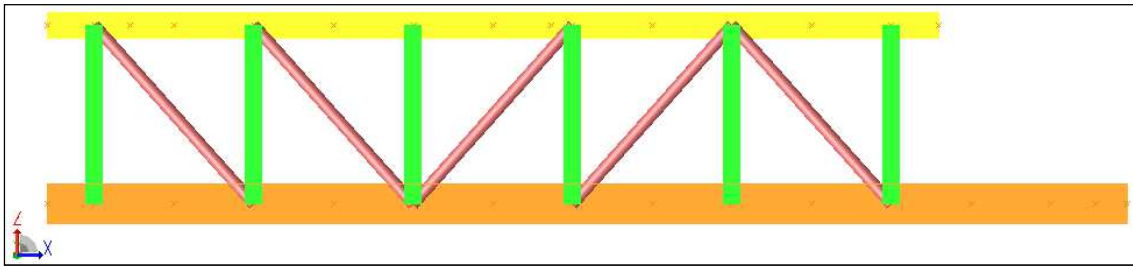


Figura 15. Grupos das barras do corte L1.

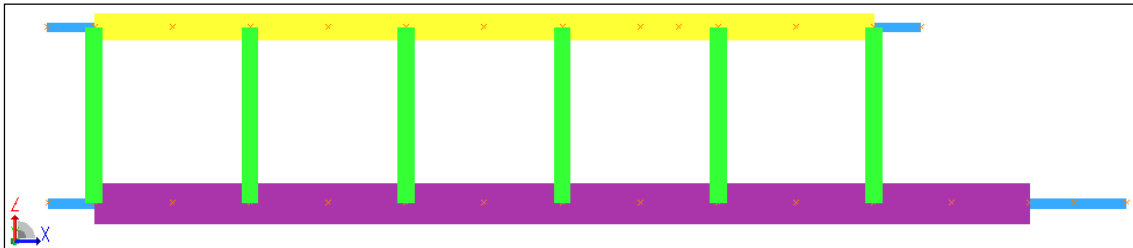


Figura 16. Grupos das barras do corte L2.

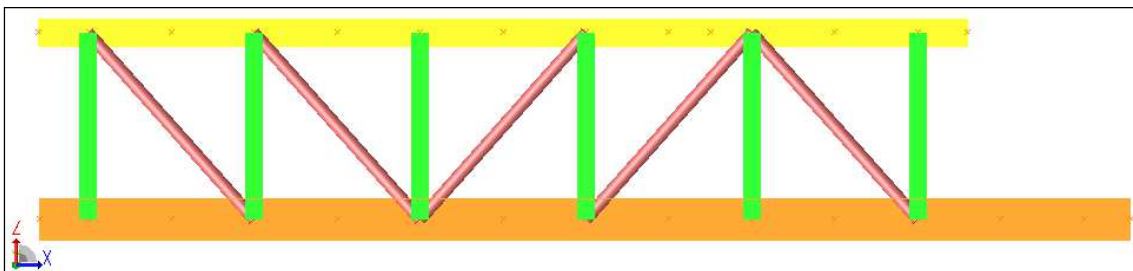


Figura 17. Grupos das barras do corte L3.

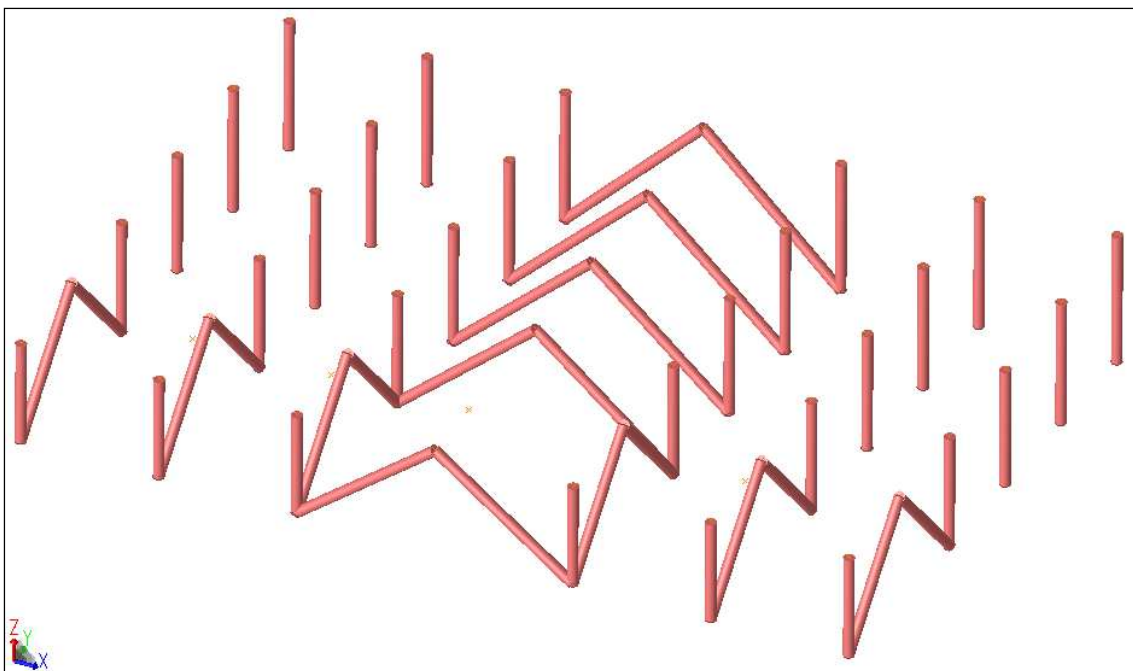


Figura 18. Grupos das barras do paliteiro.

As figuras 19 e 20 a seguir mostram, respectivamente, as chapas do primeiro e do segundo pavimento do módulo. As chapas foram modeladas como elementos finitos de placa somente para efeito de peso e contenção lateral das vigas. A todas as chapas foi atribuído o grupo P16.

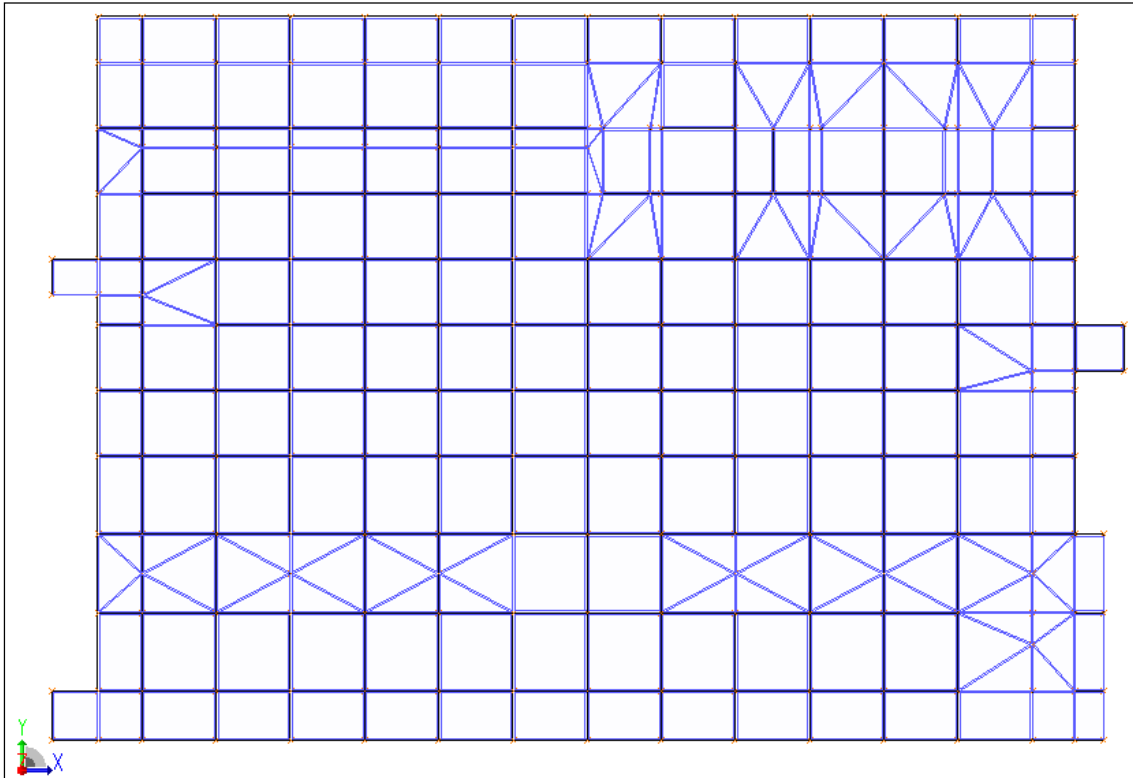


Figura 19. Chapas do primeiro piso.

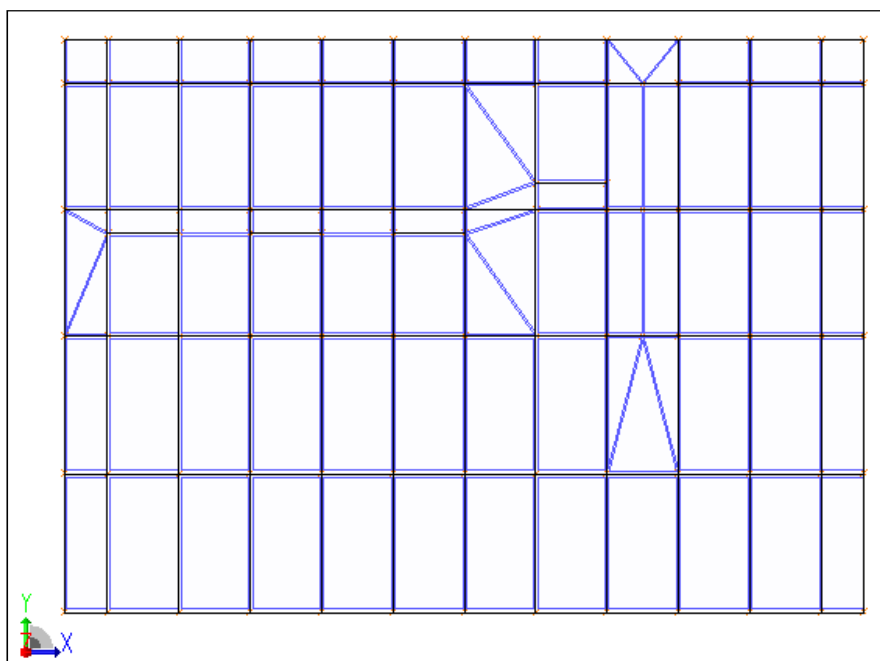


Figura 20. Chapas do segundo piso.

3.5 Condições de Contorno

O módulo se apoia no convés da plataforma por 4 tipos diferentes de conexões, a figura 21 apresenta uma vista em planta do sistema de apoio do módulo identificando cada um dos tipos de conexões, as figuras 22 a 24 mostram em cortes o sistema de apoio da estrutura e as figuras 25 a 29 mostram os detalhes das conexões.

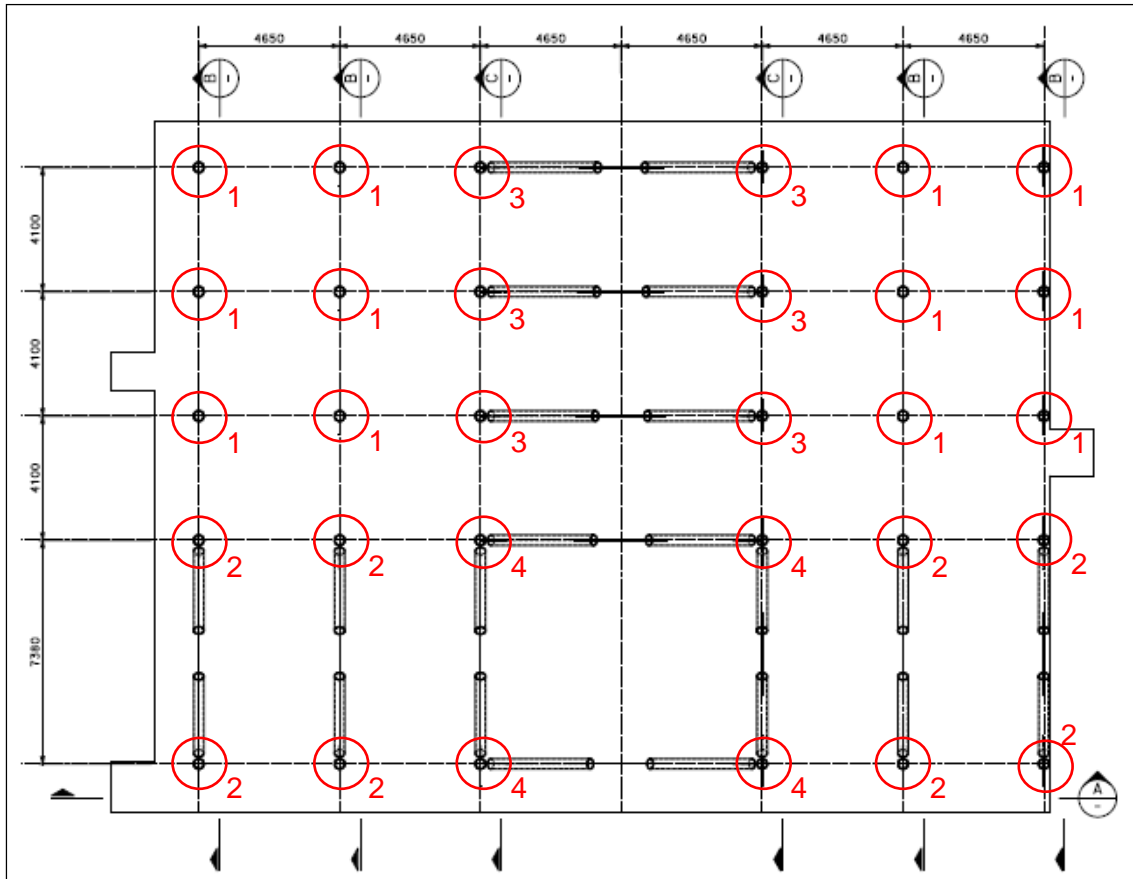


Figura 21. Suporte do módulo – vista em planta.

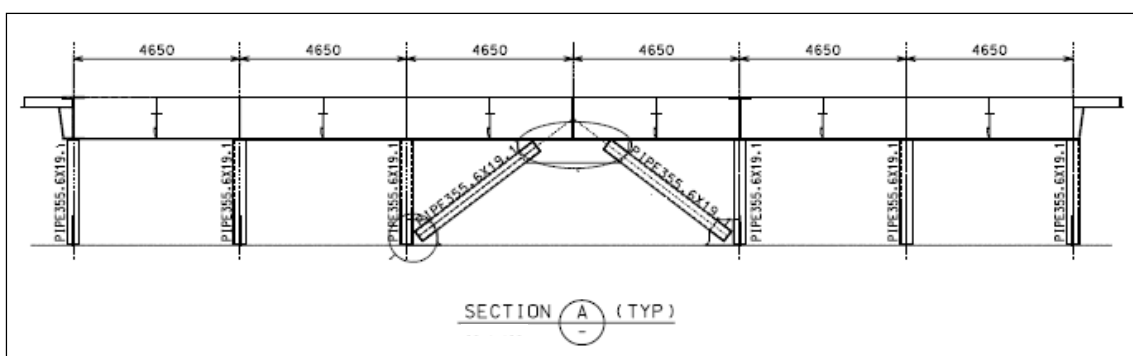


Figura 22. Suporte do módulo – seção A.

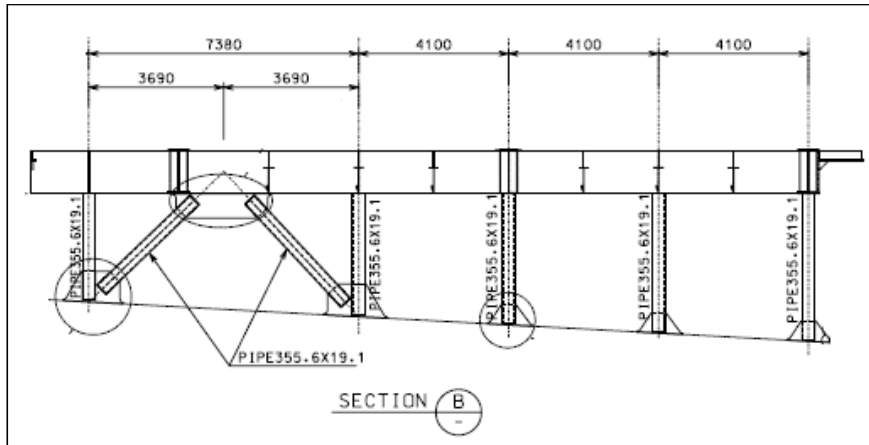


Figura 23. Suporte do módulo – seção B.

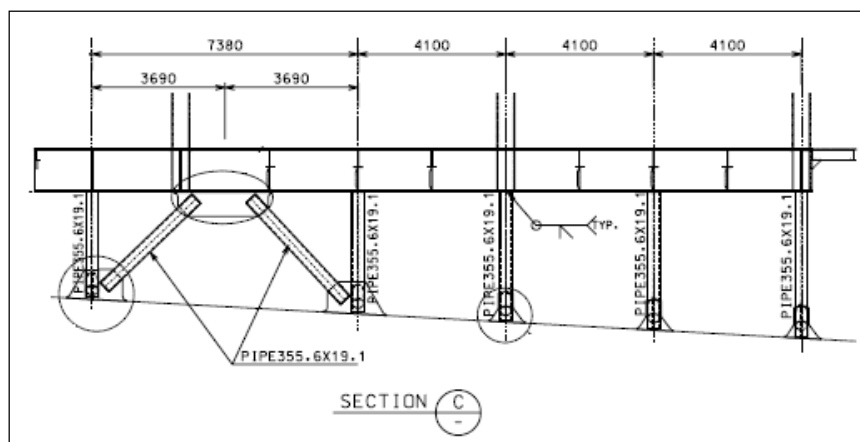


Figura 24. Suporte do módulo – seção C.

