

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO BALDONADO LOPES

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA UNIDADE PORTÁTIL
OFFSHORE POR MEIO DA MODELAGEM NÃO LINEAR DOS
CABOS DE IÇAMENTO**

DOURADOS – MS

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO BALDONADO LOPES

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA UNIDADE PORTÁTIL
OFFSHORE POR MEIO DA MODELAGEM NÃO LINEAR DOS
CABOS DE IÇAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, como requisito para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof^o Dr. Augusto Salomão Bornschlegell.

Área de concentração: 3.05.04.00-7 Projetos de Máquinas.

DOURADOS – MS

2023



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA UNIDADE PORTÁTIL *OFFSHORE* POR MEIO DA MODELAGEM NÃO LINEAR DOS CABOS DE IÇAMENTO.

Rodrigo Baldonado Lopes, rodrigobaldonado2@gmail.com¹

¹Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Engenharia. Rodovia Dourados / Itahum, km 12 – Unidade II Cidade Universitária 79804970 – Dourados, MS – Brasil – Caixa postal: 364

Resumo. No meio industrial a principal operação que ocorre é o transporte, seja ele interno ou externo, onde a matéria prima chega e o produto final sai através de um meio de transporte. Diante disso, o volume total de carga muitas vezes é considerado elevado para capacidade física humana, necessitando de equipamentos específicos para elevação, movimentação e transporte de cargas. Serviços offshore, onshore e subsea, são processos que utilizam máquinas de elevação e transporte. Neste artigo, foi realizada a análise estrutural de uma unidade portátil com 1 metro cúbico de volume na condição de içamento offshore utilizando a ferramenta FEA (Finite element analysis) com base em elementos de placa DKT (Discrete Kirchhoff Theory). A norma de base foi a DNV 2.7-3 (Det Norske Veritas) e a análise estrutural foi realizada utilizando o software open source Salome-Meca considerando a não linearidade dos cabos, com o intuito de obter as cargas máximas para diferentes classes operacionais.

Palavras chave: FEA, içamento, DNV 2.7-3, Salome-Meca.

Abstract. The main operation in industrial environment is transportation, that is, the displacement of materials from and to the industrial plants as well as the displacement of materials inside of the plant. Normally the loads involved are above of the human physical capacity, then lifting and transportation machinery is necessary. This machinery may work in onshore, offshore and subsea conditions. In this article, it was performed the structural analysis of the lifting of a portable unit of 1 cubic meter in offshore conditions, using the Finite Element Analysis (FEA). The geometrical discretization was performed using shell elements and the equations discretizations was performed using the Discrete Kirchhoff Theory (DKT). The model was constructed using the software Salome Meca considering the nonlinearity from the cables. It was obtained the maximum admissible load for the structure, according to DNV 2.7-3.

Keywords: FEA, lifting, DNV 2.7-3, Salome-Meca.

1. INTRODUÇÃO

Quando é necessário movimentar, elevar ou transportar algo que possua uma carga muito elevada, buscam-se equipamentos e ferramentas adequados para realizar esse tipo de trabalho, sendo esses equipamentos denominados como máquinas de elevação e transporte. Os serviços realizados podem ser classificados de três formas, sendo elas: *offshore* - serviços realizado na costa marítima, *onshore* - serviços realizados em terra, e *subsea* - serviços submersos.

Serviços de içamento contam com auxílio de algumas normas técnicas, que podem ser necessárias tanto para bases teóricas, quanto para certificar que a operação é segura e confiável. A operação de içamento *offshore* conta com um nível maior de complexidade, tanto na fase de elaboração do projeto, como na fabricação. A norma DNV 2.7-3 (Det Norske Veritas, 2011) certifica diversos tipos de unidades portáteis *offshore* que não tenham formato de contêiner e também conta com base teórica para elaboração do projeto, fabricação e teste.

Os componentes de uma unidade que fazem a fixação, elevação e movimentação de carga podem ser divididos em estrutura e lingada, onde a estrutura conta com o quadro estrutural, olhais e elementos de ligação, enquanto a lingada é composta por cabos de aço, anelão e manilha como descrito na Fig. (1).

