

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS MÓDULOS DA PLANTA DE
PROCESSO DE UMA PLATAFORMA FPSO**

Diego Rocha Athayde

Orientação: D.Sc Marta Cecília Tápia Reyes

Co-orientação: M.Eng Márcio Andrade da Silva

Rio de Janeiro - RJ

Abril - 2013

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS MÓDULOS DA PLANTA DE PROCESSO DE UMA PLATAFORMA FPSO

Diego Rocha Athayde

Banca examinadora:

Orientadora: Prof^a. D. Sc Marta Cecília Tápia Reyes

Co- Orientador: M. Eng Márcio Andrade da Silva

Prof^o Dr. Ing Peter Kaleff

Prof^o D. Sc Julio Cesar Ramalho Cyrino

Apresentado em: ___/___/___

Rio de Janeiro

Abril - 2013

ATHAYDE, Diego Rocha

Otimização Estrutural dos Módulos da Planta de Processo de uma Plataforma FPSO/ Diego Rocha Athayde - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 125. : il, 29,7cm

Orientador: D.Sc Marta Cecília Tápia Reyes
Co- Orientador: M.Eng Márcio Andrade da Silva

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. Módulo da Plataforma FPSO
2. Análise Estrutural
3. Otimização
4. Modelo Computacional

Referências Bibliográficas: p.122

I. REYES, Marta Cecília II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica III.

Otimização Estrutural dos Módulos da Planta de Processo de uma Plataforma FPSO/ Diego Rocha Athayde - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Jesus Cristo, que é o leme da minha vida.

Ao meu avô Comte. Rogério Barbosa Athayde (*in memoriam*), que dentre os mares revoltos da minha adolescência enxergou em mim um futuro engenheiro naval.

AGRADECIMENTO

Quero agradecer à minha mãe Marcia Regina e meu pai Rogério Athayde Jr, por me ensinarem a ter humildade, compaixão e bom senso. Isto foi muito importante na minha trajetória acadêmica. À minha avó Magaly Athayde pelo carinho e força que sempre me inspirou. Ao meu irmão Leandro Athayde pela sensibilidade, amor e incentivo.

À minha amiga Anna Elisa Pedreira, pela ajuda inequívoca na adequação deste texto às normas da Escola Politécnica. Você foi essencial.

Aos meus amigos: Aline Coelho, Eloana Moreira, Juan Pablo, Gelder Guerreiro e Rafael Passos. Vocês formam a seção-mestra da minha estrutura emocional.

Aos meus amigos, e colaboradores da Technip, Eduardo Knothe e Luca Novara, pela preciosa ajuda que me deram ao longo deste ano.

À minha orientadora Marta Tápia, pela especial atenção que dedicou ao meu projeto final, e por saber a medida exata entre me direcionar com veemência para o caminho correto do bom andamento do processo, e me apoiar com seu instinto materno nos momentos em que precisei. Foi um orgulho ser seu orientado, muito obrigado.

Ao meu co-orientador Márcio Andrade, por me apoiar desde a elaboração do tema do projeto final até as últimas fases do mesmo, ainda que em período de férias. Agradeço ao suporte técnico e teórico que me ofereceu e por sempre estar disposto a ajudar não importando a situação. Muito Obrigado.

“O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que não se vê”
Platão.

RESUMO

Este estudo apresenta um método de “otimização” estrutural, com foco na redução de aço utilizado, dos módulos pertencentes à planta de processo da plataforma do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*). Uma abordagem técnica e operacional das etapas envolvidas no transporte destes módulos, da região de construção até a posição final no convés do navio, é parte complementar deste trabalho e balizadora do processo de busca pelo módulo com peso de aço estrutural reduzido. Ao final, sugeriu-se uma análise crítica por parte do projetista da estrutura original, no sentido de retificação de seus coeficientes de segurança ou possível implantação deste método em contextos diferenciados.

ABSTRACT

This study presents a structural "optimization" method, with a focus on reduction of steel used, the modules belonging to platform processes of plant type FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading). A technical and operational approach of the steps involved in the transport of these modules, in the region of construction until the final position on the ship's deck, is the complement of this work and serves as the basis for the search process by module with low weight. In the end, it was suggested a critical analysis on the part of the designer of the original structure, in the sense of safety coefficients rectification or possible implementation of this method in different contexts.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Finalidade	3
2. CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO A SER ANALISADO.....	5
2.1 Projeto do módulo.....	8
2.1.1 Etapa no Canteiro de Obras.....	10
2.1.2 Transporte do módulo do Cais Para a Balsa – <i>Load Out</i>	13
2.1.3 Transporte Marítimo	16
2.1.4 Transferência do módulo da Balsa para o convés do FPSO - <i>Lifting</i>	18
2.1.5 Fixação do módulo nos apoios sobre o convés da plataforma	21
2.1.6 Plataforma Operando (<i>In Place</i>).....	24
2.2 Escolhendo a situação crítica para o projeto	24
3. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO.....	25
3.1 Considerações Para o Modelo Estrutural.....	30
3.1.1 Modelo Computacional (Real X Modelo)	33
3.2 Geração do Modelo de Elementos Finitos	35
3.2.1 Planos e Relatórios de Referência do Módulo.....	36
3.3 Modelo Para Embarque (<i>Load Out</i>)	38
3.3.1 Condições de Contorno no Modelo- <i>Load Out</i>	39
3.3.2 Relações entre Modelo X Real - <i>Load Out</i>	39
3.3.3 Arranjo do Módulo sobre <i>Boogies</i>	45
3.4 Modelo Para Transporte Marítimo	49
3.4.1 Condições de Contorno no Modelo- <i>Load Out</i>	53
3.4.2 Relações entre Modelo X Real – Transporte Marítimo	57
3.5 Modelo Para Içamento (<i>Lifting</i>)	58

3.5.1	Condições de Contorno no Modelo- <i>Lifting</i>	59
3.5.2	Relações entre Modelo X Real – <i>Lifting</i>	61
3.6	Modelo Para o Módulo na Plataforma (<i>In Place</i>)	62
3.6.1	Condições de Contorno no Modelo- <i>In Place</i>	63
3.6.2	Relações entre Modelo X Real – <i>In Place</i>	65
3.7	Resultados das Etapas - Módulo Não “Otimizado”	69
3.7.1	Deflexões do Módulo - <i>Load Out</i>	69
3.7.2	Tensões do Módulo - <i>Load Out</i>	70
3.7.3	Deflexões do Módulo – Transporte Marítimo	72
3.7.4	Tensões do Módulo – Transporte Marítimo	74
3.7.5	Deflexões do Módulo – <i>Lifting</i>	75
3.7.6	Tensões do Módulo – <i>Lifting</i>	76
3.7.7	Deflexões do Módulo – <i>In Place</i>	78
3.7.8	Tensões do Módulo – <i>In Place</i>	80
3.7.9	Verificação da Etapa Crítica	81
3.8	Método de Otimização	82
3.8.1	Otimização a partir da redução das espessuras do modelo original	91
3.8.2	Otimização a partir do aumento das espessuras do modelo subdimensionado.....	92
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	94
4.1	Resultados da “otimização” a partir do Modelo Original	94
4.2	Resultados da otimização a partir do Modelo Subdimensionado... ..	103
4.3	Modelo Final Otimizado	119
4.3.1	Características do Modelo Final Otimizado	119
4.3.2	Resumo dos Dados Significativos da “Otimização”	120
4.3.3	Estimativa Global de Redução de Aço	120
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
6.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	125

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 70, com a descoberta do Campo de Guaracema, na plataforma continental de Sergipe-Alagoas, o Brasil enxerga no território marítimo um possível caminho para o aumento da sua produção petrolífera. A vocação brasileira para exploração em águas profundas é confirmada na década de 80 com a descoberta da Bacia de Campos, caracterizando a atuação em águas consideradas profundas, com mais de 1000 metros de profundidade.

Com a ocorrência da exploração do petróleo nesta lâmina d'água, faz-se necessário o uso de plataformas que não tem ligação fixa com o leito marinho, uma vez que seria impraticável a utilização das tradicionais plataformas do tipo jaqueta, tendo em vista a pressão hidrostática desta profundidade.

Sendo assim, é plausível a utilização das plataformas do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que são navios com capacidade para processar e armazenar o petróleo, e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural. Além disso, no convés do navio, é instalada uma planta de processo para separar e tratar os fluidos extraídos pelos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador de tempos em tempos, que é função da capacidade de armazenamento da FPSO e da vazão volumétrica de óleo produzido.

Nesse sentido, este tipo de plataforma já faz parte das estratégias econômicas e de projetos relacionados à exploração energética no Brasil. Contudo, o conhecimento técnico sobre esta embarcação e seus componentes, em particular os seus módulos da planta de processo, em especial no aspecto estrutural, que é o âmbito do presente trabalho, é fundamental para uma consolidação da capacidade de produção e projetos de plataformas do tipo FPSO com elevados graus de excelência em engenharia, compatíveis e competitivas no mercado mundial.

Tão importante quanto às características técnicas de projeto de um módulo de plataforma, é a logística envolvida na montagem, ou integração, dos mesmos com o casco do navio convertido ou novo, da futura unidade de produção petrolífera. Logo, cuidados especiais devem ser tomados, no que diz respeito à estrutura do módulo, nas etapas de transporte do mesmo, desde o local de sua fabricação até sua ligação ao casco do FPSO, operação denominada: Acoplamento (*Mating*). A distribuição de funções da etapa construtiva e de montagem dentre diferentes companhias e estaleiros é, atualmente, uma prática comum nos projetos *offshore*, visando os

melhores preços construtivos e os locais reconhecidos pela sua qualidade técnica e experiência.

Contudo, é de extrema importância que uma análise estrutural seja feita para cada etapa de locomoção destes módulos componentes da planta de processo, visando à integridade destes elementos. Para isso, uma boa distribuição de cargas decorrentes de um número correto de apoios, ou suportes, é necessária nestas diferentes etapas, e o seu correto posicionamento é balizado pelas análises estruturais pertinentes, tais como análise de flexão de vigas e flambagem de chapas, por exemplo.

Logo, tanto na fase de projeto básico dos módulos de uma unidade do tipo FPSO, assim como no decorrer da construção dos módulos, a boa compreensão do contexto operacional e técnico ao qual serão submetidas estas estruturas é fundamental para qualquer tomada de decisão seja quanto aos escantilhões de projeto como na logística operacional de projeto. Feitas estas considerações acima, pode-se balizar qualquer proposta de modificações factíveis no decorrer do projeto ou de ratificação da qualidade do mesmo.



Figura 1 - Foto do Casco da P-58 ainda sem os módulos sobre o convés principal



Figura 2 - Foto do Casco da P-58 sendo rebocada para a fase de acabamento



Figura 3 - Foto do Casco da P-58 no estaleiro

1.1 Finalidade

Este trabalho tem como finalidade a tentativa de “otimização” estrutural de um módulo da plataforma P-58 do tipo FPSO, no que diz respeito ao total de aço estrutural utilizado na construção deste módulo. Sendo assim, neste trabalho, entende-se por “otimização” o processo de busca por uma estrutura final do módulo da plataforma que apresente um peso de aço menor que o do projeto original, e ainda assim resistir às solicitações pertinentes. Contudo, a redução dos escantilhões dos elementos estruturais do módulo e, ainda, assim garantir as expectativas construtivas, normativas e de montagem, presentes no escopo de trabalho do projeto básico, representa

ganhos financeiros e econômicos para o projeto, além de uma visão crítica sobre aspectos qualitativos do projeto do módulo e sua modelação.

Contudo, este projeto encontra-se em fase de finalização e a construção, montagem e ligação deste módulo no convés da FPSO compreenderam diferentes regiões, tendo por consequência diferentes condições de contorno para este módulo.

A proposta deste trabalho, se a resposta da otimização estrutural for positiva, é a aplicação de um procedimento em uma etapa anterior a construção do módulo e requisição dos materiais (aço estrutural) visando um refinamento nos escantilhões definidos no projeto básico, uma vez que em etapas posteriores do projeto temos um maior grau de informações e gastos do projeto, podendo balizar uma melhor tomada de decisões no âmbito da definição dos escantilhões do módulo, por exemplo. Além disso, o superdimensionamento de estruturas é consequência da falta de informações numa etapa inicial do projeto, visando a garantia de um grau de segurança que supra esta falta de informações e *feedback* do projeto.

Este estudo propicia não só uma proposta de método de otimização estrutural, mas uma visão global das operações envolvidas no transporte dos módulos de uma plataforma do tipo FPSO e suas interferências diretas na resposta estrutural destes elementos que se dão de uma forma interativa.

Com isso, pode-se fazer uma crítica ao modelo do projeto original no sentido de buscar topologias estruturais mais “otimizadas”, ou ao menos ratificar a boa prática do projeto original, se este for o caso.

2. CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO A SER ANALISADO

A unidade de produção a ser considerada neste estudo é a plataforma P-58 que é resultado da conversão do navio tanque *Welsh Venture*, ao qual gerou uma unidade de produção, estocagem e transferência (FPSO) com capacidade diária de produzir 180.000 barris de petróleo. A Plataforma tem previsão de operação em uma lâmina d'água máxima de 1.399 m, e ficar ancorada no local de operação pelo período de 25 anos, sem a necessidade de docagem.

A operação da P-58 tem previsão de iniciar suas operações em 2014 no campo do Norte do Parque das Baleias, localizado na Bacia de Campos, e, atualmente o casco se encontra atracado ao cais do estaleiro Rio Grande, onde irá ocorrer também a ligação dos módulos com o casco. Após a fixação destes módulos sobre o convés da plataforma, a mesma é rebocada até a posição final de operação.

O presente estudo considera como objeto de cálculo um módulo de remoção de CO₂ (*CO₂ Removal Unit*). Este módulo é um dentre os 16 módulos desta unidade de produção. A escolha deste módulo para objeto de análise é em função de possuir maior número de equipamentos em seus conveses (que será explicitado posteriormente) e níveis de tensões superiores a grande parte dos demais módulos. Com isso, caso a “otimização” deste módulo seja possível, temos por consequência grandes chances de viabilizar uma otimização global compreendendo boa parte dos módulos presentes na planta de processo da P-58.

Visando explicitar o contexto operacional a qual o objeto de estudo irá atuar, temos as seguintes características principais desta plataforma:

Características Principais P-58:

LOA = 330,0 m

LPP = 319,00 m

BOCA (Moldada) = 56,00 m

PONTAL (Moldado) = 30,20 m

CALADO (Projeto) = 20,85 m

CALADO MÍN.(Projeto) = 10,08 m

O objeto de análise, módulo de remoção de CO₂(CO₂ Removal Unit), que também é o módulo-3 desta plataforma, está Localizado na região de vante e a bombordo da P-58, como mostrado nas figuras a seguir:

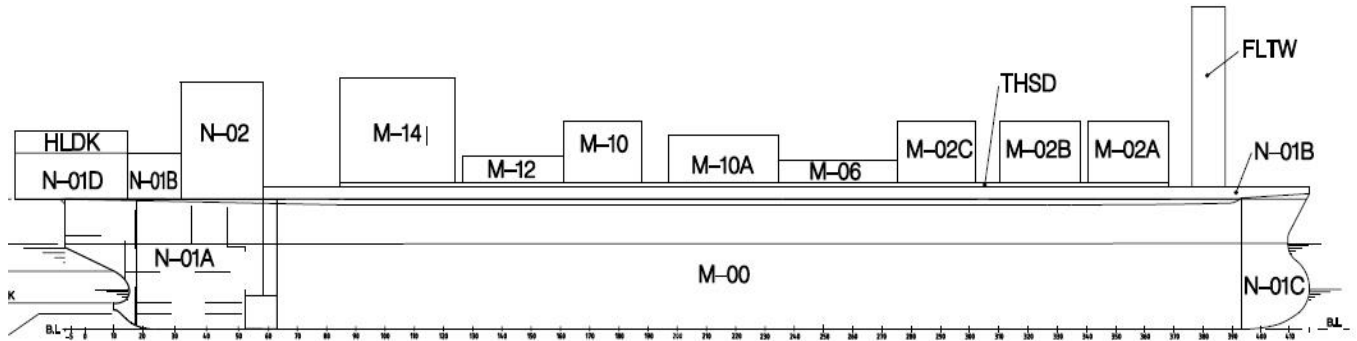


Figura 4 - Vista do perfil da P-58 com os módulos sobre o convés

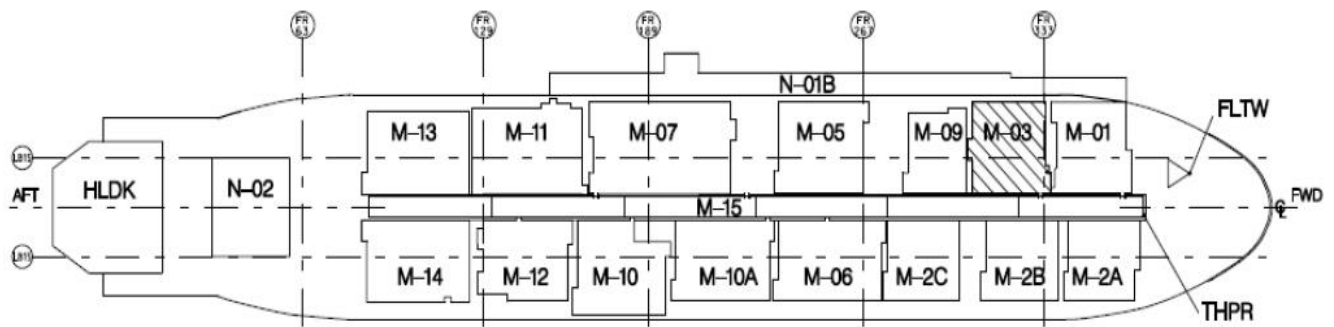


Figura 5 - Vista superior do casco da P-58 com destaque para o módulo 03

Temos as seguintes dimensões Principais do módulo:

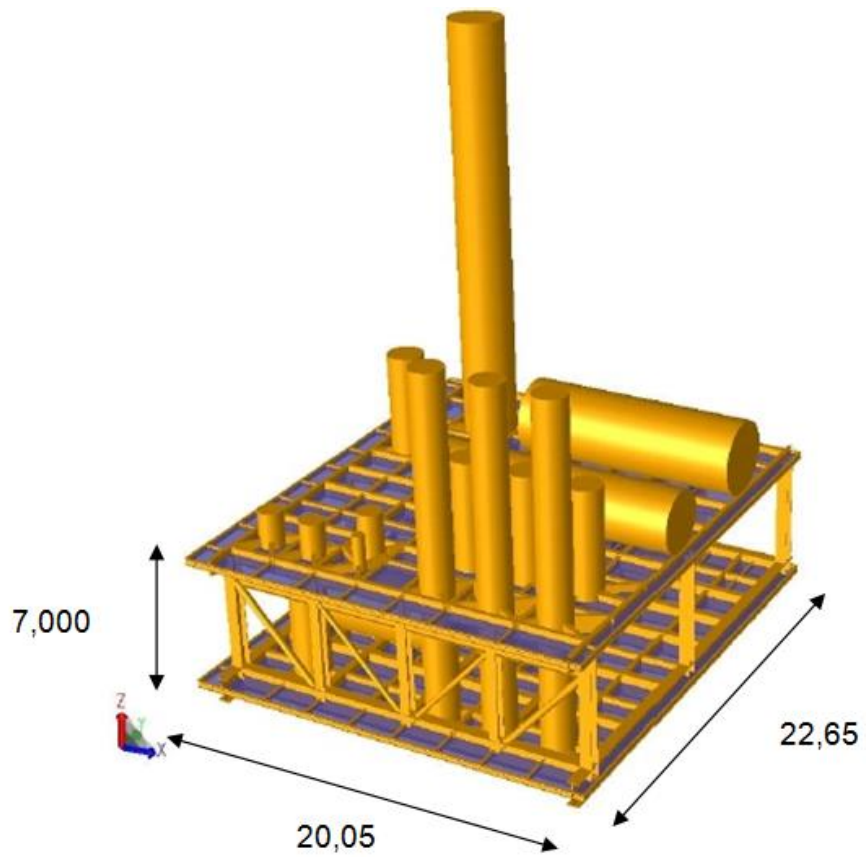


Figura 6 - Vista isométrica do módulo– modelo computacional

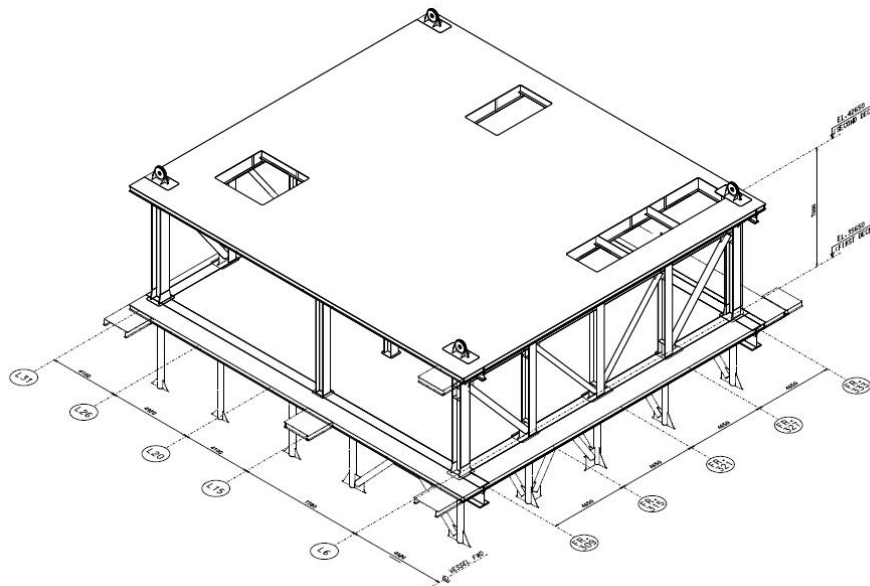


Figura 7 - Vista isométrica do estrutural do módulo sobre os suportes da P-58

Como já observado, sabemos que uma plataforma deste tipo é composta por um número considerável de módulos que desempenham funções específicas, e, até mesmo complementares, que integram este sistema de processamento do FPSO. Contudo, cada um destes módulos pode, ou não, ser produzido no mesmo estaleiro que foi feita a conversão do navio para plataforma, por exemplo. Dependendo da logística da operação e, ou, do grau de tecnologia envolvida na produção destes módulos, os diferentes componentes do navio podem ser provenientes de diferentes canteiros de obra e até mesmo de diferentes continentes o que pode gerar variadas etapas no transporte destes elementos do seu lugar de origem até sua junção no casco.

Obedecendo a este contexto, o projeto estrutural do módulo, particularmente deve ser função das condições futuras as quais este conjunto irá ser submetido, o que envolve conhecermos as diferentes etapas envolvidas na produção do módulo até seu posicionamento no convés da plataforma. Embora esta relação não seja unidirecional, ou seja, tanto o engenheiro responsável pelo projeto quanto o profissional responsável pela operação de deslocamento destas estruturas, devem sempre procurar uma distribuição favorável de cargas nesta estrutura, é na etapa de projeto que as condições críticas de cargas devem ser previstas e a partir disso são feitas algumas previsões de quais mecanismos serão utilizados para o transporte destes módulos para a posição final na planta de processo, por exemplo. Além disso, o projetista da estrutura do módulo deve se basear a partir de uma condição julgada como crítica, geralmente apresentando as maiores solicitações estruturais, em níveis de tensões e deflexões, por exemplo.

Logo, para o projeto estrutural do módulo foram observadas, na etapa de projeto básico do mesmo, e como base para a posterior otimização desta estrutura, que é objetivo do presente trabalho, as 4 etapas a seguir : Embarque do módulo (*Load out*); Transporte Marítimo, Transferência da barcaça para a plataforma (*Lifting*) e Na plataforma operando (*In Place*).

2.1 Projeto do módulo

O módulo em questão é produzido em uma região/estaleiro diferente da área onde o navio será convertido. Logo, temos como expectativa de projeto operacional e logístico que este módulo chegue ao destino (apoios no convés do FPSO) em segurança e com sua integridade estrutural garantida.

Contudo, faz-se uso de mecanismos, equipamentos e veículos de transporte existentes no mercado, ou, dependendo das singularidades do projeto e da viabilidade econômica do mesmo, pode-se construir um elemento de uso específico e exclusivo para uma função desta operação. No entanto, tendo em vista que o transporte de módulos de plataforma do tipo FPSO é prática relativamente comum nos últimos anos de crescimento da exploração petrolífera em águas profundas, e que se conta com certa experiência positiva na utilização de determinados veículos de transporte, tais como balsas, por exemplo, podemos garantir que o deslocamento destes módulos será feito utilizando elementos presentes no mercado, seja através de afretamento de balsas seja através de aluguel de carros hidráulicos de movimentação terrestre (*boogies*),

Sendo assim, o projeto do módulo compreende as seguintes etapas:

1. Deslocamento do módulo da sua posição no canteiro de obras onde foi produzido, onde o mesmo estará apoiado em suportes, até o cais deste estaleiro.
2. Translado deste módulo do Cais do estaleiro, para o veículo marítimo de transporte.
3. Apoio do módulo no veículo marítimo de transporte e viagem até a região onde se encontra o casco do FPSO (atracado no píer do estaleiro que fará a conversão).
4. Transferência deste módulo do veículo de transporte marítimo para o convés (planta de processo) do FPSO.
5. Módulo fixado permanentemente em seus apoios e, operação propriamente dita, com pleno funcionamento na planta de processo.

Logo, cada uma destas etapas compõe o objeto de estudo deste trabalho, exclusive na etapa do módulo sobre os suportes no canteiro de obras, uma vez que esta situação não foi considerada pertencente ao escopo de trabalho.

A não consideração desta etapa (canteiro) no projeto do módulo é plausível, uma vez que o número de apoios no canteiro de obras pode ser tantos quanto possíveis, e não representa uma etapa crítica deste projeto. Contudo, não é descartada uma análise estrutural desta etapa pela empresa, ou estaleiro, responsável.

Estas quatro etapas: Embarque do módulo (*Load out*); Transporte Marítimo, Transferência da barcaça para a plataforma (*Lifting*) e Na plataforma (*In Place*), irão validar as decisões tomadas pelo projetista ou responsável técnico da operação, no que se refere ao tipo de veículo de transporte a ser utilizado e o arranjo do *layout* de transporte, que irão ter significativa distinção uma da outra, tendo em vista as cargas impressas nestes suportes do módulo, que variam substancialmente em cada uma das etapas relacionadas.

A partir disso, uma análise de cada fase será realizada no âmbito dos equipamentos envolvidos e na sua consequência para a estrutura do módulo, o qual se baseará na etapa julgada crítica dentre as quatro mencionadas.

2.1.1 Etapa no Canteiro de Obras

A presente análise parte da premissa que o módulo está apoiado sobre suportes, e que, para esta condição, a integridade estrutural é garantida pelo estaleiro responsável pela montagem deste módulo, e não pela empresa responsável pelo projeto. Ou seja, para uma situação real de contrato, no contexto desta atual hipótese, o estaleiro deve garantir que o módulo não sofrerá flexões ou tensões que ultrapassem os limites balizados por regras de sociedades classificadoras, por exemplo. Além disto, esta etapa é composta pela montagem dos módulos e é caracterizada pelo processo produtivo de cada empresa envolvida na montagem de cada um dos módulos.

Como mencionado, não será objeto de estudo a disposição do módulo no canteiro de obras, e as respectivas solicitações estruturais, o que não exime a importância da apresentação desta etapa no presente trabalho, visando a boa percepção das etapas envolvidas no transporte de módulos de uma plataforma.

É prática comum em projetos de alta magnitude, como é o caso desta plataforma, a distribuição da produção/construção de cada módulo para diferentes empresas, uma vez que cada módulo se sobressai por uma função determinada que é delineada com melhor qualidade se a sua montagem e produção forem diversificadas e distribuídas entre empresas especializadas em cada função destes módulos, estabelecendo assim expectativas quanto a qualidade dos mesmos além de aspectos financeiros.

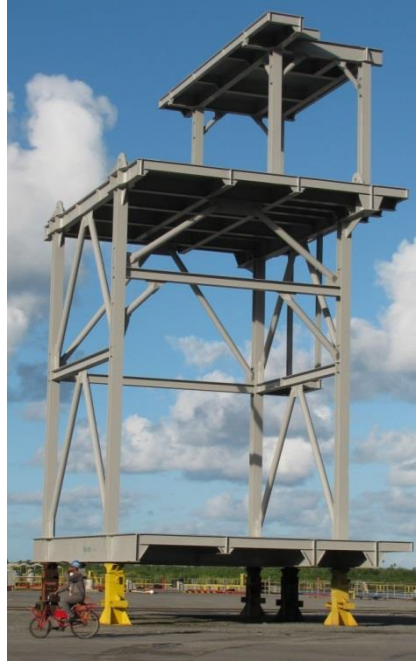


Figura 8 - Módulo no Canteiro de Obras



Figura 9 - Montagem de alguns módulos no canteiro de obras

Sendo assim, existe a necessidade da utilização de um veículo, ou equipamento, capaz de transportar este módulo do ponto inicial estipulado pelo estaleiro até o cais para posterior transporte marítimo.

Para uma situação em que o cais é distante do ponto de produção destes módulos, ou seja, quando há a necessidade de um deslocamento de algumas centenas de metros; ou não existem pórticos, ou guindastes na área capazes de fazer esta movimentação do módulo para o cais; uma boa solução está na utilização de veículos de transporte, de alta capacidade de levante e boa manobrabilidade, dependendo do *layout* do estaleiro, por exemplo. Estes veículos são comumente denominados *boogies*, e são largamente utilizados seja na área offshore seja no canteiro de obras do estaleiro.

Logo, cabe uma breve descrição deste veículo que será utilizado neste projeto:

- *Boogie (SPMT – Self Propelled Modular Trailers)*

Composto por várias rodas, e trabalhando a partir do sistema hidráulico, o sistema de transporte através de *boogies* é amplamente utilizado no transporte de estruturas navais em diversos estaleiros. Pode-se fazer uso de mais de dois veículos deste tipo, dependendo do peso do módulo a ser transportado e a configuração escolhida, visando sempre uma solicitação estrutural aceitável aliada a uma viabilidade econômica e operacional do transporte.

Um *boogie* pode ter um número variado de rodas e dimensões. Uma característica importante deste sistema, e que pode justificar sua utilização, é o fato de possuir um sistema automático de compensação de carga em cada uma das rodas, na direção vertical. Ou seja, cada roda se movimenta automaticamente na direção vertical de modo a igualar a distribuição de cargas dentre todas as rodas componentes do sistema.

Com isso, a estrutura sobre este sistema permanece em uma posição constantemente horizontal em um transporte de um módulo onde o terreno seja irregular, a estrutura não sofreria inclinações, por exemplo. Além disso, cada uma destas rodas tem movimentação independente no sentido rotacional sobre seu eixo, possibilitando alterações nas suas direções de translado.

Abaixo uma vista lateral deste sistema, e logo a seguir a imagem de um módulo sobre o *Boogie*:

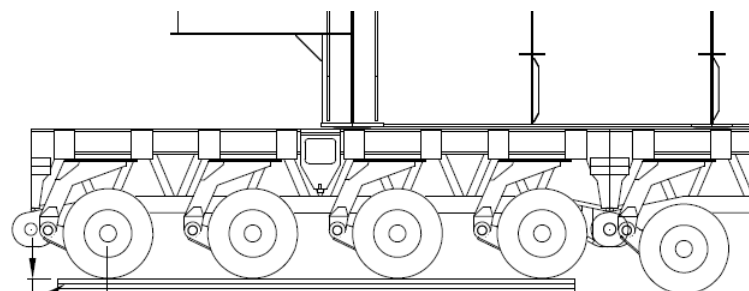


Figura 10 – Vista Lateral do sistema hidráulico – Boogie



Figura 11 - Módulo sobre o *Boogie*

2.1.2 Transporte do módulo do Cais Para a Balsa – *Load Out*

Para este projeto foi considerado que o casco do navio convertido em FPSO não foi adaptado no mesmo local que o módulo. Contudo, o deslocamento do módulo se fará inicialmente por terra e posteriormente por mar. Sendo assim, uma maneira de realizarmos este transporte marítimo seria através de balsas movidas a partir de rebocadores marítimos. Esta etapa de transferência do módulo a partir do cais para a balsa é denominada Embarque ou *Load Out*. Para esta etapa, o sistema de *boogie*, a pouco explanado, é bem útil no sentido de aliviar as diferenças de altura entre cais e balsa, com seu sistema automático de compensação, de acordo com a figura a seguir:



Figura 12 - Módulo sobre o *Boogie*

Note que na figura acima, o desnível causado por uma rampa de acesso a balsa, é compensado pela elevação vertical da roda deste sistema hidráulico. Além

disso, outras variações verticais podem ocorrer nesta operação de *Load Out*, causadas por movimentações de *Heave* da balsa e variações de maré. Recomenda-se realizar esta operação com condições climáticas favoráveis, com pouco vento e correntes, e, preferencialmente em um período/horário de pouca variação de maré. Tais informações da maré obtidas comumente a partir das *tábuas de marés*, estas publicadas pela *DHN* - Diretoria de Hidrografia e Navegação.



Figura 13 - Apoio entre base do Módulo e *boogie*

Para esta junção da base do Módulo com a superfície de apoio do *boogie*, normalmente coloca-se um material intermediário para suavizar a transferência de esforços. Este elemento pode ser composto de seções quadradas de madeira, como observado na figura acima. Este artifício é denominado “fogueira”, e, geralmente, é posicionada nos locais de maior resistência estrutural em cruzamentos de reforçadores primários da base do módulo.

Abaixo uma figura da operação de deslastro da balsa visando compensar o peso embarcado e, ou, a variação da maré:



Figura 14 - Balsa Realizando Deslastro –Operação de Load Out

Para esta configuração de *Load Out*, *boogie* embarcando na Balsa, devemos ter em mente algumas características básicas que o veículo de transporte marítimo, neste caso a balsa, deve ter:

BALSA

- Grande área de convés, capaz de abrigar os módulos a serem transportados.
- Número de tanques de lastro suficiente para minimizar movimentações na operação de *Load Out*.
- Estrutura da região dos suportes capaz de suportar as solicitações locais.
- Estabilidade estática suficiente para o mínimo de movimentações durante o transporte marítimo.

Feito isso, o módulo deve ser transferido para a balsa através dos *boogies* com todos os cuidados necessários a operação de *Load Out*. O Módulo a ser transportado fica apoiado sobre suportes previamente fixados à estrutura da Balsa, além de poder existir um sistema auxiliar de fixação da estrutura do módulo a barcaça, através de cabos de aço, por exemplo. Contudo, a etapa seguinte consiste no transporte marítimo deste componente da planta de processo da plataforma do tipo FPSO, e esta sujeita a diferentes condições de carregamento principalmente devido a movimentações da Balsa.



Figura 15 - Transporte de módulo sobre *Boogies* –Operação de *Load Out*



Figura 16 - Módulos no convés da *Balsa* – Operação de *Load Out*

2.1.3 Transporte Marítimo

A etapa de transporte marítimo consiste na locomoção do módulo em estudo da região em que foi montada e posicionada no cais (etapa de *Load Out*) para a região de implantação sobre os suportes do convés da plataforma FPSO, onde o este módulo será içado do convés da balsa para o convés da plataforma.

Contudo, deve-se frisar que a configuração dos apoios da etapa anterior de *Load Out* (apoiado nos *boogies*) é diferente dos apoios sobre o convés da balsa, que geralmente são suportes feitos de aço e em quantidade, e extensão no convés, suficientes para a boa estabilidade do módulo sobre a balsa assim como a boa distribuição dos esforços neste elemento. Além disso, comumente faz-se uso de mecanismos de peiação visando minimizar os efeitos de movimentação do módulo que são consequências do movimento da balsa transportadora. Também vale destacar que a Balsa não possui propulsão própria, o que demanda a utilização de pelo menos dois rebocadores para esta operação. Nesta etapa, além das cargas comuns às fases anteriores tais como o peso próprio do módulo, se contabiliza os esforços gerados na

estrutura tendo em vista as movimentações da balsa devido à presença das forças externas ambientais, como: vento, corrente e ondas.

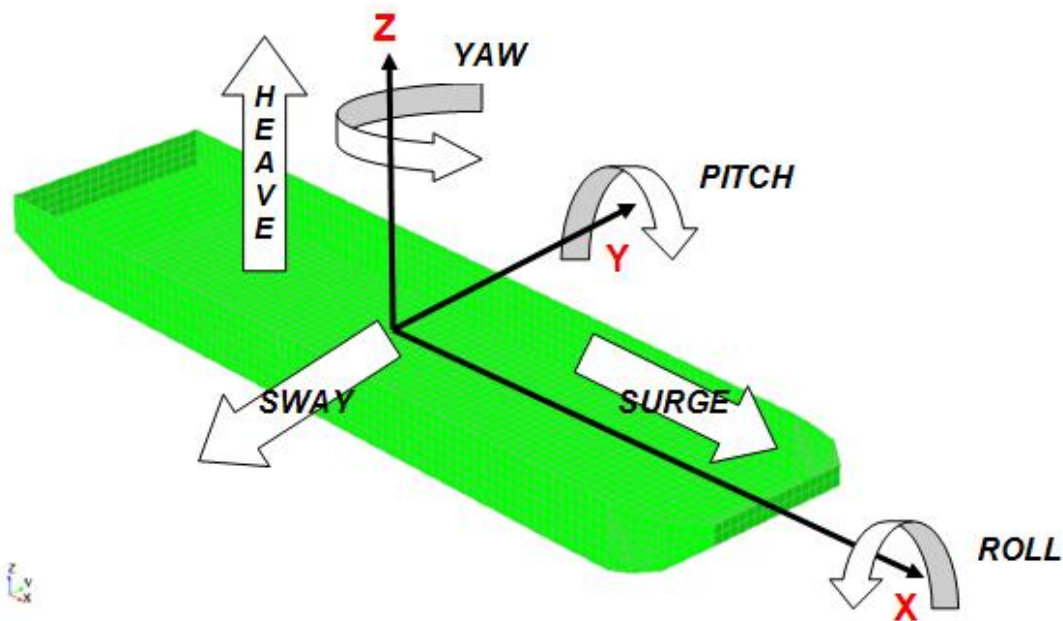


Figura 17 - Direções possíveis de movimentação da balsa transportadora

Através da figura acima observamos os possíveis movimentos da balsa transportadora do módulo. Tal movimentação gera solicitações estruturais no módulo nas direções X, Y e Z. Este acréscimo é consequência de acelerações nestas direções devido ao movimento da balsa. Contudo, as condições de mar da região, que para este estudo é a Bacia de Campos, ditam o também o número de suportes na balsa e o tipo de peiação que o módulo estará submetido, além de influenciar até mesmo na escolha, por parte do armador, do tipo de transporte marítimo utilizado, em função do seu comportamento no mar.