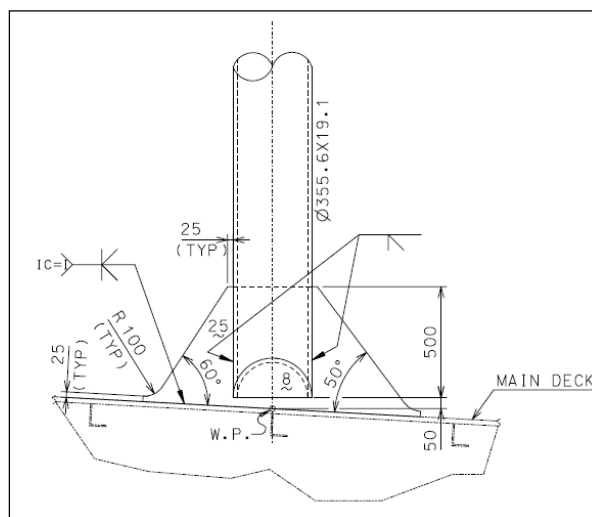


Figura 25. Suporte do módulo – conexão tipo 1 – vista transversal.

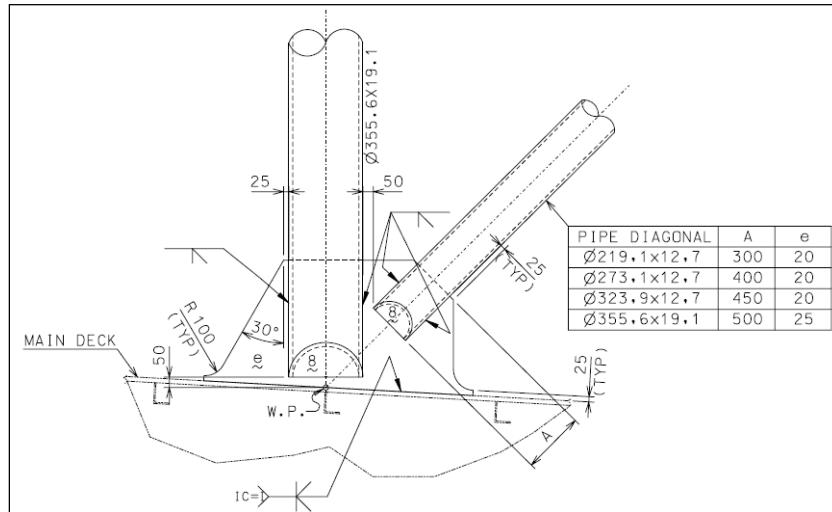


Figura 26. Suporte do módulo – conexão tipo 2 – vista transversal.

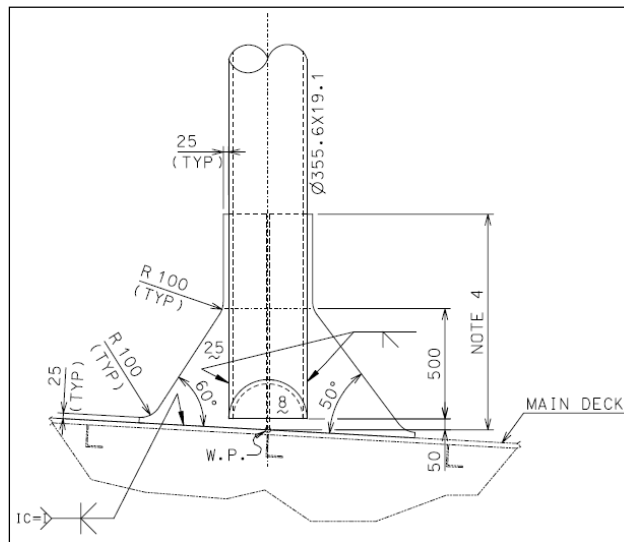


Figura 27. Suporte do módulo – conexão tipo 3 – vista transversal.

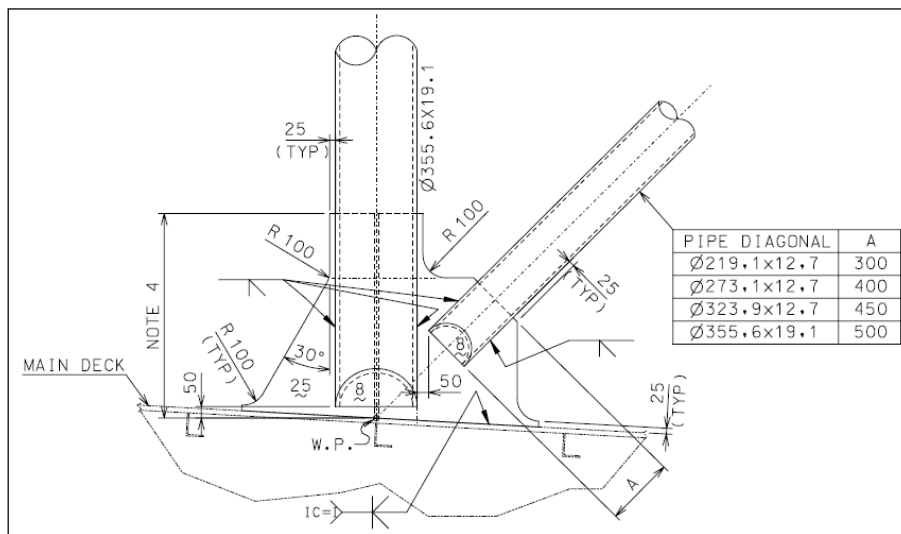


Figura 28. Suporte do módulo – conexão tipo 4 – vista transversal.

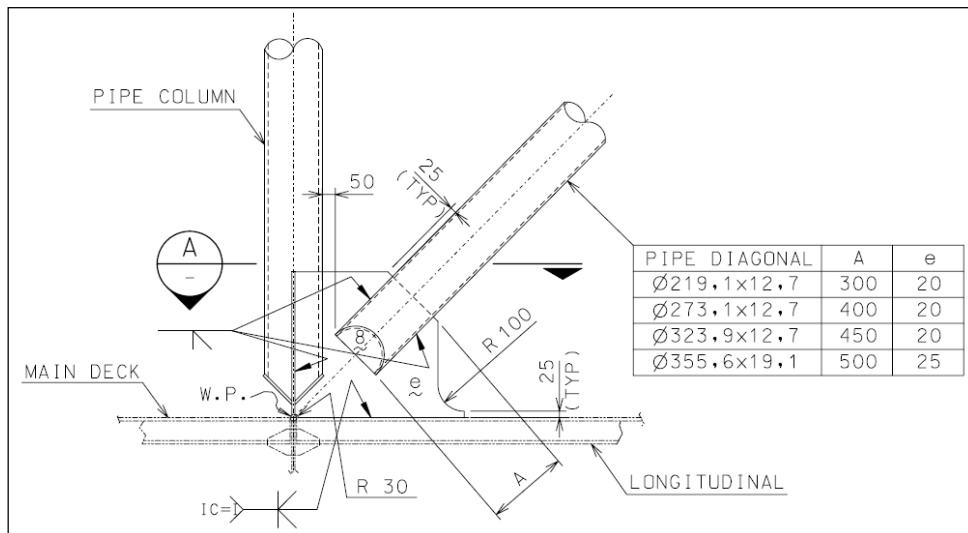


Figura 29. Suporte do módulo – conexões tipos 3 e 4 – vista longitudinal.

As figuras que se seguem mostram como a suportação do módulo foi traduzida no modelo. A figura 30 a seguir mostra o paliteiro com os nós do plano do convés engastados. Em cada nó, cada número representa um grau de liberdade (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz) podendo assumir os valores zero (livre) ou um (fixo).

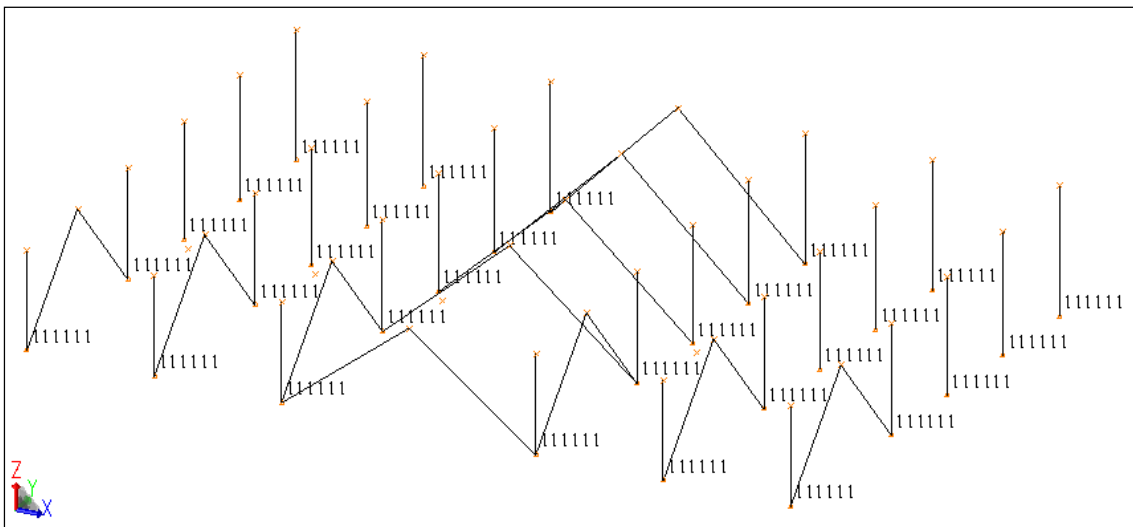


Figura 30. Suporte do módulo.

As chapas que fazem a ligação dos tubos ao convés atuam como rótulas e foram representadas liberando-se algumas rotações nas extremidades das barras do paliteiro, conforme mostram as figuras 31 a 37 a seguir. Nessa figura, as rotações liberadas estão indicadas pelo número um.

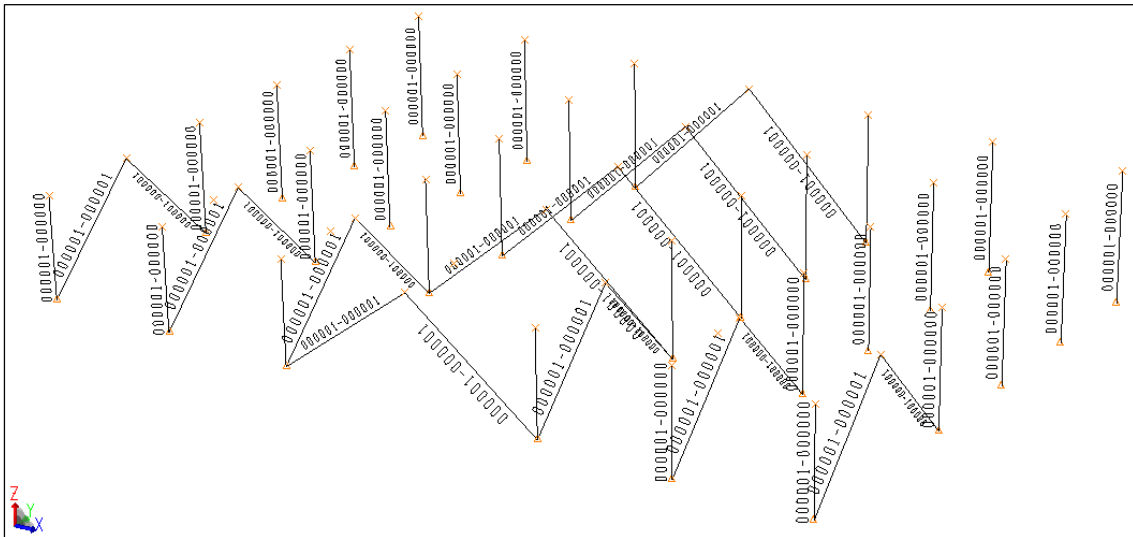


Figura 31. Rótulas nas extremidades das barras - isométrico.

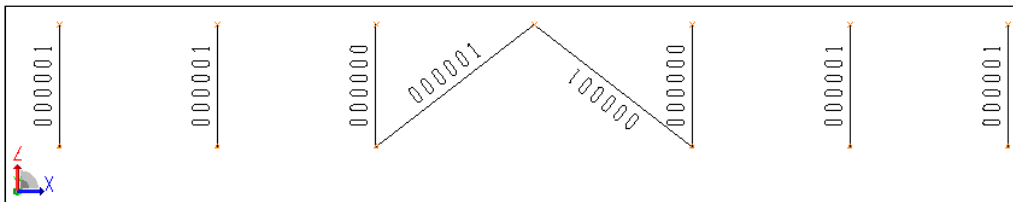


Figura 32. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção A.

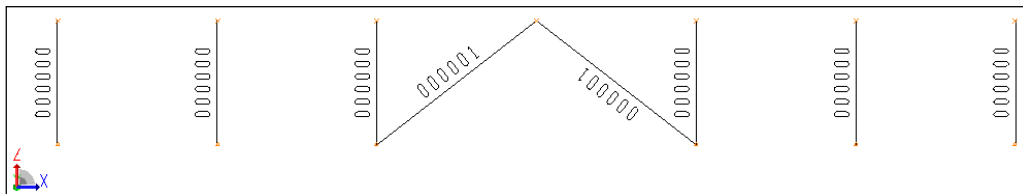


Figura 33. Rótulas nos nós superiores das barras – seção A.

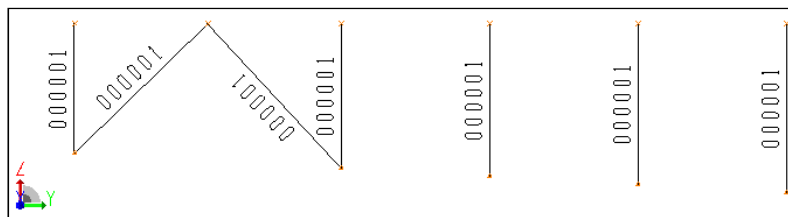


Figura 34. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção B.

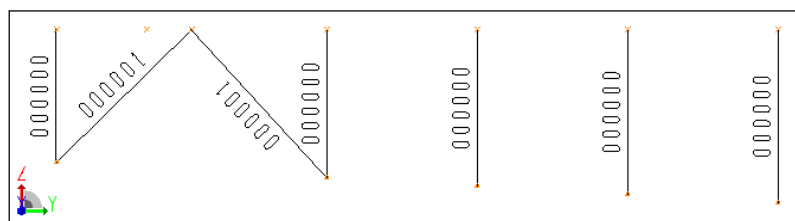


Figura 35. Rótulas nos nós superiores das barras – seção B.

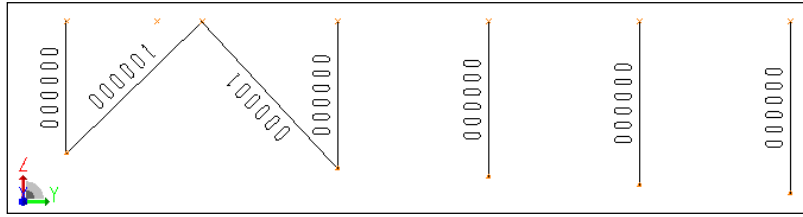


Figura 36. Rótulas nos nós inferiores das barras – seção C.

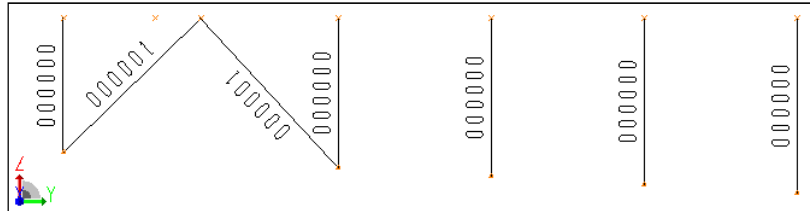


Figura 37. Rótulas nos nós superiores das barras – seção C.

Além do paliteiro, as barras de contraventamento do módulo também tiveram rotações liberadas, conforme indicado nas figuras 38 a 41 a seguir.

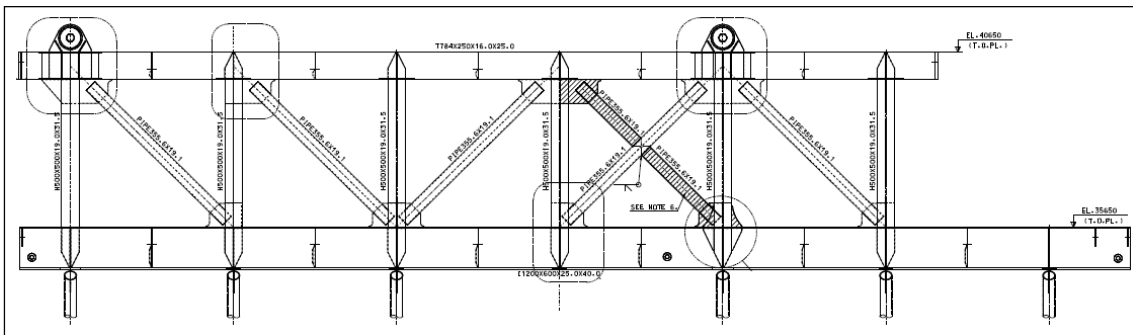


Figura 38. Vista em corte – seção L1.

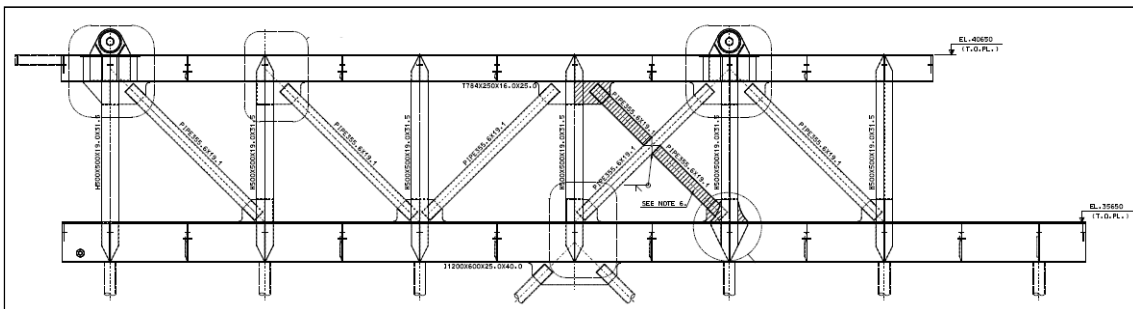


Figura 39. Vista em corte – seção L3.