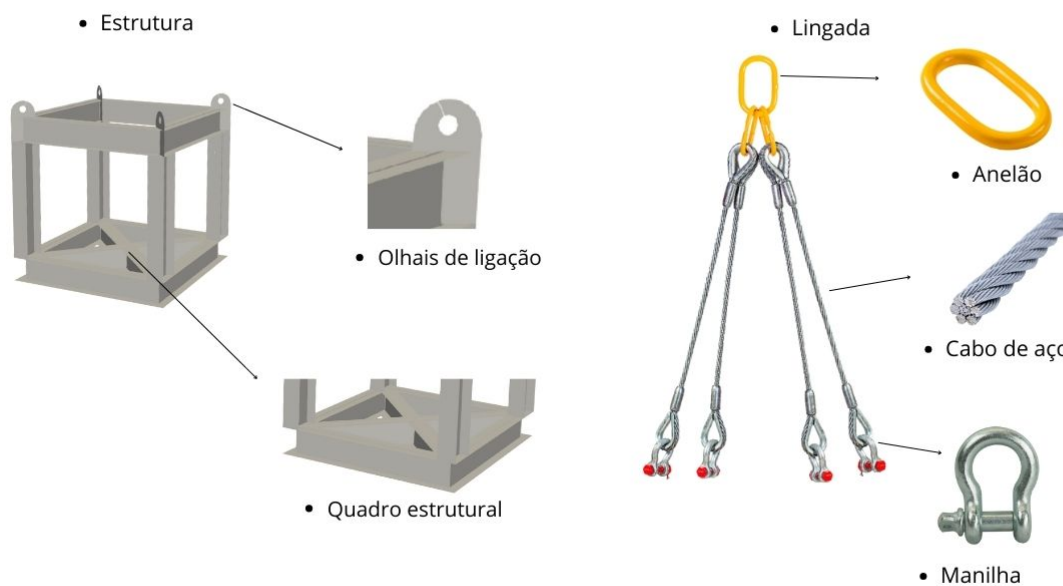


Figura 1. Descrição estrutura e lingada (fonte própria)

Devido ao grande perigo causado pela quebra da máquina, todos os mecanismos e suas estruturas de metal devem ser fabricadas com material de alta qualidade, em estrita conformidade com as especificações estabelecidas pelos fornecedores de metal, assim como o engenheiro deve ter o completo conhecimento de projeto e das características operacionais (Rudenko, 1976).

Para uma análise usando softwares, é necessário conhecer as propriedades dos componentes como espessura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade de massa, outras características necessárias são o carregamento atuante na forma de força, pressão de cargas gravitacionais e as condições de fixação da estrutura. Dessa forma é possível determinar as regiões mais solicitadas dos componentes, demonstrando uma previsão do comportamento e possibilitando a realização de ajustes no projeto com o intuito de evitar o gasto ferramental, essa é uma das características de ajuste mais refinados, se comparado a projetos executados por tentativa e erro. A ferramenta FEA (*Finite element analysis*) pode ser considerada como um grande diferencial por reduzir prazos e os custos (Filho, 2013).

O comportamento mecânico do cabo de aço é muito diferente quando submetido à forças de tração e compressão. O cabo não oferece resistência à compressão. O mesmo acontece para os momentos fletor e torção. Adicionalmente, sua modelagem leva em consideração grandes deslocamentos. Essas não linearidades são representadas no *Salome-Meca* por meio do modelo *CABLE* com elementos do tipo *SEG2* e com 3 graus de liberdade em cada nó (translações em x, y, e z), conforme a documentação do software (Fléjou, 2010, 2008).

Alguns tipos básicos de não linearidades que podem ocorrer em uma análise estrutural são as físicas e geométricas. A não linearidade física é causada pelo comportamento elástico não linear, plástico ou viscoso do material que compõe a estrutura, enquanto a não linearidade geométrica ocorre quando as deformações são suficientemente grandes causando mudanças significativas na estrutura (deslocamentos e rotações) (Lacerda, 2014).

2. OBJETIVO

O trabalho atual possui o objetivo de estudar o comportamento de uma estrutura portátil de classe A Fig. (2), com volume de $1 m^3$, na condição de içamento *offshore* representando o comportamento não linear dos cabos, seguida da discretização da classe operacional e o peso máximo permissível de carga que pode ser transportado com segurança. Também tem-se o objetivo de comparar a presente modelagem com a realizada por Estigarribia *et al.* (2019).