Com isso, temos que a resposta da estrutura flutuante as condições de mar (ondas) se dá pela seguinte relação:

$$\boxed{\text{Condições de mar (Travessia RJ-RS)}} \times \boxed{\text{RAO}}^2 = \boxed{\text{Movimento da Balsa}}$$

O RAO (*Response Amplitude Operator*) é também conhecido como função de transferência e representa um conjunto de dados estatísticos da unidade flutuante calculados, normalmente, para todos os seus movimentos e em todas as direções e frequências de onda. Tendo em mãos os dados estatísticos de alturas de ondas da região assim como os respectivos períodos de oscilação, e utilizando um software de cálculo que, para este caso, considera a teoria linear e trabalha no domínio da frequência, pode-se obter a resposta da balsa ao mar da travessia, que compreende desde o local de produção dos módulos (Niterói-RJ) até o local de fixação dos mesmos no convés do FPSO (Estaleiro Rio Grande). Com isso, as movimentações e acelerações consequentes desta interação entre o conjunto balsa-módulo e estado de mar, terá consequências nas tensões observadas na estrutura do módulo. Além disso, é importante destacar que a distribuição de massa de um módulo de plataforma influencia diretamente na resposta da balsa transportadora ao espectro de mar considerado. Como a inércia total do sistema se difere para diferentes módulos por terem diferentes pesos e alturas de centro de gravidade, a análise estrutural possui diferentes valores de entrada para suas acelerações, em função de cada módulo analisado.

Contudo, serão utilizados os dados das acelerações nas três direções principais (X, Y e Z) como valores de entrada para o cálculo estrutural, tendo em vista que o foco está na análise estrutural e não hidrodinâmica. Na situação real de projeto operacional, a empresa contratante da balsa solicita os dados finais (tais como acelerações máximas nas três direções) referentes ao movimento da mesma com o módulo sobre seu convés, ou solicita somente desenhos da embarcação para sua modelação em software de análise hidrodinâmica para gerar os dados necessários ao cálculo estrutural a ser realizado. Esta etapa referente ao transporte marítimo, assim como os dados e suas aplicações e ponderações serão devidamente explicitados na análise do transporte marítimo, em uma etapa posterior deste trabalho.

2.1.4 Transferência do módulo da Balsa para o convés do FPSO - *Lifting*

Uma vez que a Balsa de transporte marítimo está devidamente posicionada próxima à unidade FPSO, e considerando que o pontal da balsa é muito menor que o pontal da plataforma, a operação mais utilizada para este tipo de situação é o içamento. Esta etapa define os escantilhões dos elementos componentes da estrutura do módulo, uma vez que, para a presente operação em estudo, compõe a situação de menor número de apoios (que será o número de olhais fixados a estrutura do módulo)

e conseqüentemente maior vão livre das vigas principais da base deste módulo. Para esta operação, é comum a utilização de unidades de alta capacidade de içamento, em um raio de ação que atenda as diferenças de altura entre o pontal da balsa e da plataforma. Para o presente estudo, considerando as operações envolvidas com esta plataforma, o guindaste estará em terra e fará o traslado do módulo a partir da balsa para o convés da plataforma do tipo FPSO.



Figura 18 - Içamento de um módulo para o convés da P-58 no estaleiro Rio Grande

É importante destacar que outro procedimento comum neste tipo de operação é o *Loadin*, que consiste na transferência do módulo da balsa para o cais, e posterior içamento deste módulo, do cais para o convés do FPSO.

O guindaste utilizado para esta operação é de modelo PTC200-DS, da empresa MAMMOET:



Figura 19 - guindaste PTC22-DS da Mammoet

É importante destacar, novamente, que esta é a etapa de projeto, ou etapa crítica, onde os elementos estruturais irão sofrer maiores solicitações. Logo, desde a concepção do projeto deste módulo da plataforma do tipo FPSO, os olhais de içamento já estavam definidos, como podemos observar na figura abaixo:

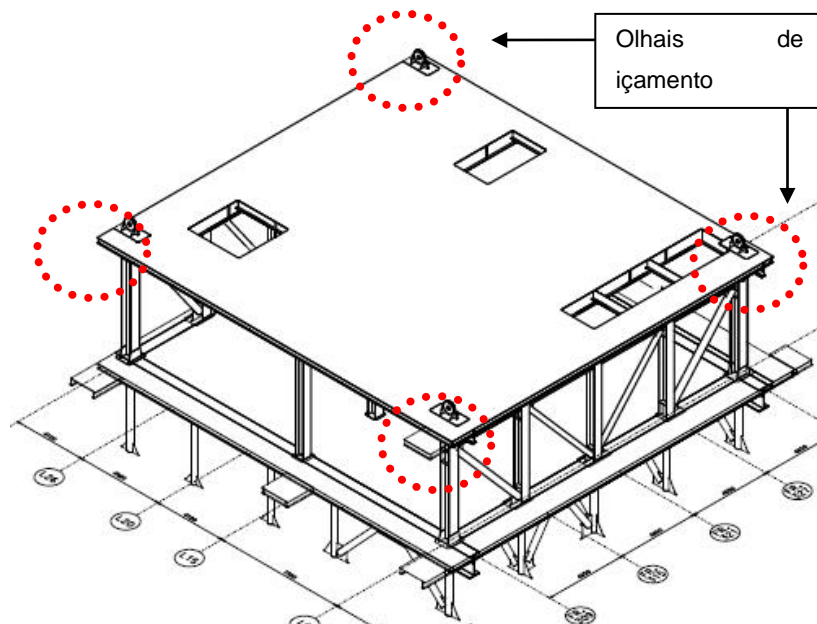


Figura 20 - Olhais de içamento em destaque na vista isométrica do módulo



Figura 21 - Vista inferior do módulo e os elementos componentes da base

2.1.5 Fixação do módulo nos apoios sobre o convés da plataforma

Esta fase compreende o posicionamento final deste módulo (no caso o módulo de remoção de CO₂), que passou por diversos arranjos e apoios desde sua concepção no canteiro de obras até seu içamento na etapa precedente. Para este estudo, os módulos ficam apoiados em uma série de suportes, que tem seu número variado de acordo com as dimensões das bases dos mesmos. Logo, cada módulo tem um arranjo

diferenciado para seus suportes sobre o convés que é diretamente proporcional a distribuição de pesos deste módulo.



Figura 22 - Suportes do módulo sobre o convés do FPSO



Figura 23 - Vista panorâmica do convés do FPSO e os suportes dos módulos

Temos que a ligação do módulo com estes suportes é auxiliada através de pinos guia como ilustra a imagem a seguir:



Figura 24 - Detalhe de um dos encaixes do módulo com o suporte sobre o convés do FPSO

Observe que os encaixes estão posicionados abaixo dos elementos gigantes da base do módulo, visando uma melhor distribuição dos esforços, uma vez que tais elementos possuem maior resistência estrutural:



Figura 25 - Detalhe de um dos apoios do módulo com o suporte sobre o convés do FPSO

2.1.6 Plataforma Operando (*In Place*)

Nesta fase, na plataforma operando (*in place*), o módulo estará em seu posicionamento final para plena operação e, conseqüentemente, a estrutura da base destes módulos deverá ser capaz de resistir a todas as cargas atuantes nesta etapa tais como: vento, equipamentos operando, carga de máquinas e pessoas passando sobre as passarelas do módulo.

Com isso, temos a partir de agora uma visão geral de todas as etapas relacionadas ao transporte do módulo da plataforma. Contudo, cada uma destas etapas irão apresentar suas peculiaridades e considerações importantes para o projeto das bases deste módulo, na etapa de cálculo propriamente dito, baseado principalmente nos dados de saída do software SACS, de modelação e cálculo estrutural.

2.2 Escolhendo a situação crítica para o projeto

Para a modelação estrutural do módulo, temos por parte do projetista a avaliação das etapas anteriormente explicitadas, e decisão sobre quais parâmetros devem ser observados na determinação dos escantilhões deste módulo. Neste caso, a etapa escolhida como crítica, que apresenta as maiores solicitações estruturais é a etapa de *Lifting*, uma vez que possui as maiores dimensões de vão livre das vigas principais e conseqüente deflexão/tensão maiores nesta etapa do que nas demais.

Com isso, o dimensionamento do módulo considera uma análise prévia, ainda na etapa do projeto básico, fundamentada por esta etapa de içamento do módulo (*Lifting*).

Seguindo o mesmo raciocínio, esta etapa de içamento do módulo também será considerada como base para a “otimização” estrutural, onde sabemos que se a estrutura resistir às solicitações nesta etapa crítica, conseqüentemente resistirá às demais etapas, mesmo que ocorram modificações nos arranjos dos *boogies* ou dos suportes no convés da Balsa transportadora, por exemplo.

3. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO

Com auxílio de uma ferramenta computacional de modelagem e análise estrutural foi feito o modelo do módulo de remoção de CO₂ (*CO₂ removal Unit*), representado através de nós, membros e elementos de placa. Para cada etapa operacional foram inseridas as condições de contorno apropriadas além das diferentes cargas atuantes na estrutura, sendo estas estáticas ou dinâmicas, externas ou a partir de elementos componentes do módulo.

Contudo, o número de análises foi dividido em função do número de diferentes configurações as quais o módulo foi submetido, admitindo que desde a saída deste módulo do canteiro de obras, onde foi ocorreu sua montagem(Niterói-RJ), até a região de operação fixado ao convés da FPSO(etapa *in place*), existem diferentes arranjos no que diz respeito ao número de apoios e forças atuantes na estrutura.

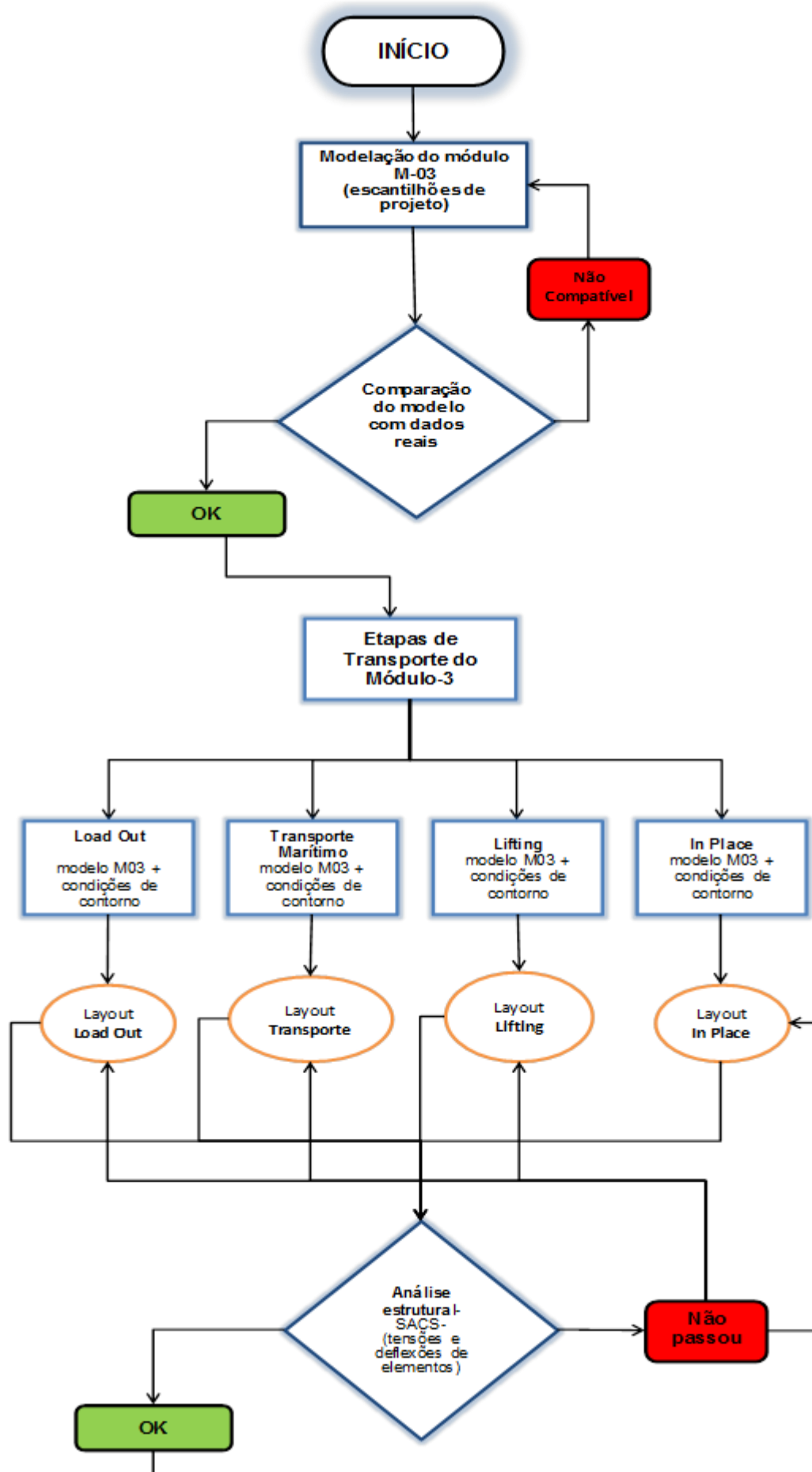
O software utilizado para a modelação e análise estrutural foi o SACS v5. 3, que é dividido em pacotes de funções específicos para modelagem e visualização de resultados. Todas as considerações, modelo de cálculo e regras, ou normas, utilizadas por este software serão devidamente explicitadas, se pertinentes ao estudo.

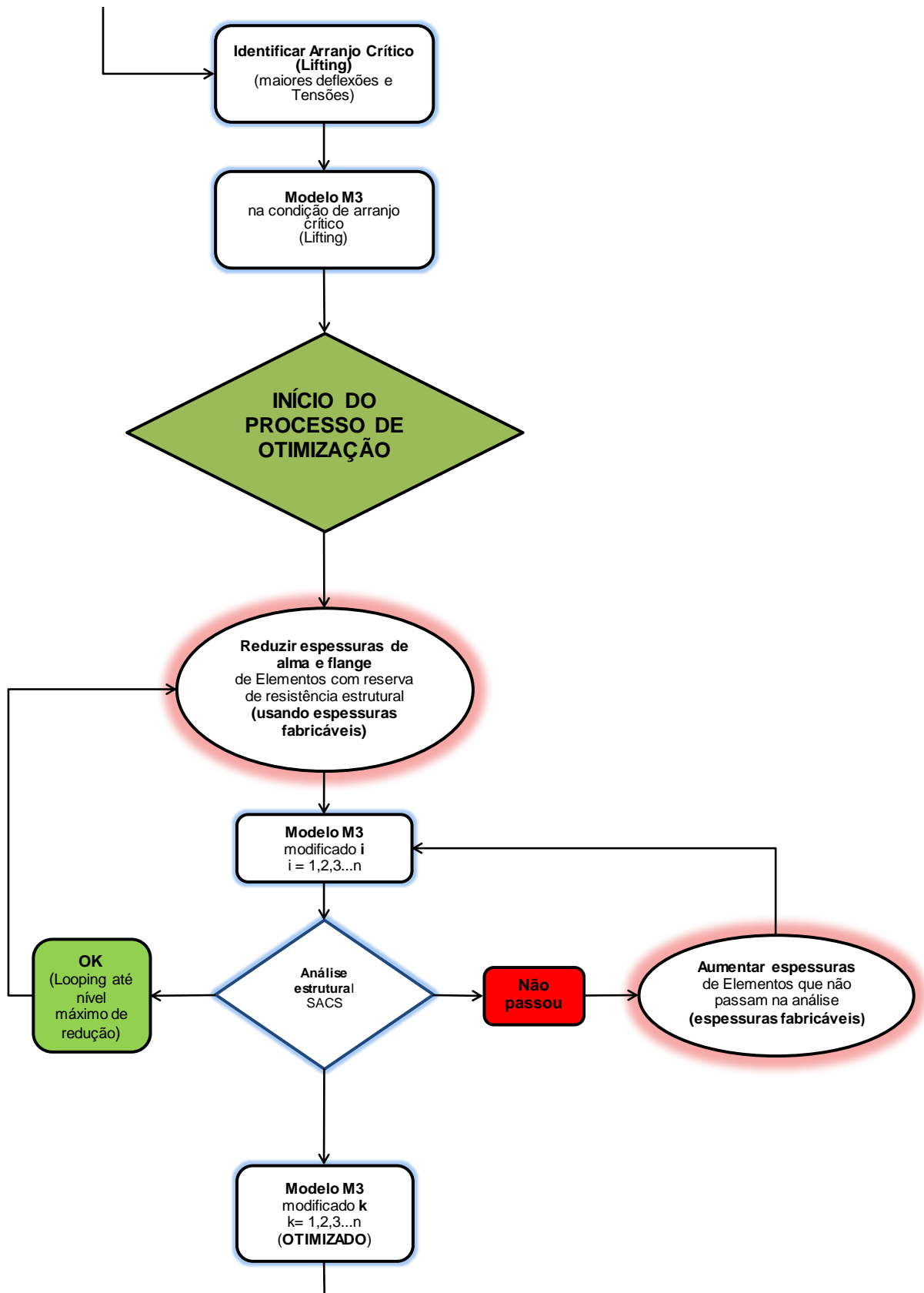
Feitas as análises e identificados os pontos críticos com limites de tensão ou deslocamentos excedentes aos de regra, mudam-se os *layouts* de transporte do módulo visando a melhor distribuição de cargas.

A partir disso, agora no âmbito da “otimização” propriamente dita, obtemos a condição crítica (etapa de *Lifting*) dentre todas as etapas do transporte do módulo, baseado nos níveis de tensões observados na saída do programa de análise estrutural. Esta etapa será a escolhida como base para o processo de “otimização” estrutural.

Contudo, este processo consiste na busca iterativa da redução do aço estrutural utilizado. Como estratégia deste procedimento, alteram-se as espessuras da alma e flange dos reforçadores primários e secundários da estrutura original do módulo, de forma a reduzir o peso total de aço estrutural. Feito isso, faz-se a análise deste modelo “otimizado” sofrendo os carregamentos, e submetido às condições de contorno da etapa de içamento (*Lifting*). Logo, a variável de mérito desse processo iterativo de redução do aço estrutural utilizado, é o peso final do módulo, uma vez que: $\text{Peso total final} < \text{Peso total inicial}$, e ainda assim atender as tensões e deformações previstas pela regra, e aplicadas a esta análise.

Abaixo um fluxograma traduzindo a estratégia de modelação estrutural do módulo, na etapa inicial de projeto, até o processo iterativo de redução de aço estrutural, que traduz a “otimização”, que é objetivo principal deste trabalho. Logo:





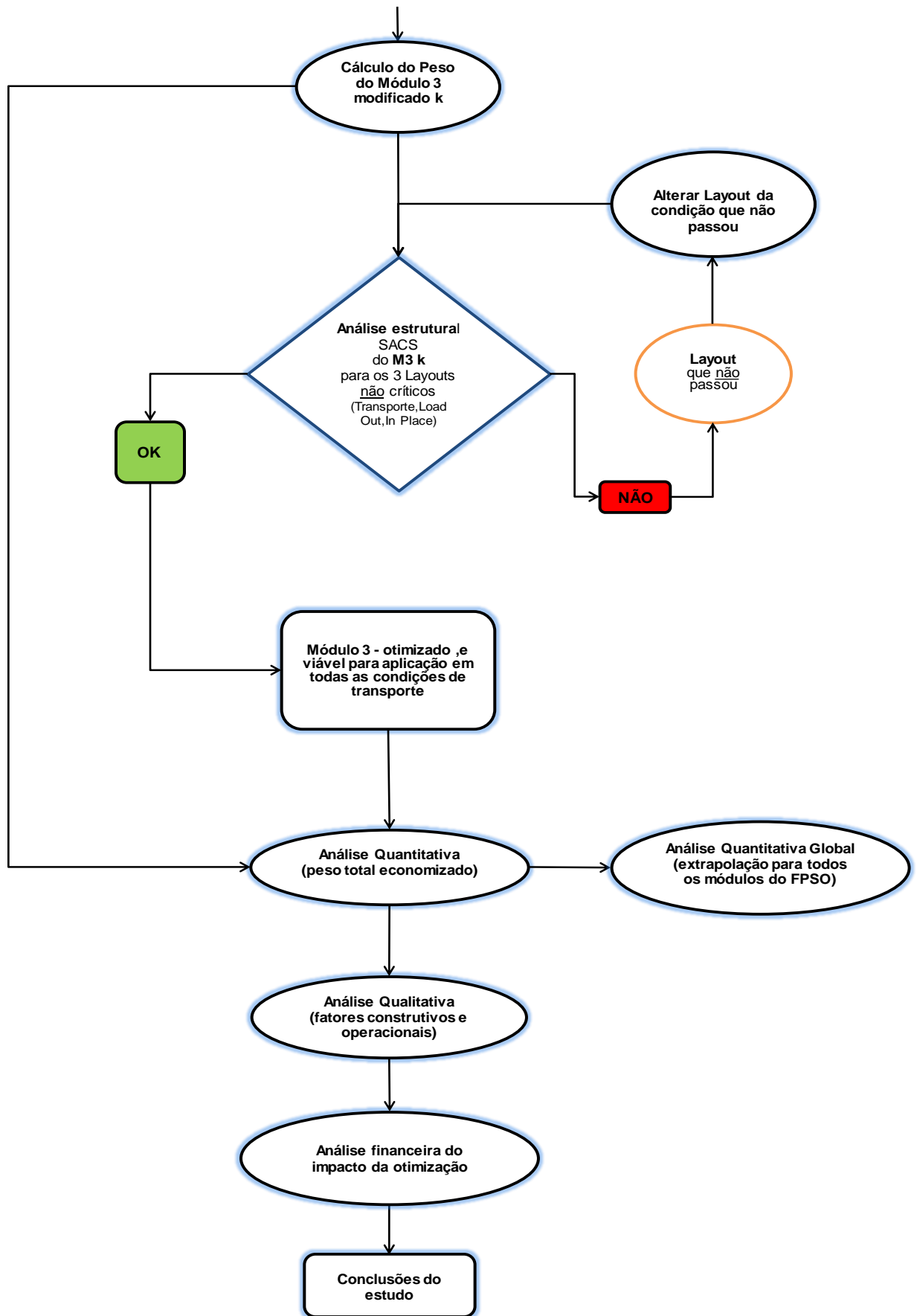


Figura 26 – Fluxograma das análises a serem realizadas para o módulo da P-58

3.1 Considerações Para o Modelo Estrutural

Deve-se fazer, por parte do projetista da estrutura do módulo, uma verificação (análise estrutural) quanto à integridade da estrutura projetada em cada uma das etapas já mencionadas. Mesmo que a etapa de Lifting seja a única etapa considerada para a “otimização” do módulo, por se tratar da mais crítica, a explicitação do modelo computacional para cada uma das etapas e sua relação entre a situação real e a modelada é fundamental para uma análise qualitativa consistente ao final deste processo de otimização estrutural, que é o foco deste presente trabalho.

Contudo, as etapas a seguir compreendem o modelo original (com espessuras de projeto) do módulo de remoção de CO₂ (*CO₂ removal unit*), e todos os dados de saída destas análises já estavam à disposição para consulta, anteriormente ao ímpeto da tentativa de “otimização” estrutural do módulo. Contudo, julgou-se importante uma descrição de cada uma destas etapas envolvidas no projeto do módulo, afim de, como objetivo secundário do presente trabalho, instruir a correta correlação entre condição real e modelada das etapas envolvidas (Load Out, Transporte Marítimo, Içamento e Módulo Na Plataforma).

Nestas análises considera-se a atuação de cargas estáticas e dinâmicas, sendo que a representação de carregamentos dinâmicos, no modelo adotado, é através da aplicação de um fator de aumento da carga estática, visando à representação deste efeito dinâmico real no modelo computacional. Estes carregamentos, tanto estáticos quanto dinâmicos, que o suporte estaria submetido em cada etapa, são baseados na ação do peso próprio, peso de equipamentos, força do vento, acelerações devido ao comportamento no mar, etc.

Contudo, fatores de resposta como tensão nos perfis estruturais e deflexão dos painéis (chapeamento + reforçadores) foram os elementos de restrição de cada etapa, onde o critério de tensões de vigas se baseia em: tensão atuante < tensão admissível. E, critério de deformações: deformação existente < deformação admissível.

Além disso, o dimensionamento do módulo da plataforma FPSO em questão é baseado ,quando aplicado, nas seguintes regras e códigos:

- 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. (Não aplicada a etapa de Load Out)

A modelação computacional do módulo e as análises estruturais envolvidas em cada uma das etapas listadas, foram realizadas utilizando o software SACS 5.3 – pertencente a Bentley.

Neste Ponto, também é importante explicitar o conceito do projeto de estruturas offshore através do método WSD (*Working Stress Design*), pois será a regra que estabelece o critério das tensões admissíveis na análise e verificação da nossa estrutura no modelo computacional. Com isso, temos a consideração dos seguintes parâmetros no método WSD:

- Método WSD (*Working Stress Design*)

Neste método, o nível de segurança que uma estrutura oferece em determinado carregamento atuante é definido comparando-se o máximo carregamento aplicado com a tensão máxima permitida em determinado elemento estrutural. Esta tensão máxima permitida é definida pelo produto da tensão de escoamento do material (aço estrutural) multiplicado por um fator denominado fator de tensão máxima admissível, definido, pela regra da DNV, por:

$$\eta_p = \beta \eta_0$$

β = Coeficiente dependente do tipo do elemento estrutural, modo de falha e esbeltes, dado pela seguinte tabela:

Tabela 1 – Tabela de coeficientes β em função do tipo de estrutura e esbeltez

Table C1 The coefficient β for shell buckling			
<i>Type of structure</i>	$\lambda \leq 0.5$	$0.5 < \lambda < 1.0$	$\lambda \geq 1.0$
Girder, beams stiffeners on shells	1.0	1.0	1.0
Shells of single curvature (cylindrical shells, conical shells)	1.0	$1.2 - 0.4 \lambda$	0.8
Spherical shells	0.8	$0.96 - 0.32 \lambda$	0.64

Note that the slenderness is based on the buckling mode under consideration

Onde:

λ = é o fator de redução de esbeltes.

η_0 = fatores básicos de tensão admissível, dados pela tabela a seguir:

Tabela 2 – Tabela de fatores básicos η

Table D1 Loading conditions	
<i>Case</i>	<i>Description</i>
a)	functional loads
b)	maximum combination of environmental loads and associated functional loads
c)	accidental loads and associated functional loads
d)	annual most probable value of environmental loads and associated functional loads after credible failures, or after accidental events
e)	annual most probable value of environmental loads and associated functional loads in a heeled condition corresponding to accidental flooding



Table E1 Basic usage factors η_0					
<i>Loading conditions</i>					
	<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>c)</i>	<i>d)</i>	<i>e)</i>
η_0	0.60 ¹⁾	0.80 ¹⁾	1.00	1.00	1.00
1) For units unmanned during extreme environmental conditions, the usage factor η_0 may be taken as 0.84 for loading condition b).					

A aplicação destes fatores contabiliza:

- Possíveis desvios desfavoráveis na aplicação das cargas.
- A probabilidade reduzida de vários carregamentos atuarem simultaneamente.
- Incertezas no modelo analítico para determinação dos efeitos das cargas atuantes.
- Possíveis desvios desfavoráveis na resistência dos materiais adotados no cálculo.
- Possíveis reduções na resistência dos elementos estruturais adotados.

3.1.1 Modelo Computacional (Real X Modelo)

Neste *software* os elementos estruturais reforçadores (Vigas, Coluna, e Diagonais) são representados por elementos de pórticos espaciais com 6 graus de liberdade nos nós (três de translação e três de rotação). Para o chapeamento do convés, são representados no programa por elementos de placa, que são definidas por três ou quatro nós, e tem 6 graus de liberdade por nó.

Todos os cálculos realizados neste programa são estáticos. No entanto, nas etapas onde a situação real prevê forças dinâmicas, tais como a etapa do transporte marítimo, por exemplo, onde o movimento da embarcação no mar implica uma carga dinâmica na estrutura do módulo, temos que estas cargas são representadas no modelo através da multiplicação de fatores de amplificação das cargas estáticas. Logo, todas as cargas estáticas (peso próprio, peso de equipamentos, etc) são combinadas e multiplicadas pelos seus respectivos fatores de aumento de carga, da seguinte forma:

$$LDCOMB = \sum_{i=1}^n LDBasic(i) \times Fator(i)$$

Onde:

LDCOMB = Combinação de todas as cargas básicas (estáticas) considerando as eventuais movimentações da estrutura (*Load Combined*).

LDBasic = Cargas básicas cujo módulo está sujeito (peso próprio, peso de equipamentos, peso de transeuntes, etc.).

Fator = Fator de amplificação da carga visando considerar os efeitos dinâmicos na estrutura.

Além disso, o modelo é construído a partir de nós (*joints*), membros (*members*) e placas (*plates*), onde os dados de output do programa são para a localização dos nós definidos no modelo. Cada etapa possui suas condições de contorno que são função da situação real da operação. No programa as condições de contorno são representadas pelas restrições (*constraints*) que representam os 6 graus de liberdade possíveis de um nó, e caracterizados por 0-livre ou 1-fixo. Logo, para a condição *in place*, por exemplo, os apoios tubulares que ligam o módulo ao convés do FPSO estão soldados nesta embarcação, logo serão representados no modelo como pontos engastados e com a configuração X=1, Y=1, Z=1, RX=1, RY=1, RZ=1 ou (111111) onde X, Y e Z são as translações nos três eixos e RX, RY e RZ as rotações nestes mesmos eixos.

Com isso, basicamente a representação do real no modelo se baseia na boa leitura das cargas atuantes e nas condições de contorno a serem consideradas em cada etapa, visando que a sua representação no modelo seja a mais fiel possível com um nível de aproximação de resultados aceitável, mas ao mesmo tempo fazer uso da simplificação de elementos visando praticidade e agilidade na resposta.

Para todas as condições temos em comum as seguintes cargas representadas no modelo:

- Peso Próprio (*Dead weight*):

Consiste no somatório do peso de aço utilizado na confecção da estrutura do módulo incluindo elementos estruturais reforçadores, chapas, solda, pintura e outros possíveis acessórios.

No software, após a modelação do módulo, o peso da estrutura é gerada automaticamente e se baseia no material aplicado aos reforçadores e na seção destes elementos. Para a contabilização de solda e pintura a densidade do aço imputada foi de 8,1KN/ m³ e um fator de contingência de 15% são utilizados para contabilizar

elementos não modelados. Estes valores são fruto da prática e experiência profissional em engenharia ao longo dos anos, por parte dos profissionais da área.

- **Peso de Equipamentos:**

Contabiliza todos os equipamentos operacionais deste módulo e que irão ser partes componentes do processo de prospecção e produção de petróleo da plataforma FPSO. Nesta análise os equipamentos foram considerados secos, sem combustíveis ou lubrificantes.

As cargas representativas dos pesos destes equipamentos, no modelo, foram inseridas de forma distribuída ou concentrada, dependendo da topologia estrutural da região da união entre o equipamento e o módulo. A representação dos equipamentos no modelo foram através de elementos de formas simples, como cilindros de peso equivalente ao peso real dos equipamentos, por exemplo. A representação destes elementos será devidamente representada na modelação propriamente dita no programa.

- **Peso de *Outfitting*:**

Na contabilidade do peso de *Outfitting* as seguintes disciplinas foram contabilizadas: Elétrica, instrumentação, tubulação, segurança e telecomunicações.

No software, esta carga foi aplicada de forma distribuída e uniforme ao longo de toda a estrutura do módulo modelado.

3.2 Geração do Modelo de Elementos Finitos

Para a modelagem propriamente dita, seguimos as seguintes etapas:

- 1º Etapa: Consulta aos desenhos e planos do projeto para verificação dos escantilhões a serem utilizados no modelo.
- 2º Etapa: Definição e posicionamento dos nós (joints) no modelo para posterior criação dos membros (*members*) que são delimitados por dois nós e definem um elemento estrutural.

- 3º Etapa: Criação dos grupos de seções referentes à 1º etapa, assim como a criação das propriedades dos materiais envolvidos na modelação (aço).
- 4º Etapa: Inserção dos elementos de chapa (plate elements) delimitados por quatro nós e que terão as propriedades do material da 2º etapa.
- 5º Etapa: Representação simplificada, no modelo, de equipamentos apoiados em elementos estruturais (membros ou chapas).
- 6º Etapa: Aplicação das cargas envolvidas atuantes no módulo (Estática e, ou, representação da dinâmica).
- Análise: Obtenção dos dados de resposta do programa no que diz respeito às deflexões máximas e tensões nos elementos componentes do módulo modelado.

Esta ordem de modelação pode ser aplicada a qualquer uma das 4 etapas de análise presentes neste trabalho (*Load Out, Transporte Marítimo, Lifting e In Place*)

3.2.1 Planos e Relatórios de Referência do Módulo

A ocorrência de erros na modelação estrutural de um elemento com certo grau de complexidade, que é o caso de módulos de uma plataforma, é reduzida à medida que o número de informações sobre este módulo é aumentado. Sendo assim, é de extrema importância o grau qualitativo e quantitativo dos planos-base para a modelagem do módulo.

Para o presente modelo do módulo, utilizaram-se os seguintes planos e relatórios (*reports*):

- Plano 1 – Vista isométrica do módulo
- Plano 2 – Estrutura primária do 1º convés do módulo
- Plano 3 – Estrutura primária do 2º convés do módulo
- Plano 4 – Seções Longitudinais da estrutura do módulo
- Plano 5 – Seções Transversais da estrutura do módulo
- Plano 6 – Detalhes estruturais dos elementos do módulo

- Plano 7 – Detalhes estruturais dos elementos do módulo
- Relatório de controle de Peso do módulo – Weight Control Report
- Relatório das deformações do convés do FPSO – *Global Sectional Deflections*
- Relatório do contexto operacional e fatores a serem adotados– *Topside Structural Design Basis*.