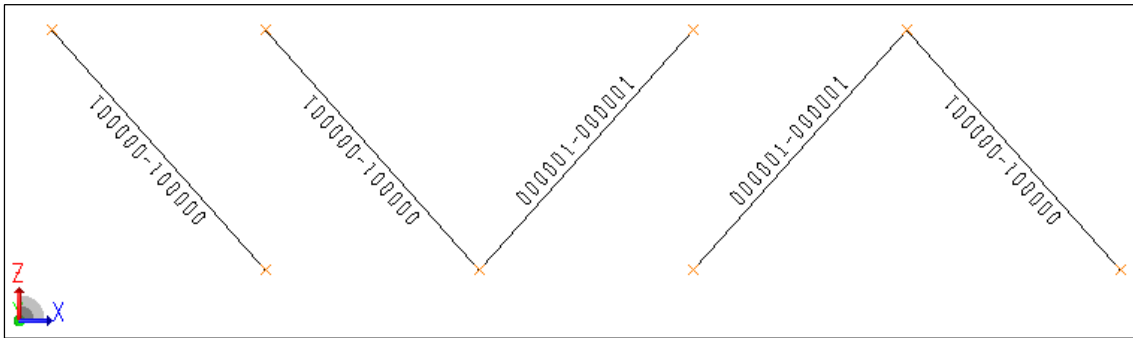


Figura 40. Rotações liberadas – seção L1.

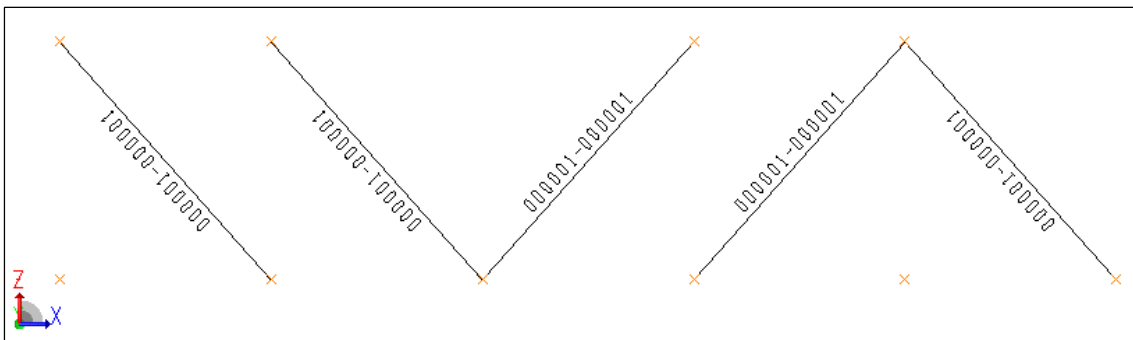


Figura 41. Rotações liberadas – seção L3.

3.6 Comprimento Efetivo

Foram aplicados a todas as barras do modelo os fatores de comprimento efetivo K_y e K_z , para cálculo do comprimento de flambagem das barras. Para o paliteiro, as colunas e contraventamentos do módulo tanto K_y quanto K_z valem 1.0. K_z vale 1.0 também para as barras dos pisos, pois as chapas de piso representam um travamento na direção local z das barras. K_y foi aplicado considerando que vigas menores se apoiam em vigas maiores e as maiores vigas se apoiam nas colunas. Sendo assim, as figuras 42 e 43 a seguir mostram K_y para as barras do primeiro piso e do segundo piso do módulo.

3.7 Carregamentos Básicos

Esta seção contém uma descrição dos carregamentos básicos considerados na análise. A soma das cargas é apresentada no final de cada item. Para compensar elementos não modelados uma contingência de 15% foi aplicada sobre o carregamento de peso próprio da estrutura, nos demais carregamentos não foi aplicada contingência. A tabela a seguir mostra os carregamentos considerados.

Tabela 4. Carregamentos básicos.

Carregamento	Identificação
1	Peso Próprio
2	Peso dos Equipamentos em Operação
3	Peso Seco dos Equipamentos
4	Peso de Teste dos Equipamentos
5	Peso de Tubulação
6	Sobrecarga
7	Vento na Direção X
8	Vento na Direção Y
9	Deslocamentos Prescritos - Efeito Viga-Navio
-	Forças de Inércia

3.7.1 Peso Próprio

Os pesos dos perfis de aço e chapas de piso são gerados automaticamente pelo programa com base nas características de seção e de material. O peso específico do aço considerado para os perfis foi de 8.1 t/m^3 ($7.85 \text{ t/m}^3 + 3\%$) para simular os pesos de soldagem e pintura, e para as chapas foi de 9.4 t/m^3 ($7.85 \text{ t/m}^3 + 20\%$), considerando as chapas e reforços. A figura 44 a seguir mostra o carregamento aplicado.

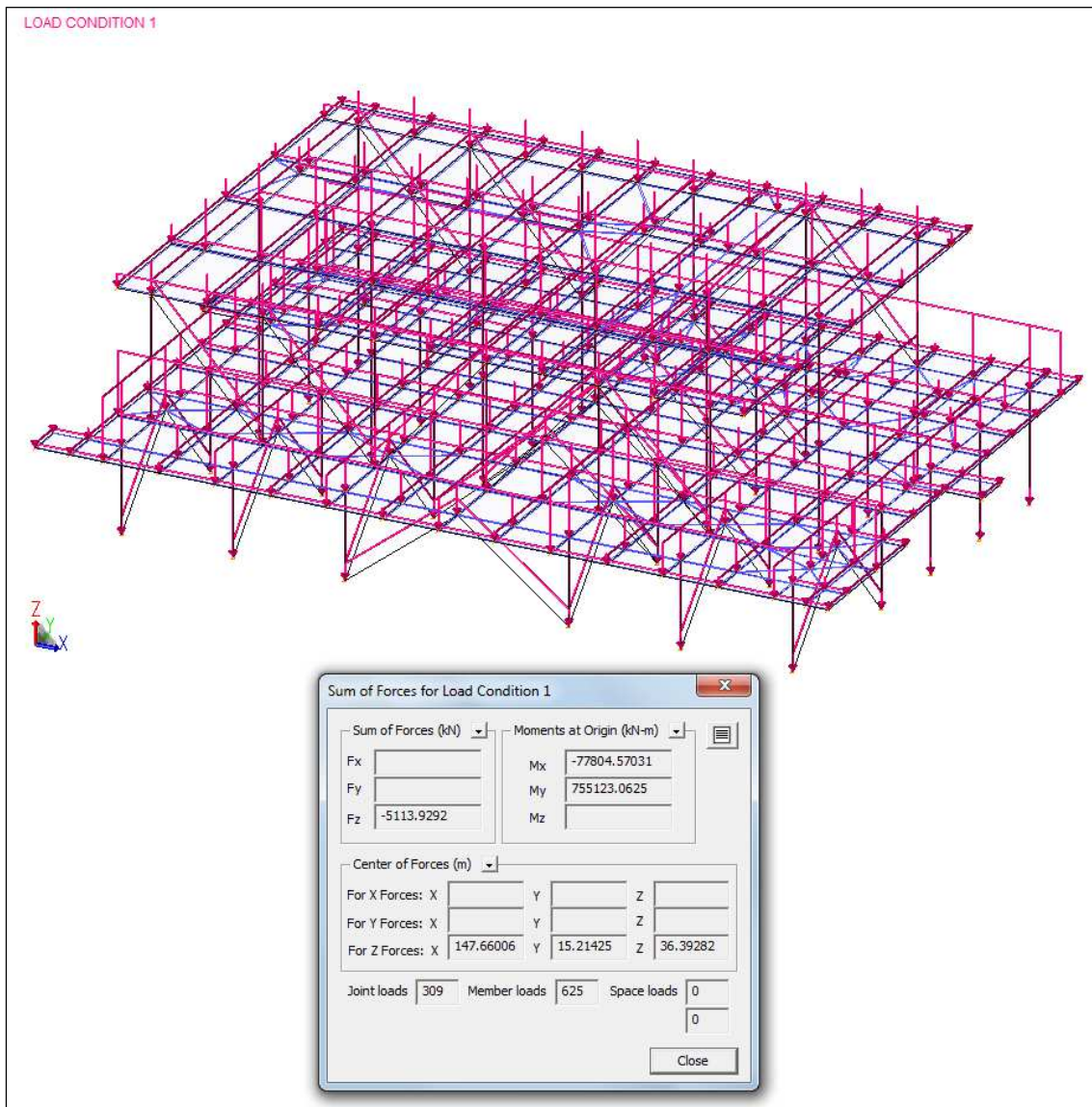


Figura 44. Carregamento 1 – Peso Próprio.

Carga total aplicada: $F_z = -5113.93$ kN.

3.7.2 Pesos dos Equipamentos

Os pesos dos equipamentos foram aplicados de acordo com o layout mostrado nas figuras 45 e 46 a seguir e foram adotados os valores apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Pesos e identificação dos equipamentos.

#	Identificação do Equipamento	Operação (kN)	Seco (kN)	Teste (kN)
1	Painel de Controle de Poço de Produção A	7.85	7.85	7.85
	Painel de Controle de Poço de Produção B	7.85	7.85	7.85
	Painel de Controle de Poço de Produção C	7.85	7.85	7.85
2	Painel de Controle de Poço de Injeção de Água A	5.89	5.89	5.89
	Painel de Controle de Poço de Injeção de Água B	5.89	5.89	5.89
	Painel de Controle de Poço de Injeção de Água C	5.89	5.89	5.89
3	Painel	7.85	7.85	7.85
4	Unidade de Energia Hidráulica para Sistema Subsea	321.47	141.66	321.47
5	Unidade de Energia Hidráulica para Manifold de Produção	245.25	117.72	245.25
6	Unidade de Energia Hidráulica	245.25	117.72	117.72
7	Lançador de Pig A – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig B – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig C – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig D – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig E – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig F – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig G – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig H – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig I – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig J – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig K – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
	Lançador de Pig L – Duto de Gas Lift	7.85	6.87	7.85
8	Lançador de Pig MSP-001	12.75	11.77	12.75
	Lançador de Pig MSP-002	12.75	11.77	12.75
	Lançador de Pig MSP-003 (reserva)	12.75	11.77	12.75
9	Lançador/Recebedor de Pig – Duto de Gás	30.41	22.56	30.41
10	Recebedor de Pig de Poços de Produção Satélite A	16.68	15.01	16.68
	Recebedor de Pig de Poços de Produção Satélite B	16.68	15.01	16.68
	Recebedor de Pig de Poços de Produção Satélite C	16.68	15.01	16.68
11	Recebedor de Pig MSP-001	18.64	16.68	18.64
	Recebedor de Pig MSP-002	18.64	16.68	18.64
	Recebedor de Pig MSP-003	18.64	16.68	18.64
TOTAL		1129.82	661.49	1002.29

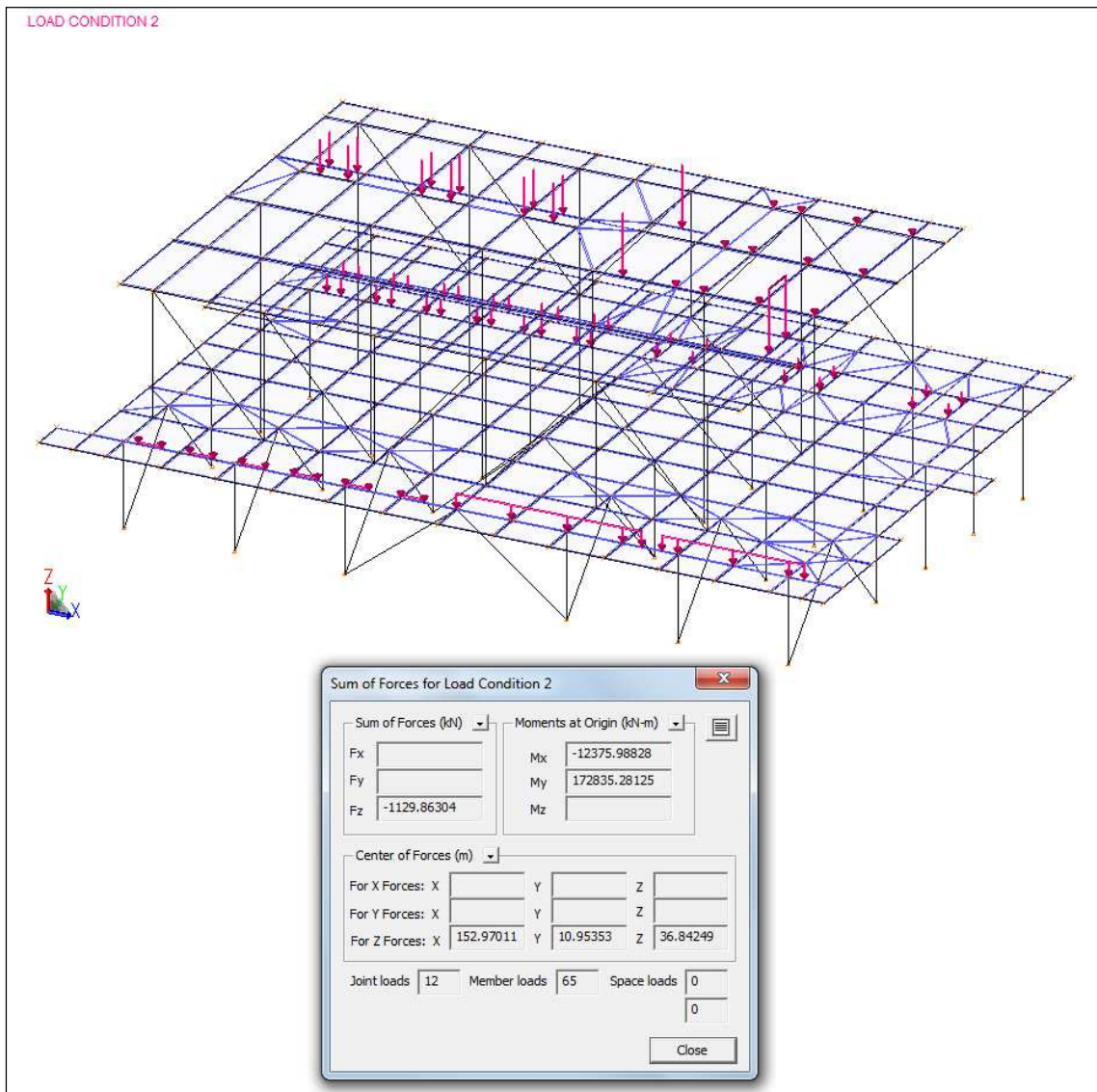


Figura 47. Carregamento 2 – Peso dos equipamentos em operação.

Carga total aplicada – carregamento 2: $Fz_2 = -1129.86$ kN.

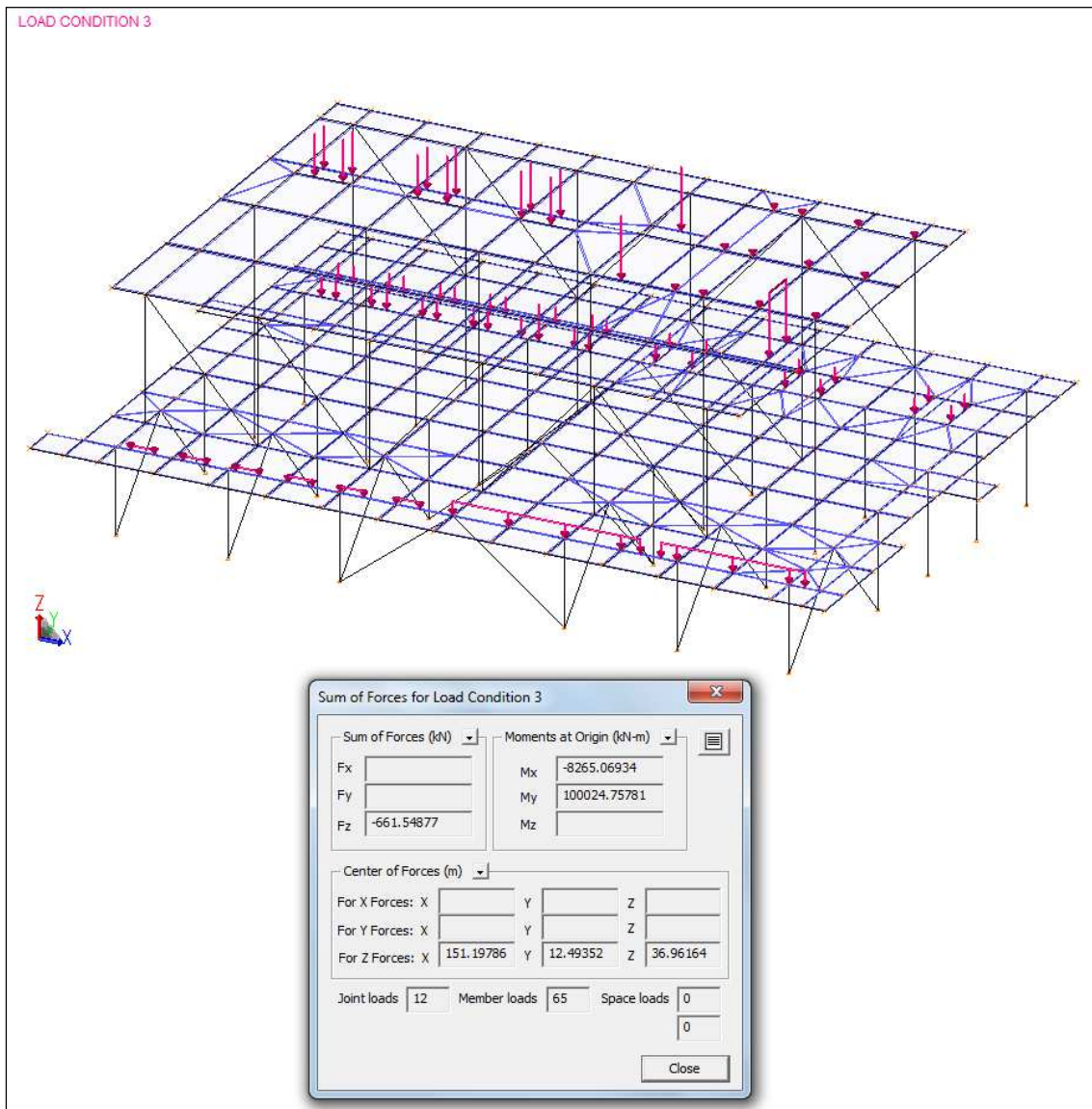


Figura 48. Carregamento 3 – Peso seco dos equipamentos.