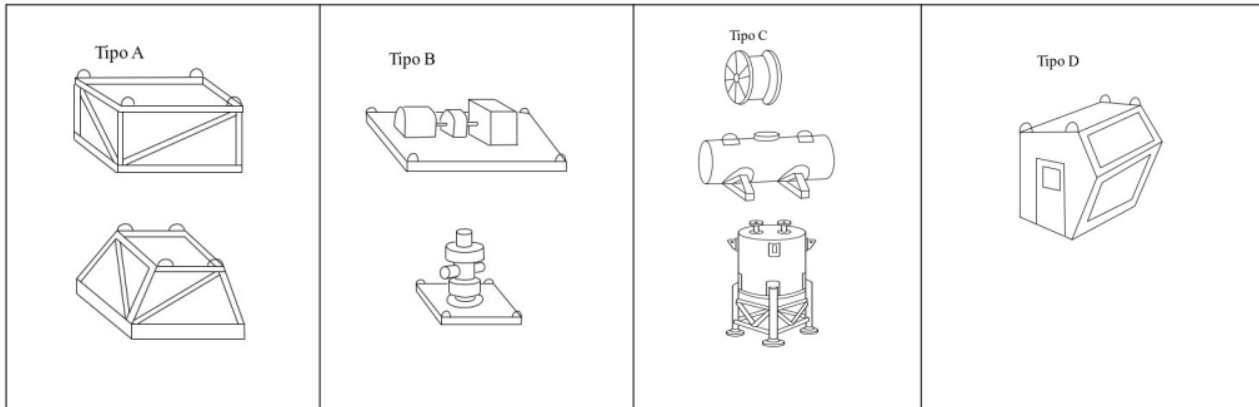


Figura 2. Classificação dos tipos de estruturas portáteis de içamento de carga (Det Norske Veritas, 2011)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação foi realizada utilizando o software *open source Salome-Meca* para obter a geometria, a malha e exibir os resultados, todos dentro do próprio software. Para a implementação do modelo no software foi utilizado como base a apostila elaborada por Estigarribia (2019), onde conta com uma descrição sobre todos os módulos e alguns exemplos práticos. Com base na ferramenta FEA foi possível realizar a análise estática não linear da estrutura.

O modelo CAD (*Computer Aided Design*) foi obtido através do módulo “*Geometry*”, com as dimensões $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$ (metros) Tab. (1) e modelado usando um perfil comercial do tipo “*I*” Fig. (3). “Quando a espessura da estrutura modelada for muito menor que as outras dimensões pode-se usar elementos do tipo casca (Vendramin, 2016)”. A geometria foi modelada pelo elemento de placa DKT (Discrete Kirchhoff Theory), descrito em Carrijo (1995).