Abaixo algum dos planos que foram utilizados para base na modelação do módulo, principalmente para tomada das dimensões dos reforçadores primários e secundários do mesmo:

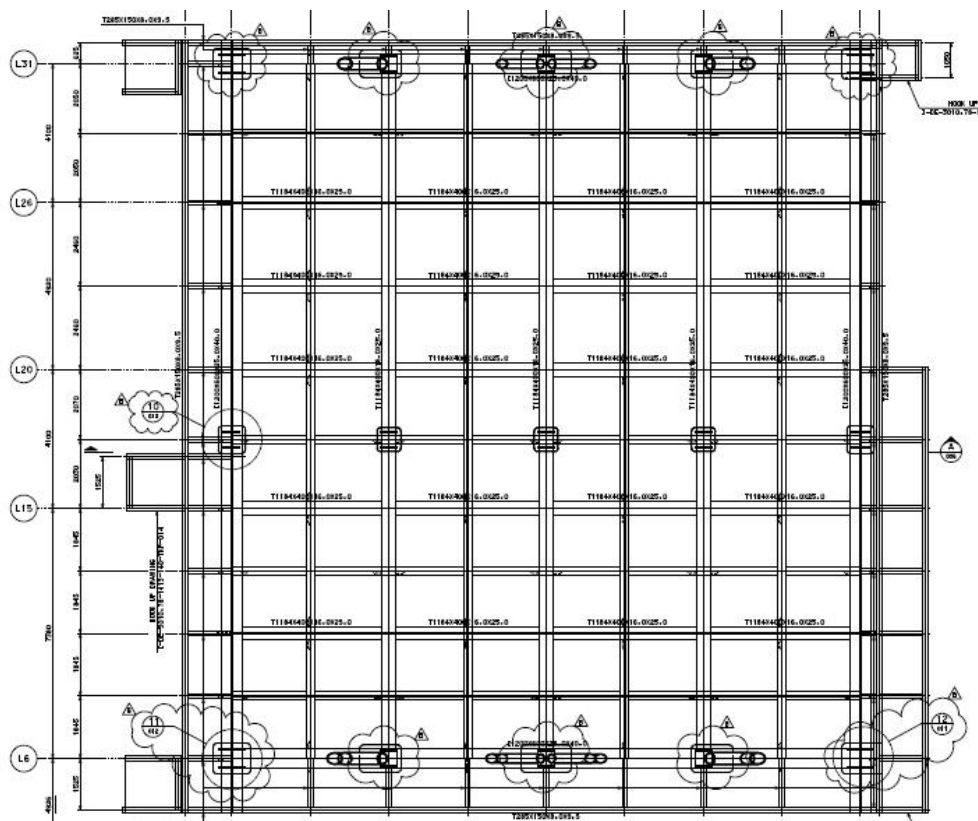


Figura 27 - Vista superior do primeiro convés (1st Deck) do módulo

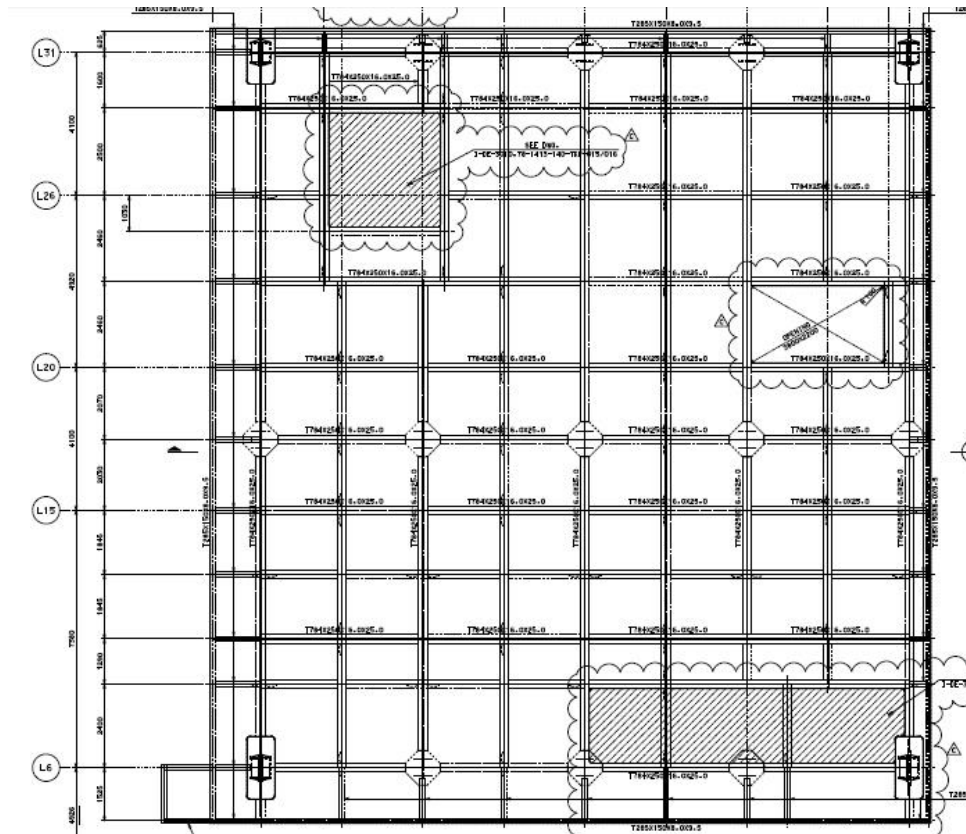


Figura 28 - Vista superior do segundo convés (2st Deck) do módulo

3.3 Modelo Para Embarque (*Load Out*)

Nesta condição de *Load Out* não fazemos a consideração de cargas dinâmicas, uma vez que a movimentação do Boogie é lenta e as movimentações da balsa atracada, em relação ao módulo sobre estes grupamentos do Boogie são consideradas desprezíveis. Além disso, forças ambientais de vento também não são consideradas nesta etapa, uma vez que esta é uma operação abrigada, realizada no cais e pode ser interrompida caso a velocidade do vento aumente em níveis que iriam ter influencia significativa na estrutura do módulo apoiado no conjunto hidráulico de transporte.

Além disso, as expectativas desta fase do projeto devem ser atendidas com base, principalmente, nos seguintes critérios de avaliação, normas e códigos:

- Noble Denton – Report N° 0013/NDI – Guidelines for Load outs. April 2002
- DnV Rules for Planning and Execution of Marine Operations, Part 2, Chapter 1 – Load Transfer Operations, January 1996.

Estas normas estabelecem requisitos bem como recomendações operacionais e técnicas para o bom andamento do processo de transferência do módulo para a balsa (operação de *Load Out*). É importante destacar que a operação de *Load Out* não é necessariamente realizada por *boogies*, podendo também ser realizadas por guindastes que transferem o módulo para a balsa através do içamento, por exemplo.

3.3.1 Condições de Contorno no Modelo- *Load Out*

Na condição real de operação, o módulo está apoiado sobre os grupamentos hidráulicos (*boogies*), contudo existem algumas armações de madeira denominadas “fogueiras”, visando a melhor transferência de cargas entre módulo e superfície de contato com o *boogie*. Esta configuração é representada no programa computacional por elementos conectores com a função de ligar estruturalmente o módulo ao *boogie*, contudo os mesmo possuem uma densidade muito pequena (0,00001 ton/m³), portanto sem influência no peso total do módulo.

Estes perfis conectores são denominados de elementos de GAP, e são artifícios utilizados pelo modelador para representar de forma fiel e simples a ligação das duas estruturas. O mesmo conceito é utilizado na transferência do peso dos equipamentos para a estrutura, como será ilustrado posteriormente, além dos próprios grupamentos de *boogie*, que também são representados por elementos de viga “I” com densidade desprezível, e dimensões compatíveis com as dimensões dos *boogies*.

3.3.2 Relações entre Modelo X Real - *Load Out*

Como já explicitado, existem algumas considerações a serem feitas no modelo visando simplificar a modelagem no programa. Contudo, esta simplificação não descaracteriza a relação com a situação real. Temos as seguintes considerações nesta etapa:

- *boogies* e Fogueiras

Para esta modelação, os *boogies* foram representados por vigas de perfil “I” ,com as seguintes dimensões:

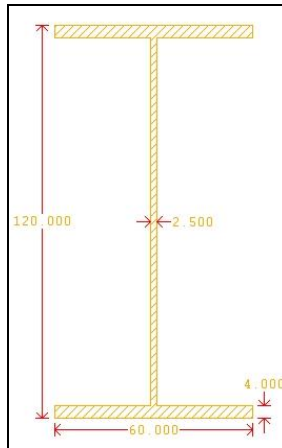


Figura 29 – Seção transversal da viga representativa do *boogie*

Observamos no modelo a mesma no plano mais inferior e os elementos verticais que ligam esta viga, que representa o *boogie*, com o primeiro convés do módulo (em verde na figura abaixo):

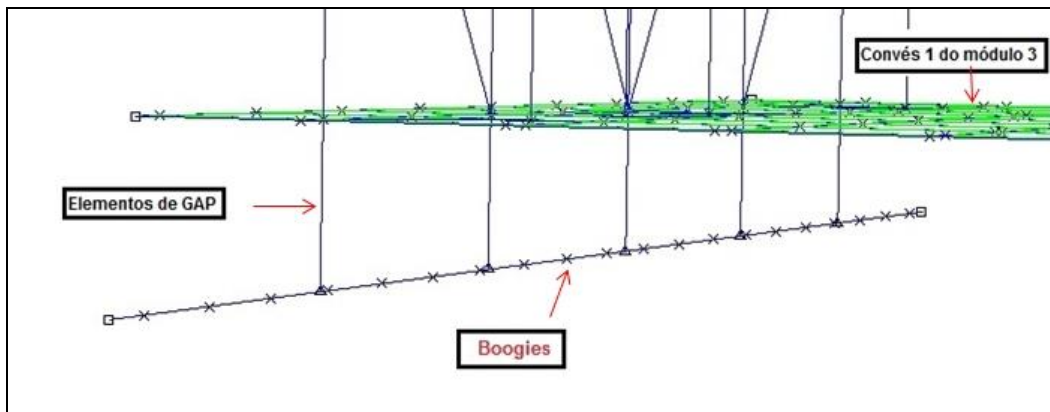


Figura 30 – Vista do modelo indicando o *boogie* e sua ligação com o módulo

Os elementos de Gap representam as “fogueiras” na situação real e representam o elemento de transferência das cargas entre os grupamentos de *boogie* e o módulo.

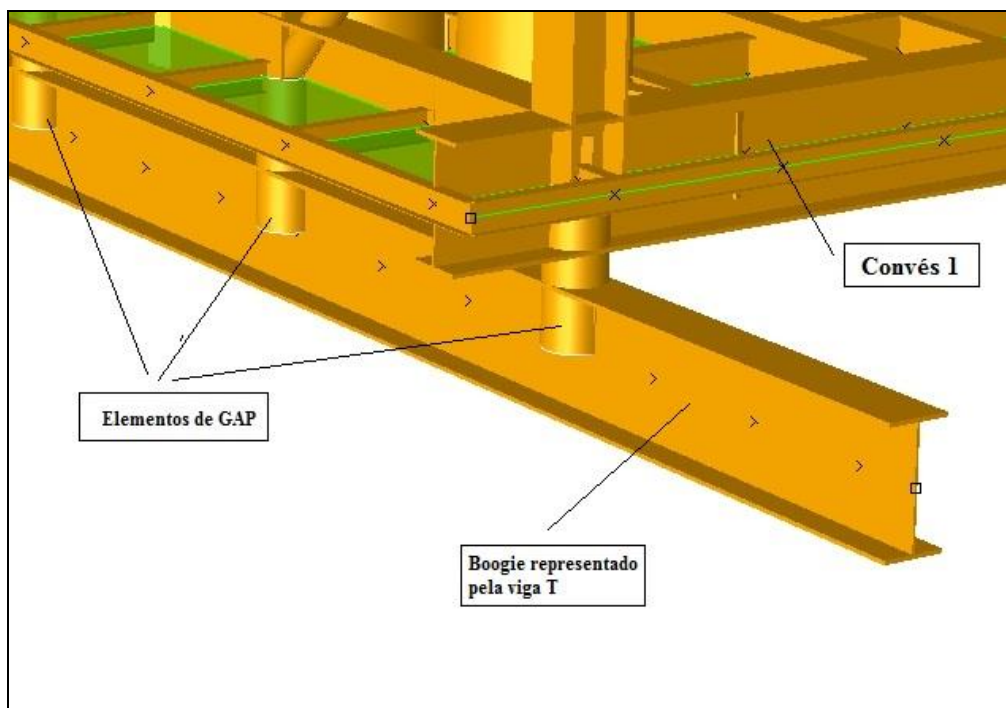


Figura 31 – Vista do modelo indicando o *boogie* e os elementos de ligação(GAP)

Como condição de contorno, observando a figura abaixo, temos as seguinte configuração:

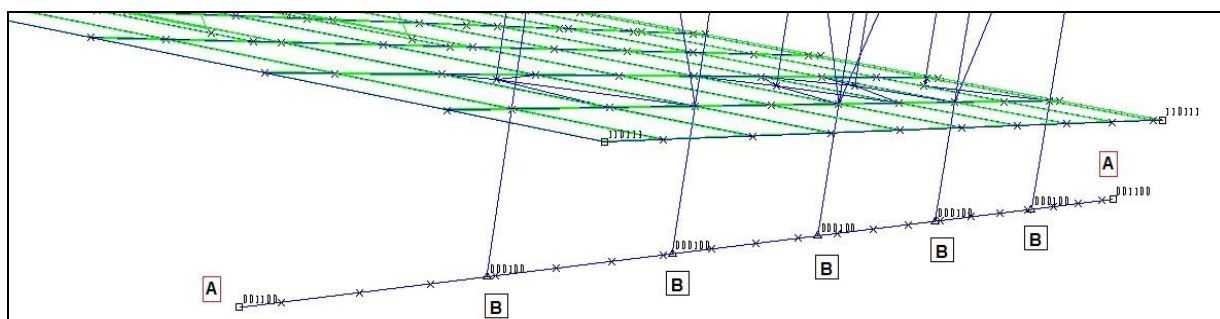


Figura 32 – Condições de contorno do *boogie* impostas no modelo

Onde os pontos com a indicação “A” são os de extremidade e os com a indicação “B” os de ligação com a estrutura do módulo, lembrando que esta é a vista de um dos boogies que é equivalente e simétrico ao outro *boogie* da outra metade deste arranjo de Load Out.

Logo, temos os seguintes valores:

Ponto A (extremidades do modelo): (0, 0, 1, 1, 0,0).

Fixo na translação em Z, e na rotação em X. Livre nas demais.

Ponto B(pontos dos elementos de GAP): (0, 0, 0, 1, 0,0).

Fixo na Rotação em X. Livre nas demais.

Temos a consideração do seguinte eixo de coordenadas, que coincide com o eixo de referência do navio (FPSO):

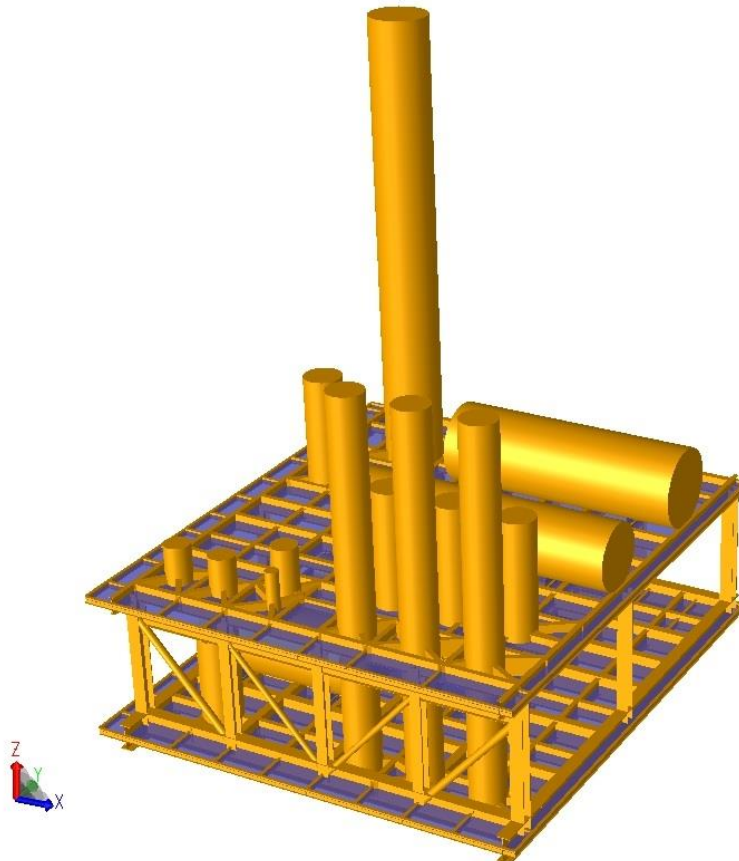


Figura 33 – Vista isométrica do modelo e o eixo de coordenadas adotado

Onde:

Eixo global X: Alinhado com o eixo longitudinal do FPSO (positivo para vante).

Eixo global Y: Alinhado com o eixo transversal do FPSO (positivo para bombordo).

Eixo global Z: Alinhado com o eixo vertical do FPSO.

Além disso, temos as seguintes características e propriedades da viga que representam o *boogie*, no modelo do SACS:

Section label	I120X60	Edit
Outside diameter (cm)		
Wall thickness (cm)		
E (kN/cm ²)	20000.	
G (kN/cm ²)	8000.	
F _y (kN/cm ²)	34.5	
Density (tonne/m ³)	0.00001	
Segment length (m)		
Tensile strength (kN/cm ²)		
\$ <input type="checkbox"/> Flooded member		

Figura 34 – Características da Viga que representa o Boogie

Observe que a densidade tem valor de 0,00001 toneladas por metro cúbico. Este valor visa que o peso do *boogie* não seja considerado pelo programa.

- Equipamentos e seus suportes

Para a modelação dos equipamentos presentes no módulo, foram estabelecidos elementos (formas cilíndricas na figura abaixo) com dimensões principais equivalentes às dos equipamentos reais, de forma a utilizar no modelo os efeitos desta distribuição de carga nos suportes e elementos estruturais diretamente ligados.

De forma equivalente à modelação da viga-*boogie*, foram modelados elementos ligados a estes equipamentos com densidades muito pequenas, visando apenas à transferência das cargas do equipamento para a estrutura do módulo.

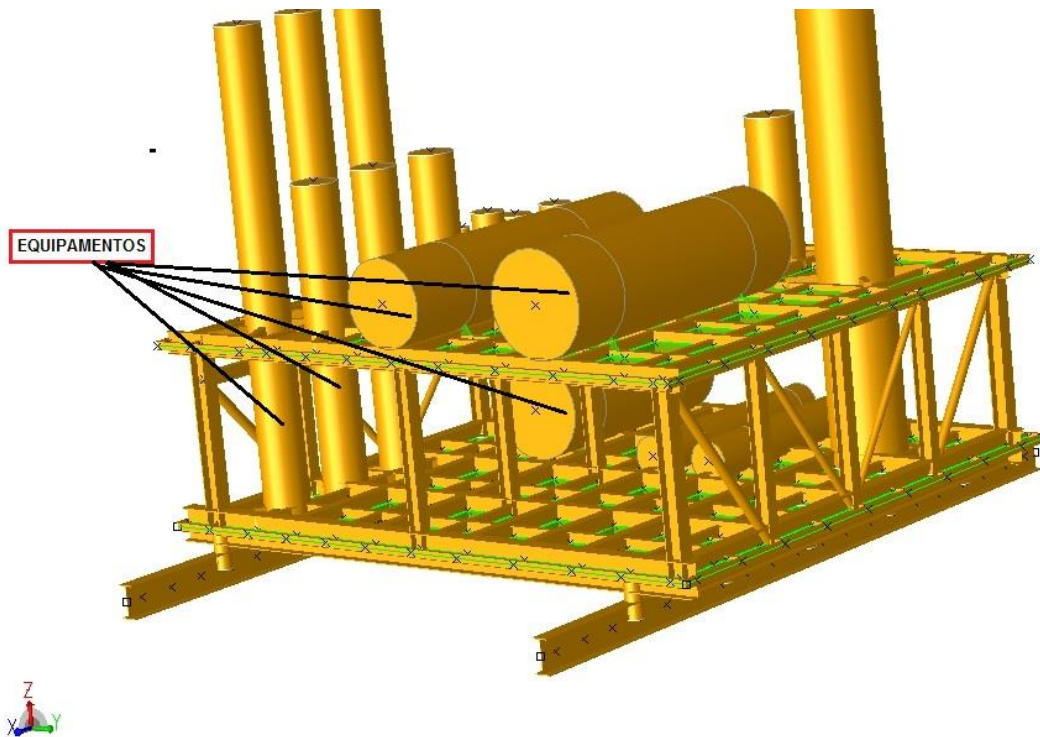


Figura 35 – Equipamentos representados no modelo SACS

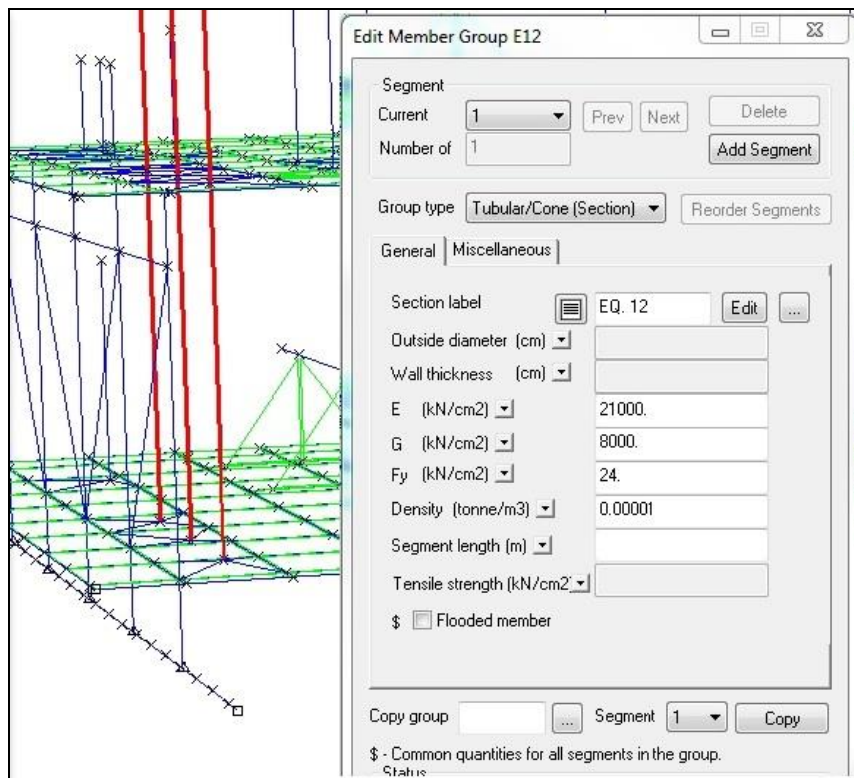


Figura 36 – Características de alguns dos equipamentos modelados no programa

3.3.3 Arranjo do Módulo sobre *Boogies*

O arranjo final é composto pelo módulo sobre duas linhas de *boogies*, onde o contato entre o veículo e a estrutura do módulo é realizado através de “fogueiras” que são trechos de madeira arrançados de forma transversal e longitudinal, a fim de aliviar as concentrações de tensões neste ponto de contato. Abaixo um arranjo ilustrativo desta etapa:

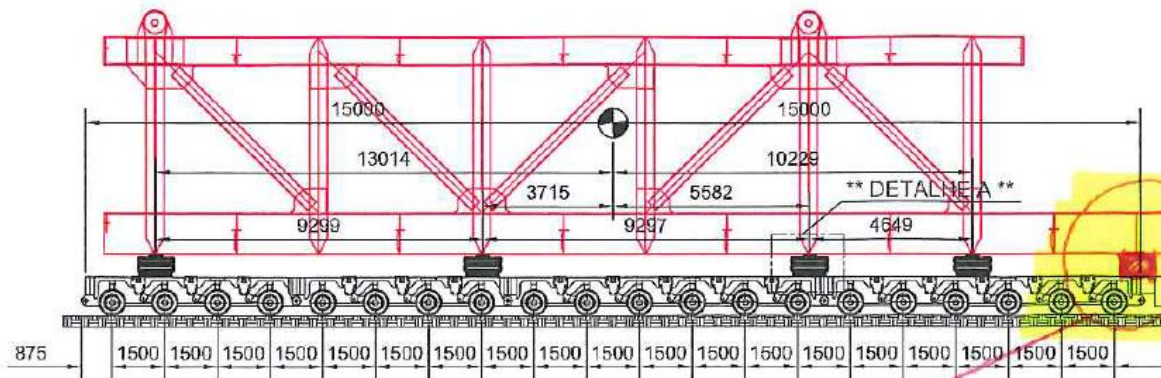


Figura 37 – Vista lateral de um módulo de plataforma sobre *boogies*

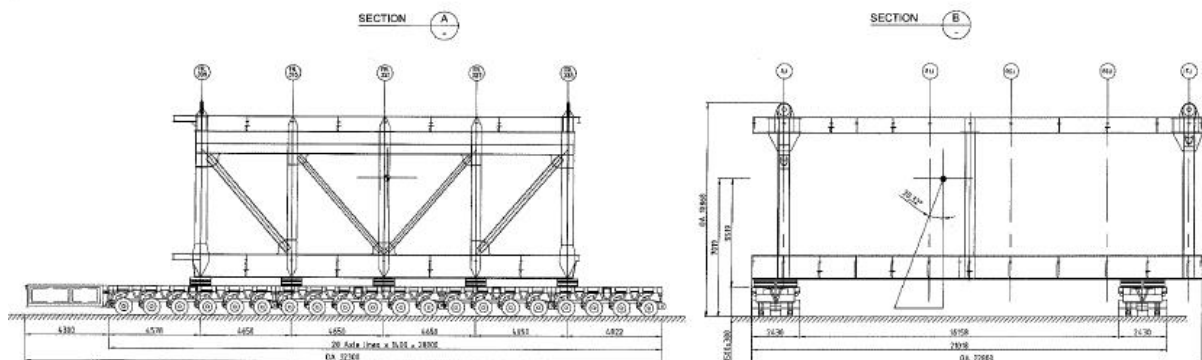


Figura 38 – Vista lateral e frontal do módulo sobre os *boogies*

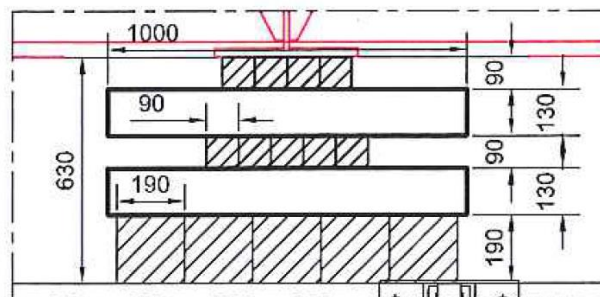


Figura 39 – Vista frontal da fogueira e suas seções de madeira

É importante destacar que os pontos de apoio entre o módulo e o *boogie* (posição das fogueiras) devem ser posicionados coincidentes com cruzamentos de elementos reforçadores gigantes, uma vez que esta região apresenta maior resistência estrutural.

- Posicionamento e análise de equilíbrio

Além disso, devemos realizar nesta fase uma análise de equilíbrio estático entre a estrutura e o posicionamento do *boogie*, e até mesmo o número de linhas deste veículo. Logo, para este projeto, temos a seguinte consideração:

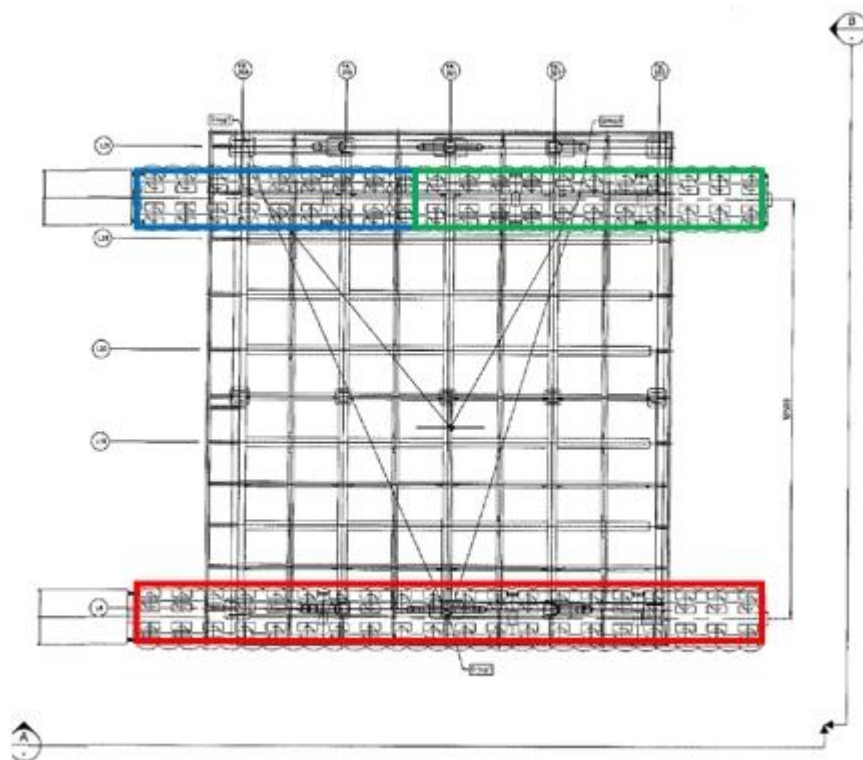


Figura 40 – Vista superior do módulo e dos grupamentos de *boogies*

Note que os vértices desta figura estão posicionados no centro dos grupamentos dos *boogies*, e o centro de área desta figura quando coincidente com o centro de gravidade do módulo oferece a condição de estabilidade mais favorável possível. Logo, estas considerações nos ajudam a estabelecer se o posicionamento e número de *boogies* escolhidos para a operação de *Load Out* são satisfatórios, ou não, baseadas nos somatórios de forças e momentos.

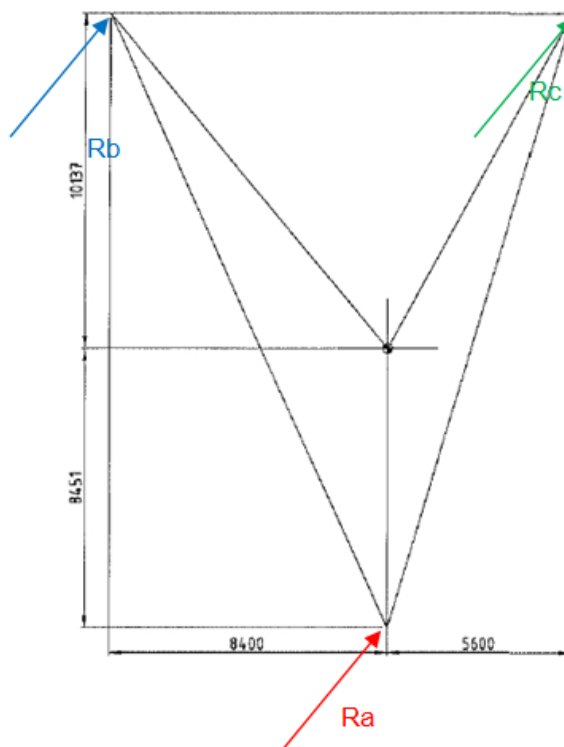


Figura 41 – Balanço triangular das reações nos bogies

Temos os seguintes passos para a formulação para esta configuração triangular:

- 1 – Listagem das forças atuantes na estrutura e sua respectiva posição do centro de gravidade. Neste caso podemos consultar valores reais destas informações, como podemos observar abaixo:

Module:		M03								
DISCIPLINE	Nett Weight	C.O.G Coordinates (m)			Conting. Weight	Conting. %	Gross Weight	C.O.G Coordinates (m)		
		X	Y	Z				X	Y	Z
EL - Electrical	13,680	8,850	9,784	41,325	1,368	10,00	15,048	8,850	9,784	41,325
IN - Instruments	23,932	9,076	9,232	38,881	1,272	5,31	25,204	9,086	9,208	38,871
ME - Mechanical	431,225	9,883	5,683	41,345	21,561	5,00	452,786	9,883	5,683	41,345
PI - Piping	114,436	8,850	9,784	39,900	5,722	5,00	120,158	8,850	9,784	39,900
SA - Safety	0,700	10,300	11,390	37,936	0,119	17,00	0,819	10,300	11,390	37,936
ST - Structural	410,753	9,118	9,990	37,587	17,261	4,20	428,014	9,118	9,990	37,587
TE - Telecomms	1,408	8,850	9,784	41,325	0,239	17,00	1,647	8,850	9,784	41,325

Figura 42 – Pesos e posições do centro de gravidade do módulo

Fazendo relação com a tabela acima fornecida pelo armador e com as considerações feitas no modelo temos que:

$$\text{Peso Próprio} = \text{Structural}(ST)$$

+

$$\text{Peso de Outfitting} = \text{Eletrical} + \text{Instruments} + \text{Piping} + \text{Safety} + \text{Telecomms}$$

+

$$\text{Peso de Equipamentos} = \text{Mechanical}$$

=

$$\text{Peso Total Real} = \text{Peso total no modelo}$$

É importante destacar que para a contabilização das cargas dos diversos equipamentos, onde um pode ser mais pesado que o outro se deva fazer uma consulta com o armador para determinação do peso real de cada um deles. Contudo, a informação obtida da tabela de pesos acima já é um somatório final destes equipamentos, que deve ser o mesmo após a modelação destes no modelo estrutural do módulo.

- 2 – Mapeamento dos pontos “A”, “B” e “C”, que são os centros geométricos dos grupamentos de *boogies*, e considerados três grupamentos para essa configuração de Load Out. Estes pontos iram conter as reações Ra, Rb e Rc, que são as reações dos *boogies* ao peso do módulo. Estes três pontos estabelecem os vértices da figura do balanço triangular.
- 3- Devemos estabelecer as distâncias entre as forças atuantes de reação e aplicadas na estrutura e verificar o equilíbrio do somatório de forças e somatório de momentos. Para isso fazemos uso da consideração de que as reações atuantes nos grupamentos de *boogies* formam um triângulo com vértices “A”, “B” e “C”. Além disso, o numero de rodas presente em cada grupo de *boogie* é importante para verificar a carga atuante em cada roda, visando não exceder a carga máxima permitida pelo equipamento, que é

dado fornecido pela empresa contratada para o fornecimento destes boogies.

Feitas estas verificações de equilíbrio, estabilidade, carga máxima permitida nos *boogies* e arranjo destes veículos respeitando a topologia estrutural do módulo, no que diz respeito aos pontos de contato entre *boogie* e estrutura do módulo (sempre em cruzamentos de elementos primários), podemos partir para a análise computacional desta configuração de Load Out.

3.4 Modelo Para Transporte Marítimo

Na análise do transporte marítimo do módulo do cais até a FPSO, temos como base, além dos previstos pela tapa anterior de Load Out, os seguintes critérios de avaliação, normas e códigos:

- Noble Denton – Report N° 0030/ND – Guidelines for Marine Transportations. April 2009
- DNV – RP – C205 – Environmental Conditions and Environmental Loads, April 2007
- METOCEAN DATA, Rev 0 – Condições ambientais do trecho Niterói-Rio Grande.

Além disso, devemos nos atentar a alguns planos da balsa transportadora como auxílio na tomada de decisões por parte do projetista e criador do modelo do módulo em questão, tais como:

- Arranjo da Balsa de transporte: que orienta no posicionamento dos suportes entre módulo e balsa, no que diz respeito à continuidade estrutural.
- Memória de Cálculo com as Máximas Acelerações da Balsa: Este é um relatório emitido pelo responsável pelo serviço de transporte que serve de dado de entrada para a análise estrutural na etapa de transporte marítimo.

A diferença marcante entre a etapa anterior (Load Out) e atual de Transporte Marítimo, esta no fato da consideração de forças dinâmicas na análise estrutural do módulo. Este acréscimo de cargas é consequência da movimentação da balsa devido à resposta que a embarcação tem sob a ação das ondas da região. Particularmente no caso deste cálculo estrutural, fez-se a consideração de que o projetista responsável pela análise estrutural do módulo na operação de Transporte Marítimo recebia como informação as acelerações máximas da embarcação nas três direções: Ax, Ay e Az.

Contudo é importante destacar que para o caso de não recebimento desta informação da empresa responsável pela barça, poderíamos coletar informações nas condições ambientais da região (Metocean Data) e calcular a resposta da balsa com o módulo sobre seu convés através da relação seguinte relação:

$$\text{Condições de Mar(METOCEAN)} \times RAO^2(\text{Balsa e Módulo}) = \text{Movimentos(acelerações)}$$

No entanto, se faz necessário destacar alguns pontos relevantes no cálculo das acelerações máximas da balsa, para este projeto:

- O Operador amplitude de resposta (RAO) foram considerados para ondas incidentes do ângulo 0 até 360 graus, com um passo de 22,5 graus e uma faixa de períodos de 2 a 30 segundos.
- Os períodos naturais de vibração da embarcação devem ser calculados e evitados a sua proximidade na situação real de operação.
- O risco de se encontrar uma condição extrema de mar, em determinado transporte marítimo é função do tempo total da operação. Logo, se o tempo de operação é reduzido, o risco de encontro de uma situação extrema de mar é similarmente reduzido.
 - Para um transporte de 30 dias (ou mais), a análise prevê uma condição extrema de mar de um período de 10 anos. Como o transporte do módulo de Niterói ao estaleiro Rio Grande é inferior a esse tempo (de 7 a 10 dias), a análise do estado de mar pode ser menos rigoroso obtendo uma condição extrema de mar em 1 ano, e não em 10 anos.

O RAO deve ser gerado a partir do centro de gravidade da balsa com o módulo sobre o convés e considerando as propagações de onda nas direções de zero a 180 graus, com a seguinte referência:

$$\eta = A e^{-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} e^{i\omega t}$$

$$x = 0, y = 0$$

$$\eta = A e^{i\omega t}$$

$$X_n = |X_n| e^{i(\omega t + \varphi_n)} \quad n = 1, \dots, 6$$

$$\text{Re}(X_n) = |X_n| \cos(\omega t + \varphi_n)$$

Onde:

η = elevação de onda

A= Amplitude de onda

β = Ângulo de incidência da onda

ω = Frequência angular da onda

$x=0$ e $y=0$ São posições no plano horizontal

X_n = movimento da plataforma

N= graus de liberdade

Φ = Ângulo de fase

Re (X_n)= Parte real do movimento.

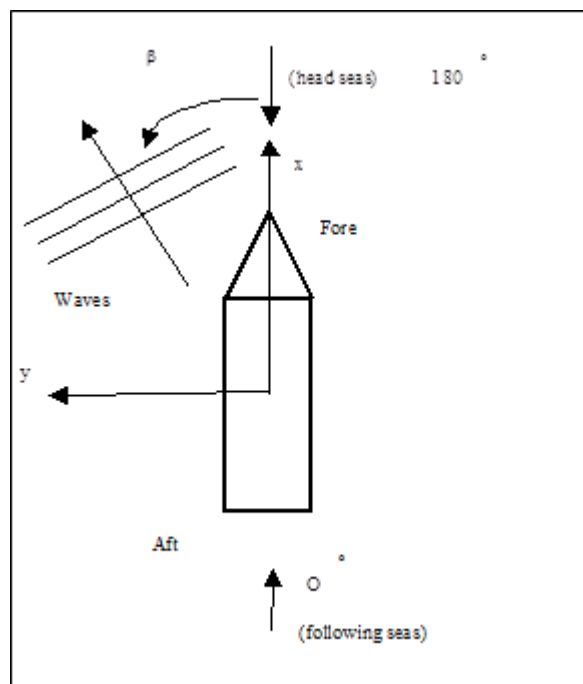


Figura 43 – Definição das direções de incidência de ondas

Feitas essas considerações e utilizando um *software* adequado para a modelação destas análises hidrodinâmicas, a informação principal para a estrutura do módulo são as acelerações máximas em cada direção.