Carga total aplicada – carregamento 3: $F_{z_3} = -661.55$ kN.

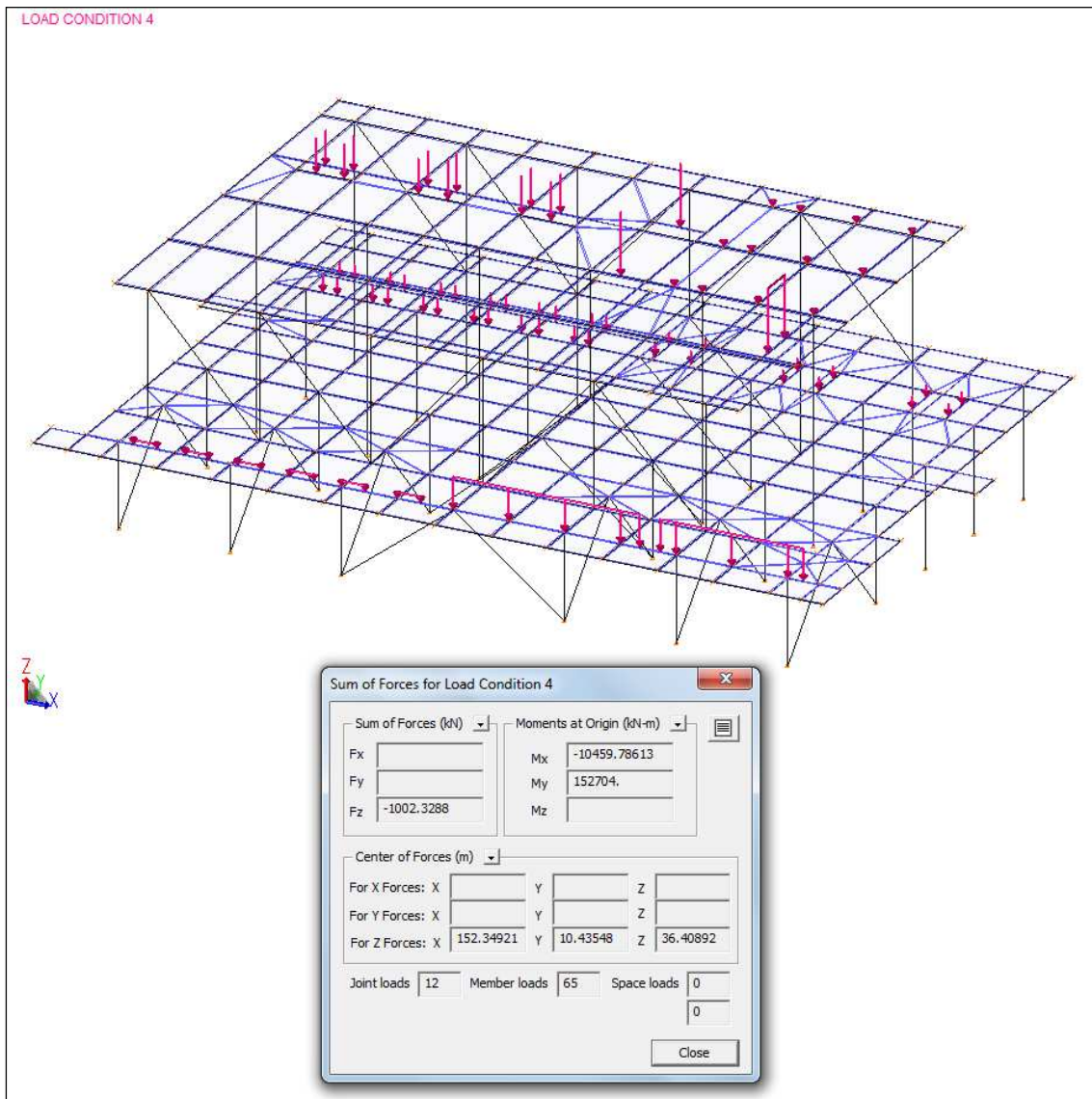


Figura 49. Carregamento 4 – Peso de teste dos equipamentos.

Carga total aplicada – carregamento 4: $F_{z4} = -1002.33$ kN.

3.7.3 Carga de Tubulação

Foi considerado que a tubulação está uniformemente distribuída no piso. Foi assumida uma carga de 8 kN/m^2 . A figura 50 abaixo mostra o carregamento aplicado.

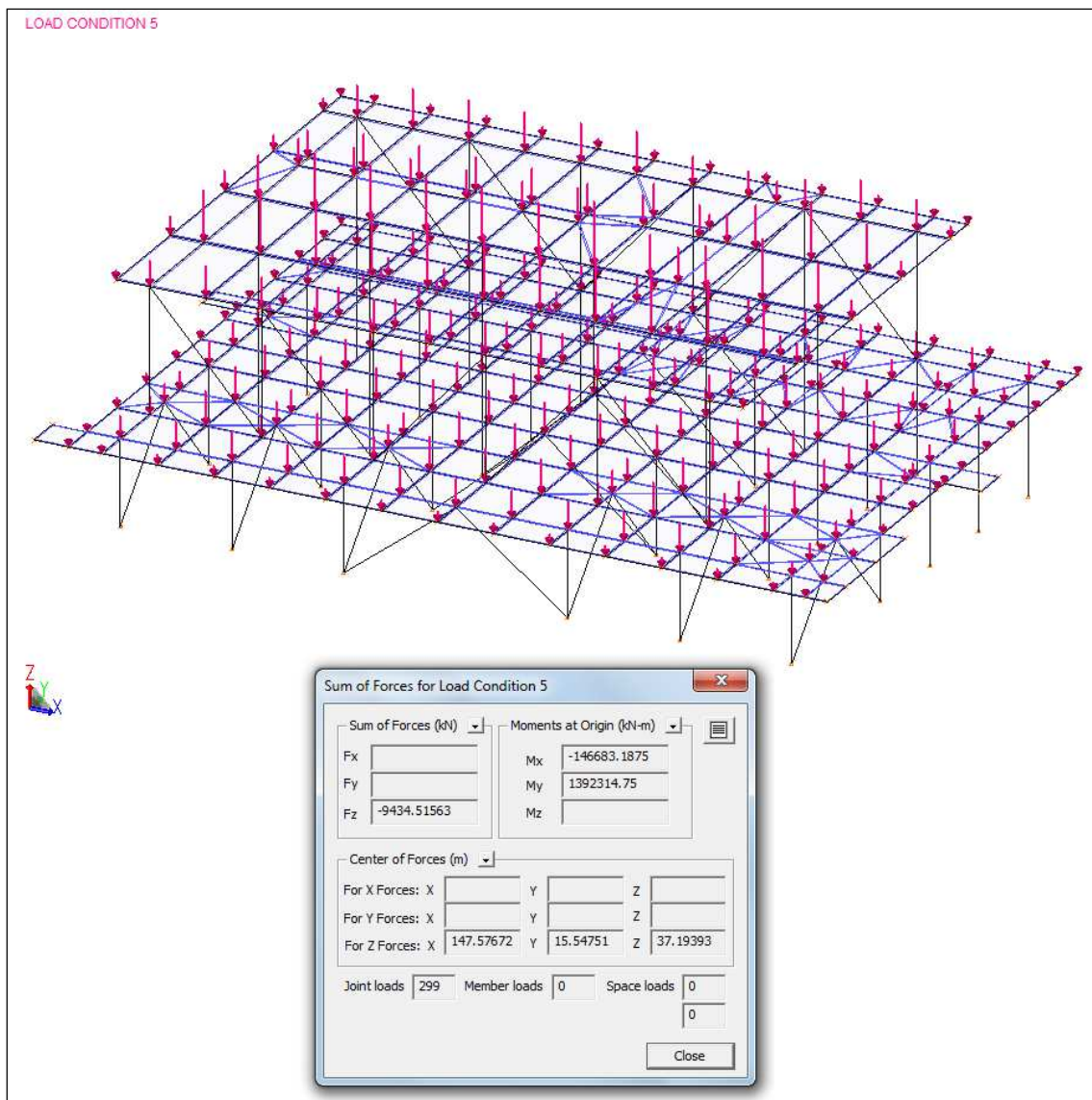


Figura 50. Carregamento 5 – Peso da tubulação.

Carga total aplicada: $F_z = -9434.52 \text{ kN}$.

3.7.4 Sobrecarga

De acordo com a norma DNV OS-C201 [8], foi adotada uma sobrecarga de 4 kN/m² na rota de fuga e de 5 kN/m² nas áreas entre equipamentos. O local de aplicação da sobrecarga foi definido de acordo com o layout dos equipamentos (figuras 44 e 45). As figuras 51 a 54 a seguir mostram o carregamento aplicado.

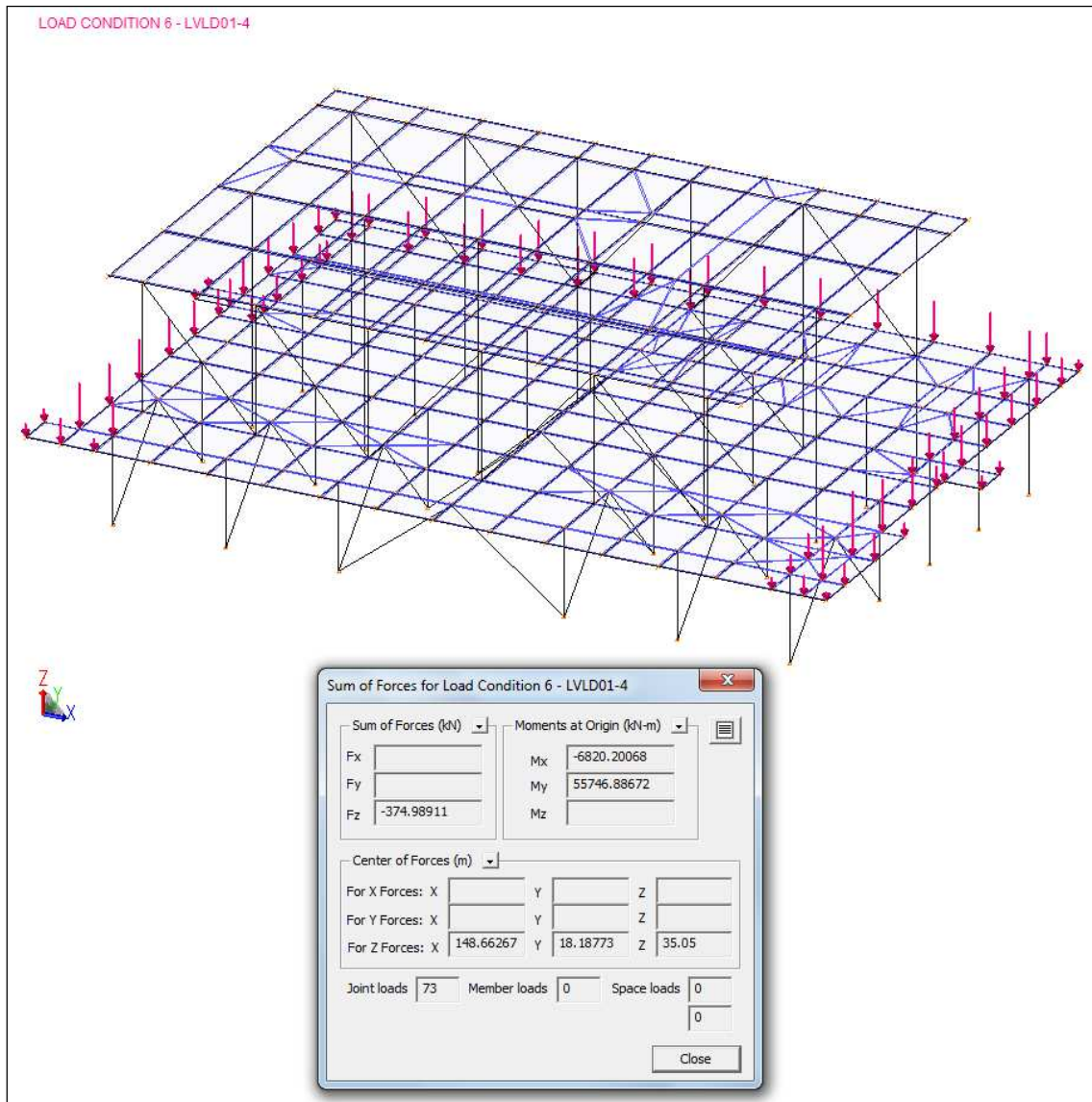


Figura 51. Carregamento 6 – Rota de fuga – 1º piso.

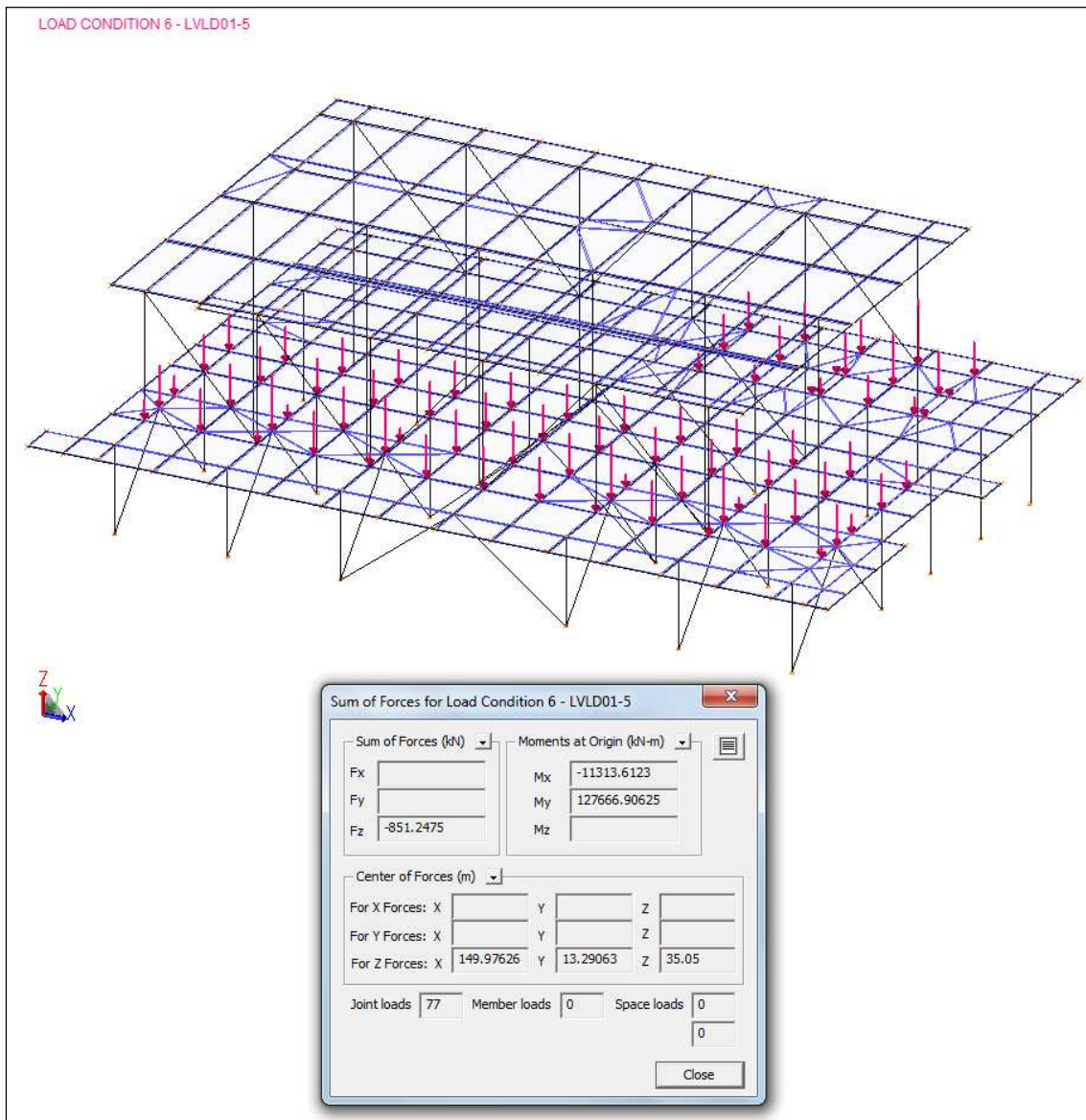


Figura 52. Carregamento 6 – Área entre equipamentos – 1º piso.