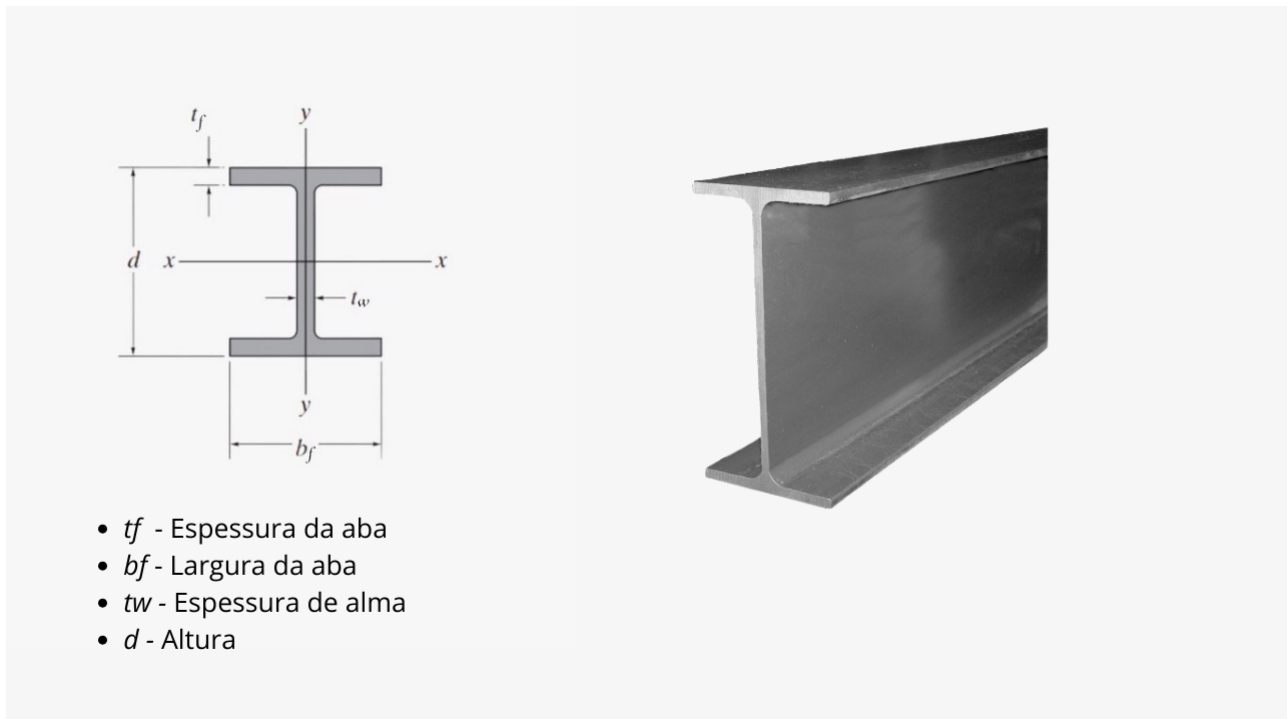


Figura 3. Perfil tipo I

Tabela 1. Descrição do perfil I utilizado (Gerdau, 2023)

Descrição	Área	Altura d	Espessura de alma t_w	Aba	
				Largura b_f	Espessura t_f
mm x kg/m	mm ²	mm	mm	mm	mm
W150x13,0	1660	148	4,3	100	4,9

Os olhais para amarração do cabo foram criados sem rigor geométrico, mas mantendo a espessura de chapa de 1/2" (12,7 mm) definidos como uma parte rígida da estrutura e o seu comportamento pode ser realizado por um estudo a parte.

O carregamento foi feito com uma carga em rampa aplicada ao nó central da estrutura denominado grupo *Carregamento*. A conexão da estrutura à lingada segue a orientação da norma DNV 2.7-3 deixando uma eslinga da lingada livre e na junção dos cabos no topo, aplicou-se a condição de engaste.

Após marcadas todas as condições de carregamento e de contorno na geometria, o modelo foi importado para o módulo "Mesh" para criação da malha. A discretização do modelo se deu através do algoritmo *Netgen 1D-2D*. Obteve-se uma discretização contando com 15341 nós, 14677 elementos finitos quadriláteros e 267 elementos triangulares, todos com interpolação linear Fig. (4).

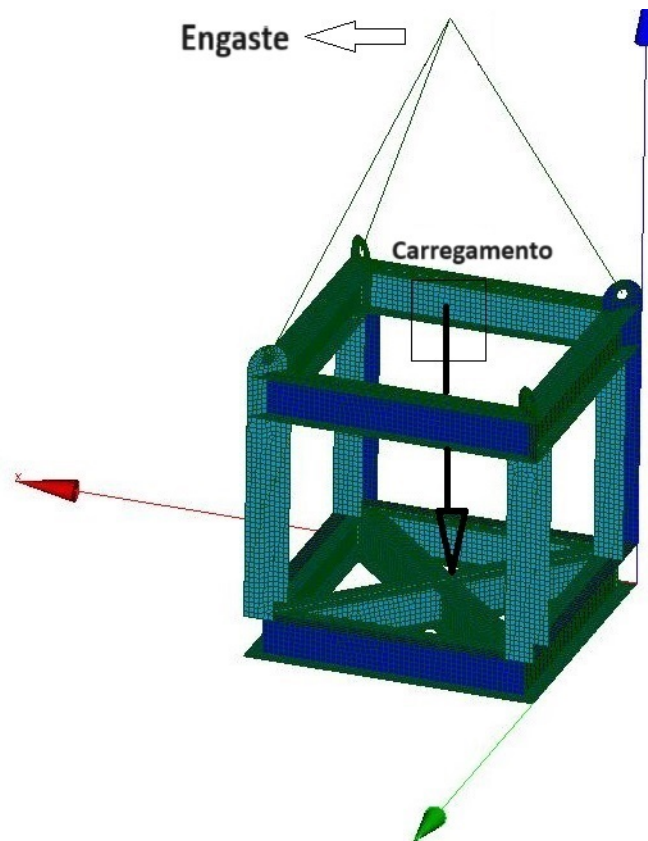


Figura 4. Modelo discretizado em malha (fonte própria)

Após a criação da malha o modelo foi carregado ao módulo "AsterStudy" e modelado utilizando DKT. Para os cabos, foi atribuído os elementos de cabo (Fléjou, 2010) com área de seção transversal de 20 mm² e pré-carga de 1 MPa para facilitar a convergência. Ainda para melhorar a convergência existe um parâmetro que faz a razão entre os módulos de Young na compressão com relação ao módulo de Young na tração. Se este parâmetro for nulo, traz uma singularidade para problema (Dominique, 2022). Assim, no presente trabalho, empregou-se o valor padrão do software de 1e - 4.

O material usado foi o aço ASTM A36 com módulo de Young de 200 GPa, coeficiente de Poisson 0,27, com tensão de escoamento de 250 MPa.