Como mencionado, as cargas dinâmicas são representadas no modelo computacional por cargas estáticas multiplicadas por fatores de aumento destas cargas. Logo, a principal tarefa nesta etapa é definir quais são os fatores de aumento das cargas estáticas que melhor representam as cargas dinâmicas da situação real, consequentes das movimentações da Balsa transportadora. Temos que as acelerações finais seguem a seguinte formulação:

$$a'_l = a_l + g \cdot \sin(\theta_{PitchMax})$$

$$a'_t = a_t + g \cdot \sin(\theta_{RollMax})$$

$$a'_v = a_v + g$$

Onde:

$\theta_{PitchMax}$ É o ângulo máximo de *Pitch* na condição extrema considerada.

$\theta_{RollMax}$ É o Ângulo máximo de *Roll* na condição extrema considerada.

a_l É a aceleração dinâmica máxima longitudinal para o ponto determinado.

a_v É a aceleração dinâmica máxima vertical para o ponto determinado.

a_t É a aceleração dinâmica máxima transversal para o ponto determinado.

g É a aceleração da gravidade (9.81 m/s²)

Contudo, No ambiente da modelagem computacional do software SACS, o que se faz é a análise do peso de todas as cargas estáticas nas três direções (X, Y e Z), inserindo a gravidade na direção X e na direção Y. Uma vez que o software tem este mecanismo de cálculo, basta inserirmos um fator que aumente a gravidade na direção Z e considere acelerações, comparadas com a gravidade(g), nas direções X e Y. Ao final teremos forças atuantes nas 3 direções que são massas multiplicadas por uma aceleração da gravidade reduzida(direções X e Y) e aumentada(direção Z) ,estáticas mas que reproduzem os efeitos de aumento da carga da condição real dinâmica. Logo, o que se faz é comparar a aceleração obtida com a aceleração da gravidade. Assim, temos os seguintes fatores:

Fator X = +- a.x/g ; Fator Y= +- a.y/g ; Fator Z = g + az/g e g – az/g

3.4.1 Condições de Contorno no Modelo- *Load Out*

As cargas atuantes são as mesmas que as previstas na condição de *Load Out*: Peso próprio, Equipamentos e *Outfitting*. Contudo, com seus respectivos fatores de modificação da aceleração da gravidade visando à representação das cargas dinâmicas decorrentes da movimentação da Balsa no mar.

Para esta operação de Transporte Marítimo, inicialmente o módulo deve ser transferido do cais para a balsa e ficar apoiado sobre suportes de aço, de acordo com a figura abaixo:

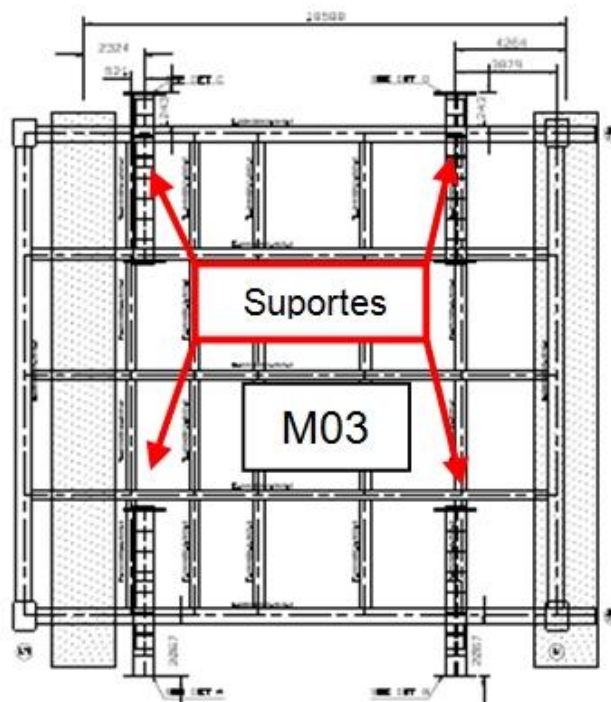


Figura 44 – Vista superior do Módulo Sobre os suportes

Observe que os suportes estão entre os dois grupamentos de *boogies*, e, portanto determinam um vão livre menor do que aquele previsto na etapa de *Load Out*.

Para este projeto, e devido ao máximo aproveitamento da capacidade de carga da balsa transportadora, foram estabelecidos dois módulos sobre o convés desta embarcação, como demonstra a figura a seguir:

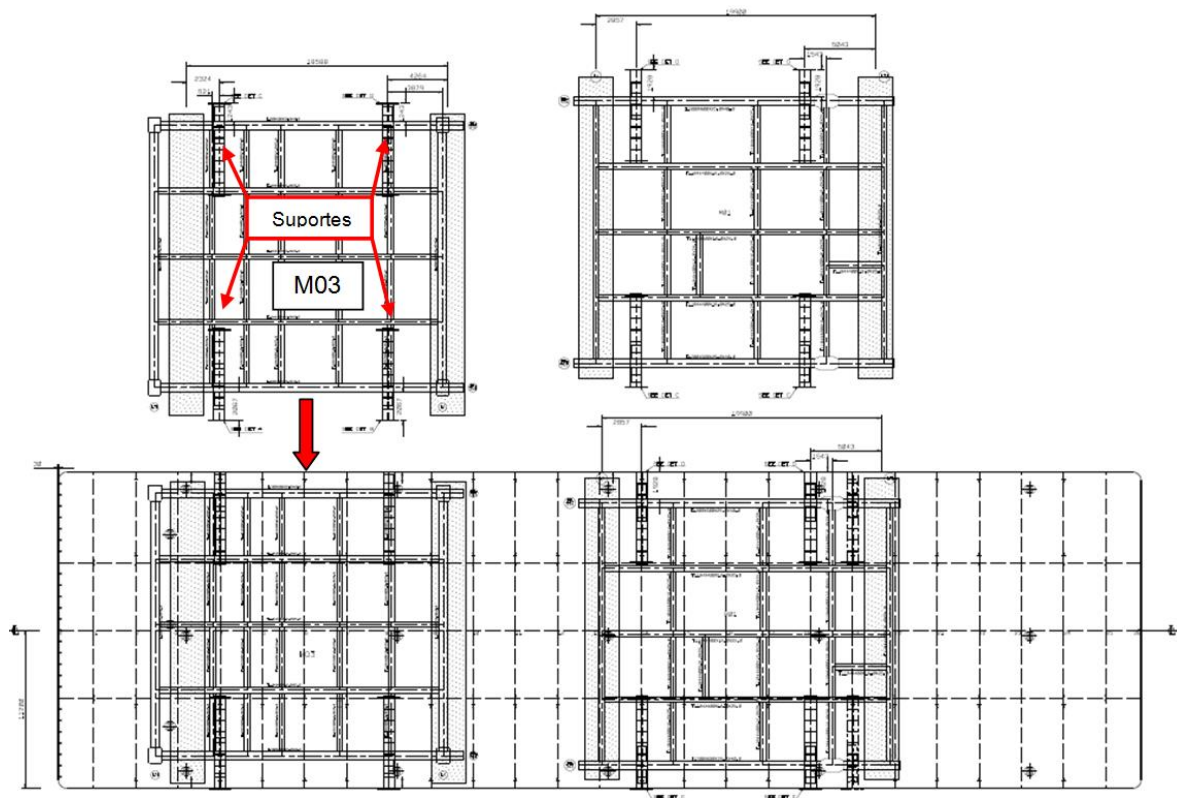


Figura 45 – Vista superior do módulo sobre o convés da balsa transportadora

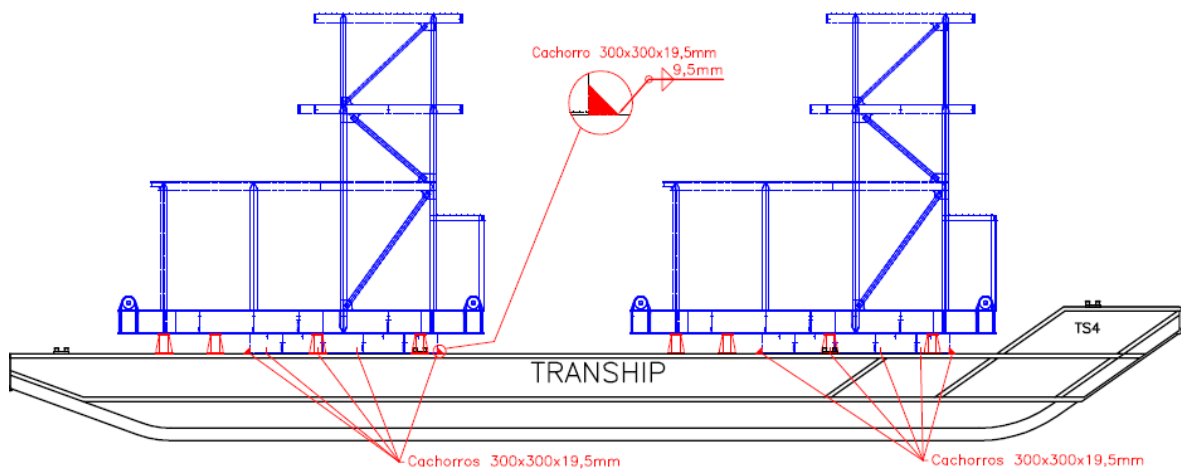


Figura 46 – Vista de perfil dos módulos sobre o convés da embarcação (ilustrativa)

Logo, o módulo estará apoiado sobre os suportes e esta fixação terá o adicional de um sistema de peiação, que não será modelado neste cálculo por não influenciar sensivelmente na expectativa da análise. Além disso, temos como dados fornecidos, informações sobre as máximas acelerações da balsa. A partir delas os fatores de acelerações, que irão servir, no modelo, como representantes da contabilidade da ação dinâmica sobre a estrutura, serão embutidos no modelo computacional. Temos os seguintes fatores de acelerações nas três direções:

ACELERAÇÕES		
<i>A_x</i> (g)	<i>A_y</i> (g)	<i>A_z</i> (g)
0,500	0,200	1,600

Figura 47 – Fatores de acelerações máximas da Balsa na condição operacional adotada

Onde estes fatores representam a divisão das acelerações previstas em um ponto médio da localização do módulo na balsa, dividido pela aceleração da gravidade:

$$Fatores\ de\ acellerações = (A_x; A_y; A_z)/g$$

- Suportes (apoio do módulo sobre a Balsa)

Temos que a representação dos suportes sobre o convés da Balsa traduzidos no modelo a partir de condições de restrições de nós do próprio modelo. Foram considerados na operação real diferentes configurações de apoios, podendo ocorrer um suporte tipo “pata de elefante” e outro mais contínuo, por exemplo. Isto influencia diretamente nas condições de restrição dos nós. Com isso, para este projeto temos os seguintes nós representando os suportes:

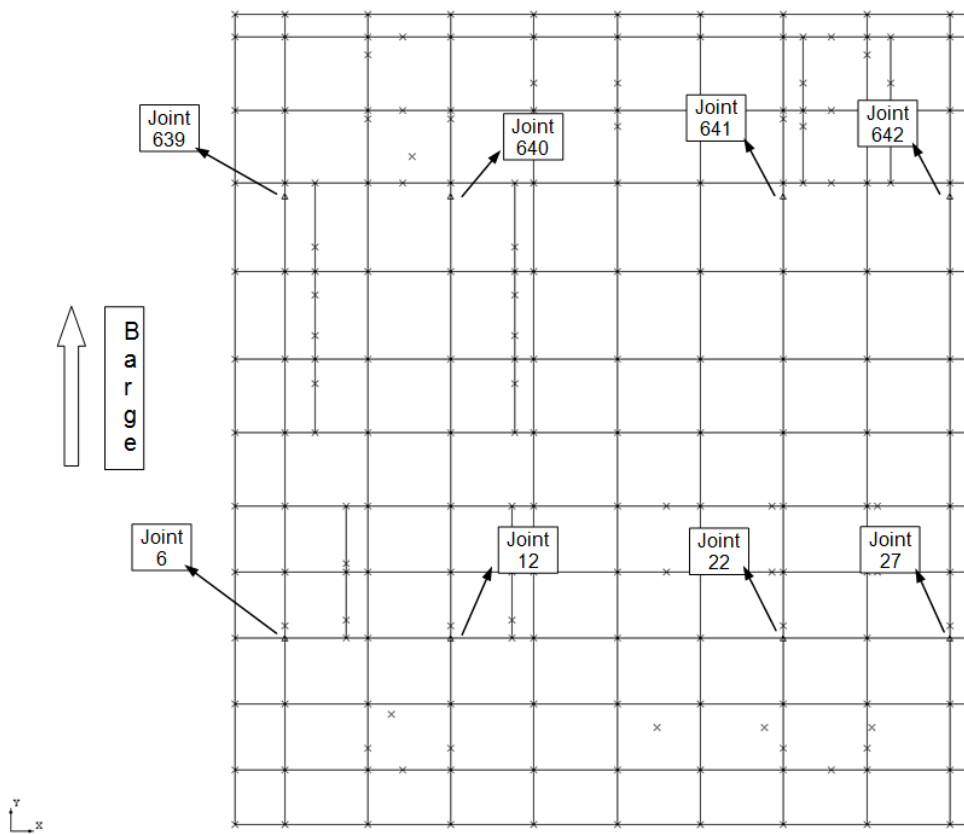


Figura 48 – Vista superior do primeiro patamar do módulo e os nós representantes dos apoios

Temos as seguintes restrições para estes pontos:

- Nó 639: (1, 1, 1, 0, 0,0) Fixo em X, Y e Z.
- Nó 640: (001000) Fixo em Z.
- Nó 641: (001000) Fixo em Z.
- Nó 642: (1, 1, 1, 0, 0,0) Fixo em X, Y e Z.
- Nó 6: (0,1,1,0,0,0) Fixo em Y e Z.
- Nó 12: (0, 0, 1, 0, 0,0) Fixo em Z.
- Nó 22: (0, 0, 1, 0, 0,0) Fixo em Y e Z.
- Nó 27: (0, 1, 1, 0, 0,0) Fixo em Y e Z.

3.4.2 Relações entre Modelo X Real – Transporte Marítimo

Para a representação das cargas dinâmicas, devemos ter em mãos as acelerações máximas da balsa nas três direções (X, Y e Z), anteriormente apresentada, para determinar as combinações de carga. Consideram-se as combinações também em função da direção de incidência da onda na balsa, uma vez que, estas acelerações máximas serão contabilizadas para a incidência da onda vinda em todas as direções de 0 a 360 graus, em passos de 45 graus. Contudo, para cada direção de incidência foram nomeadas combinações de 201 a 208:

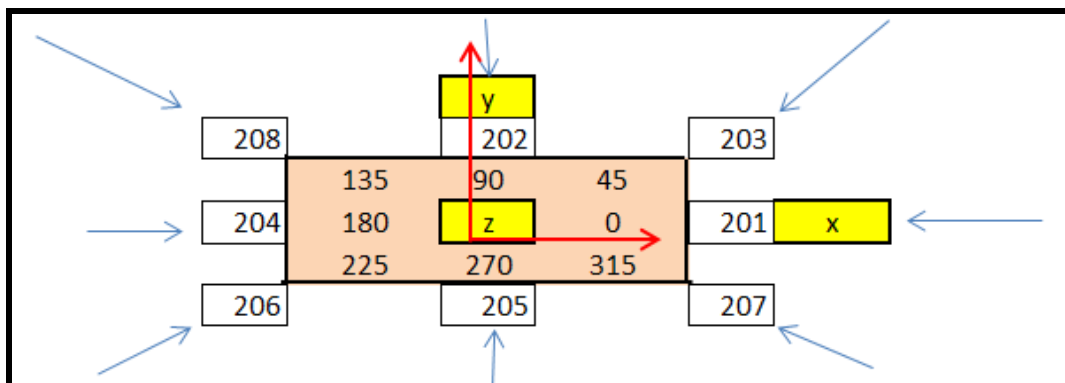




Figura 49 – modelo representando a vista superior da balsa e a incidência de ondas

Temos a seguinte legenda para a figura acima:

- 201 a 208: Combinações dos carregamentos
-  : Balsa
-  : Ondas incidentes

A partir disso, temos as seguintes combinações de carregamentos adotados:

Carregamentos Básicos	Factor	stat	Transp X	Transp Y	Transp XY	Transp -X	Transp -Y	Transp -X*Y	Transp X*Y	Transp -XY
		100	201	202	203	204	205	206	207	208
1 PP Z		1,00	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
2 PP X			0,50		0,35	-0,50		-0,35	0,35	-0,35
3 PP Y				0,20	0,14		-0,20	-0,14	-0,14	0,14
4 EQ Z		1,00	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
5 EQ X			0,50		0,35	-0,50		-0,35	0,35	-0,35
6 EQ Y				0,20	0,14		-0,20	-0,14	-0,14	0,14
7 Outfitting z		1,00	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
8 Outfitting x			0,50		0,35	-0,50		-0,35	0,35	-0,35
9 Outfitting y				0,20	0,14		-0,20	-0,14	-0,14	0,14

Figura 50 – Valores dos coeficientes de aplicação das cargas na condição de transporte marítimo

Observe que as condições onde a onda incide na balsa numa direção diagonal, como é o caso 203, por exemplo, temos a multiplicação dos fatores de acelerações em X e Y, pelo cosseno de 45 graus. Temos, por exemplo:

$$Ax(g) \times \cos 45 = \text{fator da combinação "203"}$$

3.5 Modelo Para Içamento (*Lifting*)

O entendimento desta etapa é fundamental uma vez que ela será, posteriormente, a etapa base para “otimização” do módulo, por se tratar da etapa crítica de projeto. Isto será demonstrado a seguir, uma vez que é nesta etapa que ocorre maior solicitação estrutural, o que determina a topologia estrutural do módulo.

Para esta etapa, temos as seguintes normas específicas a serem observadas para auxílio na modelagem desta etapa:

- Noble Denton – Guidelines for Lifting Operations
- Petrobras N-2684 – Estruturas Oceânicas – Cargas de Projeto – Equipamentos e Sobrecargas.

3.5.1 Condições de Contorno no Modelo- *Lifting*

O módulo será içado a partir de quatro cabos verticais que estarão presos a sua extremidade superior em dois *spreaders*, e na extremidade inferior (junto ao convés superior do módulo) através de quatro olhais.

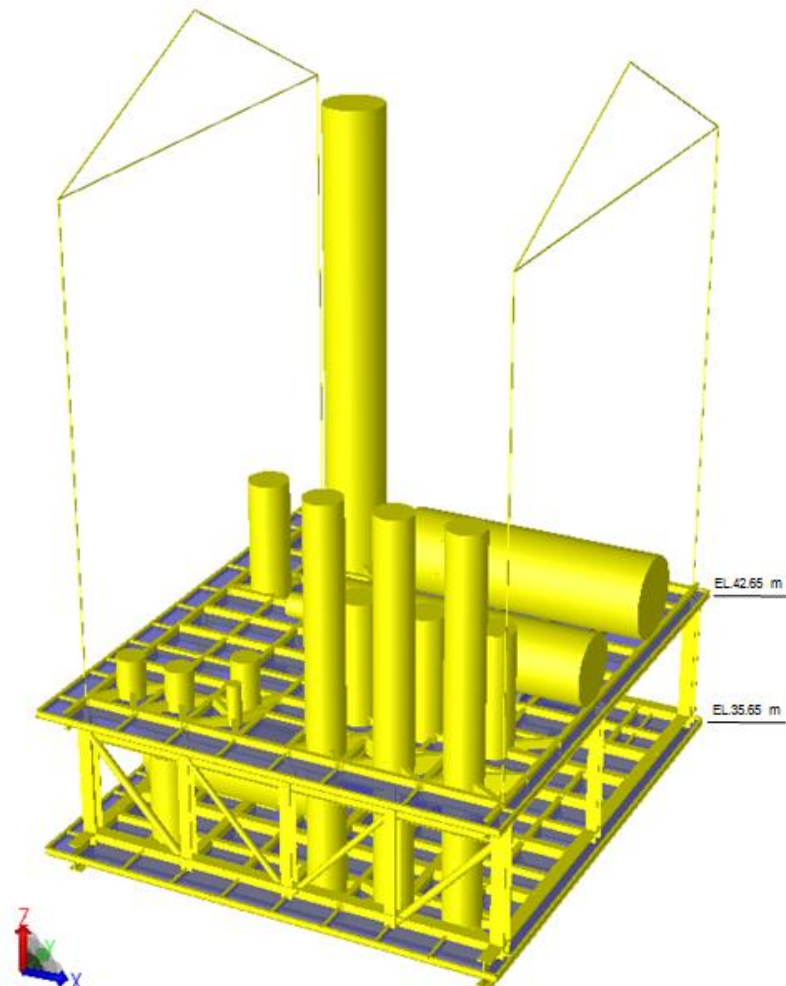


Figura 51 – Módulo na etapa de Lifting

- Fatores de içamento adotados

De acordo com indicações da regra *Noble Denton*, são adotados os seguintes fatores:

Tabela 3 – Fatores de içamento a partir da regra Noble denton

Fatores de içamento		Single Crane Lift
1 – <i>Dynamic Amplification Factor</i> (DAF)	• Module Weight > 1000tf	1.05
	• 100 tf < Module Weight < 1000 tf	1.10
	• Module Weight < 100 tf	1.15
2 – <i>Skew Load – Statically Determinate Lift</i>		1.00
3 – <i>Tilt Factor</i>		1.03
4 – <i>Yaw Factor</i>		1.05

Assim, o fator total é:

Fator Total de içamento = 1,190

Que é composto por: (1,10 X 1,0 X 1,03 X 1,05)

Com isso, este fator será aplicado a todos os carregamentos básicos já explicitados nas condições anteriores, que são estes: Peso Próprio, Equipamento e Outfitting.

- Fatores de correção para elementos com concentradores de tensão

Temos a seguir os fatores, também baseados pela regra, consequentes da fase de lifting e que devem ser utilizados para o conjunto olhal e os membros estruturais adjacentes:

Tabela 4 – Fatores consequentes do içamento

Fatores Consequentes do içamento	
Elementos	Factors
Pontos de <i>Lift</i> (Olhais & <i>spreaders</i>)	1.35
Elementos componentes do conjunto olhal(reforçadores locais,etc)	1.35
Elementos diretamente suportados entre pontos de içamento	1.15
Todos os outros membros	1.00

Estes fatores são aplicados como dados de entrada na verificação local destes elementos, exclusive os “elementos diretamente suportados entre pontos de

çamento”. Para estes pontos do modelo, o fator de 1,15 será considerado através do UC (Unit check). Logo, o UC destes elementos estará limitado em:

$$1,0 / 1,15 = 0,87$$

3.5.2 Relações entre Modelo X Real – *Lifting*

É importante destacar que o içamento deste módulo é considerado estático, uma vez que é içado por quatro pontos.

Os cabos de içamento, no modelo, são representados através de elementos com uma densidade infinitesimal, com intuito somente de transferir a tensão do cabo para a estrutura do módulo:

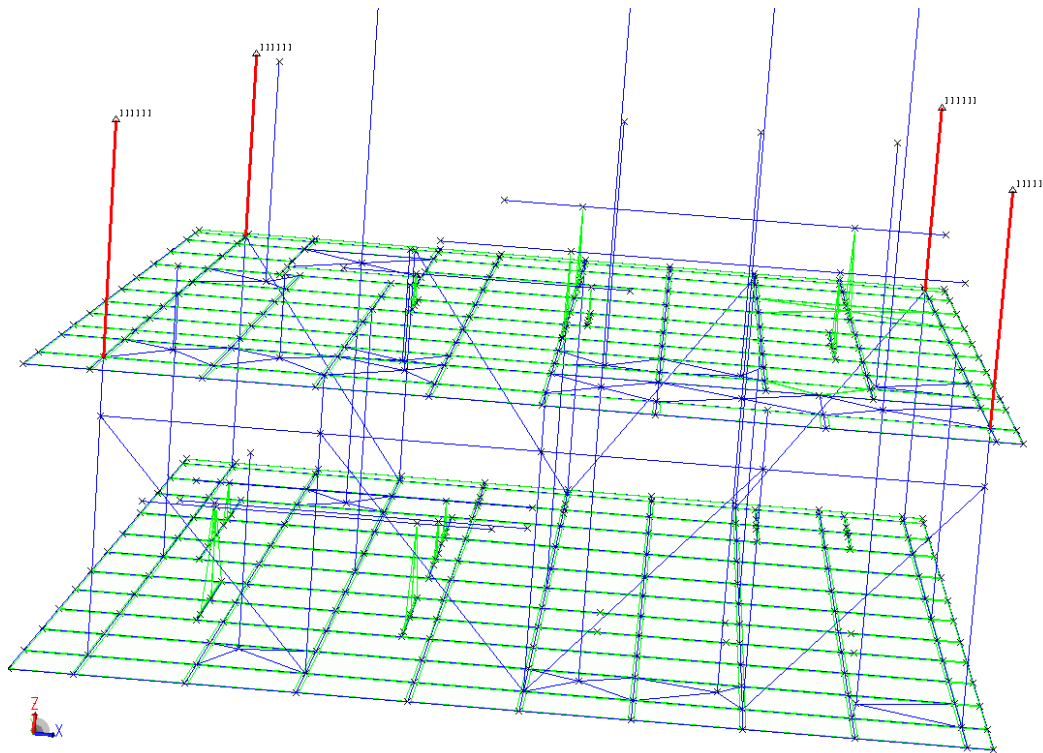


Figura 52 – Cabos de içamento do modelo

Observamos as seguintes características destes elementos:

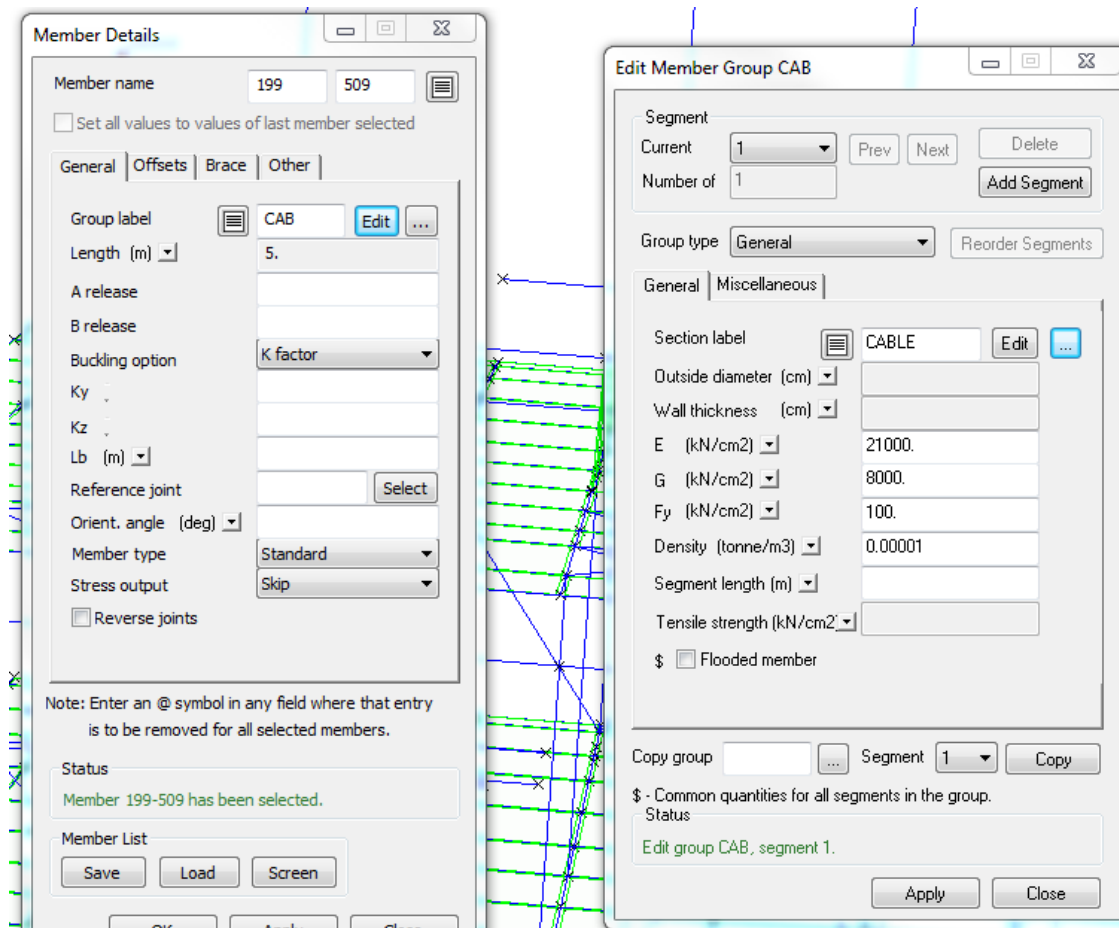


Figura 53 – características dos cabos de içamento modelados

Temos as seguintes restrições:

(1,1,1,1,1,1) nos quatro pontos de içamento, na extremidade superior(junto ao spreader) ,restrição em X,Y , Z e RX,RY e RZ.

3.6 Modelo Para o Módulo na Plataforma (*In Place*)

Nesta análise do módulo operando sobre o convés do FPSO, devemos contemplar as seguintes condições, visando à consideração de todas as situações operacionais e extremas no projeto:

- Condição estática e condições extremas de operação
- *Transit condition*: Condição de transito do estaleiro até o campo de produção
- *Damage condition*: Condição em avaria

Contudo, os parâmetros envolvidos e algumas diretrizes adotadas nesta análise têm como base as seguintes normas internacionais e regras da sociedade classificadora envolvida.

- IMO A-749 - Intact Stability requirements;
- DNV-OS-C301 – Intact Stability Requirements.
- DNV-OS-C301 – Damage Stability Requirements

3.6.1 Condições de Contorno no Modelo- *In Place*

Inicialmente, é importante destacar que diferente das etapas anteriores, teremos a ação de carregamentos decorrentes da operação propriamente dita sobre o convés da Plataforma. Sendo assim, temos adicionalmente os seguintes carregamentos:

- Peso de Equipamentos (Operando):

Nesta etapa é considerado, para efeito de cálculo estrutural, o peso de equipamentos tanto em sua condição sem o conteúdo (óleo + água + gás), quanto em sua condição em pleno funcionamento, bem como na condição de teste dos mesmos. Um fator de contingência de 15% foi adotado para estimativa deste carregamento. Contudo, este fator varia de acordo com o grau de confiança nos dados fornecidos pelo fabricante dos equipamentos, onde temos um alto fator de contingência no início do projeto (15%), e um fator que se aproxima de 5% para uma fase mais avançada do projeto.

- Cargas Vivas:

Como esta etapa compreende a fase operacional do módulo, deve-se considerar a atuação de pessoas passando pelas passarelas deste módulo, bem como passagem de veículos de pequeno porte (*handling devices*) previstos para movimentação de carga, nesta operação de prospecção de óleo no mar. Temos os seguintes carregamentos, de acordo com a área atuante, a serem considerados:

Tabela 5 – Cargas vivas atuantes na plataforma

Area	Distributed load (kN/m ²)	
	Global design	Local design
Working Areas (Process)	9.0	9.0
Storage and Workshop Areas	15.0	15.0
Lay down Areas	15.0	25.0
Room Areas	4.5	4.5
Stairs and Walkway Areas	4.5	4.5

Sendo assim, para esta análise estrutural do módulo, o carregamento a ser adotado é o de 4.5 kN/m².

Para a modelação desta etapa, devemos incluir as cargas já explicitadas no início desta seção, aplicadas a uma estrutura com apoios com as seguintes condições de contorno:

- Todos os suportes estão restritos, em sua ligação com o convés para translação e rotação em X, Y e Z.

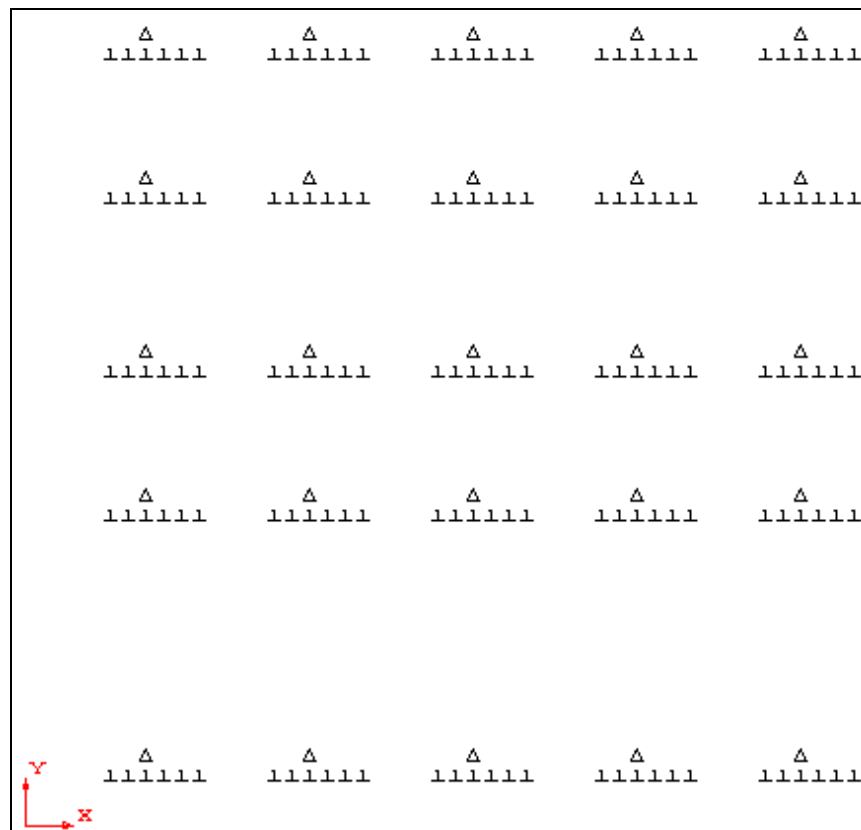


Figura 54 – Condições de contorno da fixação entre o suporte do módulo e o convés do FPSO

Além disso, temos as seguintes condições de contorno dos elementos transversais ligados a estes suportes:

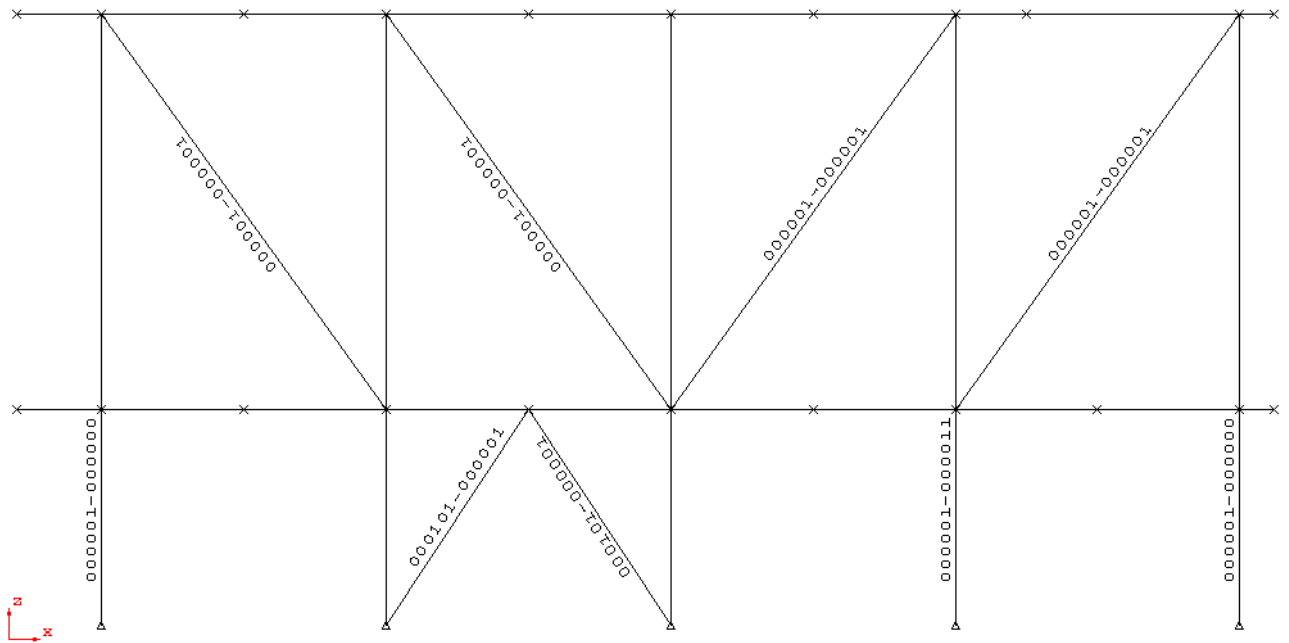


Figura 55 – Condições de contorno da vista da seção na longitudinal 6

3.6.2 Relações entre Modelo X Real – *In Place*

- Cargas Ambientais (Vento):

Também deve ser considerada a carga ambiental de vento atuante na estrutura do módulo. Como é um fator que não pode ser evitado, escolhendo boas condições climáticas para se operar, o mesmo deve ser contabilizado nesta análise.

