



# ETAPAS DA CERTIFICAÇÃO DE *CONTAINER OFFSHORE* E ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES, ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO

Fernando Ferrer de Azevedo

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

Orientador: Fábio Luiz Zamberlan, Dsc.

Rio de Janeiro

Setembro de 2013



# **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Departamento de Engenharia Mecânica  
DEM/POLI/UFRJ

## **ETAPAS DA CERTIFICAÇÃO DE *CONTAINER OFFSHORE* E ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES, ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO**

Fernando Ferrer de Azevedo

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

Aprovado por:

---

Prof. Fábio Luiz Zamberlan, Dsc.

---

Prof. Max Suell Dutra, Dr. Ing.

---

Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, PhD.

---

Robertha Marques, Msc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2013

*“Naquele dia, sem motivo algum, eu decidi sair para uma corridinha. Então eu corri até o fim da estrada. E quando cheguei lá, eu pensei em talvez correr até o fim da cidade. E quando eu cheguei lá, eu pensei que talvez eu pudesse correr através do Condado de Greenbow. E eu pensei, já que eu corri até aqui, talvez eu devesse correr por todo o grande estado do Alabama. E foi isso que eu fiz. Eu corri por todo o Alabama. Por motivo algum, eu apenas continuava indo. Corri até o oceano. E quando eu cheguei lá, pensei, já que eu cheguei tão longe, eu podia muito bem virar, e continuar indo. E quando eu cheguei ao outro oceano, eu pensei, já que eu cheguei tão longe, eu poderia simplesmente virar, e continuar indo.”*

*Forrest Gump*

Azevedo, Fernando Ferrer de

Etapas da Certificação de *Container Offshore* e análise das tensões e deformações, através de um estudo de caso/ Fernando Ferrer de Azevedo. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

V, 87 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fábio Luiz Zamberlan

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 84.

1. Introdução. 2. Diferença entre *Container Offshore* e Container ISO. 3. Análises de Projeto. 4. Análise da Fabricação. 5. Conclusão.

I. Zamberlan, Fábio Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Etapas da Certificação de *Container Offshore* e análise das tensões e deformações, através de um estudo de caso.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e incentivo dado ao longo de todo o percurso que me levou até a graduação. Sem a base que me foi passada por eles nada disso seria possível.

Agradeço a Deus, que tem me apoiado muito durante a minha trajetória de sucesso, até o momento.

Aos que amo, por estarem sempre ao meu lado, com todo o amor, companheirismo e cumplicidade que faz deste um momento especial para mim.

Agradeço aos meus amigos, que participaram comigo destes anos de faculdade e com quem compartilhei diversos momentos ao longo deste período.

Agradeço aos funcionários da DNV, em especial: Robertha Marques e Luis Renato Gomensoro, pelo suporte e críticas construtivas.

Obrigado à UFRJ que, por meio de todo o corpo docente e dos seus funcionários, tornou possível minha formação como Engenheiro Mecânico. Agradeço ao Prof. Fábio Zamberlan, em especial, pelo seu apoio e orientação durante a elaboração desse projeto.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha atual formação.

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

Etapas da Certificação de *Container Offshore* e análise das tensões e deformações, através de um estudo de caso

Fernando Ferrer de Azevedo

Setembro/2013

Orientador: Prof. Fábio Luiz Zamberlan

Curso: Engenharia Mecânica

Devido às novas descobertas dos campos do Pré-sal e da necessidade de prover cada dia mais soluções tecnológicas avançadas que garantam uma melhor qualidade das técnicas e equipamentos utilizados *offshore*, em Janeiro de 2013 a Petrobras passou a exigir que os *containers* destinados para ambiente *offshore* fossem certificados. Devido à nova exigência e do pouco conhecimento do mercado do processo de certificação, o presente trabalho teve por objetivo analisar, por meio de um estudo de caso, todas as etapas do processo de certificação de um *container offshore* de acordo com a norma DNV 2.7-1. Este processo consiste nas etapas de aprovação de projeto, acompanhamento da fabricação e testes de aceitação. Foi dado um foco maior na parte de aprovação de projeto, no qual são feitas análises de tensão e deformação atuantes, em um modelo projetado no *software* computacional *3D Beam*, em diferentes condições de içamento, quais sejam: içamento por 4 pontos, içamento por 2 pontos e içamento pela bolsa de empilhadeira. Na etapa de acompanhamento da fabricação foi dada ênfase maior nos ensaios não destrutivos, que são de extrema importância para atestar a qualidade do *container*.

*Palavras-chave: Container Offshore, Certificação, DNV 2.7-1, Aprovação de Projeto, Tensão, Deformação, Condições de Içamento, Container ISO.*

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

Offshore Container Certification and Stress and Strain Analysis, by means of a Case Study

Fernando Ferrer de Azevedo

September/2013

Advisor: Fábio Luiz Zamberlan

Course: Mechanical Engineering

Due to new discoveries in the Pre-Salt layer and the need to provide advanced and technological solutions that ensure a better quality of the techniques and equipment used offshore, in January 2013, Petrobras began requiring that containers destined for offshore environment were certificated. Due to the new requirement and little knowledge of the certification process, this work intends to analyze, by means of a case study, all stages of the certification process of an offshore container, according to the DNV standard for certification 2.7-1. This process consists on the stages of project approval, production monitoring and production testing. It was given a greater focus on the stage of design approval. In this stage, stress and strain are analyzed on the 3D Beam software for different lifting conditions: 4 point lifting, 2 point lifting and fork lift pockets. In the stage of production monitoring, it was given emphasis on non-destructive tests, which are important to attest the quality of the container.

*Keywords: Offshore Container, Certification, DNV 2.7-1, Project Approval, Stress, Strain, Lifting Conditions, ISO Container.*

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Nomenclatura .....   | 8  |
| Índice de Figuras .....  | 10 |
| Índice de Tabelas.....   | 12 |
| 1. Introdução .....  | 13 |
| 1.1. Organização do Trabalho .....   | 13 |
| 1.2. Motivação e Objetivos .....   | 14 |
| 1.3. Histórico.....  | 17 |
| 2. Tipos de <i>Container</i> .....   | 20 |
| 2.1. Definição de <i>Container ISO</i> .....   | 20 |
| 2.2. Definição de <i>Container Offshore</i> .....                                      | 23 |
| 2.2.1. Componentes de um <i>Container Offshore</i> .....                               | 23 |
| 2.3. Diferenças entre <i>Container ISO</i> e <i>Container Offshore</i> .....           | 24 |
| 3. Projeto - Análises Estruturais de <i>Container Offshore</i> conforme DNV 2.7-1..... | 26 |
| 3.1. Temperatura de Projeto .....  | 28 |
| 3.2. Análise de Içamento por 4 Pontos.....   | 30 |
| 3.2.1. Condições de Contorno e Carregamento Distribuído na Direção Z.....              | 32 |
| 3.2.2. Análise das Tensões .....   | 33 |
| 3.2.3. Análise das Deformações .....   | 36 |
| 3.3. Análise de Içamento por 2 Pontos.....   | 42 |
| 3.3.1. Análise das Tensões .....   | 42 |
| 3.4. Análise de Içamento pela Bolsa de Empilhadeira.....                               | 45 |
| 3.4.1. Análise das Tensões .....   | 45 |
| 3.4.2. Análise das Deformações .....   | 48 |
| 3.5. Cargas Dinâmicas de Impacto na Coluna.....  | 49 |
| 3.5.1. Análise das Tensões .....   | 49 |
| 3.5.2. Análise das Deformações .....   | 51 |
| 3.6. Análise do Olhal.....   | 53 |
| 3.7. Seleção da Manilha .....  | 55 |
| 3.8. Seleção da Eslinga.....   | 57 |
| 4. Análise Seção Transversal x Material x Custos .....                                 | 59 |
| 5. Análise da Fabricação .....   | 61 |
| 5.1. Processo de Soldagem.....   | 61 |
| 5.1.1. Definições de Soldagem.....   | 62 |
| 5.1.2. Histórico da Soldagem .....   | 63 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 5.2.   | Ensaio não Destrutivos .....                     | 64 |
| 5.2.1. | Ensaio Visual.....                               | 65 |
| 5.2.2. | Ensaio por Partícula Magnética.....              | 67 |
| 5.2.3. | Ensaio por Ultrassom .....                       | 70 |
| 5.2.4. | Ensaio por Líquido Penetrante .....              | 71 |
| 5.2.5. | Radiografia.....                                 | 74 |
| 6.     | Testes de Aceitação.....                         | 76 |
| 6.1.   | Teste de Içamento por 4 Pontos .....             | 76 |
| 6.2.   | Teste de Içamento por 2 Pontos .....             | 77 |
| 6.3.   | Teste de Impacto Vertical .....                  | 78 |
| 6.4.   | Teste de Içamento por Bolsa de Empilhadeira..... | 79 |
| 6.5.   | <i>Tilt Test</i> .....                           | 80 |
| 7.     | Conclusão.....                                   | 81 |
| 8.     | Sugestões para Futuros Trabalhos.....            | 83 |
|        | Referências Bibliográficas .....                 | 84 |
|        | Anexo I.....                                     | 86 |
|        | Anexo II .....                                   | 87 |