Para iniciar a análise do modelo, foi colocado uma carga do tipo rampa com valor arbitrário máximo de 126 kN no carregamento, correspondente a 10 vezes o valor do carregamento de Estigarribia *et al.* (2019), com a intenção de ultrapassar o limite de escoamento do material e definir o limite de operação desta estrutura. Com a representação dos cabos e seguindo a penalização da norma DNV 2.7-3 de desconsiderar uma eslinga da lingada, iniciou-se a simulação no software.

Segundo a DNV 2.7-3, o carregamento de projeto em todos os elementos em um içamento com eslingas para unidades portáteis deve ser calculada com base na força do ar $F_{ar}(kN)$, Eq. (1).

$$F_{ar} = DF \times MGW \times g \times SKL \quad (1)$$

DF = fator de projeto, em função da classe operacional e MGW Tab. (2);

MGW = *Maximum gross weight* (peso bruto máximo, em toneladas);

g = aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$);

SKL = fator de penalização por diferença de comprimento dos cabos (mínimo 1,25).

As classes operacionais são divididas pelo limite de altura significativa de ondas, sendo R60 a altura máxima de onda de 6 m, R45 a altura máxima de onda de 4.5 m e R30 a altura máxima de onda de 3.0 m Tab. (2).

Tabela 2. Fatores de projeto - DF (DNV 2.7-3)

Classe Operacional	MGW < 50 ton	MGW \geq 50 ton
R60	$1,4 + 0,8 \sqrt{(50/MGW)}$	2,2
R45	$1,4 + 0,6 \sqrt{(50/MGW)}$	2,0
R30	$1,4 + 0,4 \sqrt{(50/MGW)}$	1,8

A tensão admissível foi calculada seguindo a penalização da norma DNV 2.7-3 utilizando 85% da tensão de escoamento do material para içamento por 3 pontos Eq. (2):

$$S_{adm} = 0,85 \times S_y \quad (2)$$

Onde;

S_{adm} é a tensão admissível;

S_y é a tensão de escoamento do material.

A carga útil máxima (massa), P também é definida pela DNV 2.7-3 Eq. (3):

$$P = MGW - T \quad (3)$$

Onde;

P é a carga máxima permitida pela unidade.

T é a tara da unidade PO, que corresponde a 200 kg;

MGW é a carga bruta máxima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para obter os resultados, o modelo foi importado para o módulo "ParaVis" e foi possível visualizar onde a estrutura exige maiores esforços, tanto para deslocamento quanto para tensões, utilizando o critério de Von Mises, que é definido como tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas (I. Norton, 2013).

Com a tensão admissível obtida através da Eq. (2) ($S_{adm} = 212,5 MPa$), o carregamento inicial foi de 12,6 kN, subindo gradativamente para observar até onde a estrutura sofre a maior sollicitação e apresente um nível de tensão próximo da tensão admissível do material, sendo esse carregamento de 88,2 kN Fig. (5). Com esta sollicitação mecânica a estrutura apresenta concentrações de tensões nas mesas das vigas, destacadas na Fig. (5). As concentrações de tensões nessas regiões se explicam pelo fato da ausência de apoio de um cabo, minimizando o esforço na viga vertical onde o cabo não foi representado e sobrecarregando as demais.