De acordo com a regra da DNV, "Classification Notes 30.5", as forças de vento são determinadas da seguinte maneira:

$$F = 0.613 V^2 C_s A / 1000 \text{ [kN]}$$

$$C_s = 1.0 \text{ Coeficiente de Forma (Área total projetada)}$$

$$A = \text{Área exposta (m}^2\text{)}$$

$$V = \text{Velocidade do Vento (m/s)}$$

Temos a seguinte referência do vento atuante na área de atuação da plataforma (Bacia de Campos):

Tabela 6 – Velocidade de vento na Bacia de Campos

Velocidade de Vento (m/s)		
Duração	1 ano de retorno. (m/s)	100 de retorno. (m/s)
10 min.	18.64	31.88

Como já explicitado anteriormente, consideramos as três condições operacionais da plataforma: (Condição em Operação, Condição de trânsito e Condição em avaria). Em cada uma destas condições temos níveis diferentes de inclinações e velocidades de acelerações da embarcação FPSO, o que irá influenciar diretamente no comportamento estrutural do módulo em destaque.

Sendo assim:

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

Tabela 7 – inclinações e aceleração na condição extrema de operação

Roll		Pitch		Heave
θ	T	θ	T	
20°	15 s	10°	15 s	

Tabela 8 – inclinações e aceleração na condição de Trânsito

Para a condição em Avaria (*Damage*) temos os seguintes parâmetros de ângulo máximo de banda (*Heel*) e ângulo de Trim:

Ângulo Banda: 25°

Ângulo de Trim: 10°

- Deflexões no Convés:

Como o módulo vai estar apoiado nos vários suportes que por sua vez estarão fixados no convés do FPSO, as deflexões, translações e rotações do mesmo nas

condições de Alquebramento e Tosamento devem ser contabilizadas nesta análise. Temos, como dados de saída de uma análise de deflexão da viga navio, desta plataforma, os seguintes valores:

Tabela 9 – Deflexões, translações e rotações na região de apoio do módulo analisado

Frame Section (n°)	Vertical Displacement (Z) (m)	Horizontal Displacement (X) (m)	Rotation (Y) (rad)
309	0.355689	0.068172	0.004015
315	0.333067	0.072512	0.004284
321	0.312551	0.076001	0.004502
327	0.291054	0.079278	0.004708
333	0.268628	0.082342	0.004903

- Arranjo dos Suportes:

Nesta condição, o módulo está apoiado num total de 25 suportes tubulares distribuídos ao longo da base do módulo, como demonstra a figura:

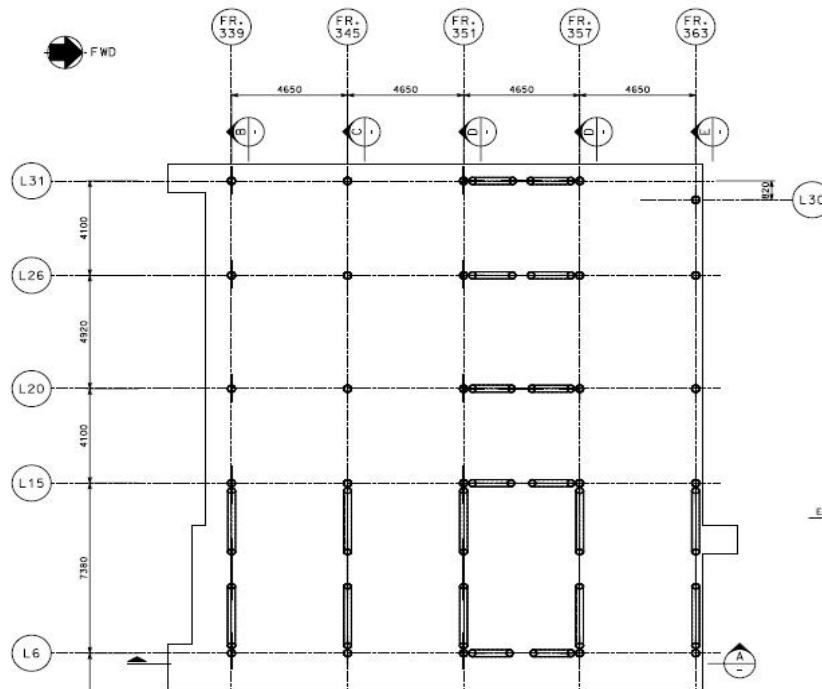


Figura 56 – Vista superior do convés da FPSO e os suportes do módulo

Observe que a disposição dos suportes obedece também a estrutura presente no navio, uma vez que coincide com cruzamentos de longitudinais de teto e cavernas.

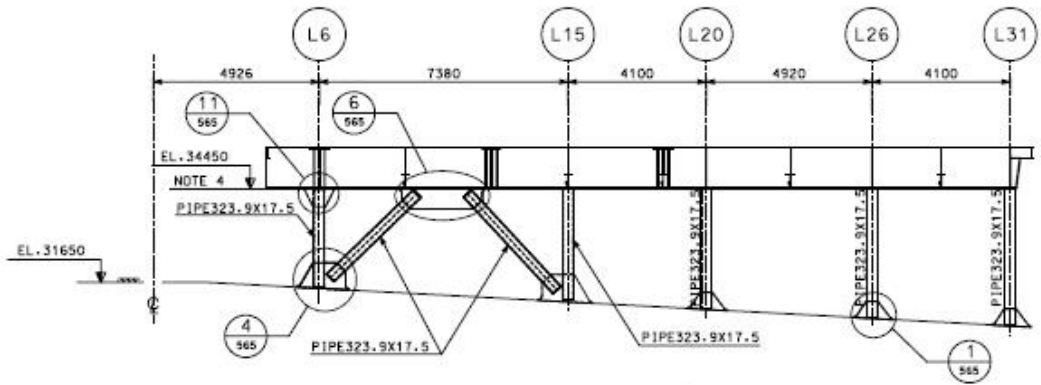


Figura 57 – Vista de perfil dos suportes do módulo em análise

Temos a vista isométrica deste arranjo, representado no modelo:

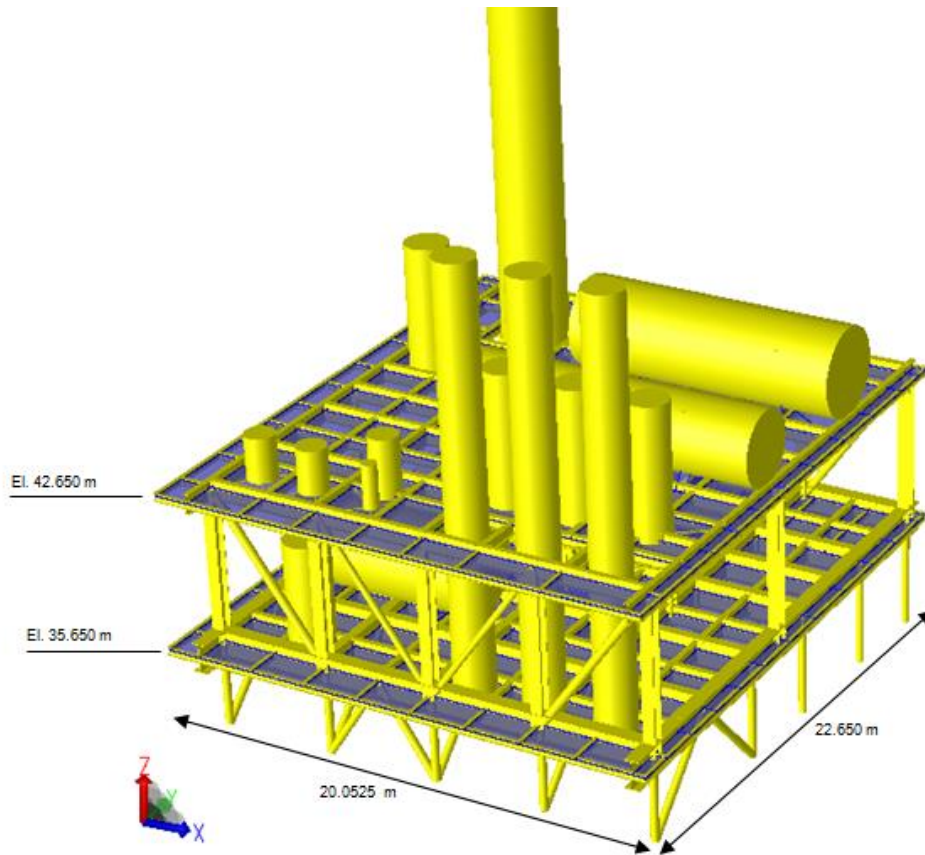


Figura 58 – Vista isométrica do módulo na condição *In Place*

3.7 Resultados das Etapas - Módulo Não “Otimizado”

A seguir serão listados os principais dados de saída das etapas de *Load Out*, Transporte Marítimo, Içamento e Módulo na Plataforma, tendo em vista que as tensões e deflexões nos membros do módulo são os parâmetros a serem avaliados.

3.7.1 Deflexões do Módulo - *Load Out*

Temos os seguintes níveis de deflexões no modelo computacional representativo da etapa de *Load Out*:

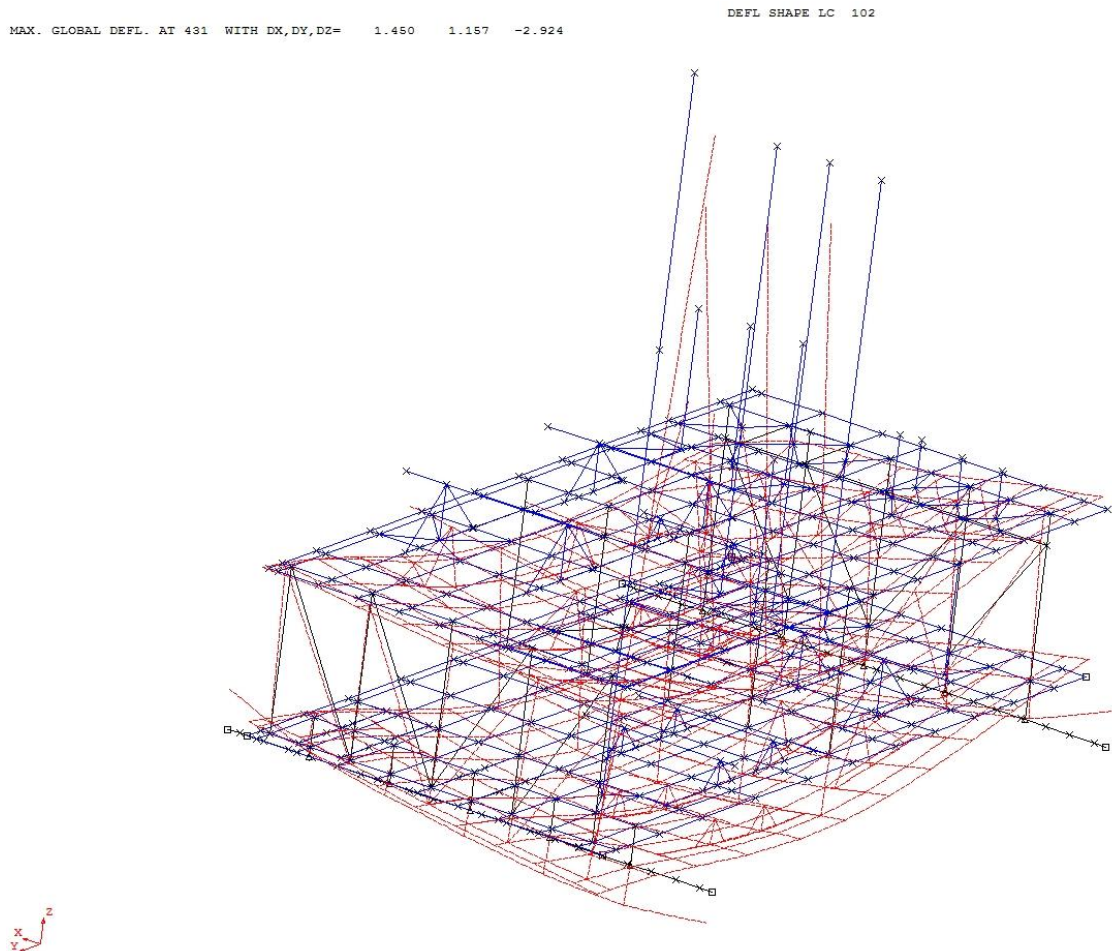


Figura 59 – Deflexões no modelo SACS na condição de *Load Out*

Através dos dados de saída, identificamos a maior deflexão global do modelo, que para este caso é de 2,924 cm, na direção vertical. De acordo com as normas vigentes neste projeto, não se deve ultrapassar um limite de $L/360$ em deflexões em

qualquer ponto do módulo, onde “L” é a distancia do maior vão livre da estrutura, que, para este caso, é a distância entre os *boogies*. Com isso temos:

$$\delta_1 = 2,924 \text{ cm}$$

$$L_{\text{transv}} = 1845 \text{ cm}$$

$$\delta \text{ max} = L/360 = 5,12 \text{ cm} \quad \delta \text{ max} > \delta_1 \Rightarrow \text{Ok}$$

3.7.2 Tensões do Módulo - *Load Out*

O programa fornece dados das tensões em todos os nós (joints) definidos no modelo, e a avaliação das tensões admissíveis são baseadas pelo especificado em: “AISC Manual of Steel Construction 9th Edition and API RP 2A-WSD 21st”. A seguir a imagem da verificação global dos níveis de tensões classificadas por cores:

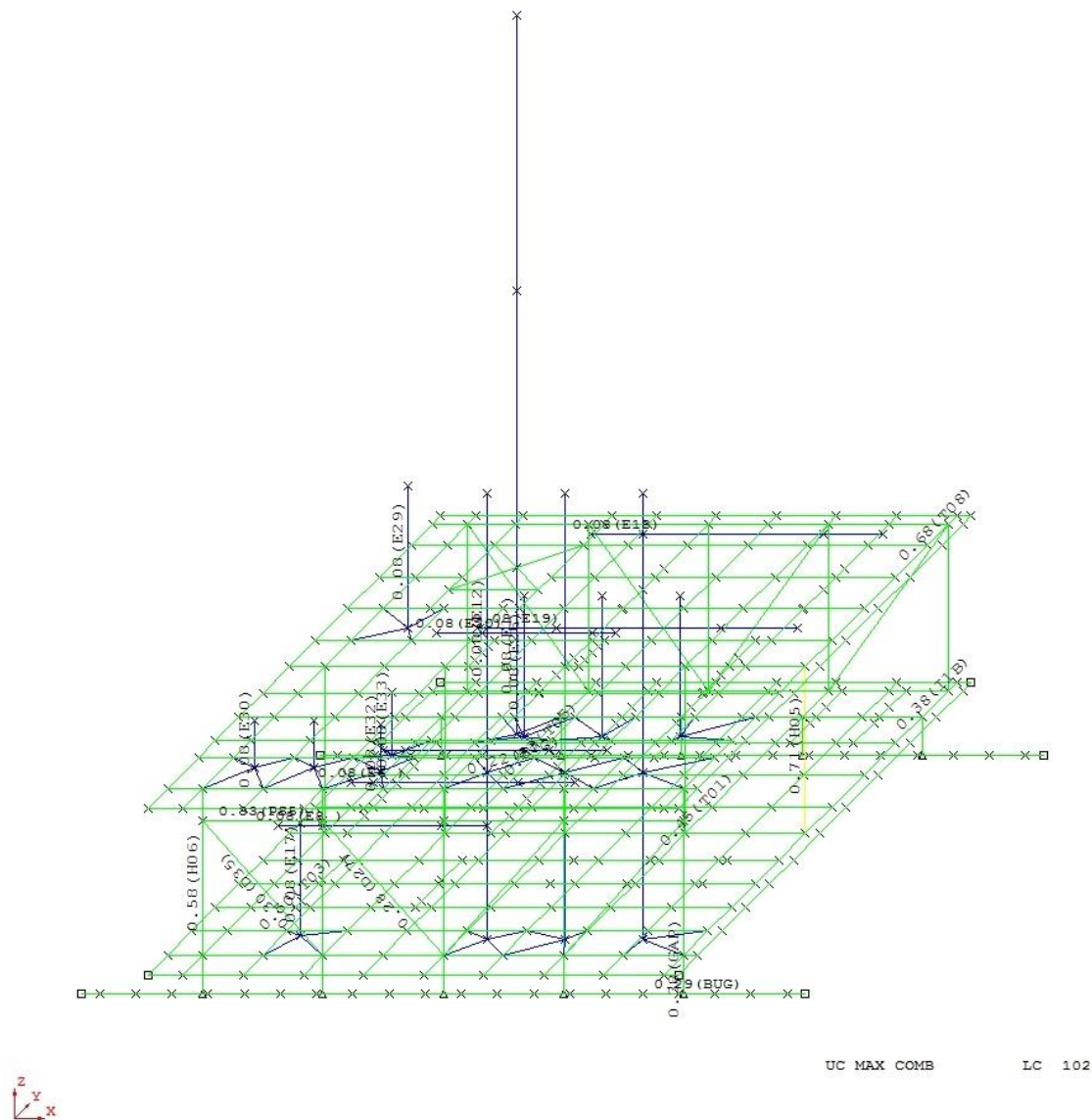


Figura 60 – Nível de tensões no modelo SACS na condição de *Load Out*

Temos a seguinte classificação com relação aos níveis de tensões relacionados ao modelo:

- Verde $UC < 0,80$
- Amarelo $0,80 < UC < 1,0$
- Vermelho $UC > 1,0$

Onde “UC” quer dizer “*Unit Check*” que nada mais é que um parâmetro que contabiliza a reserva de resistência de determinado elemento do modelo, pela razão entre a tensão atuante no membro e a tensão admissível por regra. Logo, valores verdes possuem resistência muito acima das solicitadas e não representam

preocupações para esta fase do transporte do módulo. Valores amarelos possuem resistência suficiente para as cargas atuantes e estão dimensionadas de forma adequada. Valores em vermelho de “UC” representam um elemento que não suporta as cargas atuantes, e deve ser reforçado o arranjo do *Load Out*, ou repensado. Uma estrutura dita “eficiente” para uma determinada solicitação teria na maioria de seus elementos $0,80 < UC < 1,0$, pintados de amarelo.

Logo, para este arranjo de *Load Out* e observando a figura de saída do programa SACS, conclui-se que a estrutura do módulo resiste bem às solicitações desta fase do transporte, para o arranjo de *boogies* definido.

3.7.3 Deflexões do Módulo – Transporte Marítimo

- Deflexões do módulo (SACS)

Temos que o critério adotado para deflexões máximas é o mesmo para a etapa anterior de *Load Out*, onde a deflexão máxima não deve exceder 1/360 do vão livre, para membros estruturais primários e 1/250 para membros secundários.

Com isso, temos o seguinte resultado:

MAXIMUM JOINT DISPLACEMENTS								
LOAD	DEFL (X)		DEFL (Y)		DEFL (Z)	DEFL (T)		
COND	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)	JOINT	(CM)
100	226	0.060	192	-0.216	313	-1.448	313	1.460

MAX. VIEW DEFL. AT 313 WITH DX,DY,DZ= -0.021 -0.189 -1.448 DEFL SHAPE LC 100

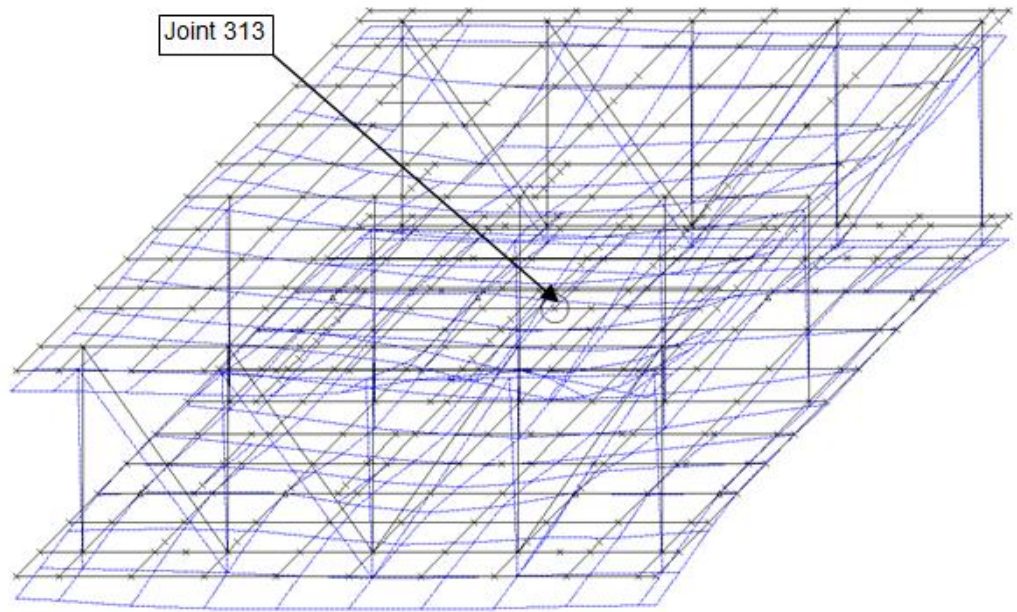
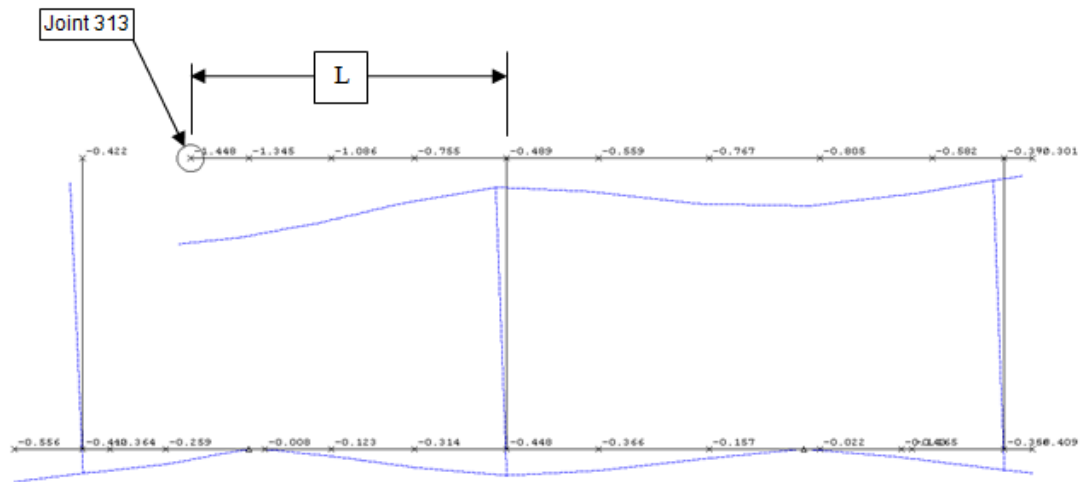


Figura 61 – Deflexões do módulo na condição de transporte marítimo

MAX. VIEW DEFL. AT 313 WITH DX,DY,DZ= -0.021 -0.189 -1.448 DEFL SHAPE LC 100



DISPLACEMENT 2 LC= 100

Figura 62 – Vista lateral da seção que contém o nó de maior deflexão

Com isso, temos a seguinte verificação:

$$\delta_{313} = 1.448\text{cm}$$

$$L = 703.5 \text{ cm}$$

$$L / 360 = 1.954 \text{ cm} > \delta_{313} \Rightarrow \text{ok}$$

3.7.4 Tensões do Módulo – Transporte Marítimo

Para a condição de Transporte Marítimo, o AMOD (Allowable Stress Modifier) foi determinado a partir da regra da DNV OS C201, e tem os seguintes valores:

Condition	AMOD
Static	1,000
Transp	1,333

Sendo assim, Temos os seguintes resultados para as tensões nos elementos do módulo na condição de transporte marítimo :

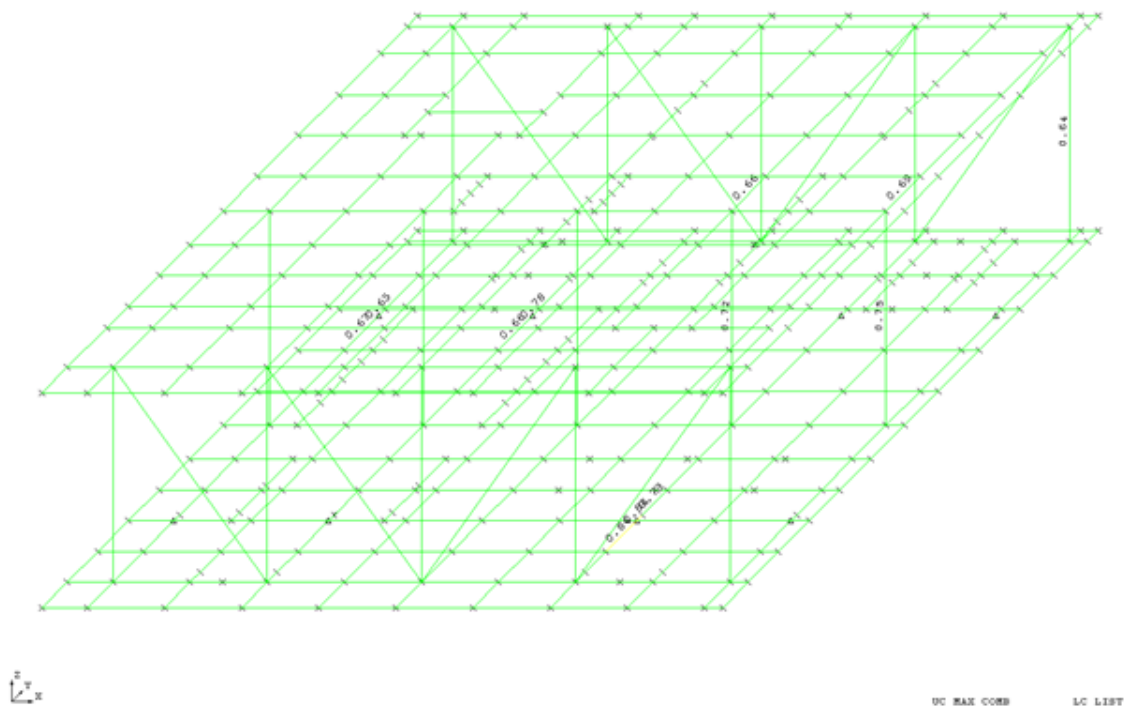


Figura 63 – Nível de tensões no modelo SACS na condição de Transporte Marítimo

Logo, para o arranjo de Transporte Marítimo, a estrutura do módulo resiste bem às solicitações desta fase de transporte marítimo sobre a balsa.

3.7.5 Deflexões do Módulo – *Lifting*

Para a condição de Lifting, temos que as deflexões em nós do modelo não devem exceder 1/360 do vão livre dos elementos primários.

```
DEFL SHAPE LC 101
MAX. VIEW DEFL. AT 304 WITH DX,DY,DZ= -0.040 -0.087 -6.658
```

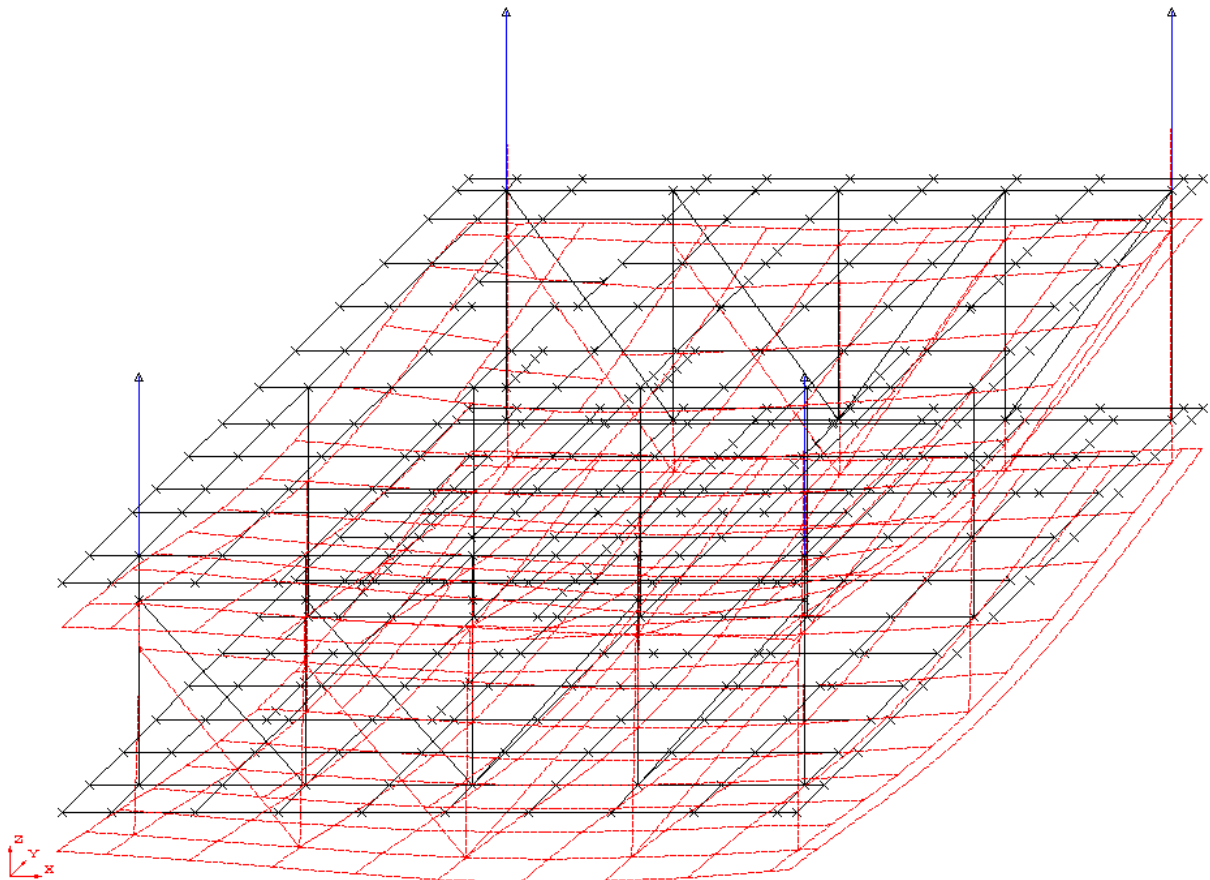


Figura 64 – Deslocamentos do módulo na condição de Lifting

Com isso, observando as deflexões nos nós:

JOINT DISPLACEMENTS AND ROTATIONS							
JOINT	LOAD COND	***** DEFL (X)	cm DEFL (Y)	***** DEFL (Z)	***** ROT (X)	***** radians ROT (Y)	***** ROT (Z)
303	101	-0.0261	-0.0922	-6.6449	0.0004	-0.0003	-0.0001
304	101	-0.0400	-0.0869	-6.6577	-0.0008	0.0003	-0.0001
305	101	-0.0540	-0.0818	-6.3228	-0.0031	0.0010	-0.0001

Deflexão relativa:

$$\delta_z = 6.658 - 6.323 = 0.335 \text{ cm}$$

$$L = 369 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{max}} = L/360 = 1.025 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{max}} > \delta_z$$

3.7.6 Tensões do Módulo – *Lifting*

Para a condição de Lifting, o AMOD (Allowable Stress Modifier) foi determinado a partir da regra da DNV OS C201:

Condition	AMOD
Lifting	1,000

Com isso, os seguintes níveis de tensões observados, e atendendo as considerações feitas anteriormente para os elementos que suportam diretamente o içamento, temos:

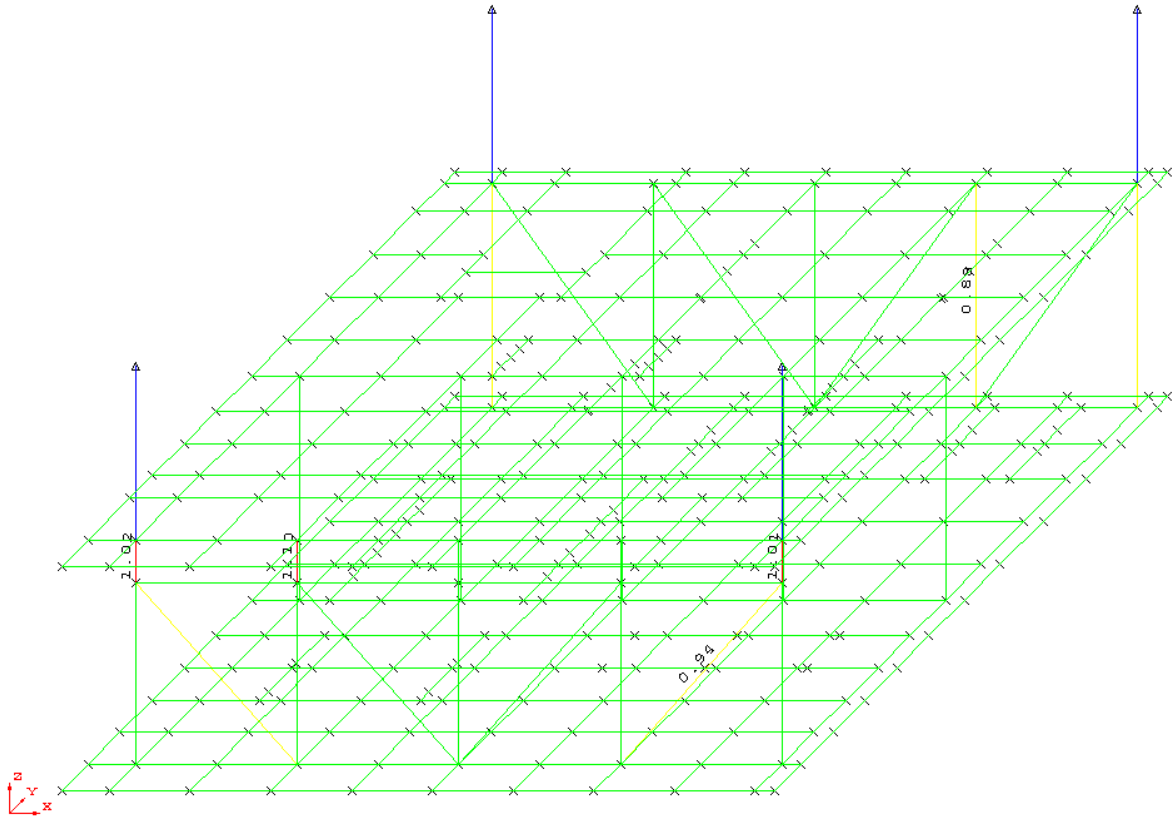


Figura 65 – Níveis de tensões (Unit Checks) do módulo na condição de lifting

Temos, para uma vista dos elementos críticos:

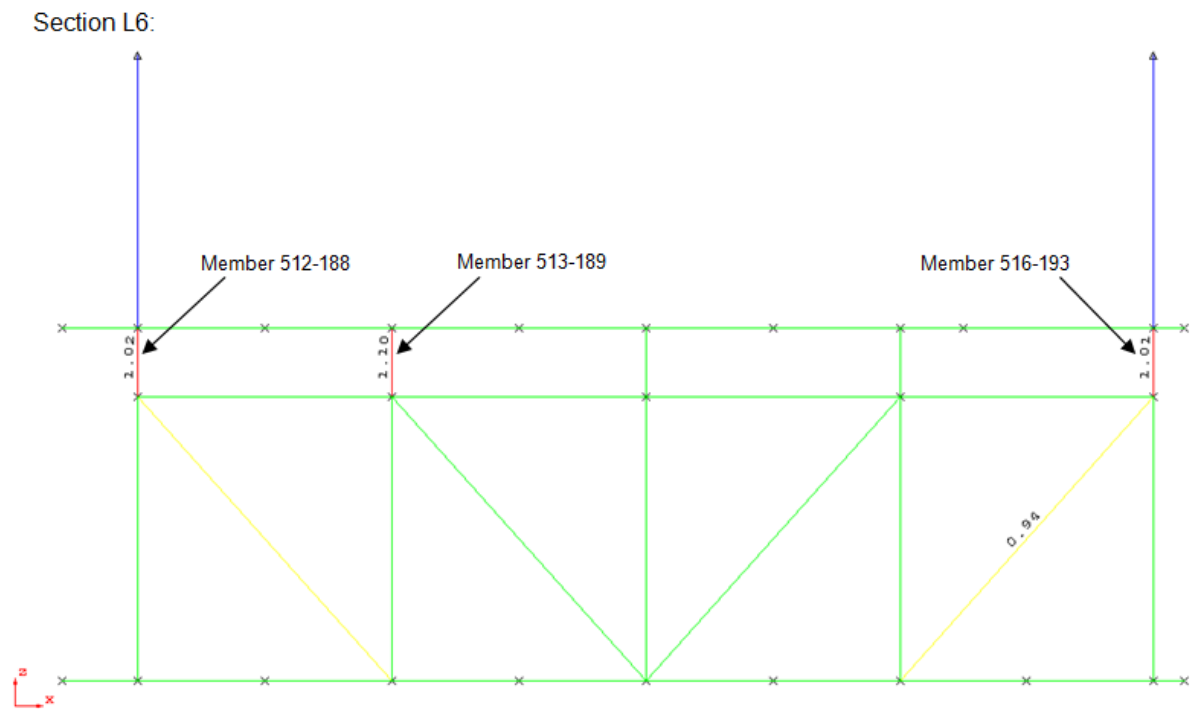


Figura 66 – Vista da seção contendo os elementos críticos da condição de *Lifting*

Com isso, a partir da utilização de um refinamento do programa, podemos recalcular os parâmetros componentes do *Unit Check* de forma “manual” diminuindo o vão livre da viga, por exemplo, que é variável de cálculo do programa. Esta possível redução do vão livre é consequência da utilização de nós na modelação dos elementos, uma vez que neste modelo uma viga “atravessa” a outra, o que não acontece na prática. Sendo assim, poderíamos reduzir o comprimento de uma coluna pela metade da alma dos elementos adjacentes de suas extremidades, obtendo assim uma condição mais favorável para a flambagem, que foi o caso desta análise da etapa de *Lifting*.