## Nomenclatura

**R** = *Rating*. Massa bruta máxima do *container offshore*, incluindo equipamentos permanentes e sua carga, em kg, mas excluindo o conjunto de içamento;

Nota: A massa do conjunto de içamento não está incluída em R porque o conjunto de içamento geralmente não está disponível na hora da certificação e porque ele pode ser substituído durante o tempo de vida útil do *container*;

**T** = Tara. Massa do *container* vazio, incluindo qualquer equipamento permanente, mas excluindo a carga e o conjunto de içamento, em kg;

**P** = *Payload*. Carga Útil. O peso máximo permissível de carga, que pode ser transportado com segurança pelo *container*, em kg. ( $P=R-T$ );

**S** = Massa do conjunto de içamento, em Kg;

**F** = Carga do projeto, em N;

**F<sub>h</sub>** = Força resultante na horizontal, em N;

**F<sub>v</sub>** = Força resultante na vertical, em N;

**L** = Comprimento do *container*, em mm;

**L<sub>n</sub>** = Comprimento da viga, em mm;

**R<sub>e</sub>** = Tensão de escoamento mínima especificada a temperatura ambiente, em N/mm<sup>2</sup>;

**C** = Tensão de escoamento do material na zona termicamente afetada;

**R<sub>m</sub>** = Resistência à tração mínima especificada a temperatura ambiente, em N/mm<sup>2</sup>;

**RSL** = Força resultante em cada olhal, em N;

**T<sub>d</sub>** = Temperatura de Projeto ou temperatura de operação é a temperatura de referência usada para a escolha do grau dos aços utilizados em *containers offshore* e equipamentos, em °C;

**g** = Aceleração da gravidade ( $\sim 9,81 \text{ m/s}^2$ );

**n** = Número de pernas da eslinga;

**t** = Espessura do material, em mm;

$\alpha$  = Ângulo entre a perna da eslinga e a vertical, em graus.

**$\sigma_e$**  = Tensão equivalente de acordo com o critério de Von Mises, em MPa;

**$\epsilon$**  = Deformação relativa máxima, em mm;

**D** = Deformação relativa da viga, em mm;

**WLL** = Carga máxima de trabalho, em toneladas;

**WLL<sub>min</sub>** = Limite da carga de trabalho mínimo, em toneladas;

**WLL<sub>manilha</sub>** = Limite da carga de trabalho máxima na manilha, em toneladas;

**F<sub>p</sub>** = Carga vertical total aplicada sobre os olhais, em N;

**D<sub>h</sub>** = Diâmetro do furo do olhal, em mm;

**H** = Raio externo do olhal, em mm;

**t<sub>c</sub>** = Espessura do olhal + chapa de reforço.

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.3.1 - Tipos de Unidades Portáteis de acordo com a norma DNV 2.7-3 .....   | 19 |
| Figura 2.1.1 - <i>Container</i> Padrão ISO .....   | 21 |
| Figura 2.2.1 - <i>Container Offshore</i> .....   | 23 |
| Figura 2.3.1 - Condições de mar a que os <i>Containers Offshore</i> estão sujeitos .....   | 24 |
| Figura 2.3.2 - <i>Spreader</i> e conjunto de Içamento, respectivamente .....   | 25 |
| Figura 2.3.3 - <i>Corner Fitting</i> e Olhal, respectivamente .....  | 25 |
| Figura 3.1.1 - Relação entre a tensão de escoamento especificada e energia de impacto absorvida pelo material .....  | 29 |
| Figura 3.2.1 - <i>Container Offshore</i> içado por 4 Pontos .....  | 30 |
| Figura 3.2.2 - Gráfico que relaciona o tamanho de onda com a massa bruta total e o fator de segurança .....  | 31 |
| Figura 3.2.3 - Carga distribuída na estrutura primária do <i>Container Offshore</i> e condições de contorno determinadas .....                               | 32 |
| Figura 3.2.4 - Vigas mais solicitadas na análise de Içamento por 4 Pontos .....  | 35 |
| Figura 3.2.5 - Imagem amplificada das vigas mais solicitadas no Içamento por 4 Pontos .....  | 35 |
| Figura 3.2.6 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Z... 37  | 37 |
| Figura 3.2.7 - Seleção dos nós para o cálculo da deformação relativa global atuante na viga.... 38   | 38 |
| Figura 3.2.8 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Y .. 39  | 39 |
| Figura 3.2.9 - Seleção dos nós para o cálculo da deformação relativa local atuante na viga..... 40   | 40 |
| Figura 3.2.10 - Vista lateral da deformação do <i>Container Offshore</i> no Içamento por 4 Pontos . 41   | 41 |
| Figura 3.3.1 - <i>Container Offshore</i> içado por 2 Pontos .....  | 42 |
| Figura 3.3.2 - Vigas que estão sofrendo maior tensão devido ao Içamento por 2 Pontos..... 43   | 43 |
| Figura 3.3.3 - Mensagem de erro transmitida pelo <i>software</i> após a tentativa de análise de Içamento por 2 Pontos utilizando um método diferente..... 44 | 44 |
| Figura 3.4.1 - Representação da Bolsa de Empilhadeira no <i>Container</i> ..... 45   | 45 |
| Figura 3.4.2 - Vigas mais solicitadas no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira..... 47   | 47 |
| Figura 3.4.3 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Z... 48  | 48 |
| Figura 3.5.1 - Representação da força atuante no <i>Corner Post</i> e das condições de contorno necessárias para análise .....                               | 50 |
| Figura 3.5.2 - Representação das vigas mais solicitadas devido à atuação da força no <i>Corner Post</i> ..... 51   | 51 |
| Figura 3.6.1 - Olhal .....   | 53 |
| Figura 3.6.2 - Olhal e suas principais dimensões .....   | 54 |
| Figura 5.2.1 - Deposição insuficiente de solda .....   | 66 |
| Figura 5.2.2 - Reforço excessivo..... 67   | 67 |
| Figura 5.2.3 - Rechupe de cratera .....  | 67 |
| Figura 5.2.4 - Representação da trinca superficial e a formação do campo de fuga .....   | 68 |
| Figura 5.2.5 - Imagem do antes e depois do ensaio por partícula magnética..... 69  | 69 |
| Figura 5.2.6 - Etapas do processo de ensaio por partícula magnética..... 69  | 69 |
| Figura 5.2.7 - Penetração e limpeza inicial da superfície..... 72  | 72 |
| Figura 5.2.8 - Tempo de penetração do líquido na descontinuidade..... 72   | 72 |
| Figura 5.2.9 - Remoção do excesso de líquido da superfície .....   | 73 |
| Figura 5.2.10 - Aplicação do revelador e observação da indicação .....   | 73 |
| Figura 5.2.11 - Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura..... 74   | 74 |
| Figura 6.1.1 - <i>Container Offshore</i> sendo içado por 4 Pontos..... 77  | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.2.1 - <i>Container Offshore</i> sendo içado por 2 Pontos.....                | 78 |
| Figura 6.3.1 - <i>Container Offshore</i> realizando o Teste Vertical de Impacto ..... | 79 |
| Figura 6.4.1 - <i>Container Offshore</i> sendo içado pela Bolsa de Empilhadeira.....  | 79 |
| Figura 6.5.1 - <i>Container Offshore</i> no <i>Tilt Test</i> .....                    | 80 |

## Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1.1 - Designação de dimensão de <i>Container</i> ISO.....   | 22 |
| Tabela 2.1.2 - Peso bruto permissível para <i>Containers</i> ISO .....   | 22 |
| Tabela 2.3.1 - Especificações de projeto do <i>Container Offshore</i> .....                                      | 27 |
| Tabela 3.1.1 - Relação da espessura do material com a temperatura de testes de impacto - Charpy .....            | 29 |
| Tabela 3.1.2 - Correção dos valores obtidos na Figura 3.1.1 utilizando corpos de prova de tamanho reduzido ..... | 30 |
| Tabela 3.2.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento por 4 Pontos .....                        | 36 |
| Tabela 3.2.2 - Deslocamentos críticos no Içamento por 4 Pontos.....  | 37 |
| Tabela 3.2.3 - Resultado das simulações do Içamento por 4 Pontos.....  | 41 |
| Tabela 3.3.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento por 2 Pontos .....                        | 44 |
| Tabela 3.3.2 - Resultado das simulações do Içamento por 2 Pontos.....  | 44 |
| Tabela 3.4.1 - Especificações da Bolsa de Empilhadeira.....  | 46 |
| Tabela 3.4.2 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira .....          | 47 |
| Tabela 3.4.3 - Deslocamentos críticos no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira.....                                | 49 |
| Tabela 3.4.4 - Resultado das simulações do Içamento pela Bolsa de Empilhadeira.....                              | 49 |
| Tabela 3.5.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas devido à atuação da força no <i>Corner Post</i> ..... | 51 |
| Tabela 3.5.2 - Deslocamentos críticos devido à atuação da força no <i>Corner Post</i> .....                      | 52 |
| Tabela 3.5.3 - Resultado das simulações da atuação da força no <i>Corner Post</i> .....                          | 52 |
| Tabela 3.7.1 - Representação do limite mínimo de carga de trabalho para Manilha .....                            | 56 |
| Tabela 3.7.2 - Lista das manilhas certificadas e suas especificações.....  | 57 |
| Tabela 3.8.1 - Aços mais utilizados em <i>Container Offshore</i> .....   | 59 |
| Tabela 5.2.1 - Aplicação dos ensaios não destrutivos.....  | 65 |
| Tabela 5.2.2 - Vantagens e limitações do ensaio por Partícula Magnética .....                                    | 70 |
| Tabela 5.2.3 - Vantagens e limitações do ensaio por Ultrassom.....   | 71 |
| Tabela 5.2.4 - Vantagens e limitações do ensaio por Líquido Penetrante.....                                      | 74 |
| Tabela 5.2.5 - Vantagens e limitações do ensaio por Radiografia .....  | 75 |
| Tabela 5.2.1 - Relação da quantidade de <i>Containers</i> fabricados e testados.....                             | 76 |