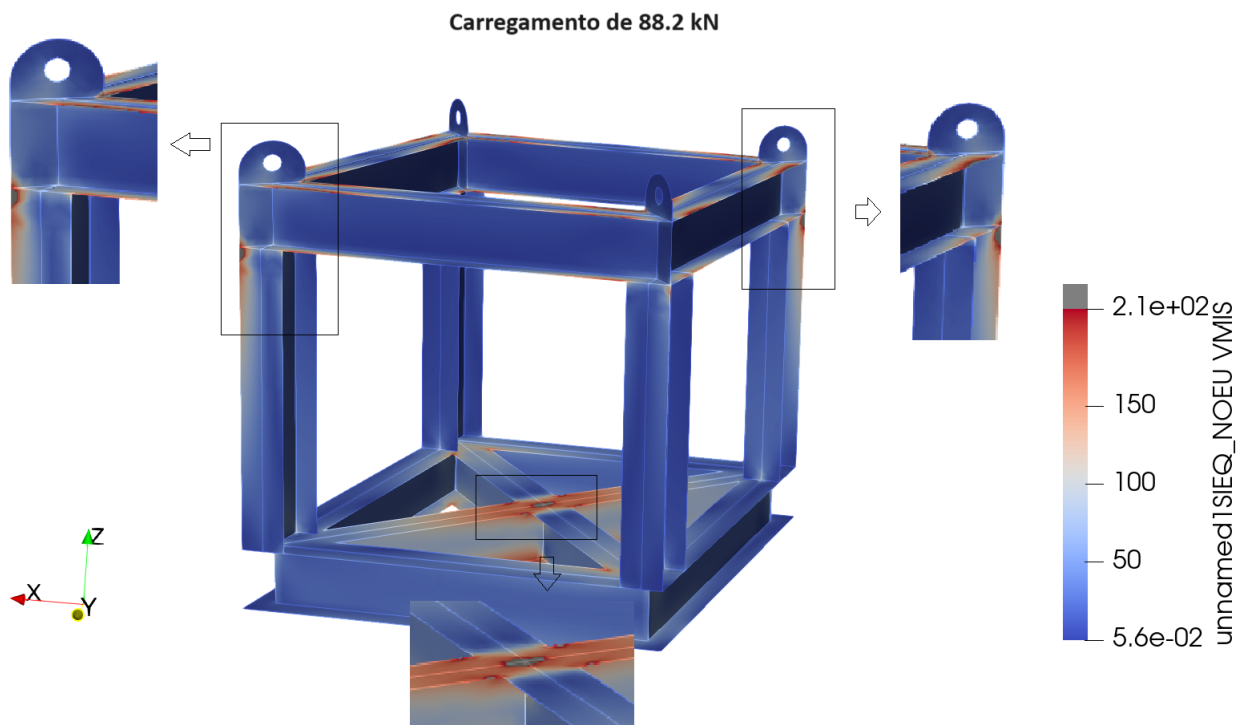


Figura 5. Campo de tensão de Von Mises [MPa] da estrutura (fonte Própria)

A Fig. (6) mostra o deslocamento máximo obtido em *mm* quando aplicado o carregamento de 88.2 kN.

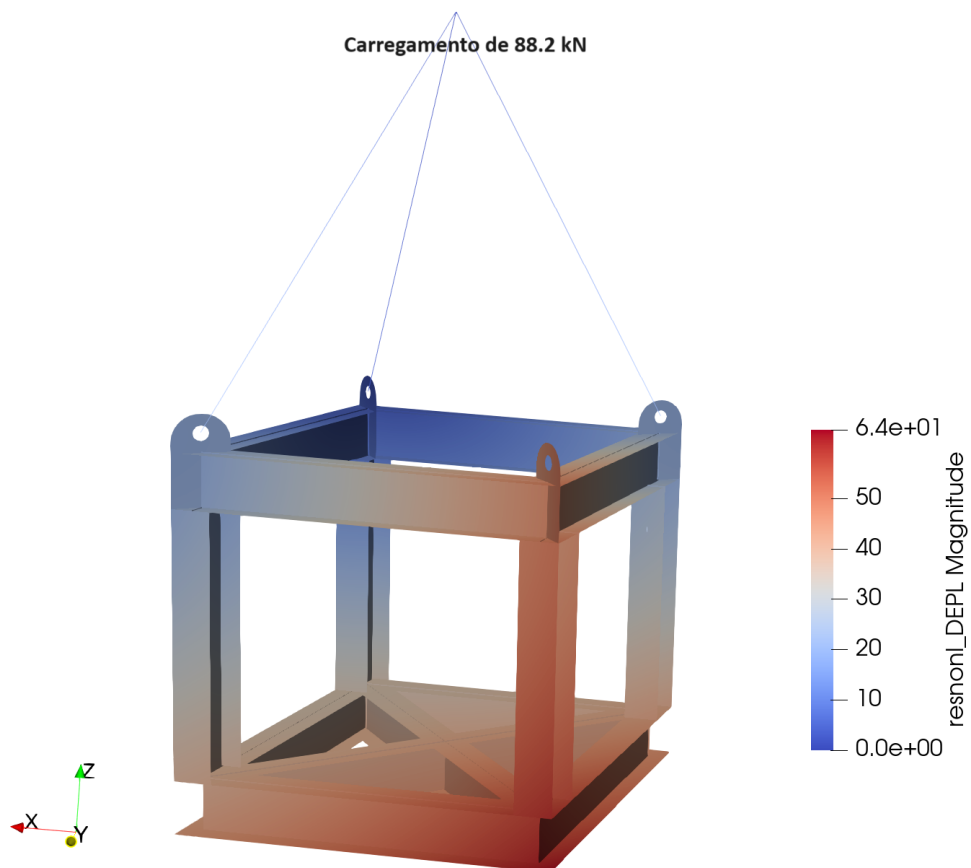


Figura 6. Deslocamento *mm* (Fonte própria)

Para determinar MGW foi usado o software *LibreOffice Calc* e através de um processo iterativo pode-se observar o MGW para as diferentes classes operacionais.