Logo, após o refinamento, obtemos níveis de tensões / deflexões admissíveis nesta situação de carregamento.

Além desta verificação, devem-se realizar verificações do conjunto “olhal’ deste módulo, contudo esta verificação não é pertinente para o presente trabalho, uma vez que o objetivo final é a busca na redução do peso do módulo, e qualquer módulo “otimizado” a partir deste original iria solicitar menos dos seus olhais originais, tendo em vista a redução do peso (carga em “Z”).

Contudo, o estrutural do módulo (não “otimizado”) é capaz de suportar as cargas impostas pela etapa de *Lifting*.

3.7.7 Deflexões do Módulo – *In Place*

Para a condição Na Plataforma (*In Place*), temos que as deflexões em nós do modelo não devem exceder $1/360$ do vão livre dos elementos primários. Logo, temos como resultado:

DEFL SHAPE LC 103
 MAX. VIEW DEFL. AT 399 WITH DX,DY,DZ= 0.000 -0.010 -1.692

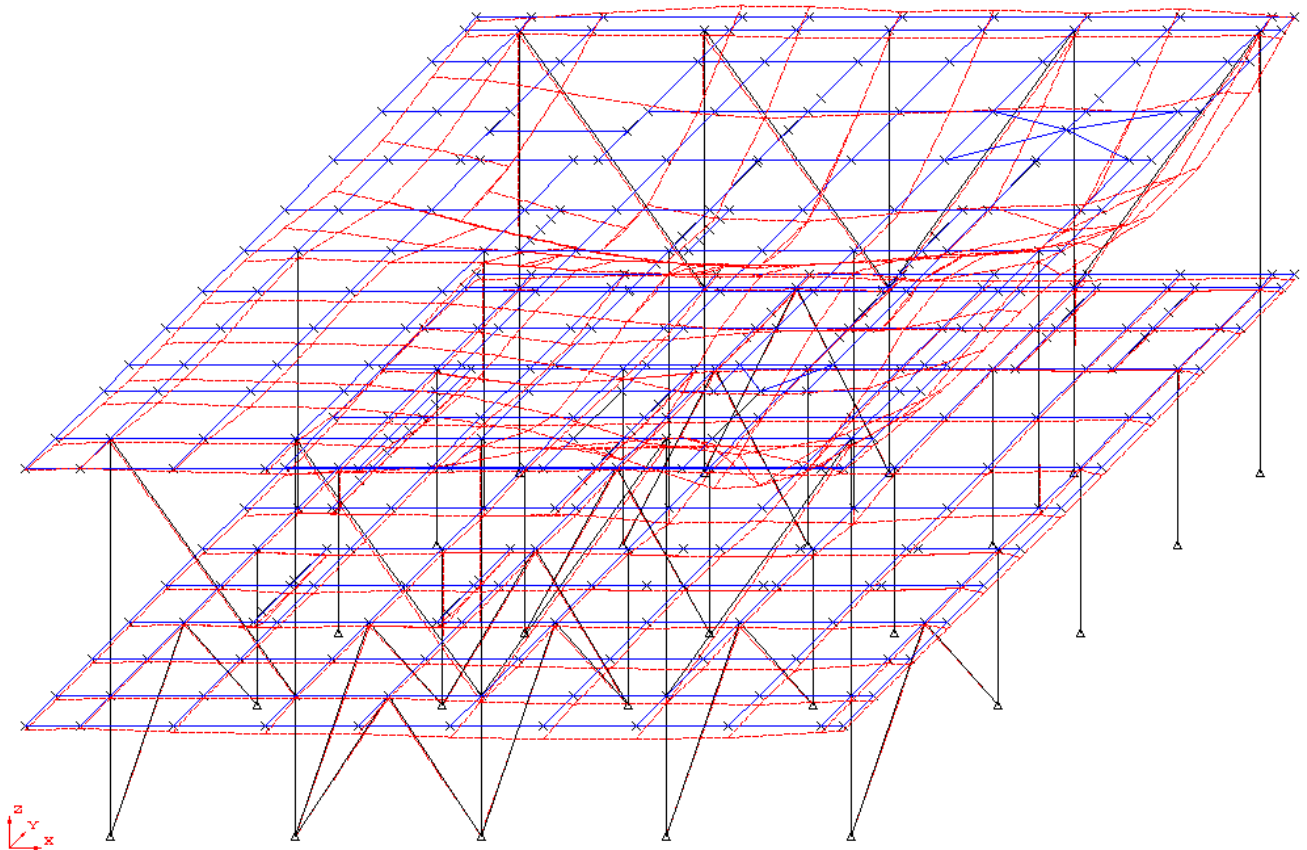


Figura 67 – Deslocamentos do módulo na condição In Place

Com isso, observando as deflexões nos nós:

LOAD		MAXIMUM JOINT DISPLACEMENTS							
COND	JOINT	DEFL (X) (CM)	JOINT	DEFL (Y) (CM)	JOINT	DEFL (Z) (CM)	JOINT	DEFL (T) (CM)	
101	336	-0.010	269	-0.019	399	-1.576	399	1.576	
102	213	-0.006	192	0.013	313	-1.013	313	1.013	
103	193	-0.007	269	-0.017	399	-1.692	399	1.692	

Deflexão relativa:

$$\delta_z = 1.692 - (1.5728 + 1.6136) / 2 = 0.099 \text{ cm}$$

$$L = 246.0 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{max}} = L/360 = 0.683 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{max}} > \delta_1 \text{ OK}$$

3.7.8 Tensões do Módulo – *In Place*

Para a condição de *In Place*, o AMOD (Allowable Stress Modifier) foi determinado a partir da regra da DNV OS C201, e tem os seguintes valores:

Condition	AMOD
Estatica/Extrema	1,333
Trânsito	1,333
Damage	1,666

Estes fatores são consequências dos carregamentos adotados na modelação, uma vez que por se tratarem de carregamentos que não são contínuos na operação, e de situações atípicas, estes fatores aumentam, em função destes fatores, o valor da máxima tensão admissível nos membros, influenciando diretamente nos valores de saída dos *Unit Check* de cada um dos membros do modelo.

Com isso, temos os seguintes níveis de tensões na etapa do módulo na plataforma:

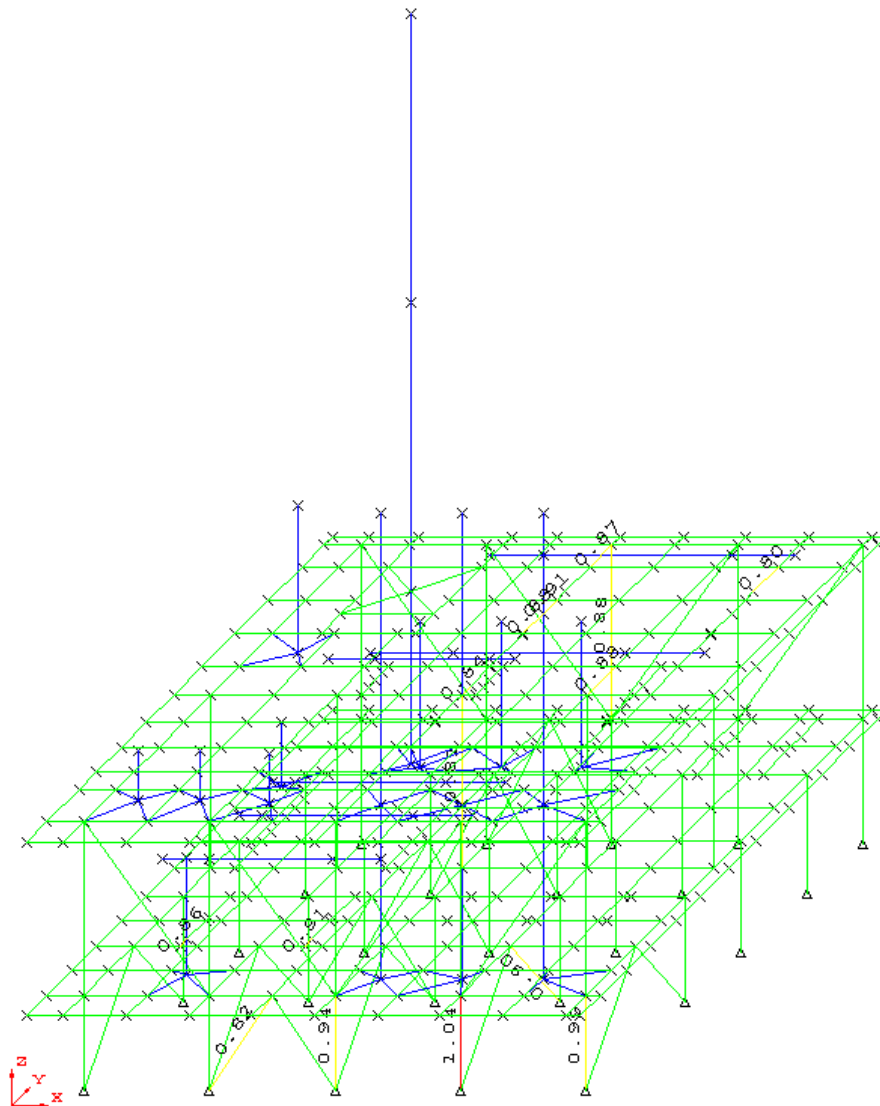


Figura 68 – Níveis de tensões (Unit Checks) do módulo na condição *In Place*

Após a observação destes resultados para esta etapa, aliadas a algumas verificações extras de análise de fadiga em alguns membros, bem como elementos com concentração de carga, constatou-se que o estrutural do módulo (não “otimizado”) é capaz de suportar as cargas impostas pela etapa do Módulo na Plataforma (*In Place*).

3.7.9 Verificação da Etapa Crítica

Para a ratificação da etapa crítica de projeto do módulo, estão listados a seguir as tensões e deflexões críticas do modelo, para cada uma das etapas explanadas:

Tabela 10 – Níveis de Tensões e Deflexões nas diversas etapas.

ETAPA	DEFLEXÕES(atual/permitida)	TENSÕES(Unit Check)
<i>LOAD OUT</i>	0,57	0,71
Transporte Marítimo	0,74	0,80
<i>LIFTING</i>	0,33	0,94
Na Plataforma	0,14	0,90

Notamos a partir da tabela acima que os maiores níveis de tensões são observados na etapa de *Lifting*, que é então ratificada como a etapa crítica para o projeto do módulo e consequentemente a etapa base para o processo de otimização estrutural.

3.8 Método de Otimização

Como foi apresentado, a etapa base utilizada para a “otimização” do módulo da plataforma em estudo é a etapa de içamento (*Lifting*) do módulo. Sendo assim, o método utilizado na busca de uma estrutura mais leve que a original se baseia na alteração do modelo original, feito no software SACS versão 5.3, desta etapa crítica. Temos que esta é a etapa de modelação já que por possuir somente 4 pontos de apoio, que são referentes aos olhais para içamento, caracteriza-se como a etapa com as maiores solicitações estruturais no nível de tensões, sendo assim a pior dentre as 4 etapas apresentadas (LoadOut, Transporte Marítimo, Içamento e Módulo na Plataforma Operando).

O método de “otimização” se baseia na redução gradual das espessuras das almas e dos flanges destes elementos componentes da estrutura primária e secundária deste módulo. A cada redução faz-se as análises de tensões e deformações previstas para este modelo da etapa de içamento, para verificação balizada nas regras e normas já explicitadas. A decisão por se reduzir as espessuras e não a altura de alma e largura de flange, é baseada numa “otimização” pós-definição do arranjo da planta de processo do FPSO. Logo, uma variação brusca na altura de uma alma, por exemplo, poderia causar interferência com alguma tubulação ou equipamentos de outras disciplinas do projeto. Abaixo podemos observar o modelo da etapa de Içamento (*Lifting*):

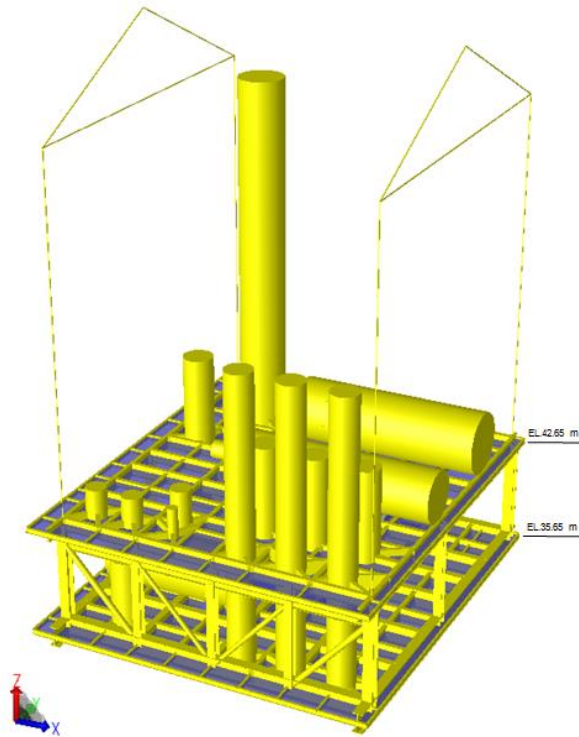


Figura 69 – Modelo utilizado para base da otimização (*Lifting*)

Este modelo é dividido em grupos de elementos estruturais com as mesmas características de seção transversal. Esta divisão dá validade construtiva a nossa “otimização”, uma vez que um trecho de um mesmo elemento estrutural com diferentes espessuras é indesejável no momento da construção, podendo gerar gastos não previstos nesta etapa, pela ocorrência do retrabalho. Os grupos do modelo são compostos por perfis “I” ou “H” como observado na seguinte tabela:

Tabela 11 –Espessuras de alma e flange no modelo original

Modelo Original	Características		
	Espessura(mm)		Perfil
	Flange	Alma	
Grupo 1	9,5	8,0	"T"
Grupo 2	40,0	25,0	"T"
Grupo 3	25,0	16,0	"T"
Grupo 4	25,0	16,0	"T"
Grupo 5	12,5	8,0	"T"
Grupo 6	40,0	25,0	"I"
Grupo 7	31,5	19,0	"I"
Grupo 8	16,0	8,0	"T"

Contudo, temos um total de oito grupos considerados para a “otimização”, com suas respectivas características originais:

- Grupos de elementos estruturais do modelo

Grupo 1 – Reforçadores Secundários do convés superior e inferior

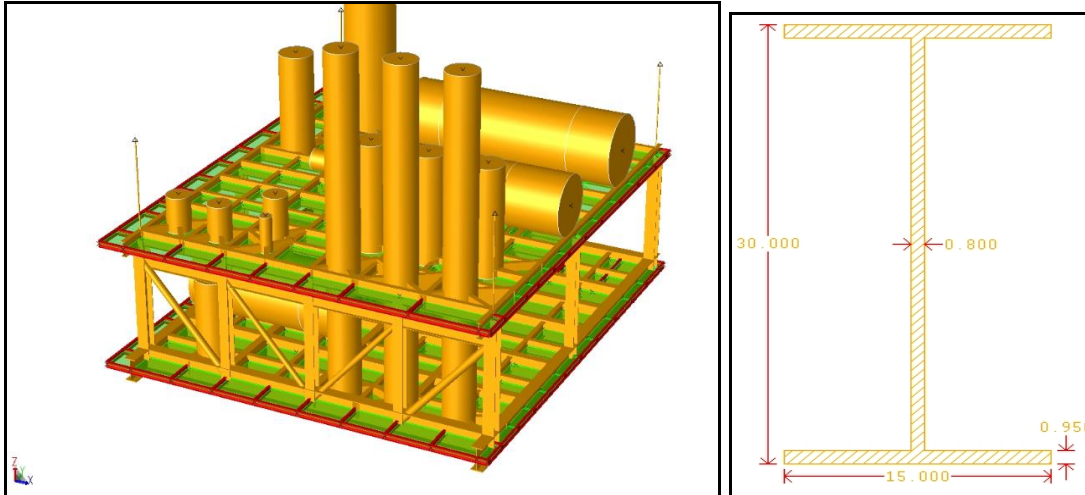


Figura 70 – Vista isométrica do grupo 1 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

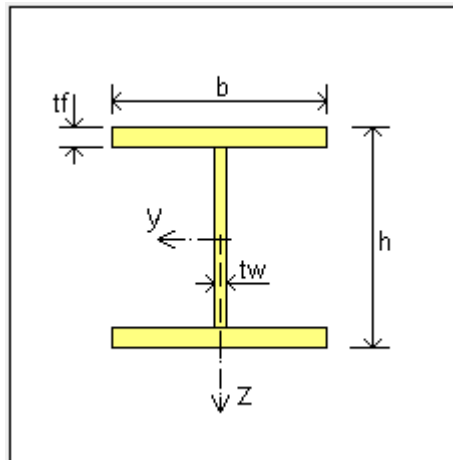


Figura 71 – Referência da nomenclatura dos parâmetros da seção do elemento

Características da seção transversal do grupo1:

$$b = 15,0 \text{ cm}$$

$$h = 30,0 \text{ cm}$$

$$tw = 8,0 \text{ mm}$$

$$tf = 9,5 \text{ mm}$$

$$\text{Comprimento total do grupo1: } 231,8 \text{ m}$$

Grupo 2 – Reforçadores Primários do convés inferior

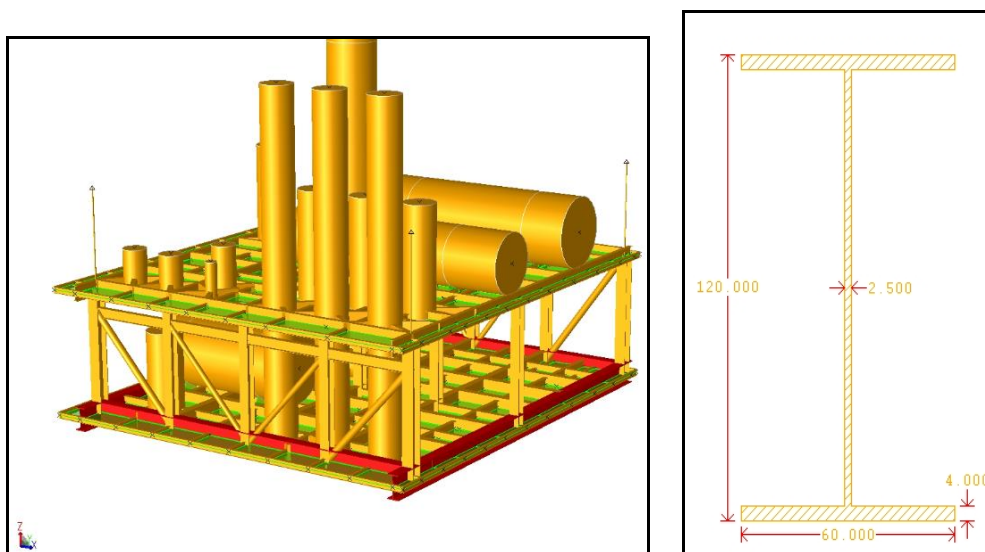


Figura 72 – Vista isométrica do grupo 2 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo2:

$$b = 60,0 \text{ cm}$$

$$h = 120,0 \text{ cm}$$

$$t_w = 25,0 \text{ mm}$$

$$t_f = 40,0 \text{ mm}$$

Comprimento total do grupo2: 82,5 m

Grupo 3 – Reforçadores Primários do convés superior e inferior

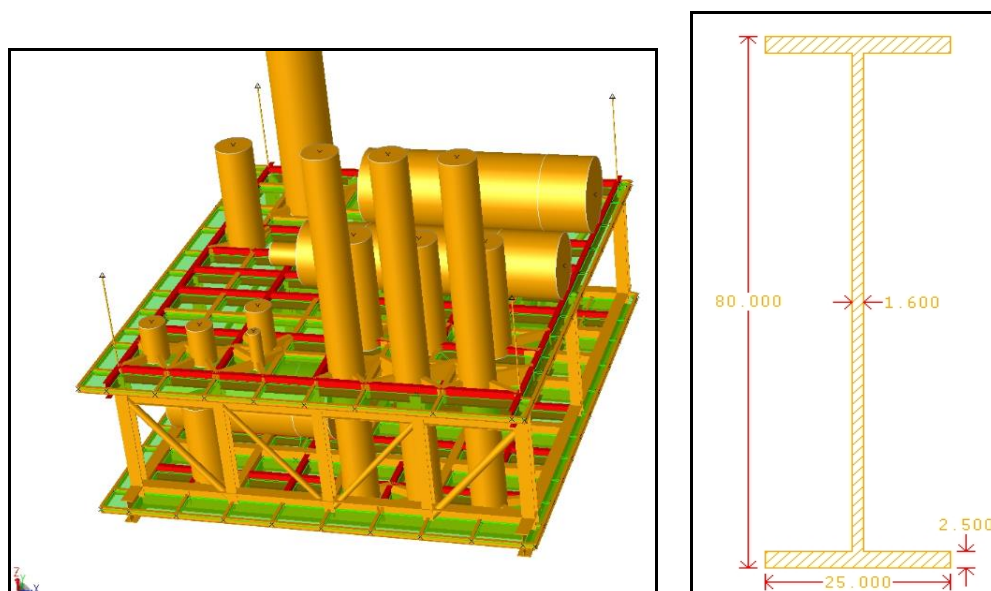


Figura 73 – Vista isométrica do grupo 3 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elemento

Características da seção transversal do grupo3:

$b = 25,0 \text{ cm}$

$h = 80,0 \text{ cm}$

$tw = 16,0 \text{ mm}$

$tf = 25,0 \text{ mm}$

Comprimento total do grupo3: 321,9 m

Grupo 4 – Reforçadores Primários do convés inferior

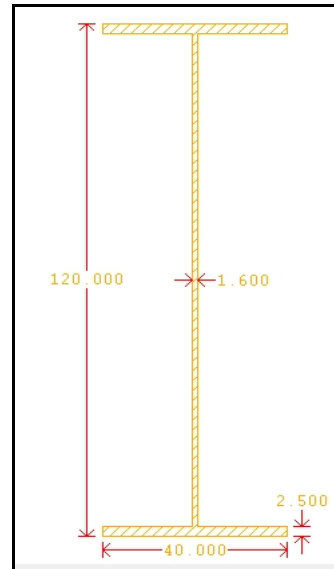
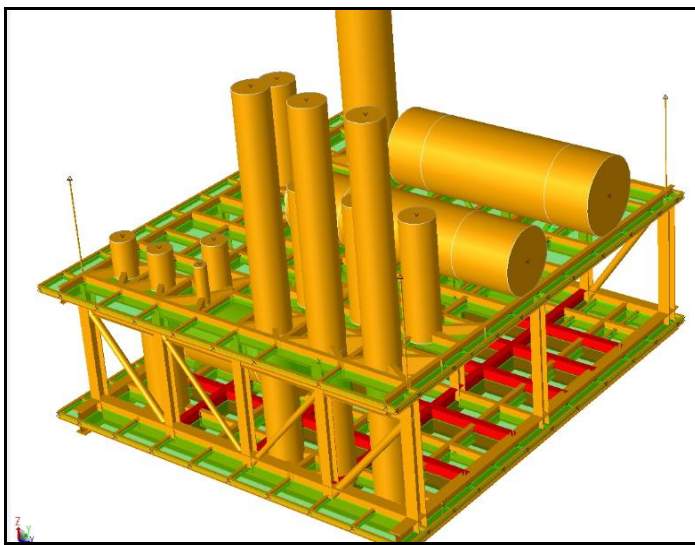


Figura 74 – Vista isométrica do grupo 4 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo4:

$b = 40,0 \text{ cm}$

$h = 120,0 \text{ cm}$

$tw = 16,0 \text{ mm}$

$tf = 25,0 \text{ mm}$

Comprimento total do grupo4: 156,4 m

Grupo 5 – Reforçadores Secundários do convés superior

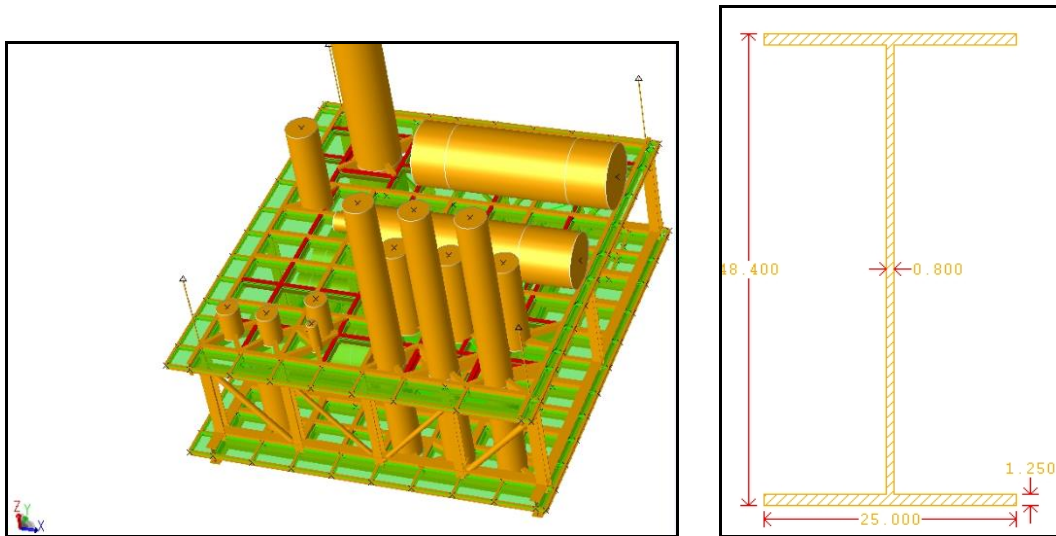


Figura 75 – Vista isométrica do grupo 5 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo5:

$$b = 25,0 \text{ cm}$$

$$h = 48,4 \text{ cm}$$

$$t_w = 8,0 \text{ mm}$$

$$t_f = 12,5 \text{ mm}$$

Comprimento total do grupo5: 165,4 m

Grupo 6 – Colunas de ligação entre o convés primário e secundário

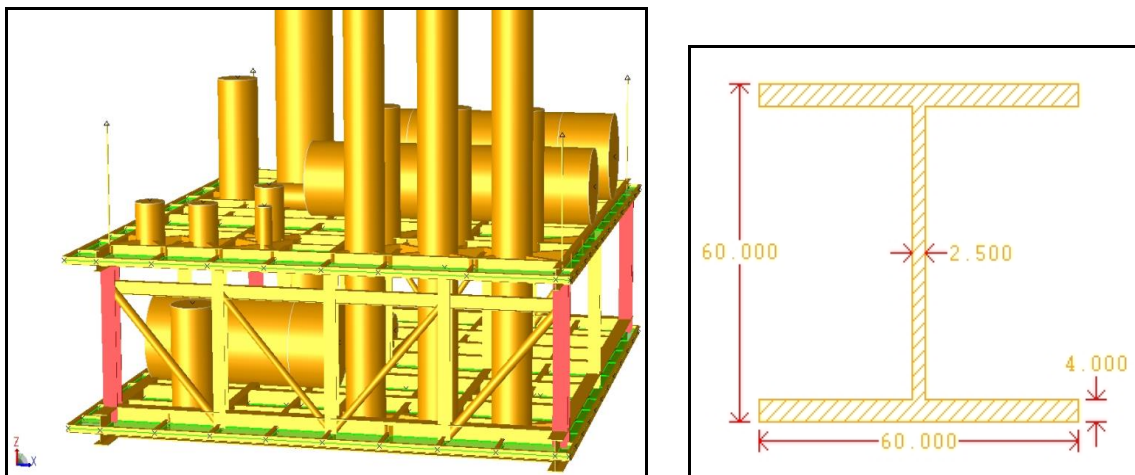


Figura 76 – Vista isométrica do grupo 6 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo6:

$$b = 60,0 \text{ cm}$$

$$h = 60,0 \text{ cm}$$

$$t_w = 25,0 \text{ mm}$$

$t_f = 40,0 \text{ mm}$

Comprimento total do grupo6: 25,8 m

Grupo 7 – Colunas de ligação entre o convés primário e secundário

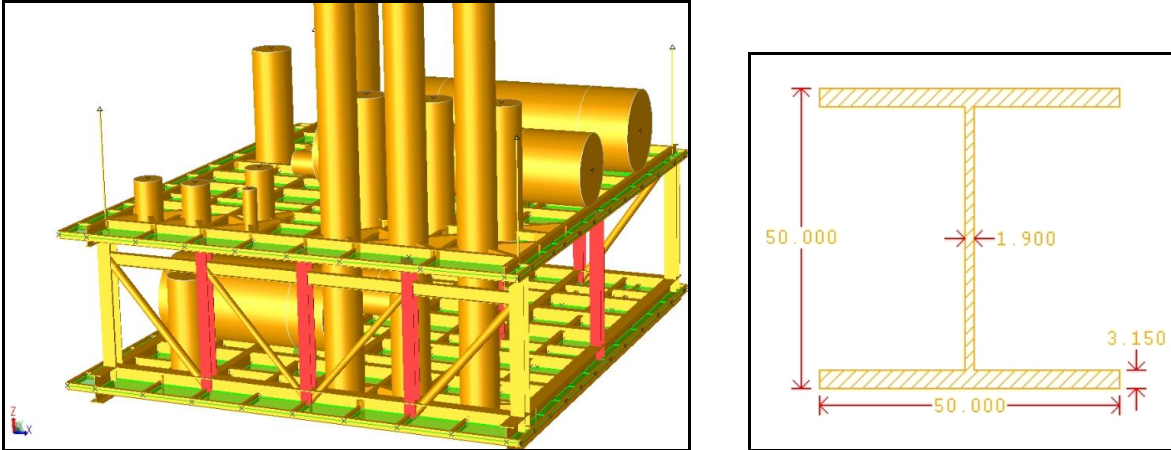


Figura 77 – Vista isométrica do grupo 7 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo7:

$b = 50,0 \text{ cm}$

$h = 50,0 \text{ cm}$

$t_w = 19,0 \text{ mm}$

$t_f = 31,5 \text{ mm}$

Comprimento total do grupo7: 70,9 m

Grupo 8 – Reforçador Transversal Primário

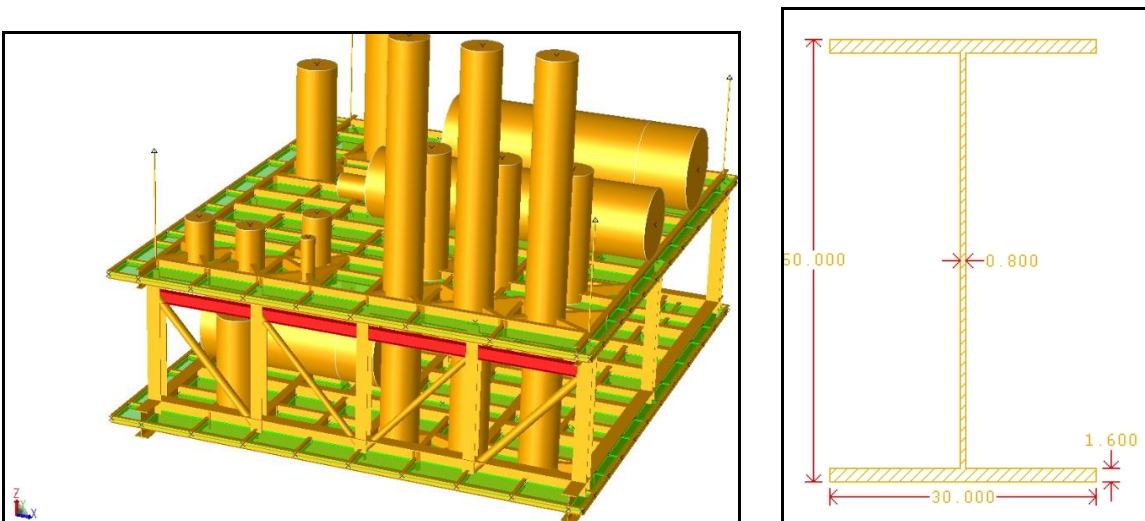


Figura 78 – Vista isométrica do grupo 8 (grifado em vermelho) e seção transversal destes elementos

Características da seção transversal do grupo8:

b = 30,0 cm

h = 50,0 cm

tw = 8,0 mm

tf = 16,0 mm

Comprimento total do grupo5: 70,9 m

Logo, estes oito grupos listados fazem parte da lógica de “otimização”, uma vez que estes elementos terão suas espessuras gradativamente alteradas. Note que não optou-se pela alteração do chapeamento dos dois conveses do módulo. Isto se deve ao fato de que neste projeto o cliente optou por utilizar uma espessura elevada de chapeamento visando reduzir o número de reforçadores necessários para obter a rigidez necessária a resistência das diferentes solicitações. Esta decisão do cliente junto ao projetista deste módulo foi tomada baseando-se em um projeto semelhante. Sendo assim, também se optou por não alterar esta espessura na “otimização”, evitando assim um risco de subdimensionar este parâmetro para a etapa do módulo na Plataforma (*In Place*), que embora não seja a crítica, possui cargas vivas sobre o convés, além de análises complementares de fadiga de membros estruturais.

A caráter de estratégia de método, também se verificou o percentual de peso de cada um destes grupos “otimizáveis” em relação ao peso total de aço do módulo, afim de analisar quantitativamente se estas alterações iriam causar mudanças significativas no peso original. Além disso, o peso total estrutural do módulo tem o seguinte valor:

Peso Total Estrutural: **415,7** Toneladas

Onde estão contabilizados além dos pesos dos perfis e chapas, também elementos não modelados (parafusos, por exemplo), solda e tinta.

Temos os seguintes percentuais de influencia no peso total da estrutura do módulo a partir dos grupos a pouco apresentados:

Tabela 12 – Influência percentual no peso total de aço do módulo de remoção de CO2

	Peso(Ton)	Percentual em relação ao peso total (%)
Grupo 1	13,6	3%
Grupo 2	72,4	17%
Grupo 3	91,1	22%
Grupo 4	69,4	17%
Grupo 5	19,0	5%
Grupo 6	18,2	4%
Grupo 7	32,6	8%
Grupo 8	2,9	1%
Chapeamento	86,2	21%
Outros	10,3	2%
Peso Total Estrutural	415,7	100%

É importante destacar a grande influência dos grupos 2, 3 e 4 e consequentemente a maior atenção, no momento da “otimização”, para estes grupos. Além disso, é importante destacar a grande participação do chapeamento, que embora não faça parte da estratégia de “otimização” deste presente trabalho, pelos motivos já explicitados a pouco, pode ser variável de mérito para outro estudo, em condições contextuais diferentes das aqui existentes.

Como este trabalho buscou-se considerar uma situação real de projeto, e viabilidade produtiva de um possível módulo “otimizado”, as espessuras escolhidas no processo de redução das mesmas obedecem as fabricáveis e as mesmas utilizadas no projeto deste módulo. Sendo assim, consideraram-se as seguintes espessuras:

Tabela 13 – Chapas Grossas comerciais (Fonte: Gerdau)

ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
6.30	19.00	44.50
8.00	22.40	50.00
9.50	25.00	63.00
12.50	31.50	75.00
16.00	37.50	100.00

É importante destacar que todos os elementos reforçadores deste módulo são soldados, logo são produzidos a partir de chapas fabricáveis.

No entanto, tendo em mãos a definição dos grupos a serem modificados, e as espessuras de chapas possíveis, também se deve atentar a características de soldagem, para se evitar problemas de empeno de reforçadores pelo aporte de calor. Com isso, não foi considerada espessura de flange menor que a espessura de alma, visando garantir esta qualidade construtiva.

Contudo, as análises realizadas tomam como ponto de partida duas direções diferentes. A primeira é reduzir as espessuras a partir do modelo original, até um ponto mínimo possível, onde a estrutura resista às cargas ainda com suas espessuras reduzidas. A segunda é partir de um modelo com suas espessuras bruscamente reduzidas a níveis que a estrutura não resista às solicitações, e a partir disso fazer um aumento gradativo destas espessuras até o nível em que a estrutura do módulo resista às cargas. Portanto, teremos um grupo de “rodadas”, ou análises, feitas a partir do software SACS para cada uma destas direções apresentadas. Com esta técnica, busca-se cercar um valor próximo do ótimo possível, desta estrutura. Portanto, temos duas direções, ou caminhos, no processo de “otimização”:

- Redução de espessuras a partir do modelo original.
- Aumento de espessuras a partir do modelo com baixa resistência estrutural.

3.8.1 Otimização a partir da redução das espessuras do modelo original

Esta “otimização” acontece a partir das espessuras originais dos grupos previstos. A tomada de decisão pelo modelo ser apto, ou não, se baseia nos dados de saída do programa, no que diz respeito às deflexões máximas do modelo, representadas pela deflexão dos nós (*Joints*), e as tensões máximas do mesmo, traduzidas pelos *Unit Checks*, de cada um dos elementos destes grupos “otimizáveis” ou não.

Logo, temos o seguinte procedimento de análise e avaliação:

Etapa 1 : Redução da espessura dos elementos para uma nova espessura diretamente inferior na tabela das chapas fabricáveis(Tabela 13).

Etapa 2 : Realização da rodada através do software(SACS) e observação dos dados de saída : deflexões e tensões(Unit Checks)

Etapa 3 : Caso a rodada realizada na etapa 2 seja favorável a continuação do processo de redução de espessuras, esta é realizada sucessivamente até ocorrer a primeira falha(flambagem, cisalhamento, tensão máxima admissível).

Caso a falha ocorra, deve se observar qual tipo de falha está ocorrendo e em qual grupo, a fim de aumentar novamente a espessura do mesmo, ou de grupos diretamente ligados a este. Este processo é iterativo e acaba quando se chega a um máximo de redução das espessuras dos grupos.