## 1. Introdução

### 1.1. Organização do Trabalho

O objetivo da seção 1.2 foi apresentar um breve panorama do mercado da indústria do petróleo e a crescente busca por inovação sem abrir mão da segurança e da preocupação ambiental. Assim, foi possível introduzir o tema do trabalho, explicando a nova determinação da Petrobras na qual todos os *containers offshore* devem ser certificados, para que haja a garantia de sua qualidade.

Na seção 1.3, é apresentado um histórico sobre a utilização de equipamentos para transporte de cargas e posteriormente de *containers*, de acordo com a mudança de necessidade que aconteceu no decorrer dos anos. Depois, é mencionada a história da criação da norma DNV 2.7-1, norma reconhecida e utilizada mundialmente para certificação de *containers offshore* e é feita uma breve comparação entre outras normas da DNV.

No capítulo 2, são apresentadas citações extraídas de livros e outros materiais de pesquisa relatando as definições de *container* padrão ISO e *container offshore* e algumas de suas principais diferenças, a fim de caracterizar o *container* objeto deste trabalho, diferenciando-o de um *container* padrão e esclarecer dúvidas relativas a essas diferenças.

No capítulo 3, é explicado como é realizada a análise de um projeto de um *container offshore*, que permite avaliar se as características do *container* são suficientes para atender às exigências básicas estabelecidas pela norma DNV 2.7-1, dentre as quais, destaca-se: seção transversal utilizada, material escolhido, dimensões, temperatura de projeto, olhal selecionado e eslinga selecionada. Posteriormente, é realizado um estudo de caso, simulando a análise estrutural de um *container offshore* utilizando o *software* de modelagem computacional *3D Beam*, pelo qual poderá ser verificado se o modelo utilizado suporta as tensões e deformações a que está sujeito, ou seja, se atende às exigências estabelecidas pela norma. Os testes definidos pela norma compõem análise de içamento por 4 pontos, análise de içamento por 2 pontos, análise de içamento pela bolsa de empilhadeira e análise de forças dinâmicas atuando em diversos pontos previamente estabelecidos pela norma de *container*. Como o *software* não é capaz de simular as forças dinâmicas, estas são consideradas estáticas e é adicionado fator de correção para mitigar os erros associados a essa consideração.

No capítulo 4, são feitas as mesmas análises mencionadas no capítulo anterior, utilizando diferentes seções transversais e diferentes tipos de aço. O objetivo principal desse capítulo é entender como essas mudanças irão afetar os resultados de tensões e deformações a que as vigas estão sujeitas e qual o impacto de custos que as mudanças acarretarão. Assim, pode-se definir qual seria o melhor custo x benefício e fazer uma análise crítica das características do *container offshore* escolhido para o estudo de caso.

No capítulo 5, são mencionados quais são os requisitos a serem seguidos para a verificação de fabricação do *container offshore* e explicado sobre os ensaios não destrutivos utilizados no processo de fabricação. Tais ensaios são de extrema importância, pois atestam a qualidade do material ensaiado e permitem confirmar as suas especificações. Dada a relevância da soldagem na fabricação do *container* e sua importância para a qualidade do mesmo, são citadas algumas definições dadas por diferentes autores e é mencionado um breve histórico.

Já no capítulo 6, são explicados os diferentes testes aos quais os equipamentos tem que ser submetidos na fase final de fabricação para poderem ser certificados e como é feita a seleção dos *containers* para a realização dos testes.

O sétimo capítulo trata-se da conclusão do trabalho. No oitavo capítulo são sugeridos alguns direcionamentos que podem ser interessantes para futuros desdobramentos.

## **1.2. Motivação e Objetivos**

Nenhuma fonte de energia tem a importância geopolítica do petróleo, já que o produto constitui a base da economia produtiva mundial e pode ser transportado ao redor do mundo com relativa facilidade. Assim, o país que detém e controla reservas petrolíferas e mantém uma estrutura adequada de refino tem vantagens competitivas sobre setores vitais da economia interna (como transporte e produção de eletricidade) e da indústria, pela participação no comércio internacional e pela exportação direta do óleo e seus derivados.

Além de gerar combustíveis como gasolina, óleo diesel e querosene de aviação, o petróleo é também a base de diversos produtos industrializados. O petróleo é formado a partir da decomposição da matéria orgânica ao longo do tempo, sendo encontrado nos poros de determinadas camadas sedimentares conhecidas como “rochas reservatório”. Trata-se, portanto, de um energético não renovável, o que aumenta a importância da descoberta de novos campos produtores ou de novas regiões produtoras.

Segundo maior produtor de petróleo na América do Sul, o Brasil vive em constante crescimento no setor. No fim dos anos 1970, o país produzia, em média, 200 mil barris de petróleo por dia. Em 2009, alcançou a marca de dois milhões de barris diários. O crescimento da produção neste período associou-se às grandes descobertas marítimas de petróleo e gás na Bacia de Campos, que começou com a descoberta do campo de Garoupa (RJ), em 1974, iniciando a busca em águas cada vez mais profundas. Nos anos 1980 e 1990, foram descobertos campos gigantes naquela bacia.

No primeiro semestre de 2008, a Petrobras anunciou a descoberta de um campo de petróleo no Pré-sal (abaixo de uma camada geológica de dois quilômetros de espessura de sal) na Bacia de Santos. O potencial dessa descoberta e das seguintes na região do Pré-sal coloca o Brasil no mesmo nível de reserva dos grandes produtores mundiais. Para se ter uma ideia do montante da produção esperada, o planejamento estratégico da Petrobras<sup>1</sup> prevê uma produção no Brasil de 4,2 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe - somatório da produção de petróleo e de gás natural) em 2020, mais do que dobrando os valores de produção atuais, de 2,0 milhões de barris por dia.

O País produz uma quantidade de petróleo bruto próximo à demanda interna. No entanto, como cerca de 70% da produção é de petróleo mais pesado e a estrutura de refino não é totalmente adequada para o processamento desse tipo de óleo, ainda é necessário importar petróleos leves, para servir de insumo para a produção de derivados leves e médios, como gás de cozinha, gasolina, nafta petroquímica e óleo diesel. Assim, o excedente de petróleo nacional pesado é exportado.

A Petrobras vem modernizando seu parque de refino para elevar a capacidade de processamento de petróleo pesado e de produção de derivados que ainda precisam ser importados. A companhia também está construindo cinco unidades de refino, nos estados de Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Maranhão e Ceará. Mais modernas, elas poderão processar tanto o petróleo pesado da Bacia de Campos como o petróleo leve, encontrado no Pré-sal. Com isso, a empresa pretende reduzir a exportação de petróleo bruto e aumentar a exportação de derivados, de maior valor agregado.

Em outubro de 2013, está previsto para ocorrer a primeira rodada de licitação de direitos de exploração de petróleo e gás na camada do Pré-sal, no campo de Libra, possivelmente a maior descoberta de petróleo já feita no país. A campanha de

---

<sup>1</sup>Segundo o Plano de Negócios e Gestão 2013-2017, lançado em março de 2013.

exploração dos campos do Pré-sal demandarão investimentos vultuosos que impactarão toda a cadeia produtiva do petróleo, refletindo em aumentos de encomendas para equipamentos *offshore*, inclusive *containers offshore*.

Cabe destacar que a exploração de petróleo no Pré-sal engloba grandes desafios não somente relativos à engenharia de equipamentos, mas também a controle e segurança, exigindo esforços no sentido de minimizar riscos operacionais, ambientais e aos trabalhadores. Dessa maneira, a certificação dos equipamentos *offshore* é uma importante prática para verificar a adequação desses equipamentos para situações adversas que podem ocorrer no alto mar, a fim de minimizar qualquer risco que possa ocorrer durante a operação desses equipamentos.