O valor da tara da estrutura (T) foi estimada utilizando os dados de Gerdau (2023), sendo $T = 200kg$. Por fim, pode-se obter o valor da carga máxima transportada com segurança variando de acordo com a sua classe operacional, observado na tab. (3).

Tabela 3. Peso máximo de carga por classe operacional

Classe Operacional	MGW [ton]	DF	F [kN]	T [ton]	P [ton]
R60	1,03	6,97	88,2	0,2	0,83
R45	1,47	4,90	88,2	0,2	1,27
R30	2,16	3,32	88,2	0,2	1,96

4.1 Influência das condições de contorno

No estudo realizado por Estigarribia *et al.* (2019) foram empregadas restrições de movimento na região dos olhais para simular a presença dos cabos. No presente trabalho, empregou-se exatamente o mesmo modelo de Estigarribia *et al.* (2019) com a adição da modelagem dos cabos.

O carregamento máximo obtido por Estigarribia *et al.* (2019) foi de $12.6 kN$ (ou seja, 14% da estimativa atual), e pode ser observado na Fig. (7) a região onde a estrutura exige as maiores solicitações. Na Fig. (9), que também foi obtida por Estigarribia *et al.* (2019), é possível observar o deslocamento em *mm* para o carregamento ainda de $12.6 kN$.

Utilizando a variação da carga, pode-se observar as duas análises com o mesmo carregamento, Fig. (7) e Fig. (8) podendo assim comparar os níveis de tensão em *MPa* da estrutura e onde ela é mais solicitada, assim como pode-se observar também na Fig. (9) e Fig. (10) os seus respectivos deslocamentos. Qualitativamente, as respostas são similares, mas quantitativamente, a não representação do cabo e as restrições de movimento empregadas penalizaram significativamente a análise ($88, 2/12, 6 = 7$).

Pode-se observar que no modelo com as restrições de movimento o nível de tensão é mais alto e o deslocamento é menor, isso se dá pela estrutura não ter liberdade para trabalhar pois o movimento está restringido pela condição de contorno.

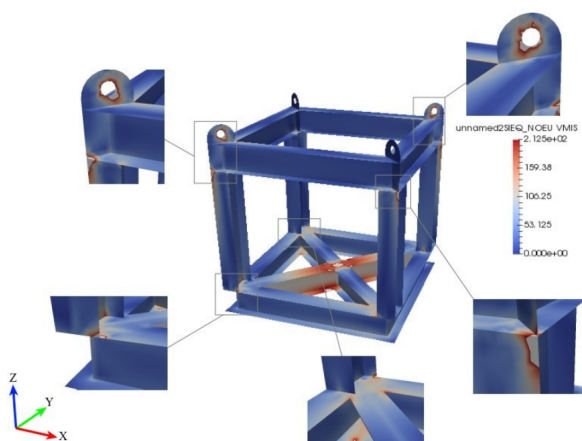


Figura 7. Tensões obtidas por Estigarribia *et al.* (2019)

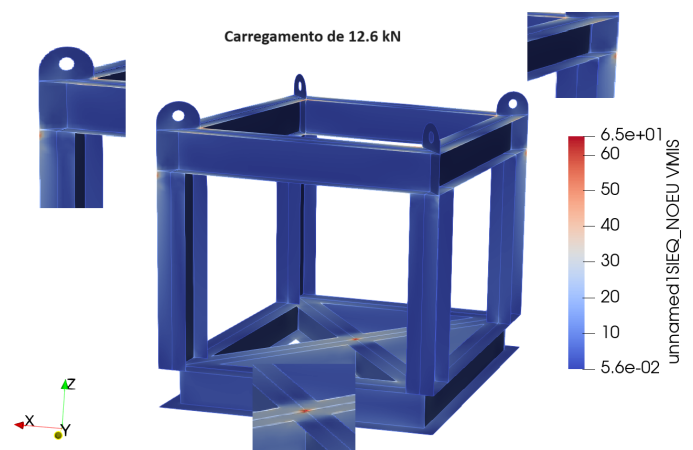


Figura 8. Tensões obtidas no presente trabalho

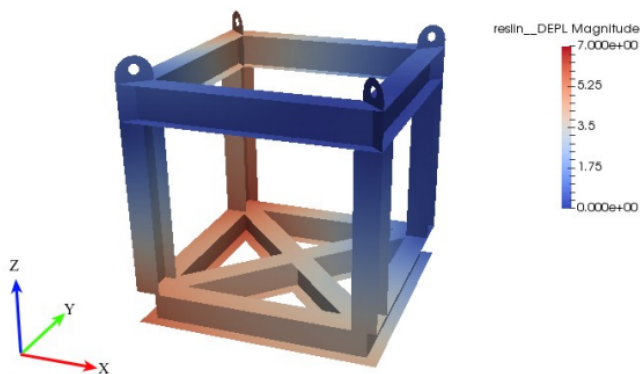


Figura 9. Deslocamento obtido por Estigarribia *et al.* (2019)