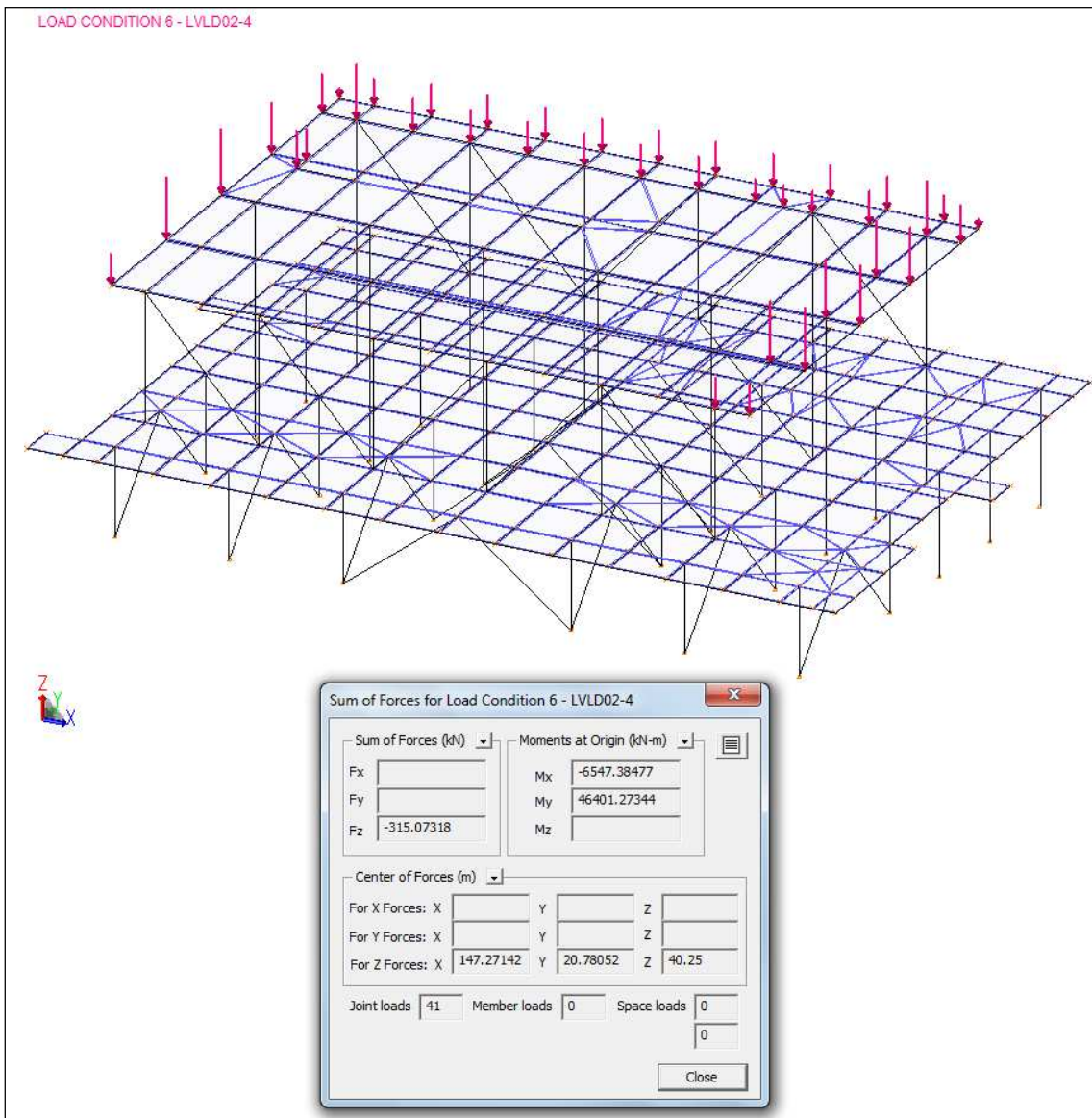


Figura 53. Carregamento 6 – Rota de fuga – 2º piso.

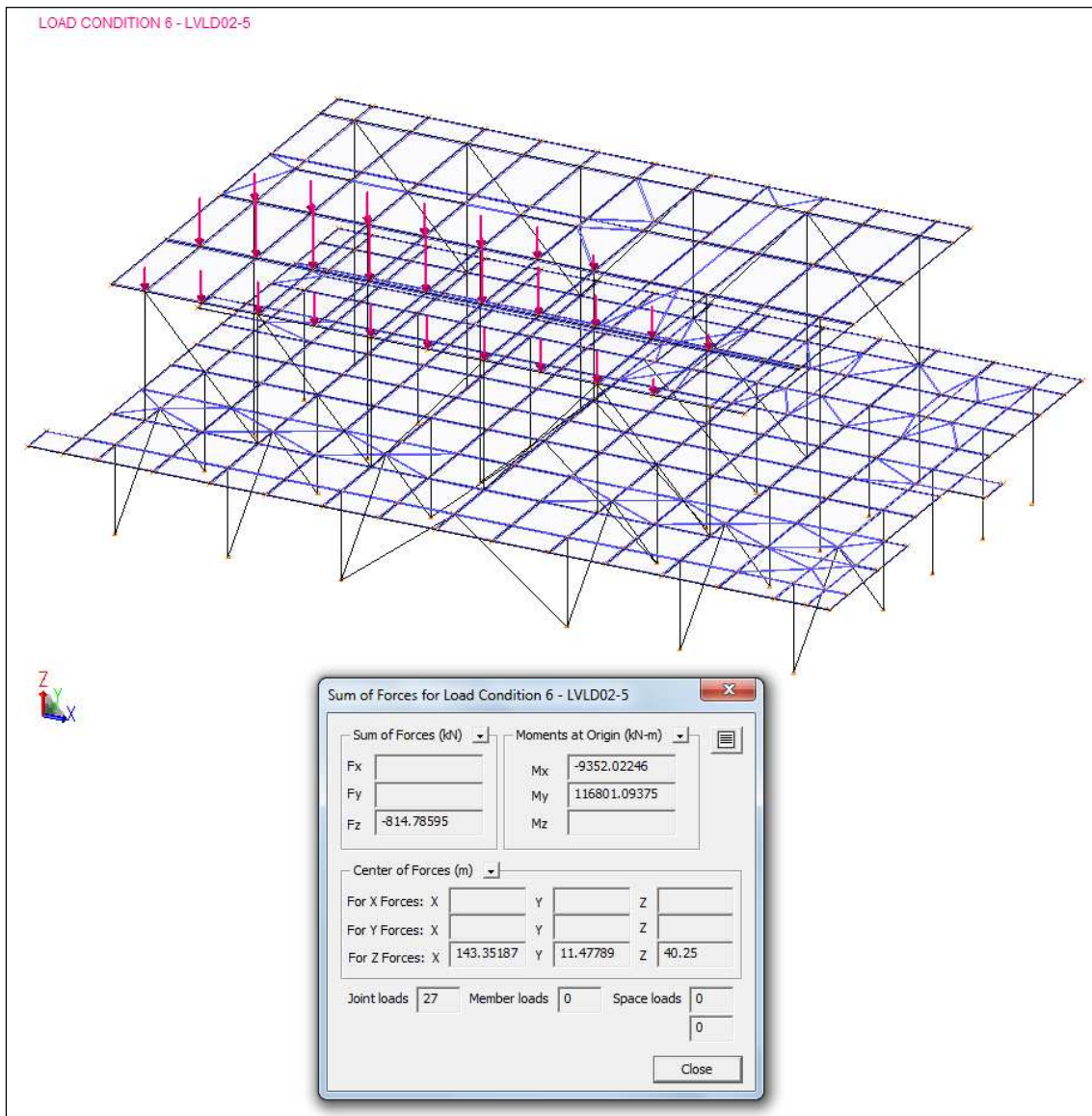


Figura 54. Carregamento 6 – Área entre equipamentos – 5º piso.

Carga total aplicada: Fz = -2356.10 kN.

3.7.5 Carga de Vento

Em conformidade com a norma DNV Classification Notes 30.5 [9], as forças do vento são determinadas como se segue:

$$F = P * A = 0.613 \text{ kg/m}^3 * V^2 * C_s * A$$

onde:

P = pressão de vento

F = força do vento sobre a estrutura

Cs = coeficiente de forma = 1.0

A = área exposta

V = velocidade do vento

A carga de vento será aplicada nas direções globais X e Y. A área de obstrução será calculada de forma conservadora, multiplicando a altura do módulo (do nível do apoio até o segundo piso) pela distância máxima entre colunas em cada direção. Considerando a pressão como 1.0 kN/m^2 , a carga aplicada tem o valor da área exposta.

A área de obstrução para o vento na direção X é de $9.864 * 19.68 = 194.12 \text{ m}^2$ e na direção Y é de $9.864 * 28.90 = 285.07 \text{ m}^2$. As figuras 55 e 56 as áreas de obstrução adotadas.

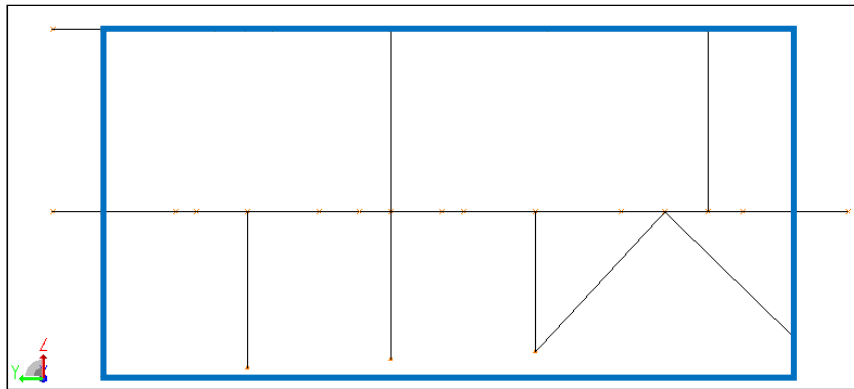


Figura 55. Área de obstrução para vento na direção X.

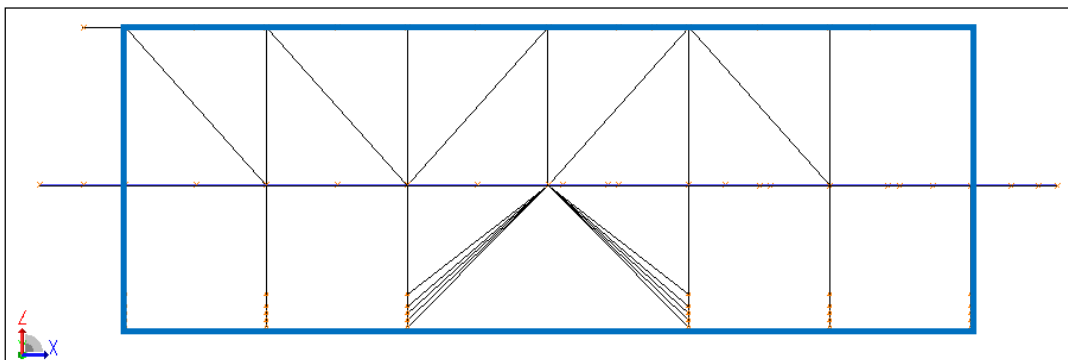


Figura 56. Área de obstrução para vento na direção Y.

As figuras 57 e 58 a seguir mostram a carga aplicada.

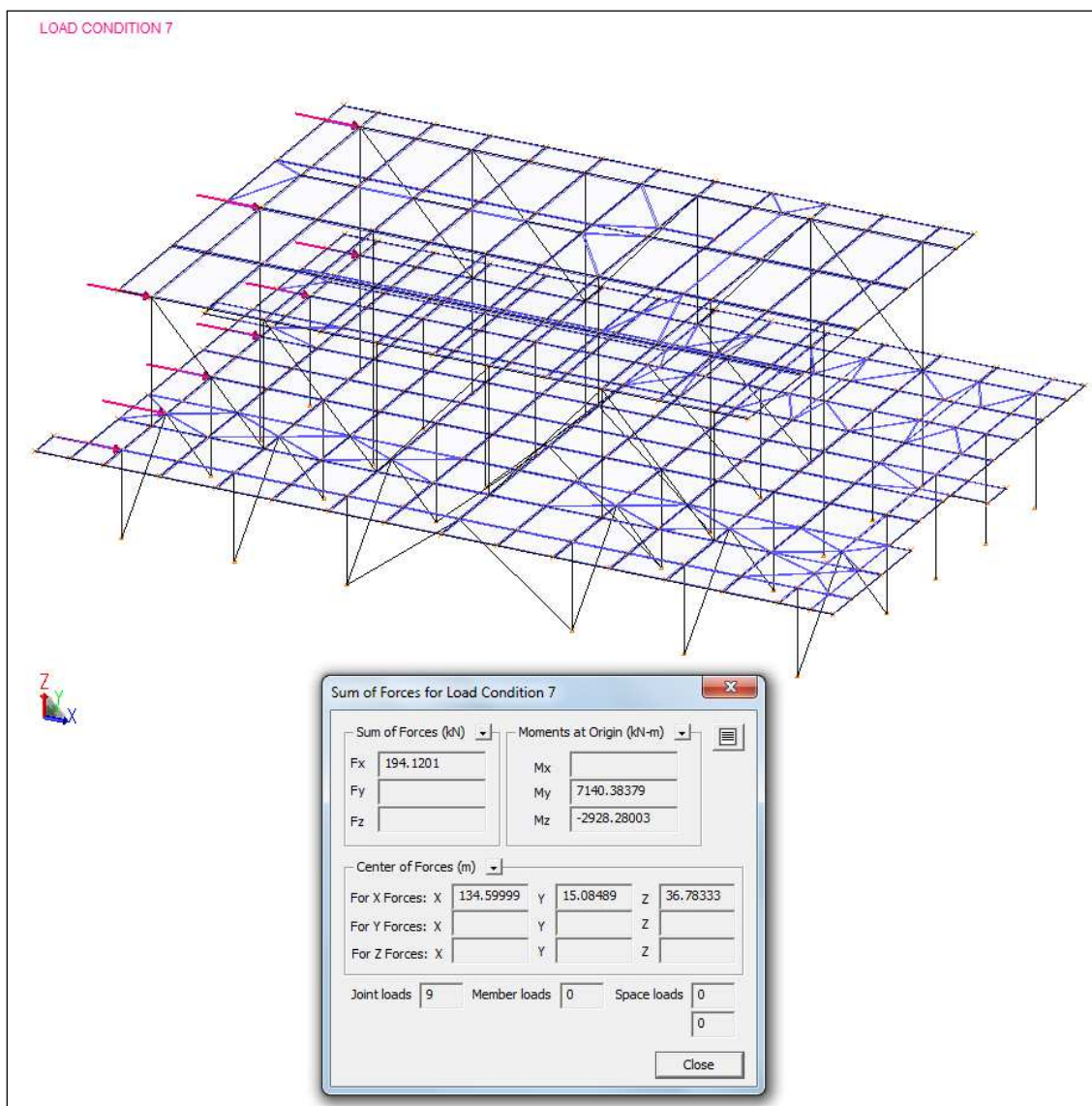


Figura 57. Carregamento 7 – Vento na direção X.

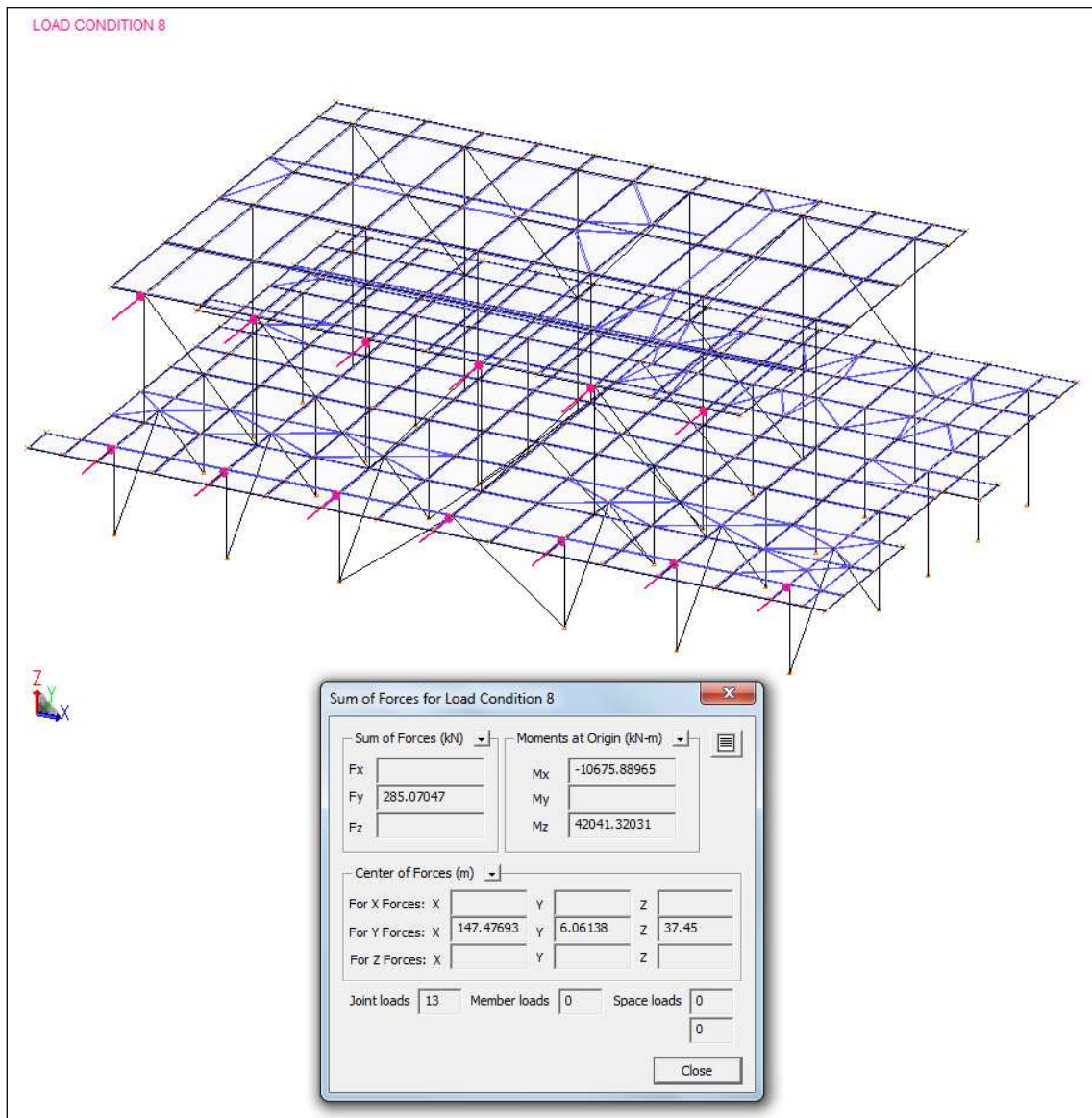


Figura 58. Carregamento 8 – Vento na direção Y.

A pressão de vento será corrigida nos fatores de combinação dos carregamentos 7 e 8 e estão calculadas a seguir para 1 ano e 100 anos de acordo com a tabela 6.

Tabela 6. Velocidade do vento.

Duração	Elevação	Fator de Correção da Velocidade	Velocidade do Vento (m/s)	
			Tempo de Retorno de 1 Ano	Tempo de Retorno de 100 Anos
10 min.	10 m	1.000	18.64	31.88
10 min.	30 m	1.151	21.45	36.69

$$P = 0.613 \text{ kg/m}^3 * V^2 * C_s$$

Considerando uma elevação de referência de 30m:

$$P_{1ano} = 0.613 * 21.45^2 * 1.0 / 1000 = 0.282 \text{ kPa}$$

$$P_{100anos} = 0.613 * 36.69^2 * 1.0 / 1000 = 0.825 \text{ kPa}$$

3.7.6 Deslocamentos Prescritos – Efeito Viga-Navio

A passagem da onda pela plataforma faz com que esta trabalhe como uma viga. A hipótese mais conservadora consiste em considerar que o comprimento da onda corresponde ao comprimento da plataforma, ou seja, a viga-navio pode estar biapoiada ou com um único apoio central, dependendo da fase da onda (ver figura 59 abaixo), isso é o que se chama de efeito de viga-navio.