É importante mencionar que segundo LOUSADA (2011), a partir de 01 de janeiro de 2013, “o embarque de unidades de carga (recipiente para reunir cargas de naturezas diversas em um só volume, para fins de transporte) realizadas nos postos, aeroportos e unidades marítimas localizados na Bacia de Campos, através do Terminal Alfandegário de Imbetiba (Macaé) somente é permitido para aqueles devidamente certificados de acordo com normas/recomendações da Organização Marítima Internacional<sup>2</sup> para *container offshore*”. Certificação é um processo que visa aumentar a confiabilidade dos equipamentos, aumentando sua vida útil e garantindo uma melhor *performance*. As etapas de um processo de certificação são:

- a) Aprovação de Projeto: Visa corrigir possíveis erros de projeto e melhorar a segurança dos equipamentos. São realizadas análises do projeto de um *container* em *software* a fim de simular as tensões e deformações resultantes de diferentes condições de trabalho no equipamento;
- b) Acompanhamento da Fabricação: Tem por objetivo assegurar que a fabricação do equipamento está sendo seguida de acordo com o proposto anteriormente e que os desenhos de projeto aprovados estão sendo efetivamente utilizados. São realizados ensaios não destrutivos nas soldas a fim de detectar possíveis discontinuidades;
- c) Testes de aceitação: O objetivo dessa etapa é assegurar que o equipamento que está sendo certificado está apto a operar. São feitos testes reais, semelhantes aos testes

---

<sup>2</sup>Agência especializada das Nações Unidas que tem como objetivo instituir um sistema de colaboração entre governos no que se refere a questões técnicas que interessam à navegação comercial internacional, bem como encorajar a adoção geral de normas relativas à segurança marítima e à eficácia da navegação.

feitos por simulação na etapa de aprovação de projeto, que simulam as diferentes condições de trabalho;

d) Emissão de certificado: Após todas as etapas anteriores serem consideradas satisfatórias, é emitido um certificado para cada equipamento. Essa é a última etapa de certificação. Após essa etapa, o equipamento está apto a operar.

Portanto, o tema do trabalho foi motivado pelas crescentes exigências de segurança dos equipamentos *offshore*, que aumenta a demanda para certificação dessas unidades (vide a exigência da Petrobrás para que *containers* possuam certificação para que possam operar em atividades *offshore*), considerando uma conjuntura de previsão de aumento da produção e dos desafios da exploração do petróleo, produto que possui grande importância econômica e estratégica para o Brasil.

### **1.3. Histórico**

Segundo SANTOS (1982), no início da navegação marítima, toda mercadoria era transportada em tonéis. O tonel, por ser uma embalagem resistente e de fácil manuseio, foi o sistema ideal que nossos antepassados encontraram para enfrentar as grandes dificuldades existentes nas operações de embarque e desembarque.

O tonel, por ser uma embalagem de extrema segurança e hermético<sup>3</sup>, facilitava o transporte de quase toda mercadoria conhecida naquela época: o vinho, por exemplo, ainda hoje tem sido transportado em tonéis, devido às vantagens oferecidas por essa embalagem. Por esse motivo, pode-se dizer que o mundo antigo, levado por circunstâncias naturais, conheceu por muitos séculos um "sistema uniforme de embalagem".

Com o decorrer do tempo, vários avanços ocorreram e naturalmente este "sistema uniforme de embalagem" foi sendo aprimorado de modo a se adequar ao desenvolvimento da engenharia naval e à conseqüente construção de navios com maiores capacidades. No decorrer da evolução dos sistemas de transporte, existiram alguns contratemplos, como por exemplo: os caminhões eram construídos para transportar as mercadorias de certa região, podendo, por isso, ser adaptados para acomodar os volumes de uma determinada mercadoria, enquanto os navios, construídos para transportar mercadorias de diferentes países e regiões, eram obrigados a receber volumes das mais diversas padronagens.

---

<sup>3</sup>Hermético: Completamente fechado. Vedado. Lacrado.

Após várias adequações e estudos, em 1950, as diversas nações do mundo se conscientizaram e começaram a ditar normas de padronização. Depois de muitas discussões no âmbito internacional, os países envolvidos dividiram-se em duas linhas de padronização distintas: na Europa a *International Standards Organization* (ISO) e nos Estados Unidos a *American Standards Association* (ASA).

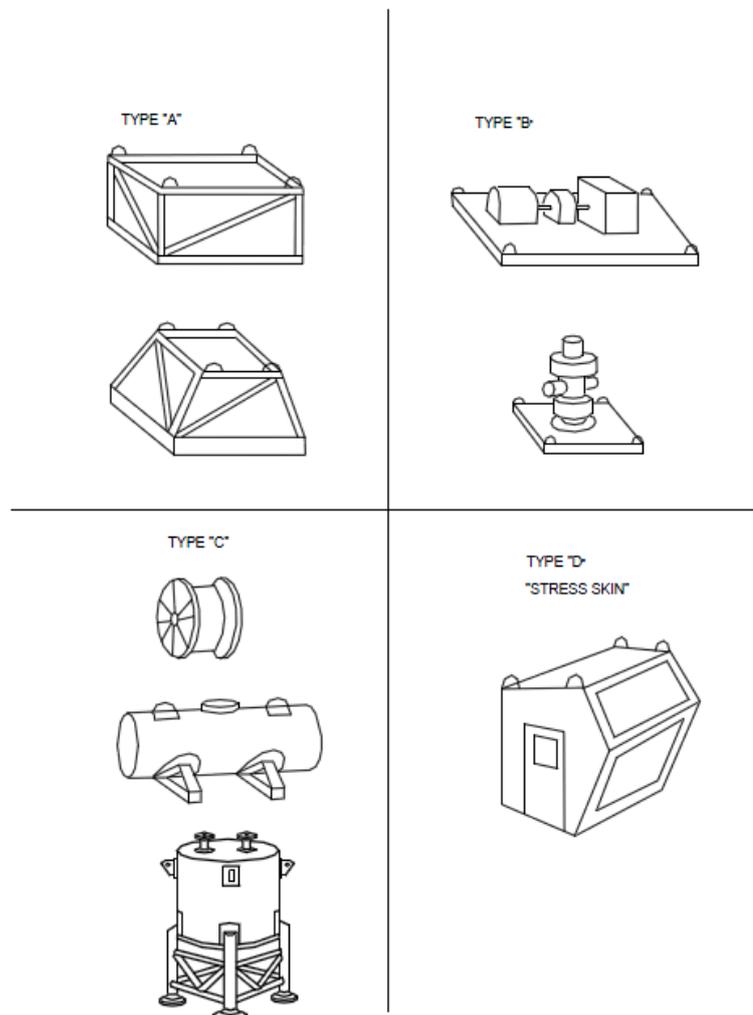
Segundo consta na introdução da DNV 2.7-1, a primeira norma criada especificamente para *containers offshore* foi publicada em Maio de 1989 como "DNV Certification Note 2.7-1 Offshore Freight Containers". A motivação para publicação desta norma foi a ausência, naquela época, de outros regulamentos, códigos internacionais e requisitos nacionais específicos para *containers offshore*. Uma revisão desta norma foi emitida em Maio de 1995, porém as bases de resistência e requisitos de projetos foram mantidas da edição original.

No início dos anos 90 vários países europeus decidiram estabelecer uma norma para *containers offshore* naquele mercado baseada na norma adotada até então, a "DNV Certification Note 2.7-1" (1989). Com isso, *European Standardization Organization* CEN iniciou a padronização em 1992, que foi finalizada em 1999, após muitas interrupções, com o lançamento da norma EN. No entanto, o trabalho para revisão e expansão da norma foi iniciado ao mesmo tempo. A revisão da EN 12079 foi completada em Abril de 2006.

As normas EN 12079 (2006) e DNV *Standard for Certification 2.7-1* (2006), foco principal deste trabalho, detalham seus requisitos nos âmbitos de projeto, processo de fabricação e testes de aceitação. A norma DNV 2.7-1 abrange todas as normas internacionais referentes a *container offshore*, porém além de ser mais didática, é mais flexível quanto aos requisitos de temperatura de projeto.

Como a DNV 2.7-1 é específica para *containers offshore* cujo *rating*, massa bruta máxima, não seja maior que 25.000 Kg, viu-se a necessidade da criação de outra norma que validasse unidades cuja massa ultrapassasse esse valor. A partir dessa demanda do mercado, criou-se a DNV 2.7-3, norma que abrange tipos de unidades incomuns e é mais específica, uma vez que as unidades costumam ser mais robustas e, portanto, as operações de carga e descarga em alto-mar são bem mais complexas. Devido à complexidade de içamento, essas unidades não são comumente utilizadas para transporte repetitivo de carga. Assim, equipamentos certificados de acordo com a DNV 2.7-3 não são considerados *containers offshore* e sim unidades portáteis *offshore*. A

título de curiosidade, abaixo podemos ver uma figura que mostra possíveis tipos de unidades portáteis certificáveis pela DNV 2.7-3:



**Figura 1.3.1 - Tipos de Unidades Portáteis de acordo com a norma DNV 2.7-3**

De acordo com a DNV 2.7-2, quando uma unidade portátil ou *container offshore* for projetada e equipada para operar a bordo de uma instalação fixa ou flutuante e executar serviços que necessitem instalações elétricas, eles podem estar sujeitos a regulamentação em vigor sobre a instalação e para a área onde for instalado. Para esses casos, a utilização desta norma é aplicável. Portanto, a DNV 2.7-2 não certifica a estrutura da unidade e sim as instalações elétricas, sistemas de ventilação e ar condicionado.