Sendo assim, partimos das espessuras originais dos grupos, que são as seguintes:

Tabela 14 – Rodada inicial para modelo com espessuras originais de alma e flange

Rodadas reduzindo as espessuras do modulo original gradualmente.	RODADA INICIAL	
	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
<u>Grupo 1</u>	9,5	8,0
<u>Grupo 2</u>	40,0	25,0
<u>Grupo 3</u>	25,0	16,0
<u>Grupo 4</u>	25,0	16,0
<u>Grupo 5</u>	12,5	8,0
<u>Grupo 6</u>	40,0	25,0
<u>Grupo 7</u>	31,5	19,0
<u>Grupo 8</u>	16,0	8,0

3.8.2 Otimização a partir do aumento das espessuras do modelo subdimensionado

Neste processo, partimos de espessuras muito abaixo das originais, em níveis de tensões e deflexões acima das permitidas. A partir deste modelo subdimensionado aumenta-se gradativamente as espessuras dos grupos com valores de *Unit Checks* mais elevados (acima de 1,0), a fim de chegar a uma situação final de um modelo com deflexões e tensões permitidas pela regra.

As etapas deste processo são semelhantes às previstas na “otimização” a partir do modelo original, anteriormente explicitado, com o diferencial de partirmos de um peso menor que o peso final alcançado.

Logo, partimos das seguintes espessuras dos grupos:

Tabela 15 – Rodada inicial com espessuras originais de alma e flange

Rodadas começando a partir de espessuras mínimas, respeitando a proporção da original.	RODADA INICIAL	
	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
Grupo 1	8,0	6,3
Grupo 2	16,0	12,5
Grupo 3	12,5	8,0
Grupo 4	16,0	9,5
Grupo 5	8,0	6,3
Grupo 6	25,0	16,0
Grupo 7	16,0	12,5
Grupo 8	9,5	6,3

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados da “otimização” a partir do Modelo Original


Temos as seguintes espessuras de alma e flange contabilizadas nas rodadas para este processo, bem como o respectivo total de aço reduzido em cada etapa e a avaliação da análise considerada:


Rodadas reduzindo as espessuras do modulo original gradualmente.	RODADA INICIAL	
	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
Grupo 1	9,5	8,0
Grupo 2	40,0	25,0
Grupo 3	25,0	16,0
Grupo 4	25,0	16,0
Grupo 5	12,5	8,0
Grupo 6	40,0	25,0
Grupo 7	31,5	19,0
Grupo 8	16,0	8,0



Rodadas reduzindo as espessuras do modulo original gradualmente.	RODADA INICIAL	
	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
Grupo 1	8,0	6,3
Grupo 2	37,5	22,4
Grupo 3	22,4	12,5
Grupo 4	22,4	12,5
Grupo 5	9,5	6,3
Grupo 6	37,5	22,4
Grupo 7	25,0	16,0
Grupo 8	12,5	6,3



 espessuras não alteradas

 espessuras alteradas

RODADA 1	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
6,3	6,3
31,5	19,0
19,0	9,5
19,0	9,5
8,0	6,3
37,5	22,4
25,0	16,0
9,5	6,3

↓

Deflexões	-
Tensões	NÃO PASSOU
Aço reduzido(Ton)	86,0

grupo 4 (unit check = 1.39) ; grupo7 (unit check=1,29)

↓

RODADA 2	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
6,3	6,3
25,0	16,0
16,0	8,0
16,0	8,0
6,3	6,3
37,5	22,4
25,0	16,0
9,5	6,3

↓

Deflexões	-
Tensões	NÃO PASSOU
Aço reduzido(Ton)	116,7

Unit Check = 2.36!!
Grupo 4

RODADA 3	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
6,3	6,3
25,0	16,0
16,0	8,0
19,0	9,5
6,3	6,3
37,5	22,4
25,0	16,0
9,5	6,3

Deflexões	-
Tensões	NÃO PASSOU
Aço reduzido(Ton)	109

RODADA 4	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
6,3	6,3
31,5	19,0
19,0	9,5
22,4	12,5
8,0	6,3
37,5	22,4
25,0	16,0
9,5	6,3

Deflexões	<u>PASSOU!</u>
Tensões	<u>PASSOU REDESIGN!</u>
Aço reduzido(Ton)	64,2

RODADA FINAL	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
6,3	6,3
25,0	16,0
19,0	9,5
22,4	12,5
8,0	6,3
31,5	19,0
25,0	16,0
9,5	6,3



Deflexões	PASSOU!
Tensões	PASSOU REDESIGN!
Aço reduzido(Ton)	74,76

Figura 79 – Sequência de rodadas para a otimização a partir do modelo original

Contudo, observa-se que tanto na rodada4, quanto na rodada final, o modelo passou nos critérios de tensões e deflexões. No entanto, se fez um refinamento do cálculo (*Redesign*), para as colunas que de ligação entre os conveses (Grupo 6 e 7). Tanto este refinamento, quanto os níveis de deformações para a rodada final serão explicitados a seguir:

- Análise de Deflexões (Rodada Final)

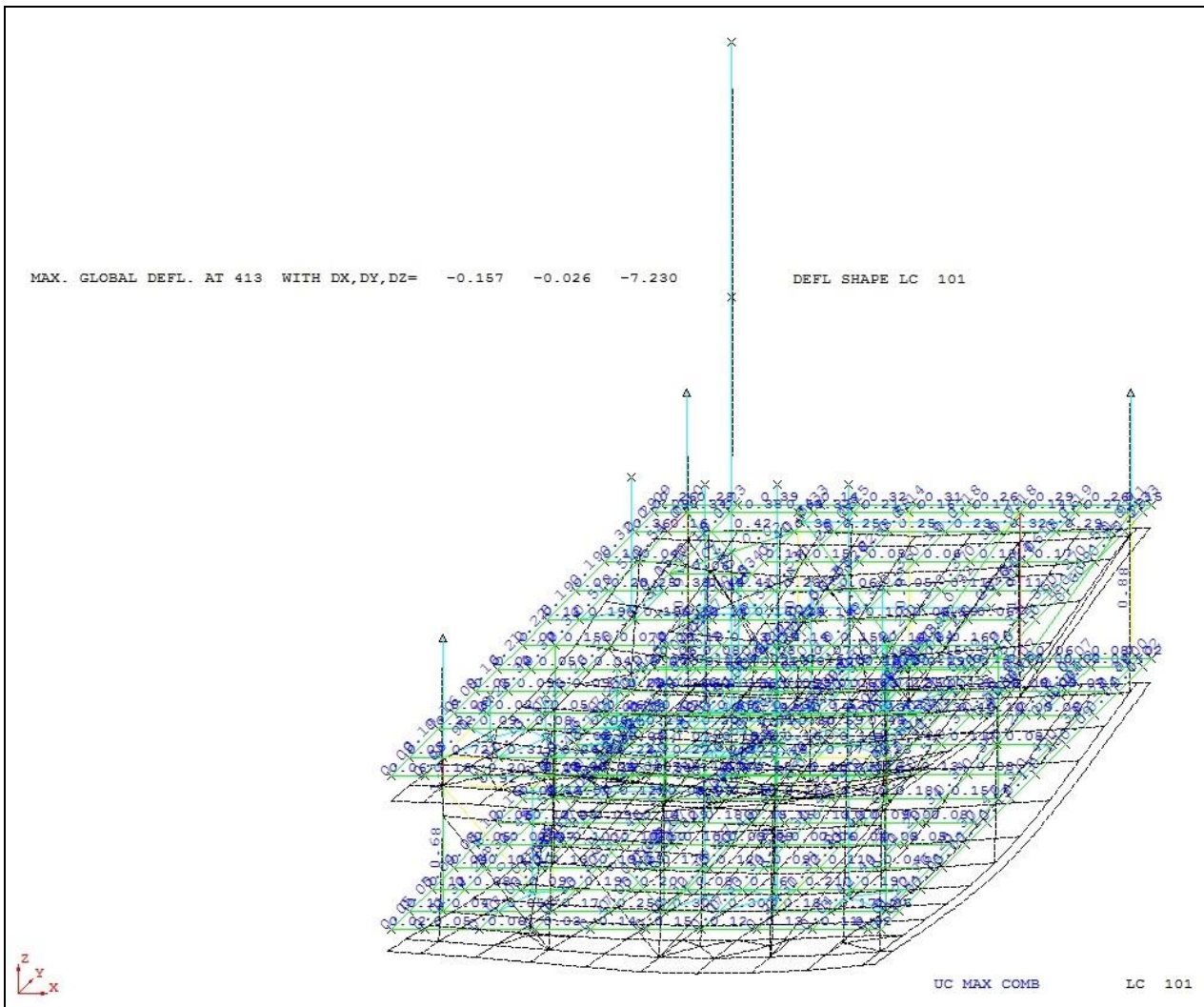


Figura 80 – Vista isométrica da deformação do modelo otimizado(Rodada final)

Para esta análise, se observam os pontos (*Joints*) com maiores deflexões no convés superior e inferior e, a partir disso, realiza-se a seguinte verificação:

Tabela 16 – Deflexões do nó crítico do convés superior (nó 117)

Deflexões Rodada Final			
Joint:	117	deflexão(cm) :	6,918844
Joint:	19	deflexão(cm) :	6,762386
Joint:	107	deflexão(cm) :	6,839245
Joint:	127	deflexão(cm) :	6,796859
Joint:	18	deflexão(cm) :	6,592741

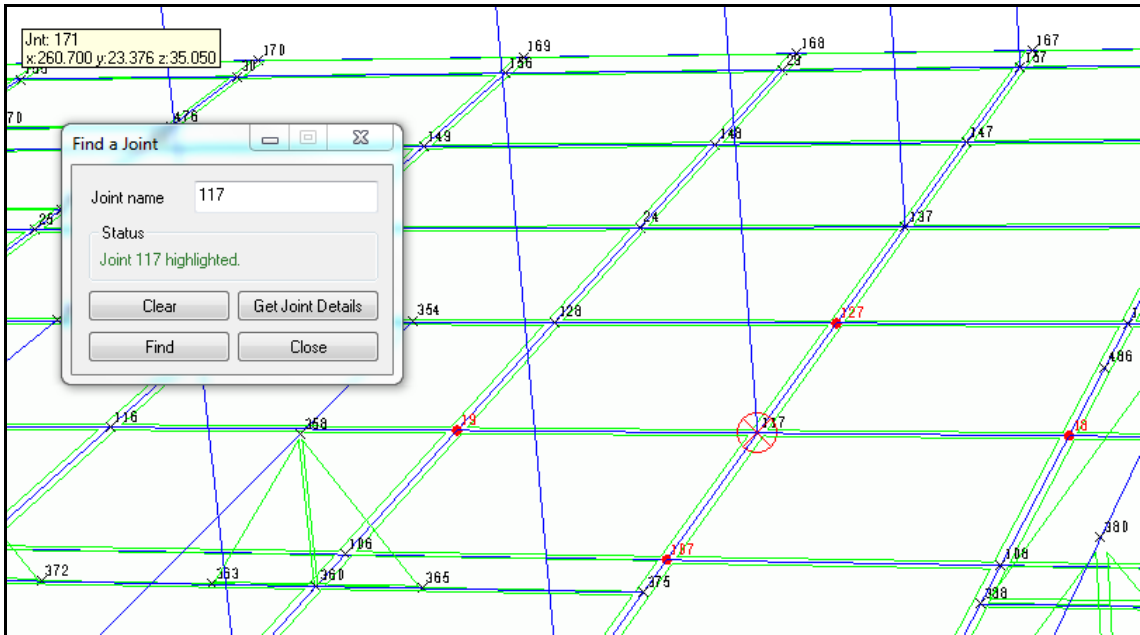


Figura 81 – Nó crítico (117) do modelo otimizado e seus nós adjacentes(19,107,127,18)

Devemos mapear os nós nas duas direções, como observado na figura acima, uma vez que a análise de deflexão deve considerar o vão livre do reforçador, que pode ser maior em uma direção do que outra.

Considera-se que a deflexão do nó não pode ultrapassar 1/360 do comprimento do vão livre que comporta o nó crítico, que para este caso do convés superior é o nó 117. Logo:

Vão livre(m):	4,65	direção X
Vão livre(cm):	4,1	direção y

Deflexões relativas entre os nós:

Variacao em X(cm)	0,121984
Variacao em Y(cm)	0,326103

Verificação da máxima variação permitível (cm):

análise em X	1,291667	OK!!!
análise em Y	1,138889	OK!!!

Onde as deflexões relativas devem ser menores do que estas permitidas.

De forma equivalente faz-se a mesma verificação para o convés inferior:

Tabela 17 – Deflexões do nó crítico do convés inferior (nó 297)

Deflexões Rodada Final		
Joint:	297	deflexão(cm) : 6,742808
Joint:	290	deflexão(cm) : 6,324234
Joint:	304	deflexão(cm) : 7,118922
Joint:	298	deflexão(cm) : 6,197382
Joint:	296	deflexão(cm) : 6,978366

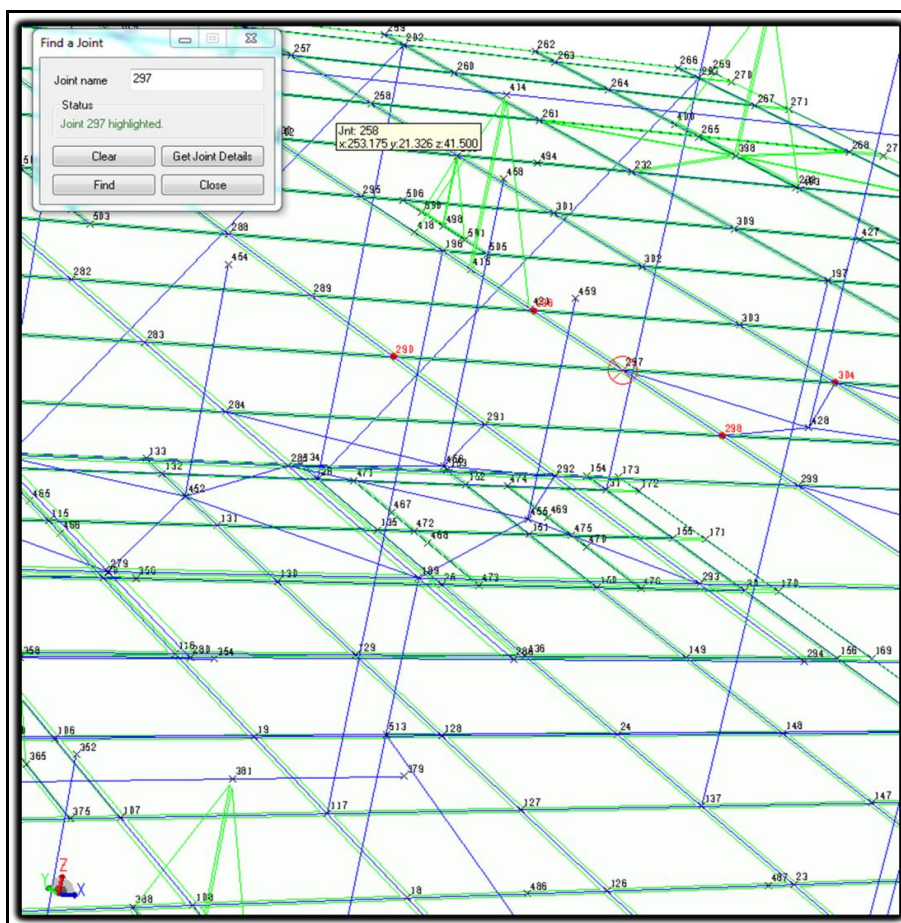


Figura 82 – Nó crítico (297) do modelo otimizado e seus nós adjacentes(290,304,298,296)

Vão livre(m):	4,65	direção X
Vão livre(cm):	3,7	direção y

Variacao em X(cm)	0,418574
Variacao em Y(cm)	0,545426

análise em X	1,291667	OK!!!
análise em Y	1,027778	OK!!!

- Refinamento do cálculo de Colunas (Rodada Final)

Além disso, foi realizado um processo de refinamento de cálculo, a fim de investigar colunas que apresentaram valores de *Unit Checks* superiores a 1,0. Como o comprimento do perfil considerado no cálculo de flambagem pelo software vai de nó a nó, podemos fazer este refinamento considerando o comprimento real do perfil, descontando os valores de meia largura de alma dos elementos da extremidade da coluna, neste caso. Logo, o refinamento desta rodada final procede da seguinte forma:

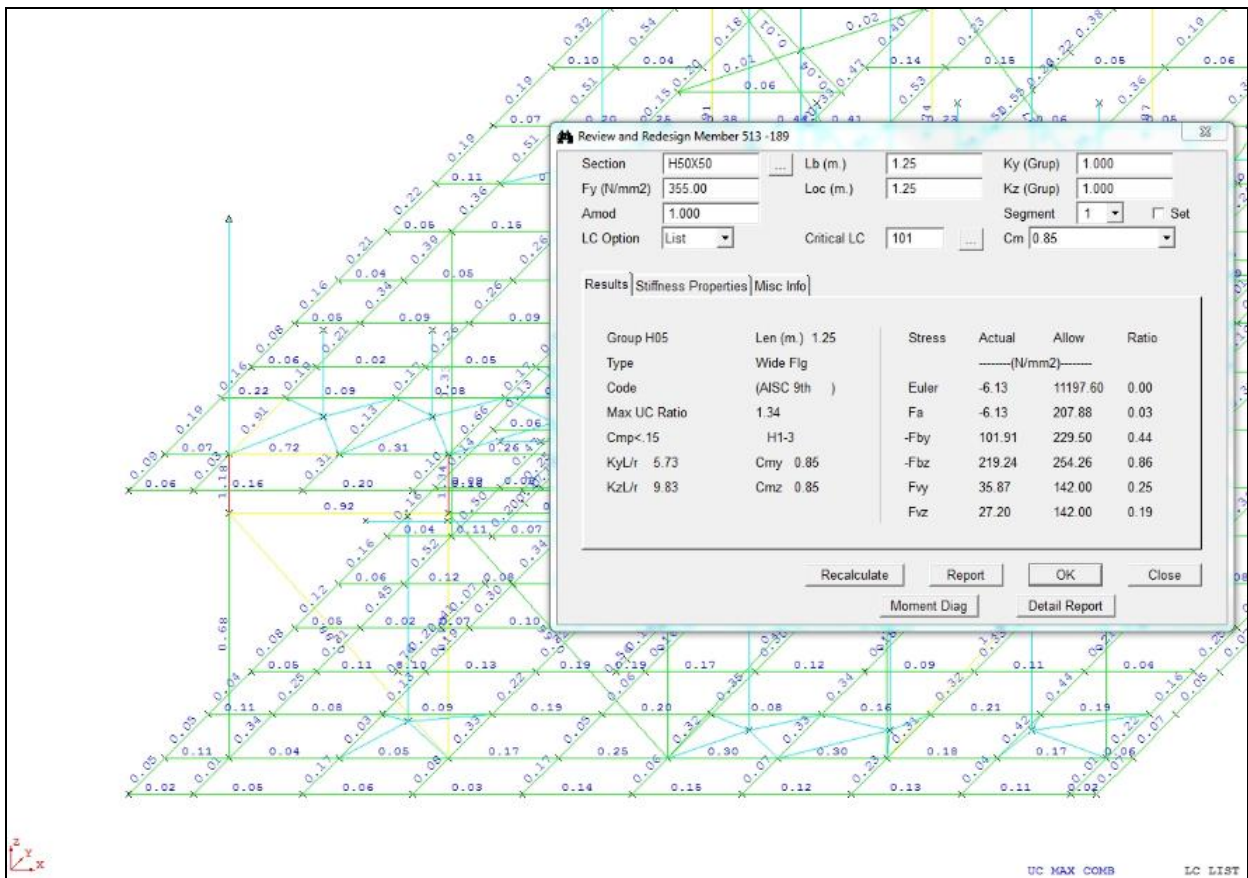


Figura 83 – Refinamento do cálculo de tensões para as colunas do modelo

Review and Redesign Member 513 -189

Section: H50X50
 Fy (N/mm2): 355.00
 Amod: 1.000
 LC Option: List

Lb (m.): 1.25
 Loc (m.): 1.25
 Critical LC: 101

Ky (Grup): 1.000
 Kz (Grup): 1.000
 Segment: 1
 Cm: 0.85

Results | Stiffness Properties | Misc Info

Group H05	Len (m.)	Stress	Actual	Allow	Ratio
Type	Wide Flg	----- (N/mm2) -----			
Code	(AISC 9th)	Euler	-6.13	11197.60	0.00
Max UC Ratio	1.34	Fa	-6.13	207.88	0.03
Cmp < .15	H1-3	-Fby	101.91	229.50	0.44
KyL/r	5.73	-Fbz	219.24	254.26	0.86
KzL/r	9.83	Fvy	35.87	142.00	0.25
		Fvz	27.20	142.00	0.19

Buttons: Recalculate, Report, OK, Close, Moment Diag, Detail Report

Figura 84 – Parâmetros do *Unit Check* para coluna que não passa na verificação

Observe que o valor do *Unit Check* verificado é de 1,34. Logo, fazendo os descontos pertinentes no comprimento da coluna original ($L_b=1,25$ m), obtemos os seguintes valores:

Section: H50X50
 Fy (N/mm2): 355.00
 Amod: 1.000
 LC Option: List

Lb (m.) (M): 0.95
 Loc (m.): 0.95
 Critical LC: 101

Ky (Grup): 1.000
 Kz (Grup): 1.000
 Segment: 1
 Cm: 0.85

Results | Stiffness Properties | Misc Info

Group H05	Len (m.)	Stress	Actual	Allow	Ratio
Type	Wide Flg	----- (N/mm2) -----			
Code	(AISC 9th)	Euler	-6.16	11197.60	0.00
Max UC Ratio	0.95	Fa	-6.16	207.88	0.03
Cmp < .15	H1-3	-Fby	91.26	229.50	0.40
KyL/r	5.73	-Fbz	133.32	254.26	0.53
KzL/r	9.83	Fvy	35.87	142.00	0.25
		Fvz	27.20	142.00	0.19

Location changed

Buttons: Recalculate, Report, OK, Close, Moment Diag, Detail Report

Figura 85 – Parâmetros do *Unit Check* para coluna refinada em seu cálculo

Portanto, com a redução para 0,95 metros, que é consequência da redução de metade da alma dos reforçadores ligados a extremidade da coluna:

$$L_b = 1,25\text{m} - (0,15\text{m} + 0,15\text{m}).$$

Feito isso, garantimos que este modelo é uma versão “otimizada” do modelo original, considerando a etapa de lifting como a principal modeladora do projeto. É importante destacar que embora o modelo resista ao içamento, devem-se fazer verificações adicionais na etapa na plataforma (*in Place*), tais como fadiga, por exemplo.

Contudo, tendo o modelo analisado nesta etapa crítica de içamento, conseguimos garantir que mesmo que ocorram modificações na topologia estrutural devido a cargas atuantes na etapa na plataforma, estas serão mínimas e com baixa probabilidade desta necessidade, tendo em vista os níveis de tensões observados na etapa delimitadora do projeto do módulo.

- Total de aço reduzido

Para este caso, temos os seguintes valores do aço total reduzido nesta “otimização” e sua respectiva percentagem de redução:

Tabela 18 – Resultados da “otimização” a partir do modelo original

RESULTADOS	
Redução a partir do modelo original	
Total de Aço Reduzido (Ton)	74,8
Percentual de Redução	18,0%

4.2 Resultados da otimização a partir do Modelo Subdimensionado

De forma equivalente temos as espessuras de alma e flange contabilizadas nas rodadas para este processo:

Rodadas começando a partir de espessuras mínimas, respeitando a proporção da original.	RODADA INICIAL	
	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
Grupo 1	8,0	6,3
Grupo 2	16,0	12,5
Grupo 3	12,5	8,0
Grupo 4	16,0	9,5
Grupo 5	8,0	6,3
Grupo 6	25,0	16,0
Grupo 7	16,0	12,5
Grupo 8	9,5	6,3



RODADA 8	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
8,0	6,3
16,0	12,5
19,0	12,5
16,0	9,5
8,0	6,3
31,5	19,0
19,0	16,0
12,5	8,0



Deflexões	-
Tensões	NÃO PASSOU
Aço reduzido (Ton)	92,3



RODADA FINAL	
Espessura(mm)	
Flange	Alma
8,0	6,3
16,0	12,5
19,0	12,5
16,0	12,5
8,0	6,3
31,5	19,0
22,4	19,0
12,5	8,0



Deflexões	PASSOU!
Tensões	PASSOU REDESIGN!
Aço reduzido (Ton)	84,2

Figura 86 – Sequência de rodadas para a “otimização” a partir do modelo subdimensionado

Neste ponto é plausível apresentar o nível de tensões nos elementos componentes deste modelo subdimensionado:

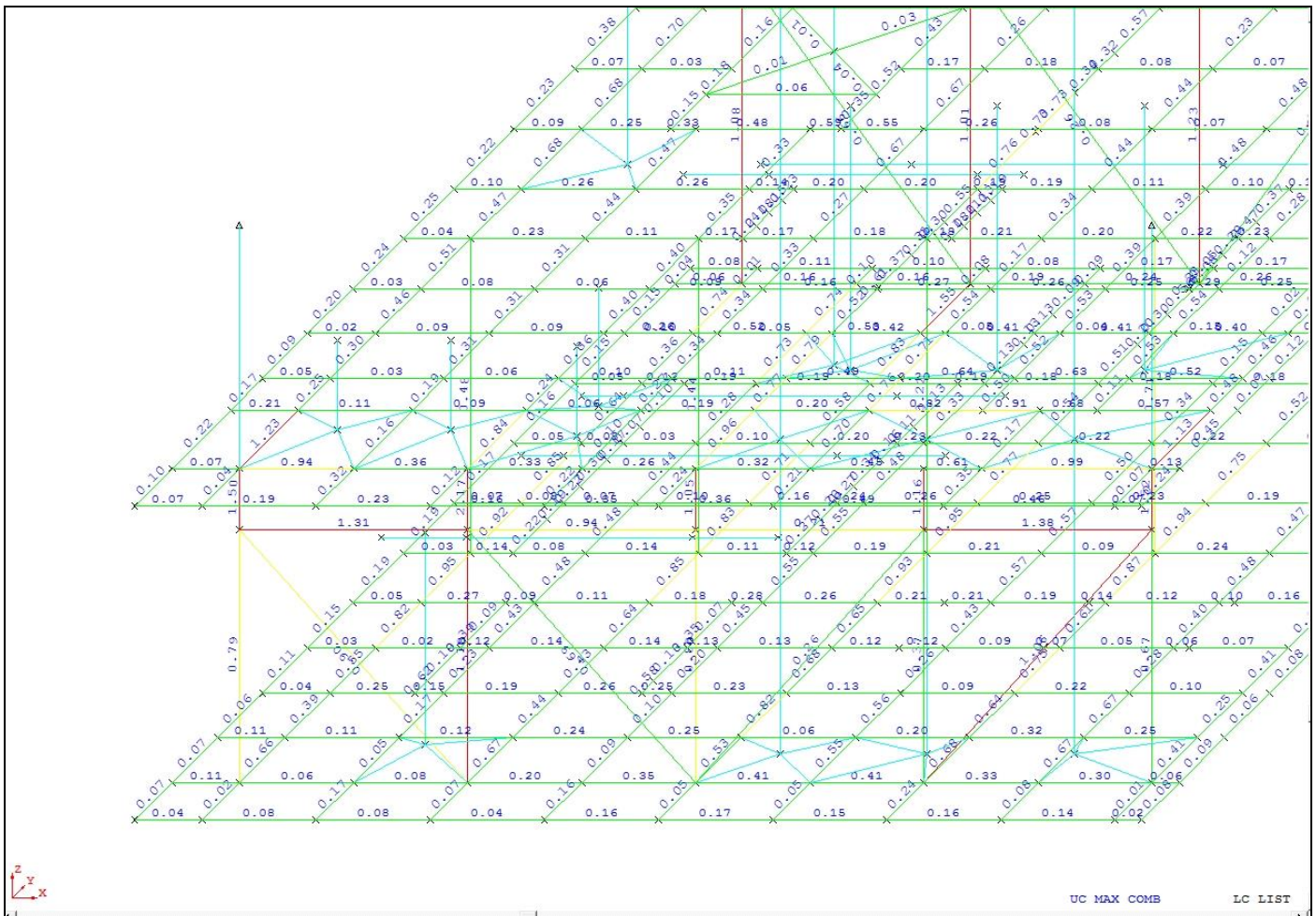


Figura 87 – Unit Check dos elementos do modelo subdimensionado

Observe na figura acima que existem inúmeros elementos com níveis de tensões acima do permitido (cor vermelha), principalmente os elementos de coluna (grupo 6 e 7).

Contudo, de forma equivalente, a seguir serão apresentados os resultados das análises de deflexão e refinamento da rodada final deste processo:

- Análise de Deflexões (Rodada Final)

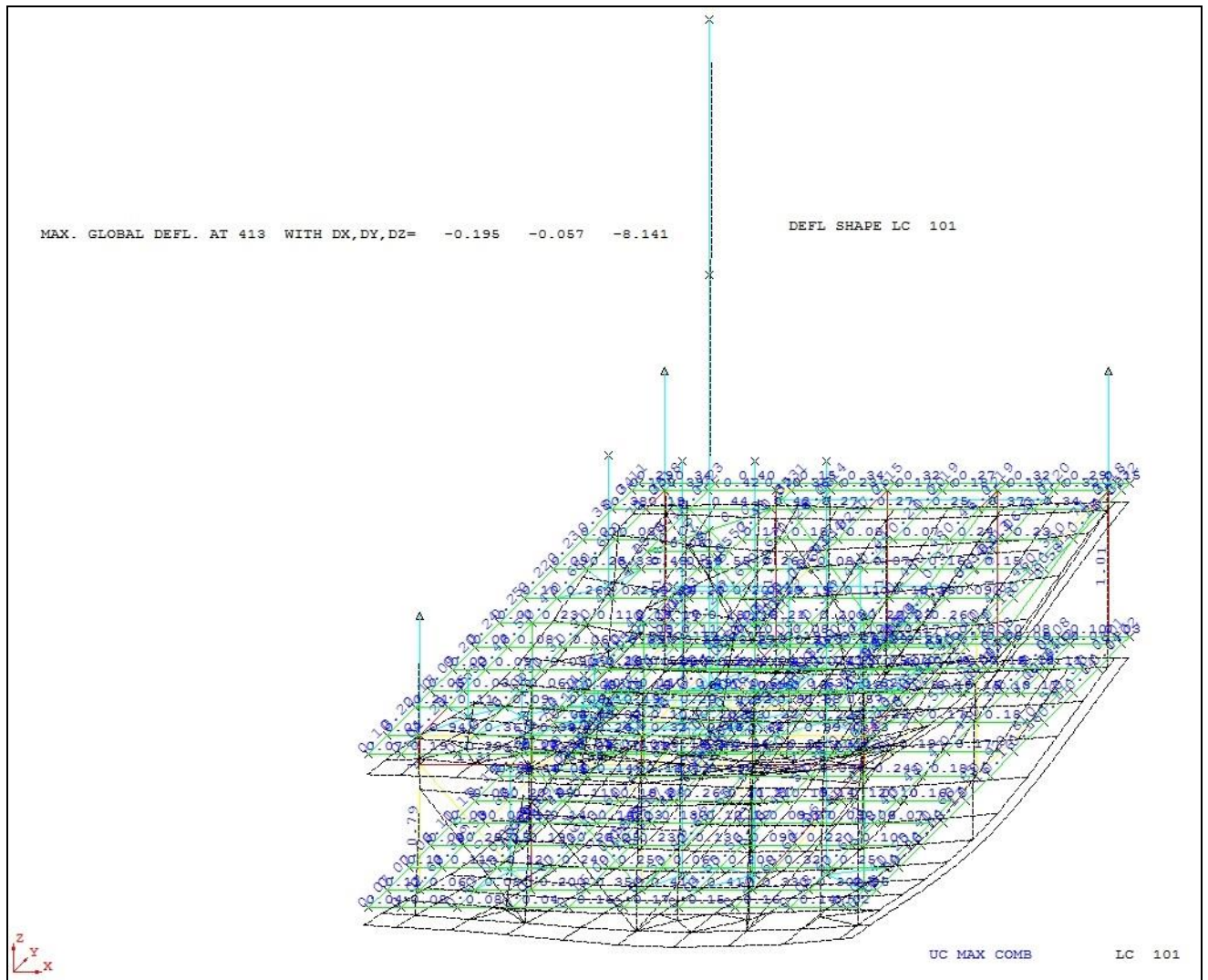


Figura 88 – Vista isométrica da deformação do modelo otimizado(Rodada final)

Prosseguindo na verificação da deflexão dos nós críticos do modelo:

Tabela 19 – Deflexões do nó crítico do convés superior (nó 117)

Deflexões Rodada Final			
Joint:	117	deflexão(cm) :	7,222626
Joint:	19	deflexão(cm) :	7,070418
Joint:	107	deflexão(cm) :	7,144989
Joint:	127	deflexão(cm) :	7,094369
Joint:	18	deflexão(cm) :	6,847268

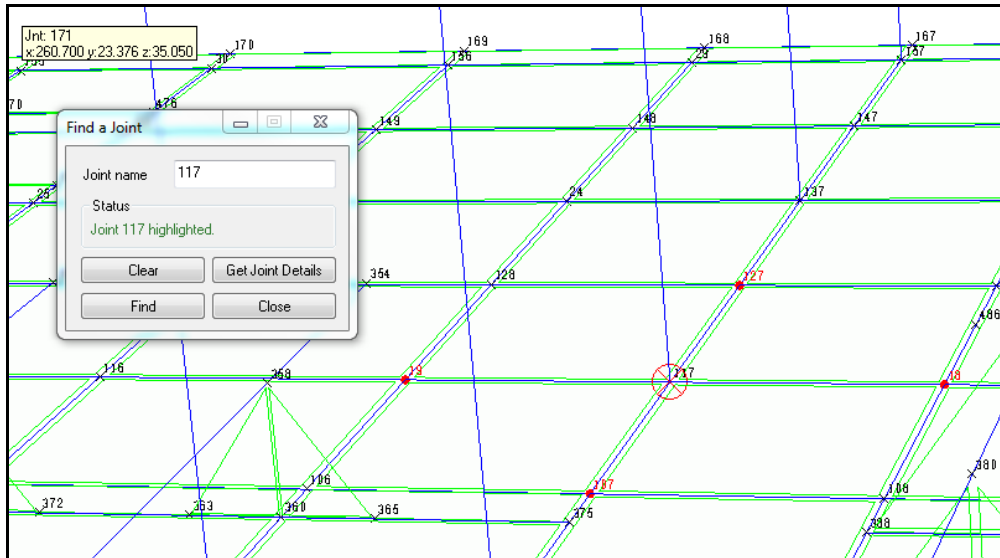


Figura 89 – Nó crítico (117) do modelo otimizado e seus nós adjacentes(19,107,127,18)

Vão livre(m):	4,65	direção X
Vão livre(cm):	4,1	direção y

Variacao em X(cm)	0,128257
Variacao em Y(cm)	0,375358

análise em X	1,291667	OK!!!
análise em Y	1,138889	OK!!!

Para o nó crítico do convés inferior temos:

Tabela 20 – Deflexões do nó crítico do convés inferior (nó 297)

Deflexões Rodada Final			
Joint:	297	deflexão(cm) :	6,847268
Joint:	290	deflexão(cm) :	6,523124
Joint:	304	deflexão(cm) :	7,304835
Joint:	298	deflexão(cm) :	6,318434
Joint:	296	deflexão(cm) :	7,241673

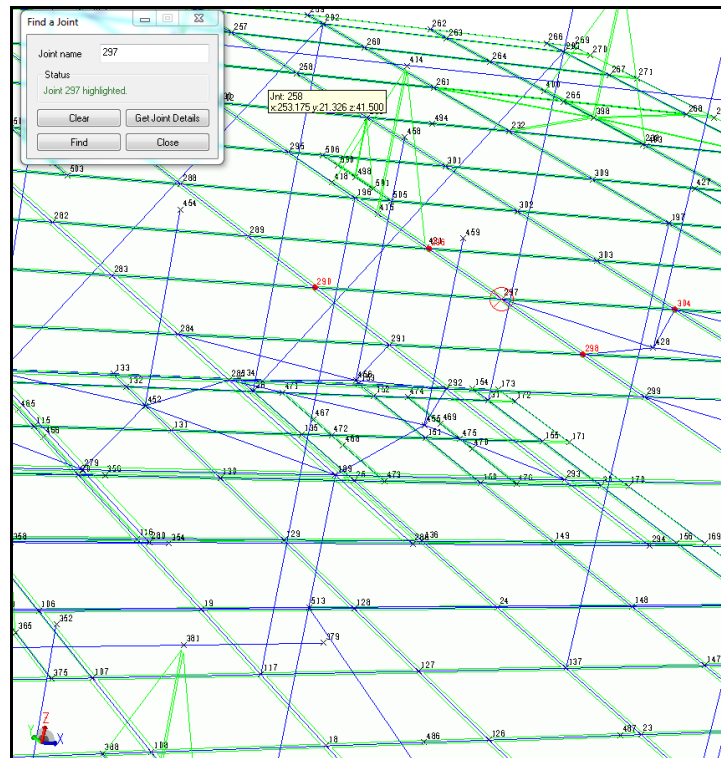


Figura 90 – Nó crítico (297) do modelo otimizado e seus nós adjacentes (290,304,298,296)

Vão livre(m):	4,65	direção X
Vão livre(cm):	3,7	direção y

Variacao em X(cm)	0,457568
Variacao em Y(cm)	0,528834

análise em X	1,291667	OK!!!
análise em Y	1,027778	OK!!!