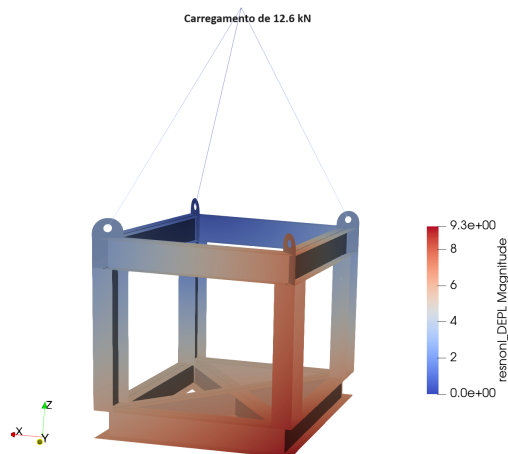


Figura 10. Deslocamento obtido no presente trabalho

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A norma DNV 2.7-3 sugere vários critérios de penalidades para a análise de uma unidade portátil *offshore* e obedecendo esses critérios, com a análise por FEA, foi possível observar a capacidade de carregamento segura. Também pela norma DNV 2.7-3, foi possível observar a classe operacional da estrutura com a sua respectiva carga de trabalho.

A ferramenta FEA mostrou-se muito eficaz pois foi de grande importância para este estudo, assim como para realizar análises de viabilidade de projetos. Softwares livres como o *Salome-Meca* são uma ótima alternativa, visto que alguns softwares comerciais possuem um preço elevado de suas licenças. Também pode-se observar que utilizando a comparação de resultados com estudos já elaborados para essa unidade, a representação em FEA no modelo dos cabos é fundamental para estimar o limite de carga da estrutura e ter um nível de confiança onde a estrutura não comprometa a segurança e a qualidade.

6. REFERÊNCIAS

- Carrijo, E.C., 1995. *Aplicação do elemento finito DKT à análise de cascas*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Det Norske Veritas, 2011. *Standard for certification, DNV 2.7-3 Portable Offshore Units*.
- Dominique, G., 2022. "Opérateur defl_materiau". https://code-aster.org/doc/v15/fr/man_u/u4/u4.43.01.pdf. Acesso em Setembro de 2023.
- Estigarribia, E.D.B., 2019. *Apostila Salome-Meca*.
- Estigarribia, E.D.B., dos Santos, R.B. and Bornschlegell, A.S., 2019. "Análise estrutural por elementos finitos de uma unidade portátil offshore para a condição de içamento por meio do software open source salome-meca". In *Publicado no 26nd Congresso Nacional de Estudos de Engenharia Mecânica - CREEM 2019*. Ilhéus/Itabuna, Brazil.
- Filho, A.A., 2013. *Elementos Finitos: A Base da tecnologia CAE*. Érica, São Paulo, 6th edition.
- Fléjou, J.L., 2008. "Modélisations cable et cable_poulie". https://code-aster.org/V2/doc/v9/fr/man_u/u3/u3.11.03.pdf. Acesso em Setembro de 2023.
- Fléjou, J.L., 2010. "Modélisation des câbles". https://code-aster.org/doc/v10/fr/man_r/r3/r3.08.02.pdf. Acesso em Setembro de 2023.
- Gerdau, 2023. "Standard i-beam". <https://www2.gerdau.com/products/standard-i-beam>. Acesso em Setembro de 2023.
- I. Norton, R., 2013. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. Bookman, 4th edition.
- Lacerda, E.G.M., 2014. *Análise não linear de treliças pelo método dos elementos finitos posicional*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Rudenko, N., 1976. *Máquinas de elevação e transporte*. Livros técnicos e científicos editora S. A.
- Vendramin, R., 2016. "Otimização estrutural de chassi de um veículo guiado automaticamente". <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/3647/TCC%20Rafael%20Vendramin.pdf?sequence=1>>. Acesso em Setembro de 2023.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.