## **2. Tipos de *Container***

Existem dois tipos de *container*: *container ISO* e *container offshore*. Abaixo, serão abordadas suas definições e principais diferenças.

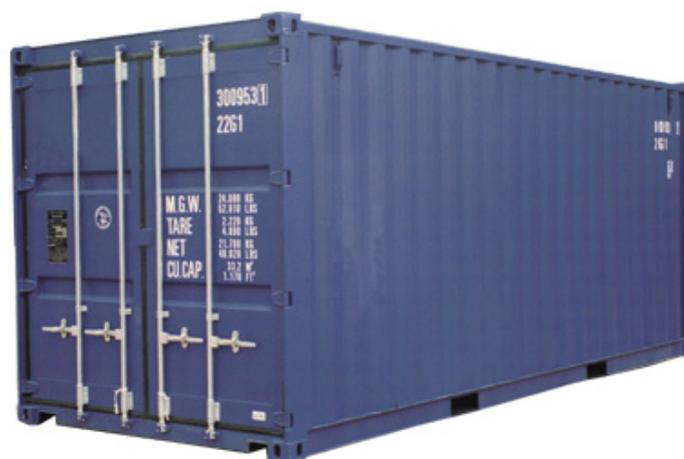
### **2.1. Definição de *Container ISO***

Segundo Decreto nº 80.145 de 15 de agosto de 1977, o *container* padrão ISO é um recipiente construído de material resistente, destinado a propiciar o transporte de mercadorias com segurança, inviolabilidade e rapidez, dotado de dispositivo de segurança aduaneira e devendo atender às condições técnicas e de segurança previstas pela legislação nacional e pelas convenções internacionais ratificadas pelo Brasil.

De acordo com o Artigo 4º do decreto citado acima, o *container* deve preencher, entre outros, os seguintes requisitos:

- a) Ter caráter permanente e ser resistente para suportar o seu uso repetido;
- b) Ser projetado de forma a facilitar sua movimentação em uma ou mais modalidades de transporte, sem necessidade de descarregar a mercadoria em pontos intermediários;
- c) Ser provido de dispositivos que assegurem facilidade de sua movimentação, particularmente durante a transferência de um veículo para outro, em uma ou mais modalidades de transporte;
- d) Ser projetado de modo a permitir seu fácil enchimento e esvaziamento;
- e) Ter o seu interior facilmente acessível à inspeção aduaneira, sem a existência de locais onde se possam ocultar mercadorias.

As premissas adotadas em termos de carregamentos para os cálculos dos esforços sofridos pelos *containers* padrão ISO são basicamente os carregamentos dinâmicos devido às cargas de vento e movimentação do navio, além dos esforços de compressão devido ao seu empilhamento durante o transporte.



**Figura 2.1.1 - Container Padrão ISO**

*Containers* padrão ISO são caracterizados por sua conformidade com um conjunto de recomendações técnicas estabelecidas por normas pela Organização Internacional de Normalização (ISO). As principais normas que se aplicam são:

- ISO 668 - "*Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*" é uma norma ISO que estabelece características dimensionais para *containers* de carga série "1", vide tabelas 2.1.1 e 2.1.2, e incorpora as seguintes informações:
  - Definições;
  - Comprimentos nominais;
  - Dimensões externas;
  - Desobstruções internas e dimensões de abertura das portas;
  - Dimensões e tolerâncias relacionadas aos locais dos "*Corner Fittings*"<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup>*Corner Fittings*: Estrutura cuja função principal é sua fixação no *Spreader*, dispositivo utilizado no içamento de *Container* ISO.

| Designação de <i>Containers</i> de Frete Série 1 |    |           |                |          |          |
|--|----|-----------|----------------|----------|----------|
| Comprimento Nominal                              |    |           | Altura Externa |          |          |
| M  | Ft | <8 ft0 in | 8ft 6 in       | 8ft 6 in | 9ft 6 in |
| 12   | 40 | AX        | A              | AA       | AAA      |
| 9  | 30 | BX        | B              | BB       | BBB      |
| 6  | 20 | CX        | C              | CC       | -        |
| 3  | 10 | DX        | D              | -        | -        |

Nota: Todas as unidades têm uma largura nominal de 8ft 0 in

**Tabela 2.1.1 - Designação de dimensão de *Container* ISO**

Nota: *Containers* designados com "X" (e. g. DX ou AX) são *containers* com a parte superior aberta.

| Peso bruto permissível para <i>containers</i> |                                |                            |
|---|--------------------------------|----------------------------|
| Designação de <i>Containers</i>               | De acordo com ISO-668<br>(LBS) | De acordo com EDF-<br>6285 |
| AX, A, AA, AAA                                | 67.200                         | 44.900                     |
| BX, B, BB, BBB                                | 56.000                         | 44.900                     |
| CX, C, CC                                     | 52.900                         | 44.900                     |
| DX, D   | 22.400                         | 22.400                     |

**Tabela 2.1.2 - Peso bruto permissível para *Containers* ISO**

Nota: AX, A, AA e AAA são todos do mesmo comprimento, mas diferem em sua altura.

- ISO 1496, partes 1 a 5 - É uma norma que estabelece critérios para que *containers* sejam concebidos para resistir, sem deformação e anormalidade, evitando torná-los impróprios para utilização;
- ISO 1161 - Esta norma estabelece critérios quanto às dimensões do *Corner Fitting*, com intuito de prove interface entre os demais *containers* durante o transporte e armazenamento dos mesmos;
- ISO 6346 - É uma norma internacional que estabelece critérios quanto à codificação, identificação e marcação dos *containers* utilizados no transporte de carga. A norma define o sistema de identificação visual para todos os *containers*, que inclui: um único número de série, o proprietário, o código do país, tamanho, tipo e categoria, além de qualquer marcação operacional;

- ISO 3874 - Esta norma internacional especifica métodos para manuseio e segurança para *containers* de série "1" construídos e fabricados em conformidade com as normas citadas acima ISO 1496 - 1 a 5. Métodos para manuseio e segurança, considerando as condições de tipos diferentes de içamento, são descritos para ambas as situações onde o *container* poderá atuar, com carregamento ou vazio.

## 2.2. Definição de *Container Offshore*

A definição citada na norma DNV 2.7-1, diz que um *container offshore*, figura 2.2.1, é uma unidade portátil com uma massa bruta máxima não superior a 25.000 Kg, para utilização repetida para transporte de bens ou equipamentos, manuseados em alto mar, com rumo a ou entre instalações fixas e / ou flutuantes e navios.

São considerados como premissas de projeto para dimensionamento dos *containers offshore* a capacidade de suportar carregamentos estáticos e principalmente dinâmicos, devido à constante movimentação do navio durante operações de carregamento e descarregamento com ondas de até 6 metros.



**Figura 2.2.1 - *Container Offshore***

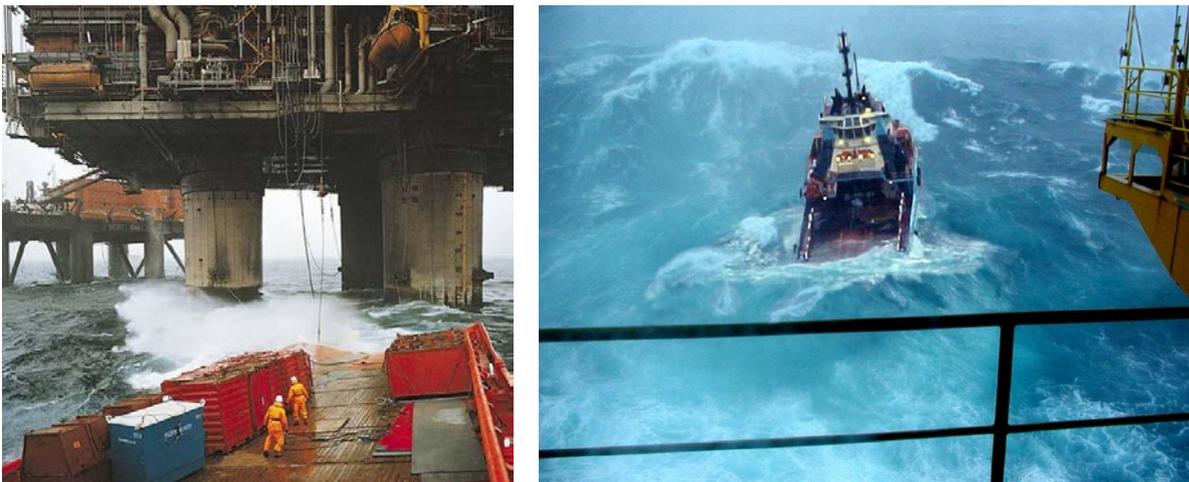
### 2.2.1. Componentes de um *Container Offshore*