- Níveis de tensões do modelo “otimizado”

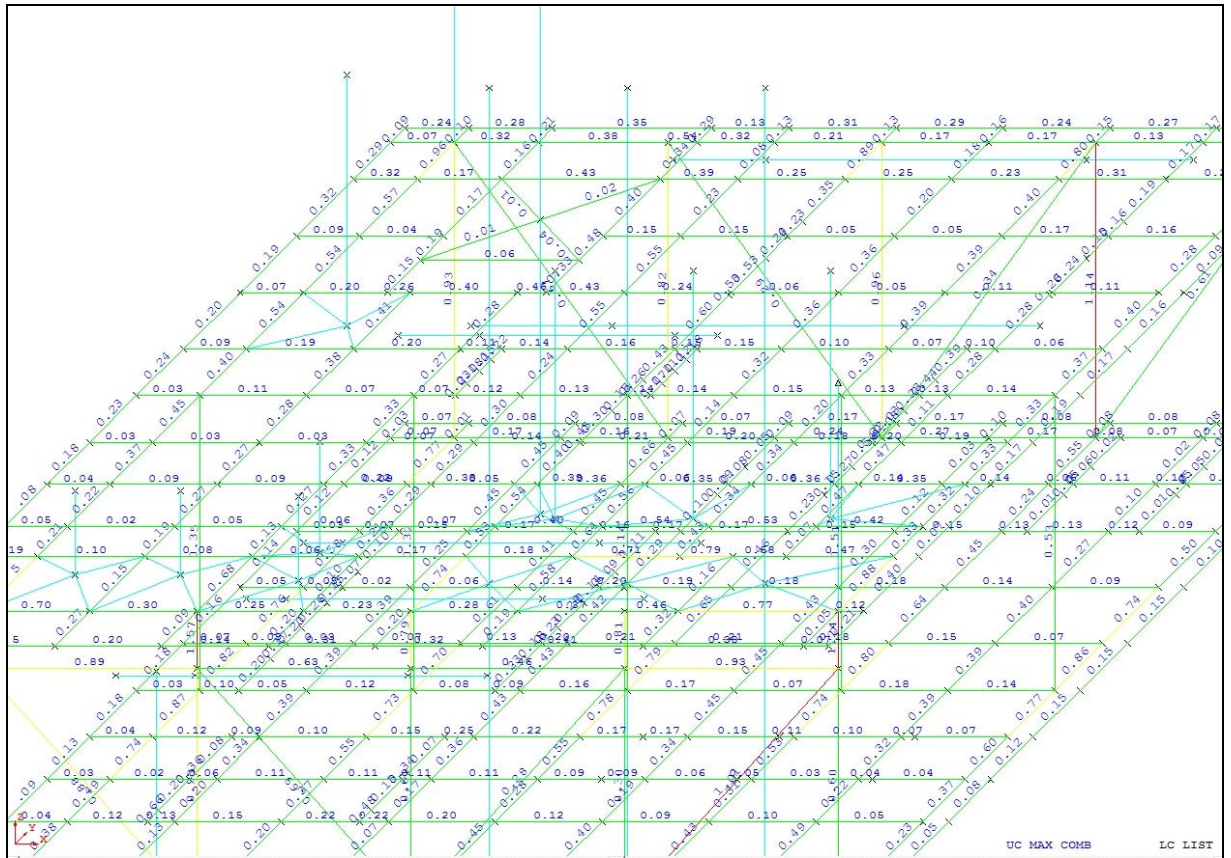


Figura 91 – Unit Check dos elementos do modelo otimizado

Observamos que uma das colunas apresenta níveis de tensões acima do permitidos (em vermelho) com valores de Unit Checks > 1. Com isso, de forma equivalente ao processo anterior de “otimização”, devemos realizar um refinamento do cálculo:

- Refinamento do cálculo de Colunas (Rodada Final)

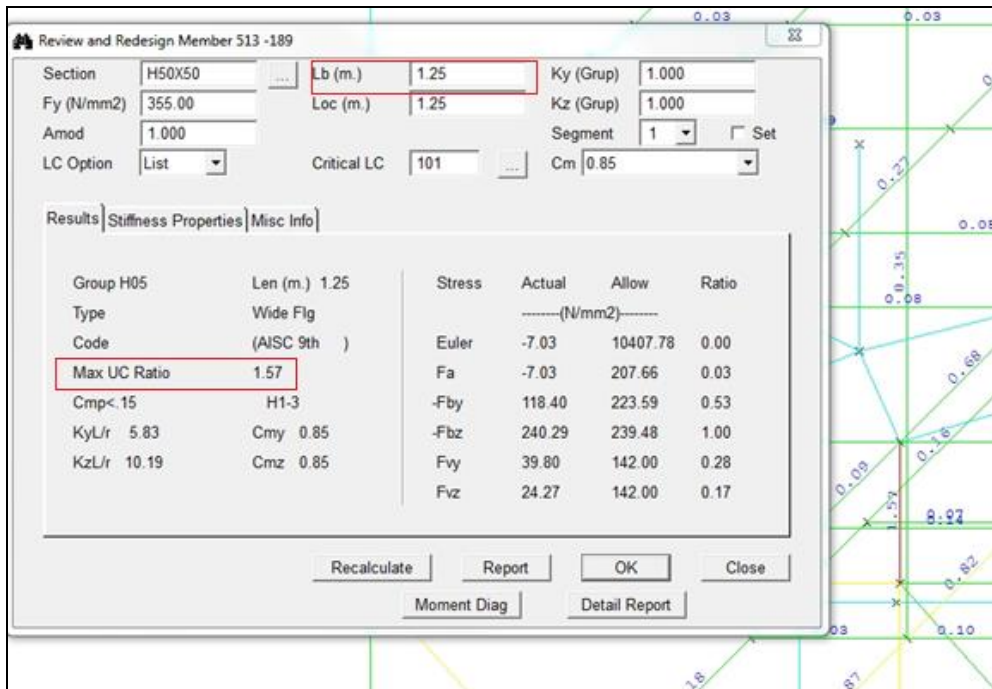


Figura 92 – Parâmetros do *Unit Check* para coluna que não passa na verificação

Fazendo as alterações pertinentes no comprimento do elemento de coluna:

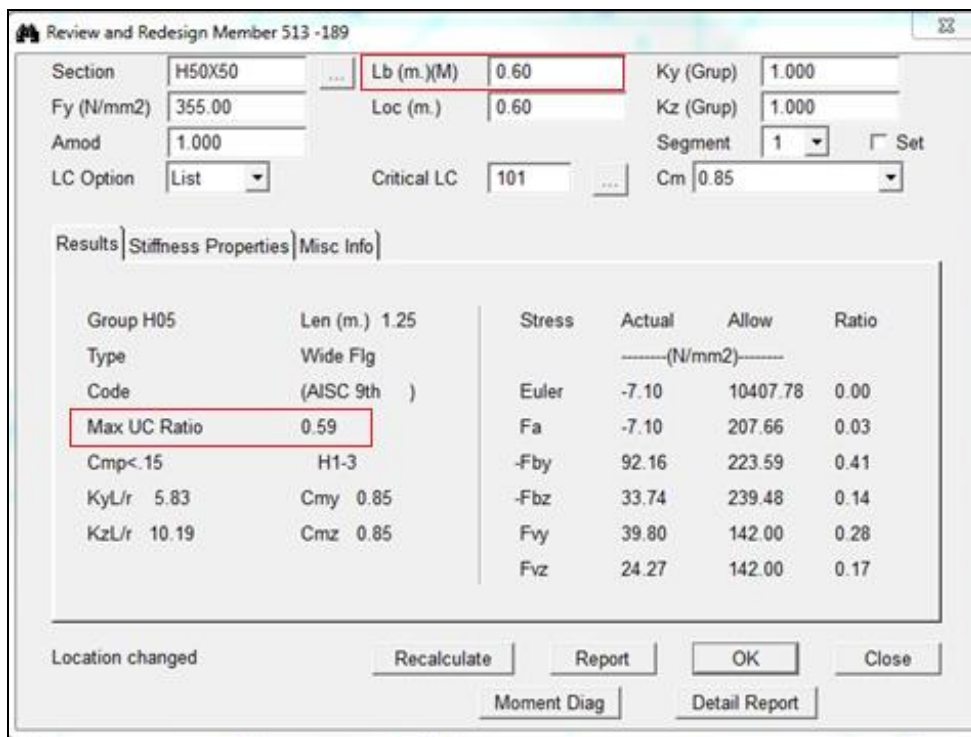


Figura 93 – Parâmetros do *Unit Check* para coluna refinada em seu cálculo

- Análise de Flambagem de Chapas

Tendo em vista que este processo se mostrou mais eficiente na redução do peso de aço que o anterior, optou-se por uma análise adicional de flambagem de chapas para este modelo, a fim de qualificar a utilização do mesmo na situação real de operação.

Esta análise compreende a verificação da possível ocorrência de flambagem das chapas dos conveses do módulo. Sendo assim, através do software SACS, obtivemos os índices de tensões atuantes nas chapas dos conveses, e tendo em mãos as situações críticas fez-se a utilização do software *Puls*, (do pacote *Sesam*), desenvolvido pela DNV, para flambagem de chapas e painéis. Sendo assim, observamos os níveis de tensões no primeiro e segundo convés da estrutura do módulo:

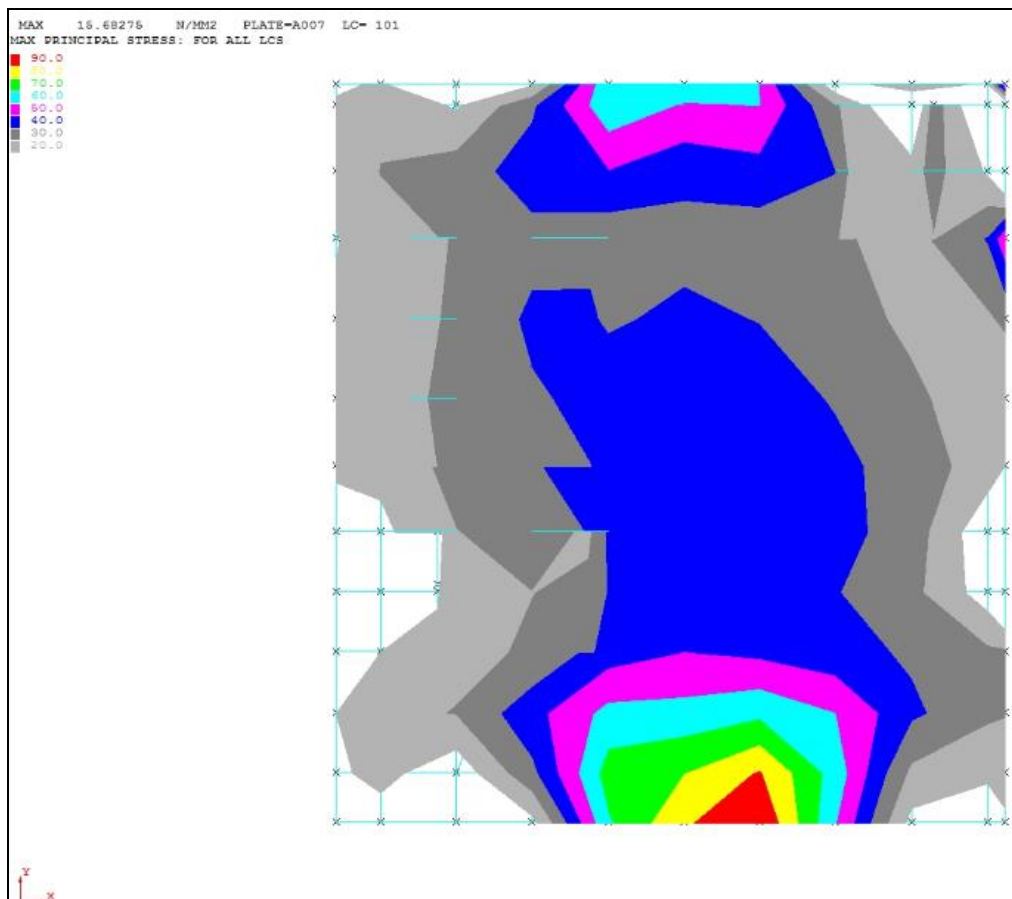


Figura 94 – Níveis de tensões axiais no chapeamento do convés inferior

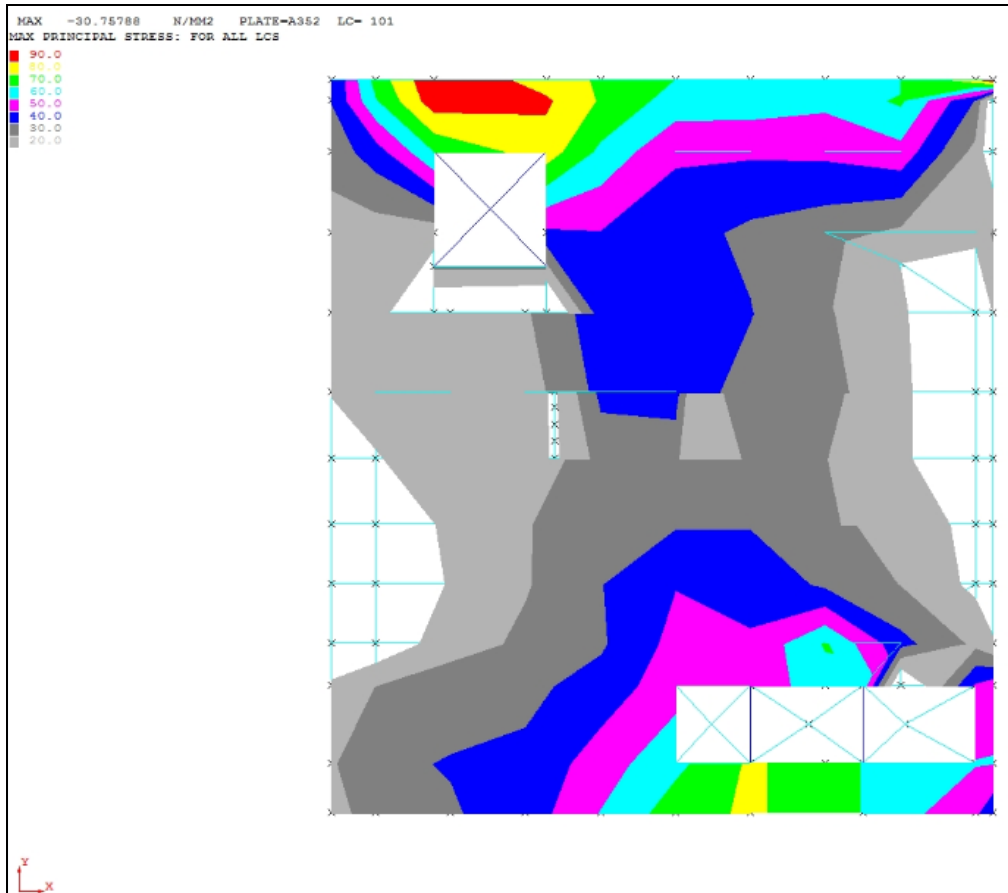


Figura 95 – Níveis de tensões axiais no chapeamento do convés superior

Tendo em mãos este diagrama gerado pelo SACS, podemos optar pelas chapas a serem analisadas, que são as seguintes:

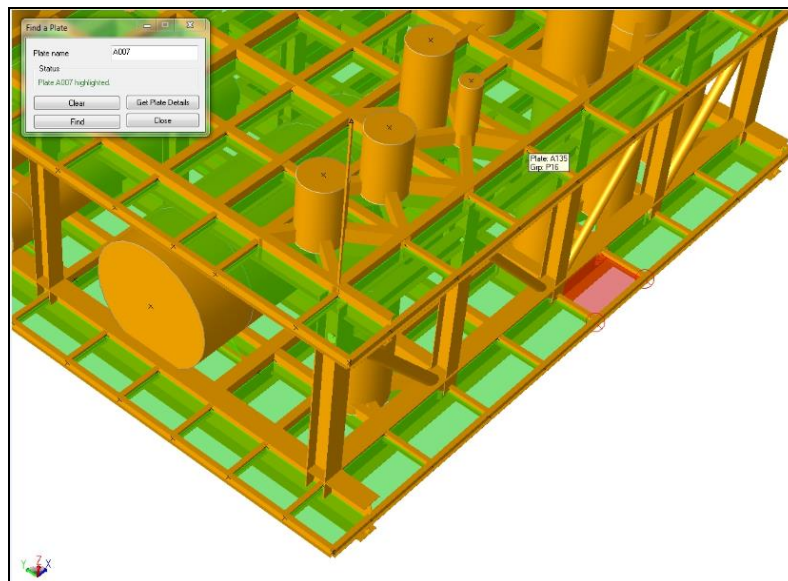


Figura 96 – Chapa crítica do convés inferior

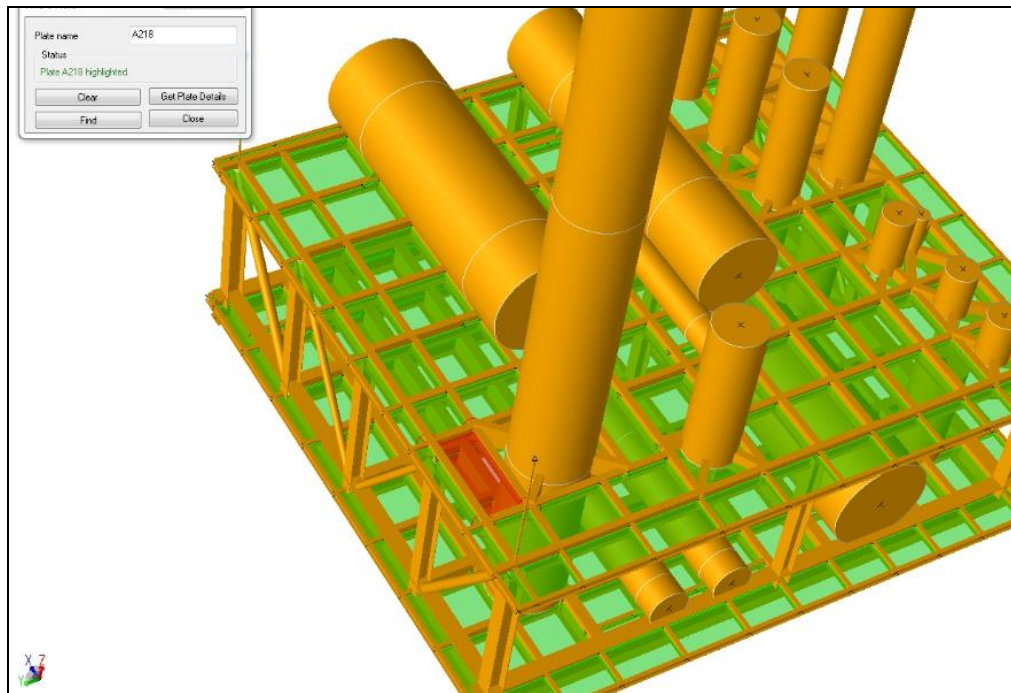


Figura 97 – Chapa crítica do convés superior

Com isso, as tensões atuantes nestes chapeamentos são as seguintes:

Chapa crítica do convés **inferior**:

Tensão axial em x: 14,7 N/mm²

Tensão axial em y: 0,4 N/mm²

Tensão Cisalhante: 0,2 N/mm²

Chapa crítica do convés **Superior**:

Tensão axial em x: 18,1 N/mm²

Tensão axial em y: 1,6 N/mm²

Tensão Cisalhante: 5,6 N/mm²

Com isso, utilizando estes dados como entrada no software *Puls* da DNV, temos:

General		Panel particulars																					
Identification																							
Allowable usage factor																							
$\eta_{\text{allowable, UC}} = $ <input type="text" value="1.00"/> $\eta_{\text{allowable, BS}} = $ <input type="text" value="1.00"/>																							
Comments		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geometry</th> <th>Material</th> <th>Loads</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">Dimensions</td> </tr> <tr> <td>Panel length [mm]:</td> <td>$L_1 =$</td> <td><input type="text" value="2325"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Panel width [mm]:</td> <td>$L_2 =$</td> <td><input type="text" value="1525"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Plate thickness [mm]:</td> <td>$t_p =$</td> <td><input type="text" value="16"/></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Geometry	Material	Loads	B	Dimensions				Panel length [mm]:	$L_1 = $	<input type="text" value="2325"/>		Panel width [mm]:	$L_2 = $	<input type="text" value="1525"/>		Plate thickness [mm]:	$t_p = $	<input type="text" value="16"/>	
Geometry	Material	Loads	B																				
Dimensions																							
Panel length [mm]:	$L_1 = $	<input type="text" value="2325"/>																					
Panel width [mm]:	$L_2 = $	<input type="text" value="1525"/>																					
Plate thickness [mm]:	$t_p = $	<input type="text" value="16"/>																					
Actual usage factor																							
Ultimate capacity																							
$\eta = $	<input type="text" value="0.12"/> Status <input type="button" value="OK"/>																						
Buckling strength																							
$\eta = $	<input type="text" value="0.27"/> Status <input type="button" value="OK"/>																						

Figura 98 – Definição da geometria da chapa crítica do convés inferior

Panel particulars			
Geometry	Material	Loads	Boundary conditions
Axial stress [MPa]:	$\sigma_{1,1} = $	<input type="text" value="14.7"/>	$\sigma_{1,2} = $
Transverse stress [MPa]:	$\sigma_{2,1} = $	<input type="text" value="0.4"/>	$\sigma_{2,2} = $
Shear stress [MPa]:	$\tau_{12} = $	<input type="text" value="0.2"/>	
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 99 – Definição das tensões atuantes na chapa crítica do convés inferior

Temos então, como dado de saída do programa o seguinte resultado:

General	
Identification	
<input type="text" value="A007"/>	
Allowable usage factor	
$\eta_{\text{allowable, UC}} =$	<input type="text" value="1.00"/>
$\eta_{\text{allowable, BS}} =$	<input type="text" value="1.00"/>
Comments	
<input type="text"/>	
Actual usage factor	
Ultimate capacity	
$\eta =$	<input type="text" value="0.09"/> Status <input type="text" value="OK"/>
Buckling strength	
$\eta =$	<input type="text" value="0.17"/> Status <input type="text" value="OK"/>

Figura 100 – Resultado para flambagem da chapa crítica do convés inferior

Sendo assim, não se observou a ocorrência de flambagem no convés inferior. Realizando o mesmo procedimento para o convés superior:

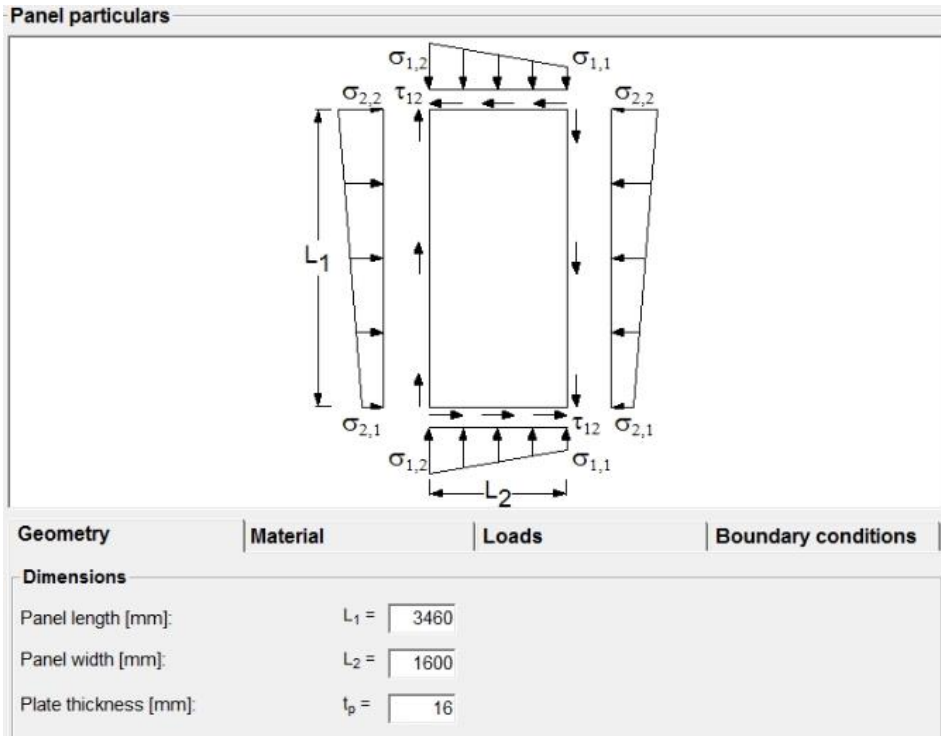


Figura 101 – Definição da geometria da chapa crítica do convés superior

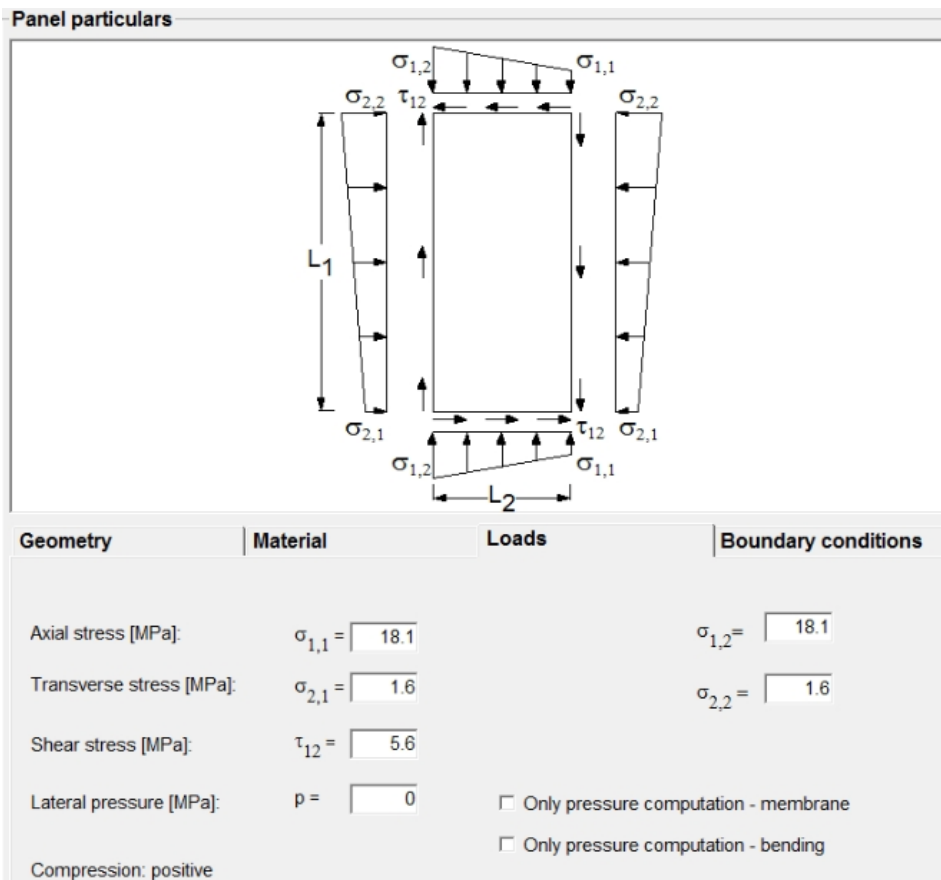


Figura 102 – Definição das tensões atuantes na chapa crítica do convés superior

General

Identification

A218

Allowable usage factor

η allowable, UC = 1.00

η allowable, BS = 1.00

Comments

Actual usage factor

Ultimate capacity

η = 0.12 Status OK

Buckling strength

η = 0.27 Status OK

Figura 103 – Resultado para flambagem da chapa crítica do convés superior

Logo, constata-se que não ocorre flambagem nas chapas pertencentes ao módulo, na etapa de *lifting*.

Contudo, feitas as análises de deflexões, tensões e flambagem de chapas, é definido assim o modelo “otimizado” pelo processo a partir de um modelo subdimensionado.

- Total de aço reduzido

Neste caso, temos os seguintes valores do aço total reduzido e sua respectiva percentagem de redução:

Tabela 21 – Resultados da “otimização” a partir do modelo subdimensionado

RESULTADOS	
Redução a partir do modelo subdimensionado	
Total de Aço Reduzido (Ton)	84,2
Percentual de Redução	20,3%

4.3 Modelo Final Otimizado

Como se observou, o método adotado para a busca do modelo com peso de aço reduzido através de um modelo subdimensionado mostrou-se mais eficaz, no que diz respeito à quantidade de aço economizada. Para este processo um percentual de 20,3 % de economia de aço foi contabilizado. Para o outro processo, através do modelo original, um percentual de 18% foi verificado, e a diferença entre os dois processos de busca pelo modelo ótimo (com menor peso possível) é de aproximadamente 11%. Este valor pode indicar que esta quantidade máxima de aço reduzido está próximo do valor de 84,2 toneladas, uma vez que cercamos a resposta, ou variável de mérito que é o peso final estrutural, por dois lados, partindo do modelo original e do modelo subdimensionado.

Tabela 22 – Resultados dos dois processos de “otimização” adotados

Comparação entre os Processos de Otimização		
	Redução a partir do modelo original	Redução a partir do modelo subdimensionado
Total de Aço Reduzido (Ton)	74,8	84,2
Percentual de Redução	18,0%	20,3%

Sendo assim, temos as seguintes características finais do modelo “otimizado”:

4.3.1 Características do Modelo Final Otimizado

Temos as seguintes espessuras de alma e flange para o modelo “otimizado”:

Tabela 23 – Espessuras finais de alma e flange do modelo “otimizado”:

Modelo Final Otimizado	Espessura(mm)	
	Flange	Alma
Grupo 1	8,0	6,3
Grupo 2	16,0	12,5
Grupo 3	19,0	12,5
Grupo 4	16,0	12,5
Grupo 5	8,0	6,3
Grupo 6	31,5	19,0
Grupo 7	22,4	19,0
Grupo 11	12,5	8,0

4.3.2 Resumo dos Dados Significativos da “Otimização”

Temos como dados relevantes para análise qualitativa e quantitativa do processo iterativo os seguintes valores:

Tabela 24 – Resumo dos valores obtidos com a otimização

Resumo dos dados Significativos da Otimização	
Peso Total de Aço do Módulo Original(Ton)	415,7
Peso Total de Aço do Módulo Otimizado(Ton)	331,5
Total de Aço Reduzido(Ton)	84,2
Redução Percentual	20,3%

4.3.3 Estimativa Global de Redução de Aço

Neste ponto podemos fazer uma estimativa inicial de quanto de aço poderíamos reduzir se o mesmo processo de “otimização” fosse realizado para os demais módulos da embarcação. Embora se trate de uma previsão inicial e sem dados das análises realizadas para os outros módulos, que possam ratificar a mesma, podemos admitir que como este processo de “otimização” foi realizado para o módulo, que é um dos mais pesados dentre todos da P-58 e apresenta níveis elevados de tensões e deformações se comparados aos demais, estimar a mesma redução

percentual para os demais módulos não está longe de uma situação real. Contudo, é importante destacar que, particularmente para o projeto desta plataforma, alguns módulos já possuíam equipamentos definidos ainda na etapa do projeto básico, que é o caso dos módulos que abrigam os geradores de energia, por exemplo. Logo, uma estimativa global de redução mais próxima da realidade consiste na observação das peculiaridades de cada um destes módulos.

No entanto, seguindo a estimativa inicial global de redução de aço aplicado, observam-se os seguintes valores de pesos estruturais dos módulos desta plataforma:

Tabela 25 – Listagem de pesos estimados dos módulos e suas respectivas reduções em aço estrutural

Extrapolação global para total de aço reduzido em otimização			
Módulo	Descrição	Peso de Aço estrutural(Ton)	Aço reduzido(Ton)
M01	Gas Dehydratation	379,9	77,1
M02A	Gas Compression	287,3	58,3
M02B	Gas Compression	287,3	58,3
M02C	Gas Compression	287,3	58,3
M03	CO2 Removal	415,7	84,2
M05	Oil processing	364,0	73,9
M06	Oil processing	289,5	58,8
M07	Oil processing	20,1	4,1
M09	Gas Compression	212,2	43,1
M10	Water injection	375,4	76,2
M10A	Sulphate Removal	239,9	48,7
M11	Local Equipment Room	521,8	105,9
M12	Chemical Storage	189,1	38,4
M13	Power generation	463,8	94,2
M14	Power generation	471,8	95,8
		4805,1	975,2

Com isso, admitindo uma redução percentual de 20,3 % do peso original de cada um destes módulos listados, temos uma redução global de aproximadamente 975,2 toneladas.

Em aspectos financeiros este total de aço, para um preço médio de 1000 US\$ / tonelada, teríamos o seguinte ganho financeiro:

Tabela 26 – Estimativa preliminar do ganho financeiro global com a otimização estrutural

Estimativa de Ganho Financeiro Global na Otimização	
Total de Aço Reduzido(Ton)	975,2
Preço médio do Aço(US\$/Ton)	1000,0
Ganho Financeiro(US\$)	975.200,00

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a apresentação de um método de “otimização” estrutural de um módulo pertencente a uma plataforma do tipo FPSO, no âmbito da redução do aço estrutural aplicado. Além disso, um objetivo secundário seria uma visão geral das diferentes etapas importantes para o projeto de um módulo deste tipo (*Load Out*, Transporte Marítimo, *In Place* e *Lifting*), tanto nos aspectos operacionais quanto na relação entre real e modelo computacional utilizado.

Como este módulo, e os demais desta plataforma, foi projetado numa etapa inicial da obra, muitos equipamentos e acessórios do mesmo ainda não tinham dimensões definidas e, conseqüentemente não se sabia a carga exata a qual o módulo iria ser submetido. Com isso, uma superestimava dos escantilhões do projeto do módulo é inevitável e prudente.

Contudo, um processo de “otimização” numa etapa posterior, tendo em mãos todas as informações necessárias que definem os carregamentos ao qual esta estrutura irá suportar, pode ser uma importante ferramenta de tomada de decisões por parte do projetista, ou até mesmo o gerente da obra, uma vez que além de indicar ao projetista se os fatores de contingência adotados estão numa faixa aceitável, pode postergar a construção do módulo se o ganho em aço justifique a referente espera por informações de outras disciplinas da obra.

Neste projeto, da P-58, a construção dos módulos na etapa inicial se mostrou vantajosa no sentido de dar andamento e dinâmica a obra, o que viabiliza toda uma estratégia e cronograma a serem seguidos. Contudo, para projetos futuros a possibilidade de alteração neste fator de contingência adotado para a estrutura (15%) deve ser reavaliada, baseado nos resultados obtidos no presente trabalho.

Além disso, para projetos com uma lógica de construção dos módulos em etapas posteriores a inicial, um procedimento de atualização dos modelos, no sentido de “otimização” estrutural contínua, deve ser adotado, uma vez que o único gasto para se fazer uso de tal procedimento são as horas trabalhadas pelos engenheiros responsáveis pela modelação, em detrimento do possível ganho financeiro anteriormente apresentado neste trabalho, por exemplo.

Como aperfeiçoamento do método de “otimização” apresentado, pode-se sugerir uma programação computacional que fizesse a ligação dos dados de saída do SACS e as restrições de espessuras fabricáveis, de modo que fosse um *looping* de rodadas com seu término em um módulo com peso “ótimo”, ou menor possível, agilizaria o processo e daria maior precisão ao resultado final.

Também é importante destacar que embora a etapa de içamento tenha determinado um modelo “otimizado” para o “módulo”, não se pode garantir que o mesmo irá passar em testes específicos de fadiga, e cargas adicionais na etapa na plataforma (*In place*). Além disso, para uma estrutura mais leve, deve-se verificar as novas frequências de vibração desta estrutura, tendo em vista que esta mudança da rigidez do módulo otimizado pode acarretar frequências naturais que se aproximem das presentes no funcionamento de equipamentos deste módulo, por exemplo. Logo, a resposta dinâmica deste elemento “otimizado” deve ser analisado. Contudo, é garantido, com base no bom entendimento desta etapa e considerando o grande número de apoios entre convés e módulo, que se existir a necessidade, mesmo que improvável, de alguma alteração na topologia do módulo, esta alteração não terá grande significativa a ponto de inviabilizar o método de “otimização” e o ganho em aço apresentado.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AISC, **Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design**. 9 ed, American Institute of Steel Construction, 1989.

BAI, Young. **Marine Structural Design**. Oxford: Elsevier, 2003.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais Em Aço: Projeto e Cálculo**. São Paulo: PINI, 2006.

DNV-OS-C201, **Structural Design Of Offshore Units (WSD Method)**. Det Norske Veritas, 2008.

DNV-RP-C102, **Structural Design Of Offshore Ships**. Det Norske Veritas, 2002.

SALMON, Charles ; JOHNSON, Jhon. **Steel Structures, Design And Behavior: Emphasizing Load and Resistance Factor Design**. New York: Harper Collings College Publishers, 1996.

TECHNICAL POLICY BOARD GUIDELINES FOR LOADOUTS. 0013/ND. Disponível em: http://www.gl-nobledenton.com/en/rules_guidelines.php. Acesso em: 20/11/12.

TECHNICAL POLICY BOARD GUIDELINES FOR MARINE LIFTING OPERATIONS. 0027/ND. http://www.gl-nobledenton.com/en/rules_guidelines.php. Acesso em: 20/11/12

TECHNICAL POLICY BOARD GUIDELINES FOR MARINE TRANSPORTATIONS. 0030/ND. http://www.gl-nobledenton.com/en/rules_guidelines.php. Acesso em: 20/11/12