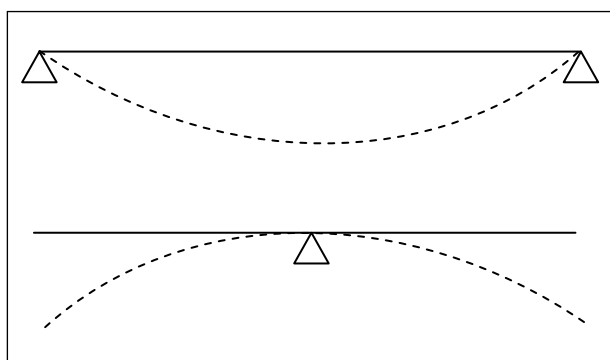


Figura 59. Efeito viga-navio.

A deformação da plataforma (viga) impõe deslocamentos aos apoios do módulo. Foram considerados para esse modelo, os deslocamentos prescritos mostrados na tabela 7 a seguir. Tais valores foram calculados com base no momento de regra para águas tranquilas e no momento de regra de onda.

Tabela 7. Deslocamentos prescritos aplicados.

Seção Transversal (nº)	Coord X a partir da popa (m)	Deslocamento vertical (Z) (cm)	Deslocamento horizontal (X) (cm)	Rotação (Y) (rad)
1	134.600	44.019	-4.565	-0.003
2	139.250	45.171	-4.038	-0.002
3	143.900	46.181	-3.514	-0.002
4	153.200	47.780	-2.476	-0.001
5	157.850	48.368	-1.958	-0.001
6	162.500	48.817	-1.440	-0.001

As figuras de 60 a 62 a seguir mostram o plano do convés com os suportes do módulo e as deformações aplicadas em cada uma das direções.

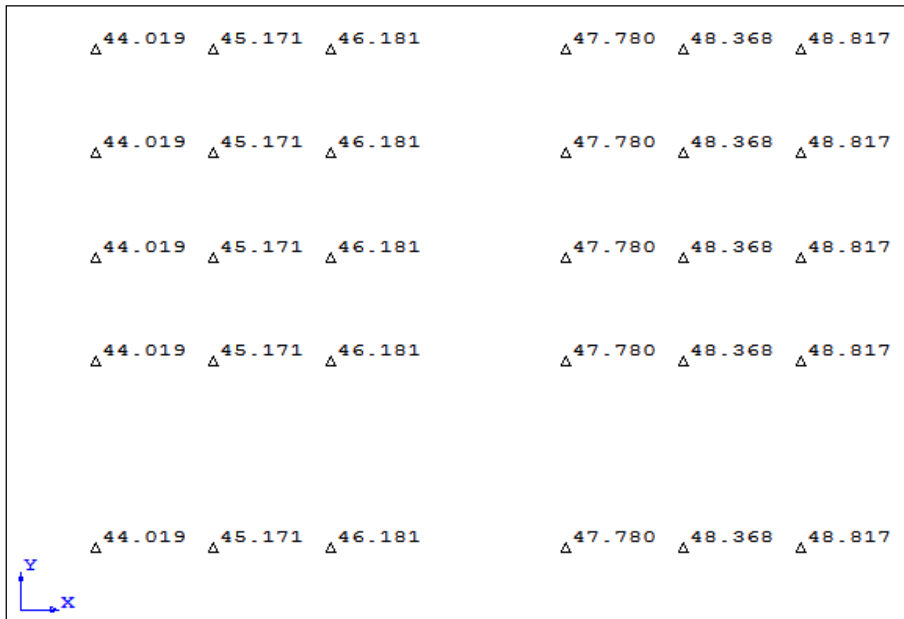


Figura 60. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – deslocamento em Z.

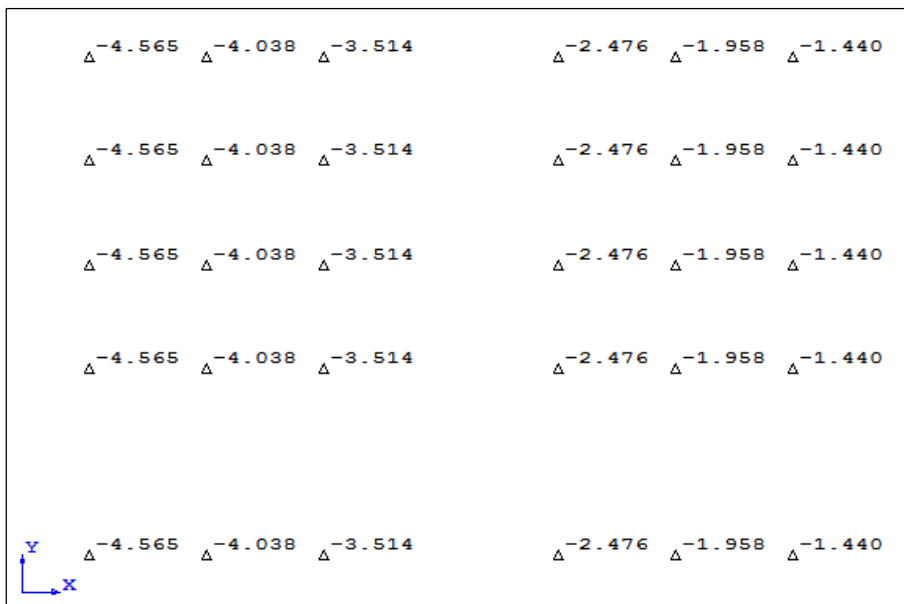


Figura 61. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – deslocamento em X.

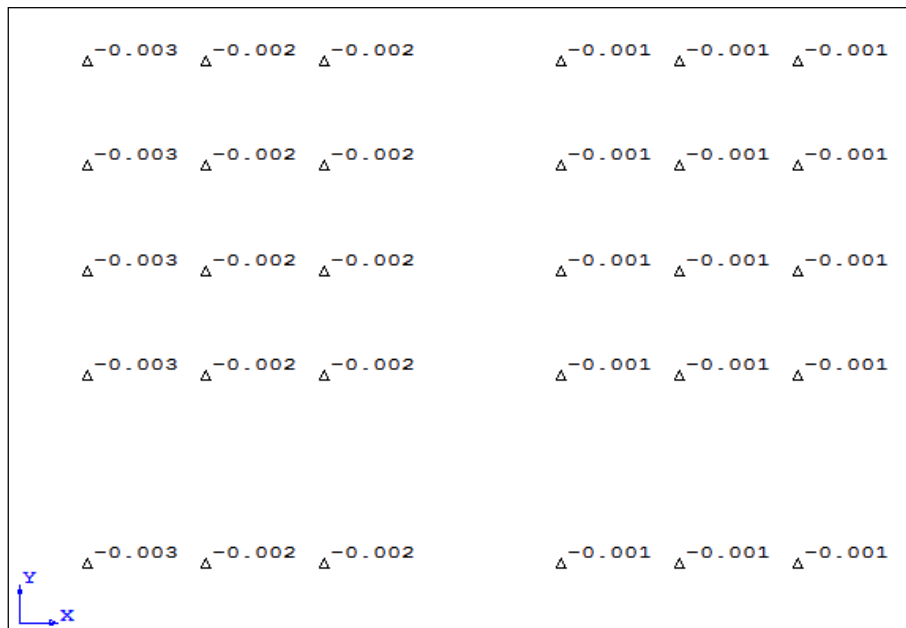


Figura 62. Carregamento 9 – Deslocamentos prescritos – rotação em Y.

3.7.7 Forças de Inércia

Uma embarcação possui 6 graus de liberdade que determinam 6 possíveis deslocamentos, ou movimentos das embarcações. A figura 63 a seguir mostra, esquematicamente, esses movimentos.

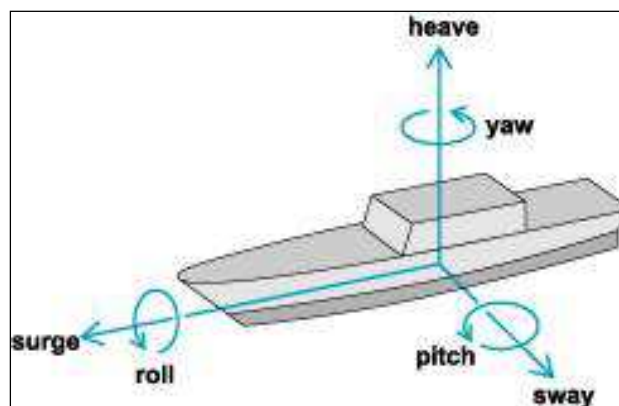


Figura 63. Movimentos das embarcações. Fonte: [10].

Os movimentos relevantes para essa análise são os de *roll*, *pitch* e *heave*, os outros três não ocorrem devido ao sistema de ancoragem da plataforma. O movimento de *roll* corresponde a uma oscilação em torno do eixo X e o de *pitch* a uma oscilação em torno do eixo Y. Já o movimento de *heave*, corresponde a uma oscilação vertical.

Os movimentos do navio (*roll*, *pitch* e *heave*) aceleram as massas de todos os módulos da plataforma, gerando forças de inércia. Dessa forma, foi utilizado um módulo do programa SACS chamado TOW para gerar os carregamentos acelerados.

Três situações foram consideradas na análise: operação sob condições ambientais extremas da Bacia de Campos (1), trânsito (2) e operação com o navio adernado (3). Para as situações 1 e 3 os carregamentos 1, 2, 5 e 6 foram acelerados; para a situação 2 os carregamentos 1, 3 e 5 foram acelerados. O centro de rotação do navio foi considerado em X= 160m, Y= 0m e Z= 8m (calado mínimo adotado).

Os movimentos de *roll* e *pitch* são definidos, respectivamente, pelo ângulo de rotação do navio e pelo período da oscilação. Já o movimento de *heave*, é definido por uma aceleração. Vale destacar que, para a situação 3 nenhuma carga ambiental foi considerada, logo, para essa situação não são considerados os parâmetros de *roll*, *pitch* e *heave*. Os parâmetros considerados nesse caso são os ângulos de avaria *heel* e *trim* em torno dos eixos X e Y, respectivamente.

As tabelas de 8 a 10 a seguir mostram os valores que foram adotados, conservadoramente, para os parâmetros dos movimentos do navio. Vale observar que, para a situação 2, como a plataforma está vazia, o calado é menor, o que gera amplitudes de rotação maiores do que as da situação 1.

Tabela 8. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 1.

Roll		Pitch		Heave
θ	T	θ	T	
15°	15 s	5°	15 s	2 m/s ²

Tabela 9. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 2.

Roll		Pitch		Heave
θ	T	θ	T	
20°	15 s	10°	15 s	2 m/s ²

Tabela 10. Parâmetros dos movimentos do navio – situação 3.

Ângulo	
Heel	Trim
25°	10°

O TOW gera 11 carregamentos acelerados chamados DEC (*Design Extreme Conditions* ou Condições Extremas de Projeto) para a situação 1, 6 chamados TRA (Transit) para a situação 2 e 4 chamados DAM (*Damaged*) para a situação 3. Esses carregamentos são gerados de acordo com as combinações dos movimentos do navio apresentadas nas tabelas de 11 a 13 a seguir.

Tabela 11. Combinações dos movimentos do navio – DEC.

Condições Extremas de Projeto			
DEC	Roll	Pitch	Heave
1	+		+
2	-		+
3	+		-
4	-		-
5		+	+
6		-	+
7		+	-
8		-	-
9	+		
10		+	
11			+

Tabela 12. Combinações dos movimentos do navio – TRA.

Plataforma em Trânsito			
TRA	Roll	Pitch	Heave
1	+	+	
2	+	-	
3	-	+	
4	-	-	
5			+
6			-

Tabela 13. Combinações dos movimentos do navio – DAM.

NAVIO ADERNADO		
DAM	Heel	Trim
1	+	+
2	-	+
3	+	-
4	-	-

3.7.8 Sumário dos Carregamentos Aplicados

A tabela 14 a seguir mostra os valores totais de todos os carregamentos aplicados ao módulo.

Tabela 14. Sumário dos Carregamentos.

Carregamento	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
1	0.00	0.00	-5113.67
2	0.00	0.00	-1129.86
3	0.00	0.00	-661.55
4	0.00	0.00	-1002.33
5	0.00	0.00	-9434.05
6	0.00	0.00	-2355.98
7	194.11	0.00	0.00
8	0.00	285.06	0.00
9	0.00	0.00	0.00
DEC1	-4.68E-07	-7183.02	-20020.97
DEC2	-5.74E-07	7183.02	-22571.30
DEC3	-2.87E-07	-7183.02	-12594.18
DEC4	-3.93E-07	7183.02	-15144.48
DEC5	2410.41	-2.74E-06	-21503.73
DEC6	-2410.41	-2.82E-06	-22190.52
DEC7	2410.41	-1.79E-06	-14076.85
DEC8	-2410.41	-1.88E-06	-14763.72
DEC9	6.81E-08	-7183.02	1895.42
DE10	2410.41	5.02E-08	412.69
DE11	-5.37E-07	-2.79E-06	-21916.40
TRA1	3880.22	-8000.30	3185.87
TRA2	-3880.23	-8000.30	2017.18
TRA3	3880.22	8000.30	266.34
TRA4	-3880.23	8000.30	-902.36
TRA5	-5.82E-07	-3.02E-06	-19992.84
TRA6	-3.09E-07	-1.61E-06	-10624.07
DAM1	-3850.44	-9512.87	-20611.17
DAM2	-3850.44	9512.85	-22196.60
DAM3	3850.44	-9512.87	-22196.60
DAM4	3850.44	9512.85	-20611.17
TOTAL	2604.51	-6898.01	-293836.90

3.8 Combinações de Carga

Nas tabelas de 15 a 21 a seguir estão apresentadas as 51 combinações de cargas que foram consideradas na análise. Vale destacar que as combinações foram elaboradas de forma que o efeito do vento combinado aos movimentos do navio sempre representem a condição mais desfavorável para a estrutura.

Tabela 15. Combinações de Carga Estáticas.

Cargas	Estáticas		
	101	102	103
1	1.000	1.000	1.000
2	1.000		
3		1.000	
4			1.000
5	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000
7			
8			
9			
Dec 1			
Dec 2			
Dec 3			
Dec 4			
Dec 5			
Dec 6			
Dec 7			
Dec 8			
Dec 9			
Dec 10			
Dec 11			
Tran 1			
Tran 2			
Tran 3			
Tran 4			
Tran 5			
Tran 6			
Dam 1			
Dam 2			
Dam 3			
Dam 4			

Tabela 16. Combinações de Carga em Serviço – Parte I.

Cargas	Combinações em Serviço - Parte I							
	201	202	203	204	205	206	207	208
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3								
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7					0.825	-0.825	0.825	-0.825
8	-0.825	0.825	-0.825	0.825				
9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Dec 1	1.000							
Dec 2		1.000						
Dec 3			1.000					
Dec 4				1.000				
Dec 5					1.000			
Dec 6						1.000		
Dec 7							1.000	
Dec 8								1.000
Dec 9								
Dec 10								
Dec 11								
Tran 1								
Tran 2								
Tran 3								
Tran 4								
Tran 5								
Tran 6								
Dam 1								
Dam 2								
Dam 3								
Dam 4								

Tabela 17. Combinações de Carga em Serviço – Parte II.

Cargas	Combinações em Serviço - Part II							
	209	210	211	212	213	214	215	216
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3								
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	0.583	-0.583	0.583	-0.583				
8	-0.583	-0.583	0.583	0.583	-0.825	0.825	-0.825	0.825
9	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
Dec 1					1.000			
Dec 2						1.000		
Dec 3							1.000	
Dec 4								1.000
Dec 5								
Dec 6								
Dec 7								
Dec 8								
Dec 9	0.707	0.707	-0.707	-0.707				
Dec 10	0.707	-0.707	0.707	-0.707				
Dec 11	1.000	1.000	1.000	1.000				
Tran 1								
Tran 2								
Tran 3								
Tran 4								
Tran 5								
Tran 6								
Dam 1								
Dam 2								
Dam 3								
Dam 4								

Tabela 18. Combinações de Carga em Serviço – Parte III.

Cargas	Combinações em Serviço - Part III							
	217	218	219	220	221	222	223	224
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3								
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	0.825	-0.825	0.825	-0.825	0.583	-0.583	0.583	-0.583
8					-0.583	-0.583	0.583	0.583
9	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
Dec 1								
Dec 2								
Dec 3								
Dec 4								
Dec 5	1.000							
Dec 6		1.000						
Dec 7			1.000					
Dec 8				1.000				
Dec 9					0.707	0.707	-0.707	-0.707
Dec 10					0.707	-0.707	0.707	-0.707
Dec 11					1.000	1.000	1.000	1.000
Tran 1								
Tran 2								
Tran 3								
Tran 4								
Tran 5								
Tran 6								
Dam 1								
Dam 2								
Dam 3								
Dam 4								

Tabela 19. Combinações de Carga para Plataforma em Trânsito – Parte I.

Cargas	Combinações para Plataforma em Trânsito - Parte I							
	301	302	303	304	305	306	307	308
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2								
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6								
7	0.199	-0.199	-0.199	0.199	0.199	-0.199	-0.199	0.199
8	-0.199	-0.199	-0.199	-0.199	0.199	0.199	0.199	0.199
9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Dec 1								
Dec 2								
Dec 3								
Dec 4								
Dec 5								
Dec 6								
Dec 7								
Dec 8								
Dec 9								
Dec 10								
Dec 11								
Tran 1	1.000				1.000			
Tran 2		1.000				1.000		
Tran 3			1.000				1.000	
Tran 4				1.000				1.000
Tran 5	1.000	1.000	1.000	1.000				
Tran 6					1.000	1.000	1.000	1.000
Dam 1								
Dam 2								
Dam 3								
Dam 4								

Tabela 20. Combinações de Carga para Plataforma em Trânsito – Parte II.