- Estrutura: É dividida em estrutura primária e estrutura secundária, como será visto adiante. A estrutura primária é composta por vigas soldadas com penetração total. A estrutura do *container* pode conter chapas para fins de segurança e isolamento do conteúdo interno do *container*. Pode ter porta na lateral do *container* ou uma tampa no teto;

- Bolsa de empilhadeira: Compõe a estrutura da maioria dos *containers offshore* e sua função é permitir o transporte do *container* no porto pela empilhadeira. A bolsa de empilhadeira está situada perpendicularmente às vigas do *frame* inferior de tal modo que o *container* se mantenha estável durante a operação de transporte no porto. Na figura 2.2.1 pode-se ver as duas bolsas de empilhadeira na lateral direita;
- Olhal: Compõe a estrutura de todos os *containers offshore*. O olhal se conecta a eslinga através da manilha. É utilizado para o içamento do *container*;
- Conjunto de Içamento: O conjunto de içamento é composto pela manilha, pela eslinga e por demais componentes secundários. O conjunto de içamento é parte integrante do *container* e é especificado no certificado do *container*;
- Manilha: A manilha é uma peça em aço utilizada para unir ou fixar cabos ou correntes. Em forma de U ou de D é fechada com um pino rosqueado e com um parafuso ou porca e contra porca;
- Eslinga: São equipamentos utilizados em operações de elevação e movimentação do *container*.

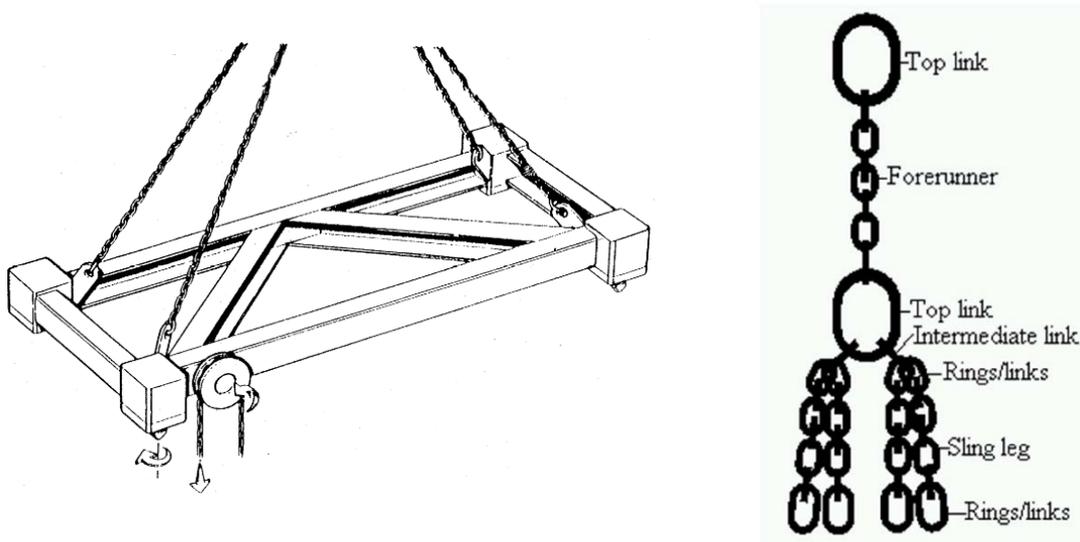
### 2.3. Diferenças entre *Container ISO* e *Container Offshore*

- Não são projetados para os altos carregamentos dinâmicos, como podem ocorrer no ambiente *offshore*, sendo destinado às operações de carga e descarga somente no porto;



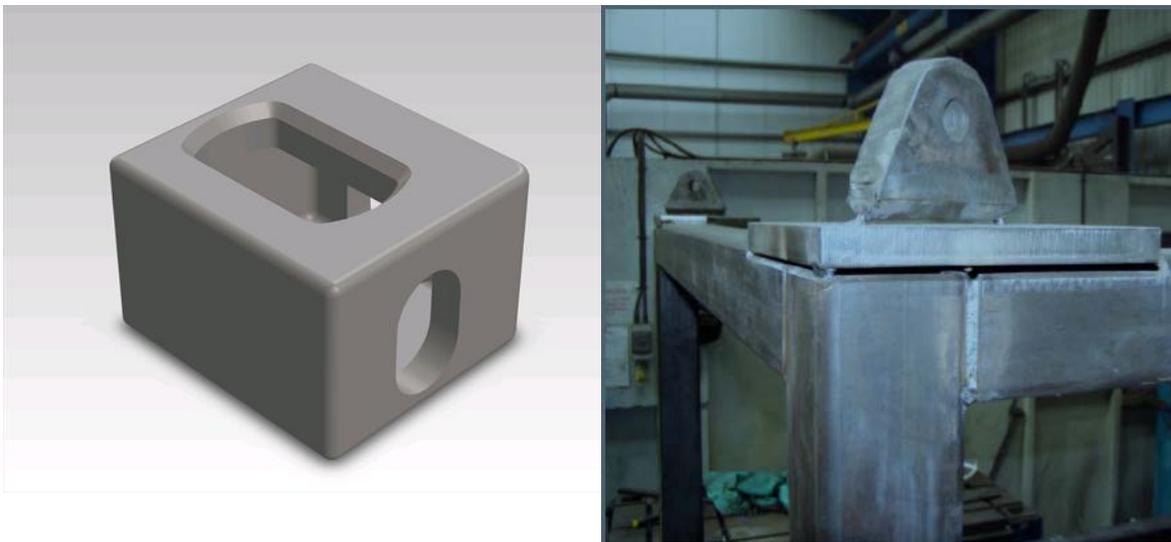
**Figura 2.3.1 - Condições de mar a que os *Containers Offshore* estão sujeitos**

- Não são projetados para serem içados com a utilização de eslinga. Seu içamento é feito utilizando *spreaders*;



**Figura 2.3.2 - Spreader e conjunto de içamento, respectivamente**

- Sua construção não é suscetível aos altos impactos. Possuem *ISO Corners* ou *Corner Fittings* ao invés de olhais;



**Figura2.3.3 - Corner Fitting e Olhal, respectivamente**

- Os regulamentos internacionais e nacionais mencionam que os mesmos não são certificados para o uso *offshore*;
- Os *containers offshore* tem a flexibilidade de poderem ser içados por qualquer guindaste no mundo desde que atendam aos requisitos de carga e velocidade;
- Os *containers offshore* só podem ser empilhados se forem projetados para tal e ainda sim não podem ser empilhados no transporte.

### **3. Projeto - Análises Estruturais de *Container Offshore* conforme DNV 2.7-1**

Foi analisado um estudo de caso no qual foram utilizadas as informações especificadas na tabela 2.3.1 para analisar o comportamento estrutural de um *container offshore* em operação sendo submetido a esforços estáticos e dinâmicos devido às condições de trabalho adversas e meteorológicas. A norma define que: *An offshore container shall have sufficient strength to allow loading and unloading in open seas from a ship deck with a sea state up to significant wave heights of 6 m. Consideration shall be given in the design to local impact loads, e.g. from hitting other deck cargo or rigid parts of the ship structure, which may cause extreme loads in such conditions.* Ou seja, um *container offshore* deve ter resistência suficiente de forma a permitir o seu carregamento e descarregamento em mar aberto a partir do convés de uma embarcação com ondas de até seis metros de altura. Devem ser consideradas no projeto as cargas locais provenientes, por exemplo, do impacto com outros *containers* no convés ou com partes rígidas da estrutura da embarcação.

No estudo de caso, os esforços dinâmicos foram considerados estáticos. Assim, foram adicionados fatores de correção em cada tipo de içamento, dependendo da criticidade da operação, devido a essa aproximação. No estudo de caso foram utilizados: aço A572 Gr. 50 por possuir um valor de tensão de escoamento adequado e disponibilidade no mercado brasileiro e seção quadrada de 80 x 80 x 6,3 mm em todas as vigas do equipamento, com exceção da bolsa de empilhadeira, que possui uma seção transversal igual a 254 x 127 x 6,3 mm. A dimensão do *container offshore* é 14303 x 1074 x 1456 mm e o rating, ou massa bruta total, considerado foi de 16.203 Kg. Foi escolhido para o estudo de caso um *container* desenvolvido para transporte de diferentes tipos de cargas, ou seja, não específico e com características semelhantes às demandadas pelo mercado. Suas características podem ser observadas na tabela a seguir:

| Especificações de Projeto |                  |
|---------------------------|------------------|
| Material                  | A572 Gr. 50      |
| Perfil                    | 80 x 80 x 6,3 mm |
| Tensão de Escoamento      | 345 MPa          |
| Tara                      | 4.203 Kg         |
| <i>Payload</i>            | 12.000 Kg        |
| <i>Rating</i>             | 16.203 Kg        |
| Temperatura de Projeto    | 0° C             |

**Tabela 2.3.1 - Especificações de projeto do *Container Offshore***

Devido às especificações de massa e à forma considerada (retangular), diferente das formas aplicáveis para norma DNV 2.7-3, como mostrado na Figura 3.1, o *container* considerado se enquadra nos requisitos necessários para certificação de acordo com a norma DNV 2.7-1.

Para as análises estruturais foi utilizado o *software* computacional "3D Beam", programa desenvolvido com base na teoria de vigas e utilizado pelos funcionários da empresa *Det Norske Veritas* também para a modelagem de navios e estruturas *offshore*. O *software* utilizado não possui características de modelagem através do método de elementos finitos, pois historicamente viu-se que esse método de análise não era necessário para *container offshore*. De acordo com BUDYNAS (2011), os componentes mecânicos nas formas de barras simples, vigas etc podem ser analisados de forma relativamente fácil utilizando métodos básicos de mecânica que fornecem soluções analíticas, não sendo necessária a modelagem utilizando métodos de elementos finitos.

De acordo com o recomendado pela DNV 2.7-1, podemos dividir a estrutura que compõe o *container* em dois grupos: estruturas primárias e estruturas secundárias. Na etapa de modelagem do projeto são consideradas apenas as estruturas primárias essenciais e não redundantes. Pela definição, estruturas primárias podem ser divididas em dois subgrupos, são eles:

a) Estrutura primária essencial e não redundante: são os elementos estruturais principais que transferem os esforços resultantes para o guindaste ou para a empilhadeira. Compreendem: os elementos superiores e inferiores, as colunas verticais, os olhais, a bolsa de empilhadeira e demais elementos essenciais relevantes que suportem altas tensões.

b) Estrutura primária não essencial: compreendem a chapa do piso e outros elementos estruturais cuja função principal não seja outra que a descrita no item (a) acima. Este subgrupo também compreende elementos estruturais de proteção. Esses elementos não são modelados no *software*.

A estrutura secundária compreende elementos que não são considerados para fins de cálculo de projeto, pois não são elementos obrigatórios ou essenciais para a estrutura. Pontos de amarração interna e chapas laterais e superiores são consideradas como estrutura secundária.

Devido a preocupações com a segurança humana e com possíveis danos a outras unidades, não é permitida nenhuma parte protuberante do *container*. Assim, portas e maçanetas devem ter um dispositivo de proteção.

### **3.1. Temperatura de Projeto**

A temperatura de projeto ( $T_d$ ), ou temperatura de operação, é a temperatura média na qual o *container* vai estar exposto durante a operação de transporte de cargas *offshore*. De acordo com a norma, podemos projetar o *container* com a temperatura de projeto sendo  $-20^{\circ}\text{C}$  ou  $0^{\circ}\text{C}$ . Se for escolhida a primeira opção, podemos operar com o equipamento em qualquer parte do mundo, exceto norte da Rússia e norte do Canadá. Devido a essas restrições de localidades, já existe uma intenção de certificar unidades com temperatura de projeto de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Se utilizarmos  $0^{\circ}\text{C}$  o *container* só poderá operar em áreas de clima temperado, uma vez que ele não atenderia aos requisitos para regiões com temperaturas mais baixas. *Containers offshore* operados no Brasil costumam ser certificados para uma temperatura de projeto de  $0^{\circ}\text{C}$ .

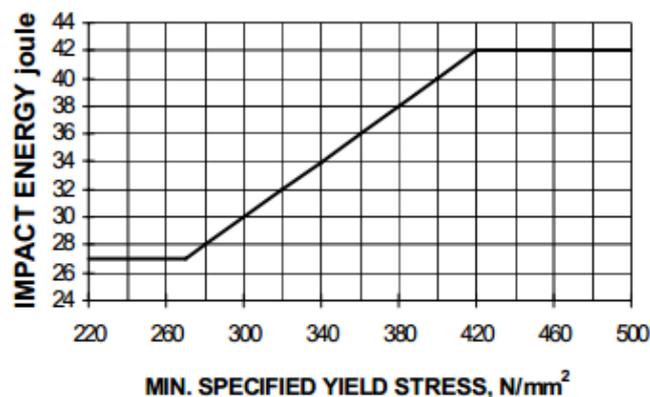
A temperatura de projeto e a espessura do material tem uma relação direta com a temperatura na qual o corpo de prova deverá ser testado durante os testes de impacto. Quanto mais espesso é o material, mais difícil fica de garantir a homogeneidade do mesmo e mais propenso ele vai estar de apresentar impurezas, facilitando o aparecimento de trincas quando submetido a esforços. Por isso, conforme observado na tabela abaixo, a norma DNV 2.7-1 e as normas internacionais exigem que quanto maior a espessura do material, menor será a temperatura testada nos ensaios de impacto, menor será a energia absorvida pelo material e, portanto, mais crítico será o ensaio.

| Espessura do material, t, em mm | Temperatura do teste de impacto em °C |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| $t \leq 12$                     | $T_d + 10$                            |
| $12 < t \leq 25$                | $T_d$                                 |
| $t > 25$                        | $T_d - 20$                            |

**Tabela 3.1.1 - Relação da espessura do material com a temperatura de testes de impacto - Charpy**

Como visto, a temperatura de projeto deve ser especificada na parte de projeto do *container*, porém, ela possui uma relação com a fase de fabricação, uma vez que os testes de impacto aos quais os corpos de prova serão submetidos acontecerão nesta etapa da certificação.

O objetivo do ensaio de impacto é medir a tenacidade do material, que é a capacidade do material de absorver energia. Uma medição confiável de tenacidade é um pré-requisito para o projeto de componentes estruturais. Os requerimentos para a energia de impacto absorvida pelo material dependem da tensão de escoamento especificada. Após ensaios em três corpos de prova, a energia absorvida média não deverá ser menor do que a apresentada no gráfico abaixo para tensão de escoamento especificada. No caso do aço A572 Grau 50 utilizado no estudo de caso, a tensão de escoamento é 345 MPa ou 345 N/mm<sup>2</sup> e portanto a mínima energia absorvida deverá ser próximo de 34 Joules, como podemos observar na figura 3.1.1 abaixo.



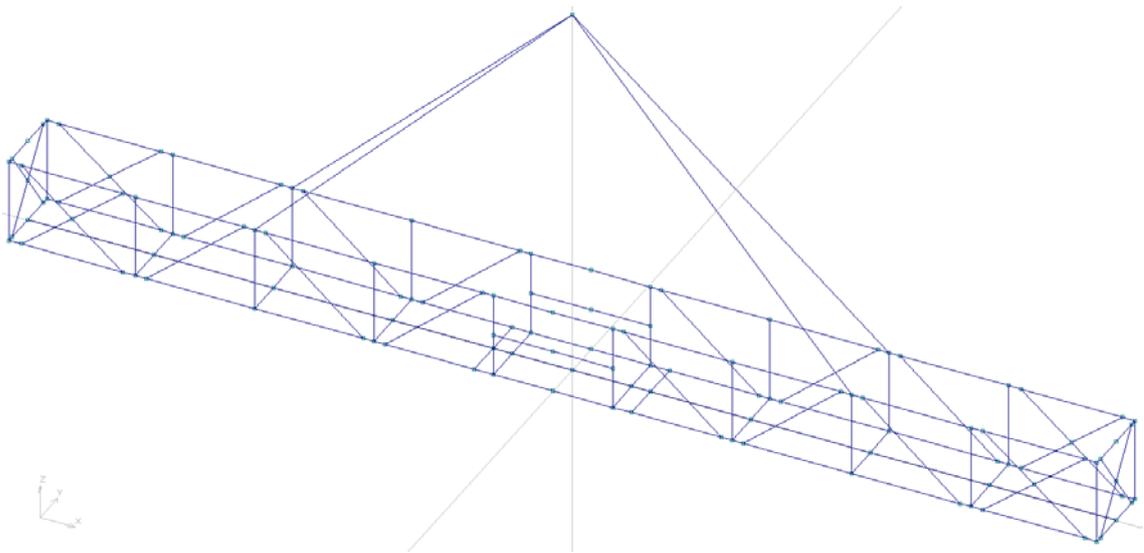
**Figura 3.1.1 - Relação entre a tensão de escoamento especificada e energia de impacto absorvida pelo material**

Se, por algum motivo, não for possível retirar corpos de prova do tamanho padrão especificado (10 x10 mm), podemos fazer uma correlação de corpos de prova com outras dimensões especificadas com o gráfico acima, assim:

| Corpo de Prova de dimensões reduzidas |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Dimensão                              | Valor da Figura 3.1.1 |
| 10 x 7,5 mm                           | 5/6                   |
| 10 x 5,0 mm                           | 2/3                   |

**Tabela 3.1.2 - Correção dos valores obtidos na Figura 3.1.1 utilizando corpos de prova de tamanho reduzido**

### 3.2. Análise de içamento por 4 Pontos



**Figura 3.2.1 - Container Offshore içado por 4 Pontos**

A análise de içamento por quatro pontos é a primeira a ser feita ao modelarmos o *container* no *3D Beam*. Essa análise simula a condição de operação de carregamento e descarregamento do *container* do navio *supply*<sup>5</sup> em condições normais de trabalho. Após muitos estudos e análises, os engenheiros da *Det Norske Veritas* afirmaram que para essa condição de içamento, um coeficiente de segurança de 2,5 seria adequado. Por não fazer parte do escopo do trabalho, a fórmula utilizada para os cálculos desse coeficiente de segurança não será provada, mas sim demonstrada abaixo, para um melhor entendimento de como foi obtido esse valor. Abaixo seguem as fórmulas e as definições de cada incógnita:

$$\varphi = 1 + \Delta V * \sqrt{(C|w * g)} \quad (1)$$

$$\Delta V = Vl + \sqrt{(2 * Vin + 2 * Vt)} \quad (2)$$

<sup>5</sup>Navio *supply*: Navio de abastecimento que transporta os containers utilizados para abastecer as instalações *offshore*.