Cargas	Combinações para Plataforma em Trânsito - Parte II							
	309	310	311	312	313	314	315	316
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2								
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6								
7	0.199	-0.199	-0.199	0.199	0.199	-0.199	-0.199	0.199
8	-0.199	-0.199	-0.199	-0.199	0.199	0.199	0.199	0.199
9	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
Dec 1								
Dec 2								
Dec 3								
Dec 4								
Dec 5								
Dec 6								
Dec 7								
Dec 8								
Dec 9								
Dec 10								
Dec 11								
Tran 1	1.000				1.000			
Tran 2		1.000				1.000		
Tran 3			1.000				1.000	
Tran 4				1.000				1.000
Tran 5	1.000	1.000	1.000	1.000				
Tran 6					1.000	1.000	1.000	1.000
Dam 1								
Dam 2								
Dam 3								
Dam 4								

Tabela 21. Combinações de Carga para Navio Adernado.

Cargas	Combinações para Navio Adernado							
	401	402	403	404	405	406	407	408
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3								
4								
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	0.199	0.199	-0.199	-0.199	0.199	0.199	-0.199	-0.199
8	0.199	-0.199	0.199	-0.199	0.199	-0.199	0.199	-0.199
9	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
Dec 1								
Dec 2								
Dec 3								
Dec 4								
Dec 5								
Dec 6								
Dec 7								
Dec 8								
Dec 9								
Dec 10								
Dec 11								
Tran 1								
Tran 2								
Tran 3								
Tran 4								
Tran 5								
Tran 6								
Dam 1	1.000				1.000			
Dam 2		1.000				1.000		
Dam 3			1.000				1.000	
Dam 4				1.000				1.000

4 METODOLOGIA

O escopo desse trabalho compreende a análise global dos elementos de barra da estrutura principal do módulo. Para tal foi utilizado o programa SACS 5.3 [7]. O programa faz a análise baseado no Método das Tensões Admissíveis e de acordo com duas normas técnicas. Para os elementos não cilíndricos adota-se a AISC [1] e para os elementos cilíndricos, a API RP 2A [2].

A seguir estão apresentadas as fórmulas, extraídas das respectivas normas, que o programa utiliza para o cálculo das tensões admissíveis e para o cálculo dos *unity checks* dos esforços de compressão axial e flexão combinados.

4.1 Elementos Não Cilíndricos – AISC [1] (unidades: ksi e in)

Flambagem:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{fl}^2 \times A} = \frac{\pi^2 \times E \times A \times r^2}{L_{fl}^2 \times A} \rightarrow F_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times r^2}{L_{fl}^2}$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade,

I = momento de inércia,

L_{fl} = comprimento de flambagem,

A = área da seção,

r = raio de giração.

Tração: $F_t = 0.6 \times F_y$

Compressão:

$$\text{Para } \frac{K \times l}{r} < C_c, F_a = \frac{\left[1 - \frac{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^2}{2 \times C_c^2} \right] \times F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3 \times \left(\frac{K \times l}{r}\right)}{8 \times C_c} - \frac{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^3}{8 \times C_c^3}}$$

$$\text{Para } \frac{K \times l}{r} \geq C_c, F_a = \frac{12 \times \pi^2 \times E}{23 \times \left(\frac{K \times l}{r}\right)^2}$$

Onde:

C_c = coeficiente de esbeltez da coluna,

K = fator de comprimento efetivo,

l = vão livre,

$F_y =$ tensão de escoamento do aço.

Flexão:

Para $L_b \leq L_c = \text{mín} \left[\frac{76 \times b_f}{\sqrt{F_y}}, \frac{20000}{\left(\frac{d}{A_f}\right) \times F_y} \right]$ e para barras de seção compacta,

$$F_b = 0.66 \times F_y .$$

Para $L_b > L_c$, na tração, $F_b = 0.60 \times F_y$.

Para $L_b > L_c$, na compressão, F_b assume o maior valor entre “1” e “2”. Onde:

$$1) \text{ Se } \sqrt{\frac{102 \times 10^3 \times C_b}{F_y}} \leq \frac{l}{r_T} \leq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 \times C_b}{F_y}}, F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y \times \left(\frac{l}{r_T}\right)^2}{1530 \times 10^3 \times C_b} \right] \times F_y \leq 0.6 \times F_y .$$

$$\text{Se } \frac{l}{r_T} \geq \sqrt{\frac{510 \times 10^3 \times C_b}{F_y}}, F_b = \frac{170 \times 10^3 \times C_b}{\left(\frac{l}{r_T}\right)^2} \leq 0.6 \times F_y .$$

$$2) F_b = \frac{12 \times 10^3 \times C_b}{\frac{l \times d}{A_f}} \leq 0.6 \times F_y .$$

Onde:

$L_b =$ comprimento lateral livre do flange de compressão,

$L_c =$ máximo comprimento lateral livre do flange de compressão,

$b_f =$ largura do flange,

$d =$ altura do perfil,

$A_f =$ área do flange de compressão,

$C_b =$ coeficiente de flexão,

$l =$ distância entre duas seções apoiadas a torção e lateralmente,

$r_T =$ raio de giração considerando o flange de compressão mais 1/3 da área de alma comprimida.

Cisalhamento:

$$\text{Para } \frac{h}{t_w} \leq \frac{380}{\sqrt{F_y}}, F_v = 0.4 \times F_y .$$

$$\text{Para } \frac{h}{t_w} > \frac{380}{\sqrt{F_y}}, F_v = \frac{F_y}{2.89} \times C_v \leq 0.4 \times F_y .$$

Onde:

C_v = taxa de tensões de cisalhamento críticas,

Esforços de compressão axial e de flexão combinados:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \times \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e'}\right) \times F_b} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{f_a}{0.6 \times F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$$

Onde:

C_m = coeficiente de flexão,

F_e' = tensão de Euler para barras prismáticas dividida por fator de segurança.

Caso C_m e F_e' sejam diferentes para f_{bx} e f_{by} , devem ser adotadas as equações abaixo:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \times \sqrt{\left[\frac{C_{mx} \times f_{bx}}{1 - \frac{f_a}{F_{ex}'}}\right]^2 + \left[\frac{C_{my} \times f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_{ey}'}}\right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{f_a}{0.6 \times F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$$

Se $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$ as equações acima podem ser substituídas por $\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$

4.2 Elementos Cilíndricos – API RP 2A [2] (unidades S.I.)

Flambagem:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{fl}^2 \times A} = \frac{\pi^2 \times E \times A \times r^2}{L_{fl}^2 \times A} \rightarrow F_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times r^2}{L_{fl}^2}$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade,

I = momento de inércia,

L_{fl} = comprimento de flambagem,

A = área da seção,

r = raio de giração.

Tração: $F_t = 0.6 \times F_y$

Compressão:

$$\text{Para } \frac{K \times l}{r} < C_c, F_a = \frac{\left[1 - \frac{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^2}{2 \times C_c^2}\right] \times F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3 \times \left(\frac{K \times l}{r}\right)}{8 \times C_c} - \frac{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^3}{8 \times C_c^3}} .$$

$$\text{Para } \frac{K \times l}{r} \geq C_c, F_a = \frac{12 \times \pi^2 \times E}{23 \times \left(\frac{K \times l}{r}\right)^2} .$$

Onde:

C_c = coeficiente de esbeltez da coluna,

K = fator de comprimento efetivo,

l = vão livre,

F_y = tensão de escoamento do aço.

Flexão:

$$\text{Para } \frac{D}{t} \leq \frac{10340}{F_y}, F_b = 0.75 \times F_y .$$

$$\text{Para } \frac{10340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20680}{F_y}, F_b = \left[0.84 - 1.74 \times \frac{F_y \times D}{E \times t}\right] \times F_y .$$

$$\text{Para } \frac{20680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300, F_b = \left[0.72 - 0.58 \times \frac{F_y \times D}{E \times t}\right] \times F_y .$$

Onde:

D = diâmetro externo,

t = espessura do tubo.

Cisalhamento: $F_v = 0.4 \times F_y$

Torção: $F_{vt} = 0.4 \times F_y$

Esforços de compressão axial e de flexão combinados:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \times \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) \times F_b} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{f_a}{0.6 \times F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$$

Onde:

C_m = coeficiente de flexão,

F_e' = tensão de Euler para barras prismáticas dividida por fator de segurança.

Caso C_m e F_e' sejam diferentes para f_{bx} e f_{by} , devem ser adotadas as equações abaixo:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \times \sqrt{\left[\frac{C_{mx} \times f_{bx}}{1 - \frac{f_a}{F_{ex}}} \right]^2 + \left[\frac{C_{my} \times f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_{ey}}} \right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{e} \quad \frac{f_a}{0.6 \times F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$$

Se $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$ as equações acima podem ser substituídas por $\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0$

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 Deformações – Verificação da Flecha Máxima

A deformação para vigas de piso não deve ser maior que $L/360$ de acordo com a AISC [1]. As figuras 64 e 65 abaixo mostram a deformada do módulo para a combinação 101 em vista isométrica e em corte transversal, respectivamente.

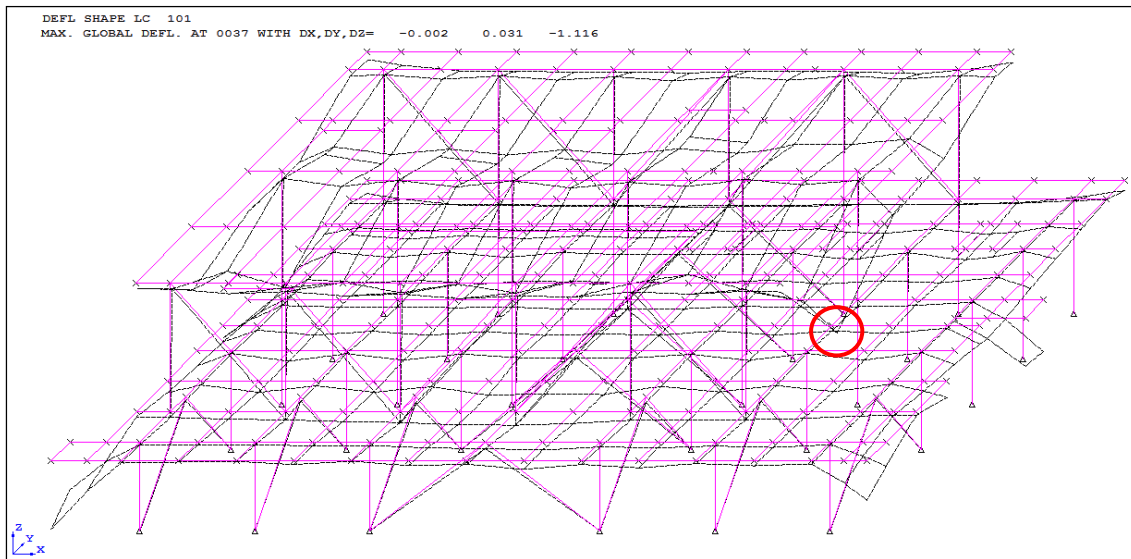


Figura 64. Deformada do módulo - isométrico.

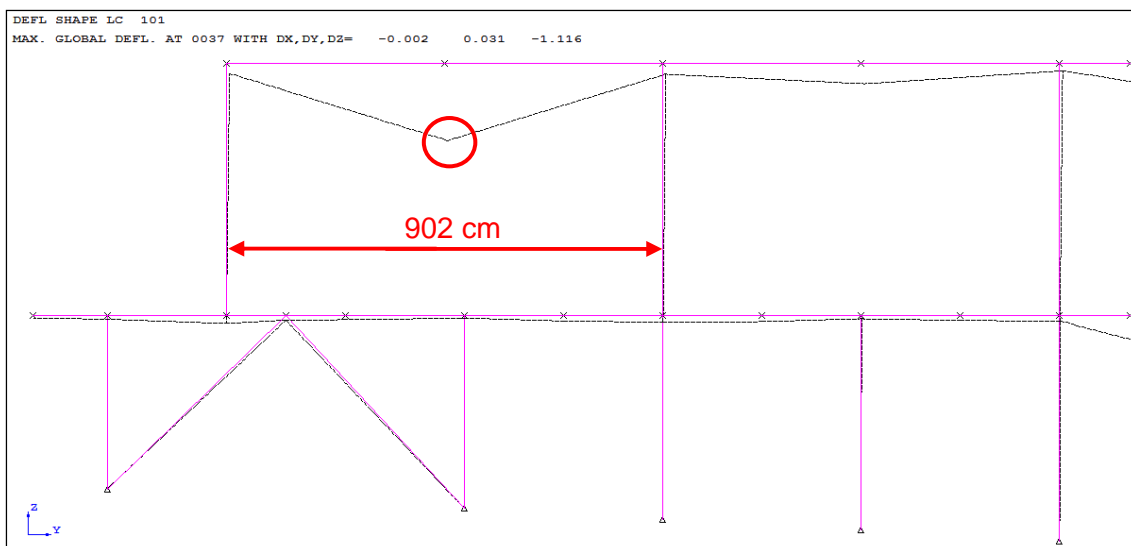


Figura 65. Deformada do módulo – vista em corte transversal.

$$\delta_{z,0037} = -1.116 \text{ cm}$$

$$\delta_{max} = L/360 = 2.51 \text{ cm}$$

Onde:

$L = 902 \text{ cm} = \text{vão do nó com maior deformação vertical}$

$\delta_{max} = \text{flecha máxima admissível}$

$\delta_{max} > \delta_{z,0037} \text{ OK!}$

5.2 Verificação dos Esforços

O “Working Stress Design” (WSD), ou Método das Tensões Admissíveis, foi adotado para a análise. O critério de verificação da estrutura é que todos os elementos de barra estruturais tenham tensões inferiores às tensões admissíveis especificadas pela AISC 13th Edition [1] e pela API RP 2A-WSD 21st [2] (apresentadas no item 4).

Segundo a API RP-2A [2], quando as tensões atuantes se devem, em parte, às condições ambientais, então as tensões admissíveis podem ser aumentadas em um terço. Os fatores modificadores de tensão admissível foram calculados e estão apresentados na tabela 22 abaixo.

Tabela 22. Fatores modificadores de tensão admissível.

Condição	AMOD
Estática	1.000
Condições Extremas	1.333
Trânsito	1.000
Adernado	1.666

Na figura 66 a seguir são apresentados os elementos que sofrem os maiores esforços de cada grupo de propriedades. A medida de quanto os elementos estão solicitados é feita através dos *unity checks* (UC's), que representam a razão entre a tensão atuante no elemento e a tensão admissível.

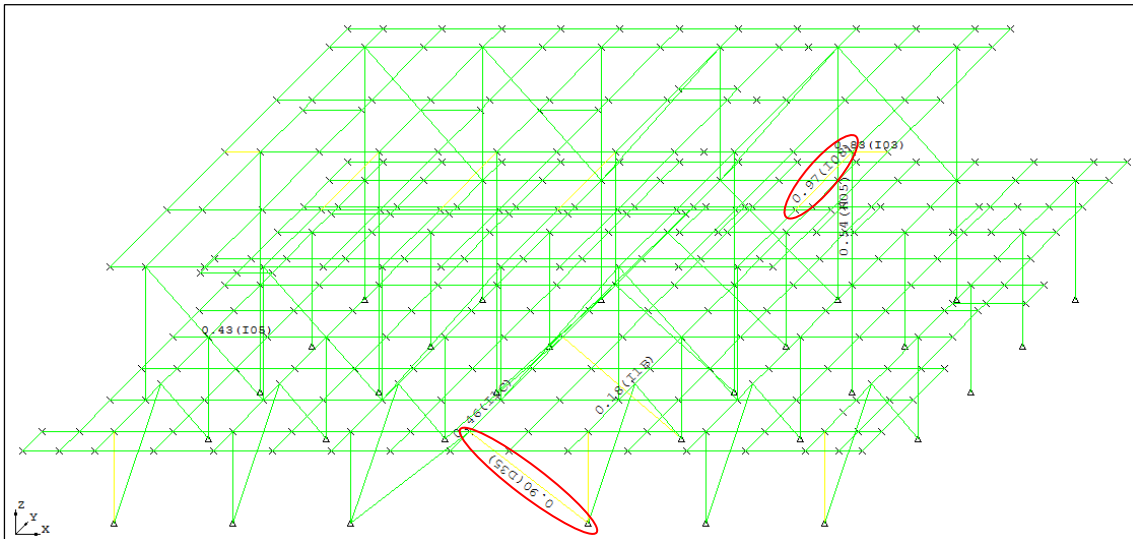


Figura 66. Unity Checks.

Na figura 66 os elementos em verde possuem UC's inferiores a 0.8, os em amarelo têm UC's entre 0.8 e 1.0 e os em vermelho têm UC's acima de 1.0. O maior valor apresentado foi de 0.97.

A tabela 23 a seguir apresenta todas as barras com *Unity Checks* acima de 0.500, do maior para o menor, e as tensões atuantes em cada barra. Em negrito está marcada a maior tensão de cada barra, indicando qual o pior esforço para cada elemento.

Tabela 23. Tensões atuantes nas barras.

Barra	Grupo	Máximo <i>Unity</i> Check	Comb.	Distância do Nó Inicial m	Tensões				
					Axial	Flexão		Cisalhamento	
						N/mm ²	Y-Y	Z-Z	Y
					N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
0027-0028	I08	0.971	214	4.51	-3.33	-182.51	-0.22	-0.01	-51.68
5L6-4L31	D35	0.898	217	0.00	-98.41	81.30	0.00	1.74	1.00
0028-0036	I03	0.825	214	0.00	-0.14	-198.32	1.99	-0.14	29.69
FF56-FF4V	I03	0.807	214	1.40	-0.41	-194.18	1.59	0.12	-29.08
FF5G-FF4Y	I08	0.785	214	4.51	-2.31	-147.79	0.48	0.01	-31.99
7L6-7L31	D35	0.758	217	3.59	-26.85	6.71	-164.59	3.65	-0.11
FF5C-FF4W	I08	0.744	214	4.51	-2.61	-139.80	0.09	0.01	-31.78
1L6-1L31	D35	0.737	218	3.59	-35.15	4.85	152.24	3.37	-11.80
FF5H-FF4X	I08	0.721	214	4.51	-2.64	-135.45	-0.08	0.00	-30.76
5L15-4L33	D35	0.719	217	0.00	-73.00	75.77	0.00	1.55	-2.30
5L6-5L31	D35	0.712	302	0.00	-67.74	-28.56	-164.95	6.47	4.18
FF58-FF4V	I08	0.698	214	4.51	-0.03	-133.06	0.43	0.02	-28.69
1L30-1L35	D35	0.692	214	4.66	-65.27	-6.13	96.04	1.67	-9.13

3L30-4L38	D35	0.688	218	6.59	-103.89	-14.92	0.00	0.28	-3.76
0026-0027	I08	0.686	213	0.00	-3.10	-128.35	-0.21	0.01	29.50
5L30-4L38	D35	0.682	217	0.00	-73.34	60.66	0.00	1.08	-0.87
5L20-4L34	D35	0.673	217	0.00	-67.87	71.11	0.00	1.39	-1.49
1L20-1L33	D35	0.640	218	4.21	-41.49	-3.27	118.42	2.22	-10.14
5L30-5L36	D35	0.638	304	0.00	-88.10	14.11	-104.37	3.10	3.05
FF5I-FF4Z	I08	0.629	214	4.51	-1.68	-118.71	-0.12	-0.01	-26.42
6L6-6L31	D35	0.623	213	3.59	-39.26	31.57	-112.52	2.82	-3.89
0028-0029	I08	0.613	213	0.00	0.11	-122.71	-0.11	0.00	23.65
FF4Y-FF5F	I08	0.611	213	0.00	-1.33	-120.97	0.62	-0.01	24.97
5L20-5L34	D35	0.599	304	0.00	-69.87	22.01	-122.69	4.03	3.42
FF4R-FF5C	I08	0.599	213	0.00	-2.11	-112.55	0.16	-0.01	25.76
FF4S-FF5H	I08	0.590	213	0.00	-2.10	-110.93	0.09	0.00	25.08
FF4U-FF5I	I08	0.554	213	0.00	-1.86	-104.18	-0.14	0.01	22.28
FF59-FF58	I03	0.553	218	1.40	-1.39	-133.36	0.13	0.00	-20.04
FF4T-FF5G	I08	0.548	213	0.00	-2.04	-102.74	0.51	-0.01	23.79
7L20-7L34	D35	0.545	217	4.21	-17.82	3.50	-119.97	2.25	-0.11
6L34-0028	H05	0.541	214	5.20	-19.97	-93.18	-28.46	-1.55	-26.79
2L20-2L34	D35	0.538	218	4.21	-46.20	-1.87	85.52	1.60	-6.62
FF4Q-FF58	I08	0.535	213	0.00	-1.34	-100.87	0.09	-0.01	22.03
3L30-3L36	D35	0.532	303	4.66	-104.58	4.37	-39.11	0.87	6.09
6L20-6L34	D35	0.531	217	4.21	-46.55	3.63	-83.06	1.55	-3.37
3L20-4L34	D35	0.529	218	6.28	-77.31	-18.91	0.00	0.38	-3.08
FF4W-0064	I08	0.521	213	0.00	-2.01	-111.66	0.12	-0.01	25.19
FF4V-0062	I08	0.519	213	0.00	0.52	-112.65	0.35	-0.02	25.06
3L6-4L31	D35	0.516	218	5.87	-74.52	-22.88	0.00	0.47	-5.45
FF5D-FF51	I08	0.515	214	4.10	-1.41	-102.08	0.03	0.01	-22.01
5L25-4L35	D35	0.513	217	0.00	-43.68	70.27	0.00	1.34	-1.34
2L6-2L31	D35	0.512	213	3.59	-22.83	21.65	102.68	2.47	-7.73
FF5E-FF52	I08	0.509	214	4.10	-1.61	-100.65	0.18	0.01	-21.19
5L15-5L33	D35	0.506	217	0.00	-8.15	-0.93	123.43	3.94	-3.61
0027-0037	I03	0.503	217	0.00	-0.30	-107.85	19.09	-0.70	16.24
3L15-4L33	D35	0.500	218	6.13	-72.07	-20.86	0.00	0.42	-2.21

As figuras 67 e 68, e 69 e 70 a seguir mostram a localização e os resultados detalhados da barra não cilíndrica mais solicitada e da barra cilíndrica mais solicitada, respectivamente (ambas assinaladas na figura 66 acima). Note-se que as barras não cilíndricas são verificadas pela AISC [1] e as barras cilíndricas, pela API RP-2A [2].

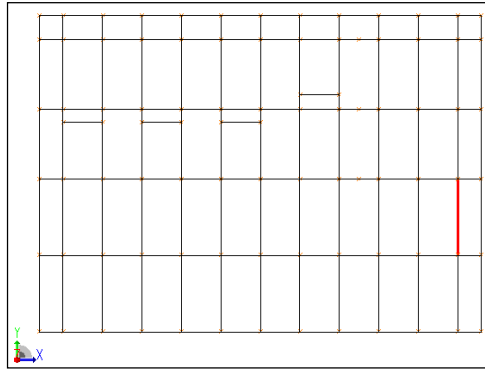


Figura 67. Localização da barra não cilíndrica mais solicitada – plano do 2º piso.

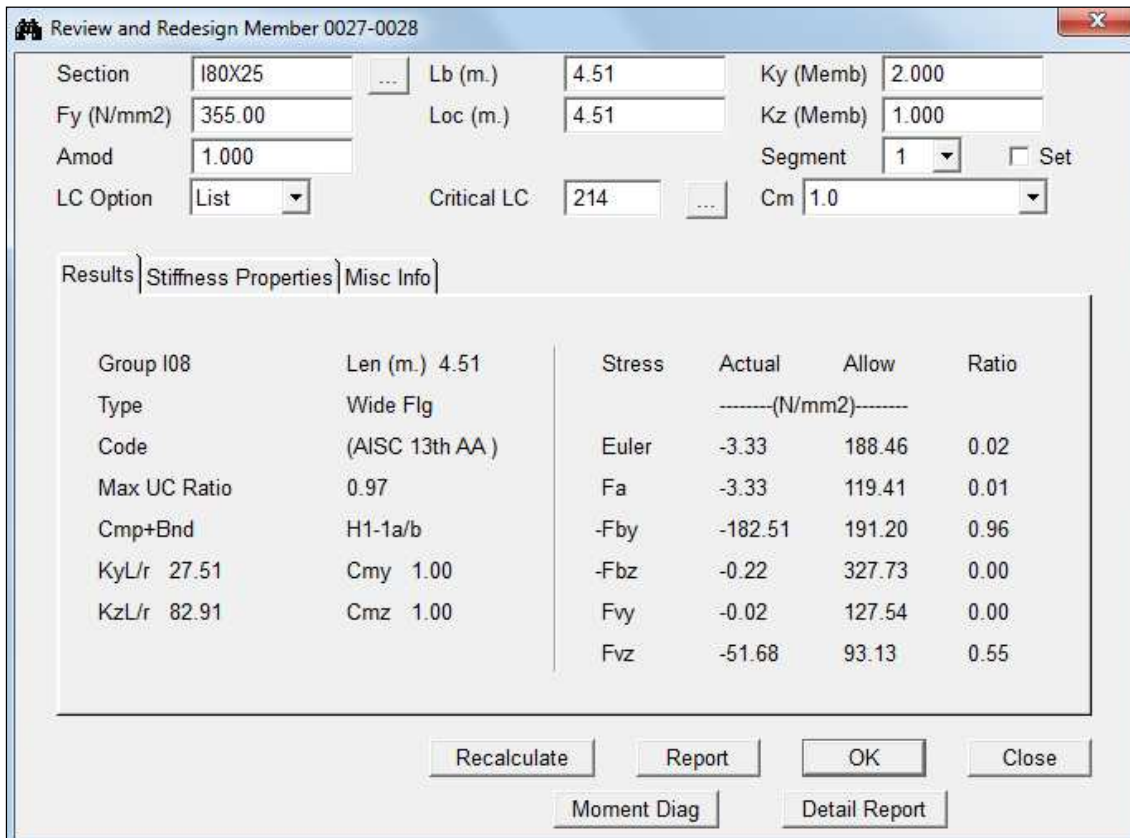


Figura 68. Resultados da barra não cilíndrica mais solicitada.

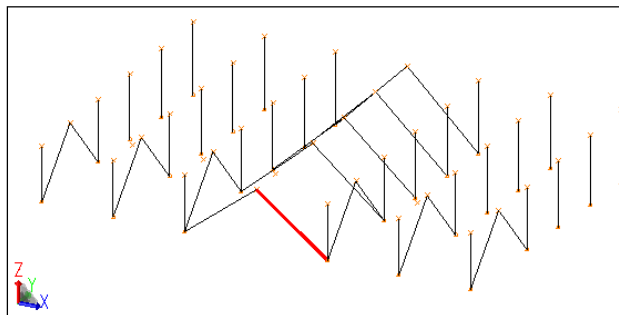


Figura 69. Localização da barra cilíndrica mais solicitada – paliteiro.

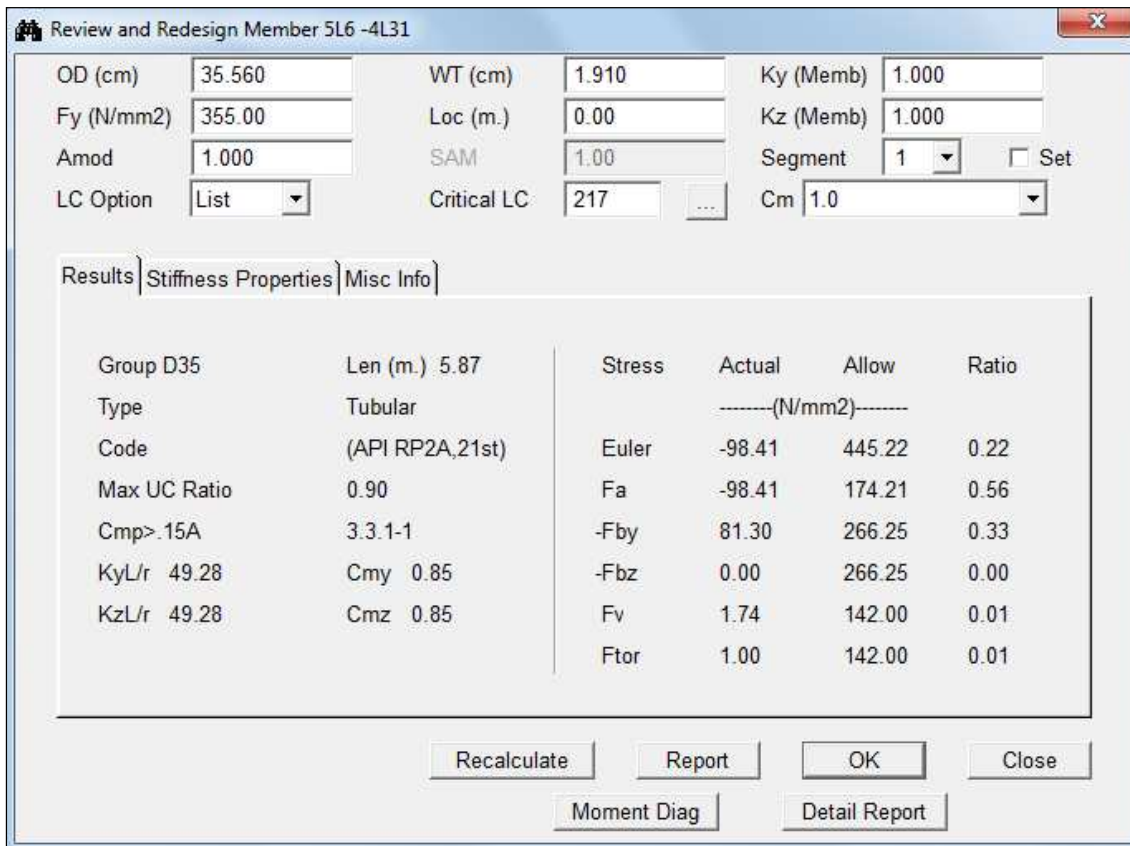


Figura 70. Resultados da barra cilíndrica mais solicitada.

A tabela 24 apresenta um resumo dos resultados mostrados nas figuras 68 e 70.

Tabela 24. Resumo dos resultados.

Barra	Grupo	Comb. Crítica	Norma Utilizada	Tensões (MPa)			U.C.	U.C. Máximo Combinado
0027-0028	I08	214	AISC	Flambagem	Atuante	-3.33	0.02	0.97
					Admissível	188.46		
				Axial	Atuante	-3.33	0.01	
					Admissível	119.41		
				Flexão no Plano	Atuante	182.51	0.96	
					Admissível	191.20		
				Flexão Fora do Plano	Atuante	0.22	0.00	
					Admissível	327.73		
				Cisalhamento em Y	Atuante	-0.02	0.00	
					Admissível	127.54		
				Cisalhamento em Z	Atuante	-51.68	0.55	
					Admissível	93.13		
5L6-4L31	D35	217	API RP 2A	Flambagem	Atuante	-98.41	0.22	0.90
					Admissível	445.22		
				Axial	Atuante	-98.41	0.56	
					Admissível	174.21		
				Flexão no Plano	Atuante	81.30	0.33	
					Admissível	266.25		
				Flexão Fora do Plano	Atuante	0.00	0.00	
					Admissível	266.25		
				Cisalhamento em Y	Atuante	1.74	0.01	
					Admissível	142.00		
				Cisalhamento em Z	Atuante	1.00	0.01	
					Admissível	142.00		

6 CONCLUSÕES

Os projetos de FPSO são cada vez mais comuns e esse tipo de plataforma constitui uma solução que tende a ser cada vez mais empregada para a exploração do petróleo na costa brasileira. Esse trabalho apresentou uma pequena, porém essencial, parte do projeto dessa grande estrutura naval que é um FPSO. Foi visto como é feita a modelagem em computador desse tipo de estrutura, quais carregamentos devem ser considerados e quais verificações são necessárias para garantir a sua segurança.

O Método das Tensões Admissíveis (WSD – *Working Stress Design*) foi adotado em detrimento do Método dos Estados Limites (LRFD – *Load and Resistance Factor Design*) porque, mesmo esse último sendo mais refinado, o WSD é mais simples de se aplicar quando se tem muitos carregamentos e combinações. Isso porque no WSD só se utiliza coeficientes de segurança sobre as tensões admissíveis, enquanto no LRFD, é necessário que se apliquem diversos fatores de combinação em cada carregamento, de acordo com a combinação. Além disso, o WSD, geralmente, é o método adotado pelas empresas de engenharia para esse tipo de análise.

Foram modelados um total de 625 elementos de barra e 310 elementos de placa. Pelos resultados apresentados na seção 5 é possível fazer uma série de conclusões. As figuras 68 e 70 mostram os dois tipos principais de resultados obtidos, que são os das vigas de piso e os das colunas e contraventamentos.

A viga de mais solicitada (figuras 66, 67 e 68) está localizada no segundo piso e corresponde a uma barra de perfil I800X250X16.0X25.0, a combinação crítica é a 214, que representa uma das condições de operação sob cargas ambientais extremas, com o vento na direção Y e movimentos de *roll* (negativo) e *heave* (positivo) agindo simultaneamente. O esforço preponderante foi a tensão de flexão no eixo local y, com um valor de -182.51 MPa e U.C. de 0.96. Também se observa uma pequena contribuição da tensão axial de compressão (-3.33 MPa e U.C. de 0.01) e da tensão de flambagem (U.C. de 0.02), e a tensão de cisalhamento no eixo local z (-51.68 MPa e U.C. de 0.55). A flexão no eixo local z e o cisalhamento no eixo local y são praticamente zero, resultado típico de uma viga.

Já a coluna ou contraventamento mais solicitado (figuras 66, 69 e 70) é um elemento tubular do paliteiro com seção $\phi 355.6 \times 19.1$, nesse caso, a combinação mais crítica é a 217, que também representa uma das condições de operação sob cargas ambientais extremas, mas com vento na direção X e movimentos de *pitch* (positivo) e *heave* (positivo) agindo simultaneamente. Agora, o esforço preponderante é a tensão axial de compressão (o que é o esperado para uma coluna), com um valor de -98.41

MPa e U.C. de 0.56. Para essa barra a flambagem é mais significativa, atingindo um U.C. de 0.22; também se observa uma tensão de flexão no eixo local y de 81.30 MPa e U.C. de 0.33 e valores muito pequenos das tensões de cisalhamento e torção (U.C. de 0.01). A tensão de flexão no eixo local z é nula.

Nenhuma das barras atingiu um *unity check* combinado maior que 1.0, essa configuração de resultados garante que a estrutura está apta a operar durante toda a vida útil da plataforma.

A DNV recomenda ainda que seja feita a análise de fadiga da estrutura, porém esta não faz parte do escopo desse trabalho, podendo servir de tema para trabalhos futuros.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] AISC – Manual of Steel Construction - ASD - 13th edition.
- [2] API RP 2A – WSD – 21st edition - Recommended Practices for Planning, Designing and Constructing - Fixed Offshore Structures – Working Stress Design.
- [3] <www.total.com> Acesso em: 11 mar. 2013, 9:46:00.
- [4] <www.nexusfp.no> Acesso em: 11 mar. 2013, 10:07:00.
- [5] <www.buewater.com/MR_gallery.asp?menu=1&off=25> Acesso em: 11 mar. 2013, 10:31:00.
- [6] DIAS,B., *Análise Estrutural Estática de um Módulo no Convés de um FPSO*, Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012.
- [7] SACS 5.3 - Structural Analysis Computer System - Bentley.
- [8] DNV - OS - C201 – Structural Design of Offshore Units (WSD method) - October 2008.
- [9] DNV Classification Notes 30.5 – Environmental Conditions and Environmental Loads - March 2000.
- [10] <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2008/CarlosChads+BrunoAvila/relat2/relat2.htm> Acesso em: 21 mar. 2013, 21:20:00.
- [11] <<http://pt.scribd.com/doc/57754099/FPSO-APRESENTACAO>> Acesso em: 11 mar. 2013, 10:52:00.
- [12] <<http://www.alliance-engineering.com>> Acesso em: 11 mar. 2013, 11:41:00.
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Floating_production_storage_and_offloading> Acesso em: 11 mar. 2013, 12:23:00.
- [14] <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2011/NathalieThiago/relat1/Conteudo.htm> Acesso em: 11 mar. 2013, 14:25:00.