No qual:

$\Delta V$  = Velocidade relativa entre o *container* e o gancho do guindaste no momento em que eles entram em contato. (m/s);

C = Rigidez do guindaste (kN/m);

W = Carga total (kN);

Vl = Velocidade de elevação do gancho (m/s);

Vin = Velocidade vertical do convés da embarcação provocada pela onda (m/s);

Vt = Velocidade da extremidade do guindaste na plataforma flutuante (m/s).

Assim, através dessas informações e de diversos testes, conseguiu-se gerar o gráfico abaixo, para diferentes condições de onda e para *containers* de diferentes massas. Porém, para que houvesse uma uniformidade na utilização do coeficiente de segurança na modelagem, fez-se uma média considerando-se a média anual da altura de ondas no Mar do Norte, massa dos *containers* e tipos e características dos guindastes. Com essas informações, chegou-se a conclusão que o coeficiente de segurança para içamento por 4 pontos dos *containers* seria de 2,5. Esse coeficiente é um dos *inputs* para a realização da simulação. A foto abaixo é meramente expositiva e os cálculos foram feitos para um tipo de guindaste específico da marca Liebherr.

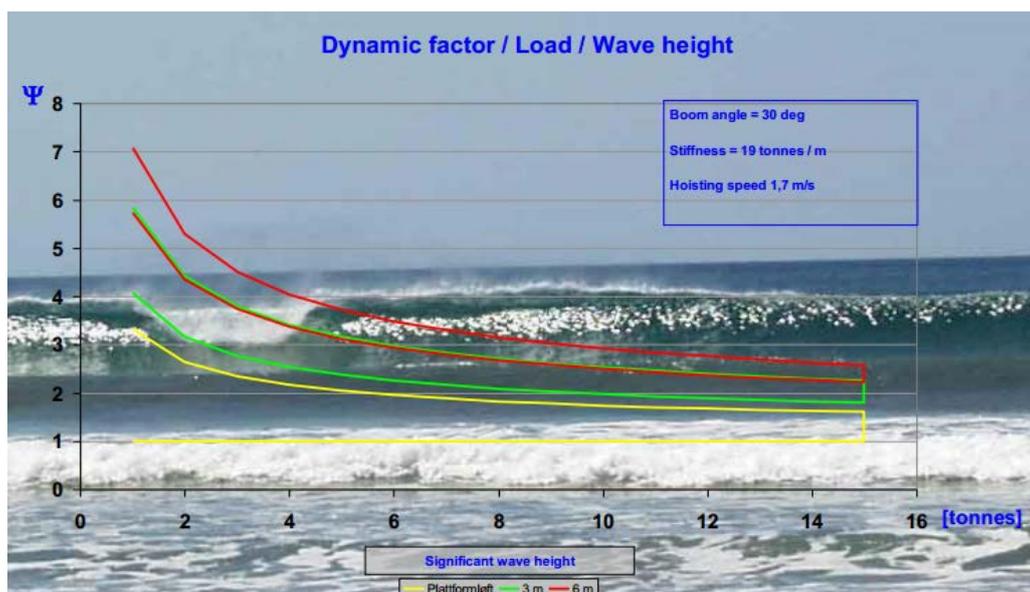


Figura 3.2.2 - Gráfico que relaciona o tamanho de onda com a massa bruta total e o fator de segurança

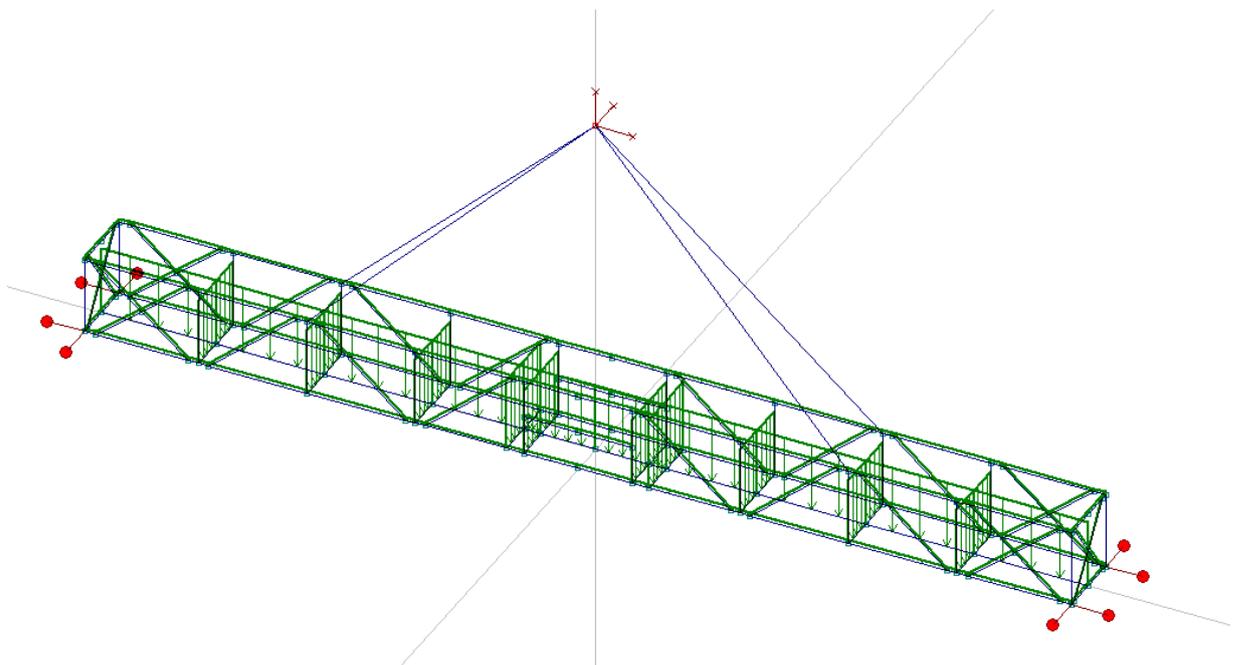
A carga considerada na simulação do *software* para a análise de içamento por quatro pontos também deverá ser um *input* no programa. Essa carga deverá atuar no nó que representa o ponto de contato do gancho do guindaste com o conjunto de içamento e é calculada de acordo com a fórmula abaixo:

$$F = 2,5 * R * g \quad (3)$$

Dado que  $R^6 = 16.203 \text{ Kg}$  para o caso analisado, temos que:

$$F = 2,5 * R * g = 2,5 * 16.203 * 9,81$$
$$F = 397.378,58 \text{ N}$$

### 3.2.1. Condições de Contorno e Carregamento Distribuído na Direção Z



**Figura 3.2.3 - Carga distribuída na estrutura primária do *Container Offshore* e condições de contorno determinadas**

A imagem acima mostra os esforços atuantes na estrutura quando esta está sendo submetida à condição de içamento por 4 pontos. Como o *container* projetado não é específico para transporte de um tipo único de equipamento, uma forma de generalizar é considerar a carga útil como sendo igualmente distribuída na estrutura primária

---

<sup>6</sup>R = Rating, conforme definido no item Nomenclatura, na página 8.

essencial e não redundante. Carga útil, ou *Payload*, é o peso máximo permissível de carga que pode ser transportado com segurança pelo *container*.

Outro *input* importante para a simulação é o estabelecimento de condições de contorno, que são restrições que devem ser adotadas no modelo, a fim de simular as condições reais de trabalho a que o *container* estará submetido, para que o *software* possa rodar o modelo adequadamente. Sendo assim, é necessário avaliar a estrutura em questão para descobrir que tipos de condições de contorno são relevantes em cada içamento, pois terão um impacto significativo sobre os resultados.

As condições de contorno devem ser tais que evitem a rotação livre do modelo e a movimentação ao longo dos eixos principais X, Y e Z, de modo a mantê-lo estável e simular as condições de trabalho real. No estudo de caso, para o içamento por 4 e 2 pontos, o ponto de contato do guindaste com o conjunto de içamento é considerado como sendo um ponto com apenas três graus de liberdade rotacionais, ou seja, não translada. Já os quatro nós do *frame* inferior destacados em vermelho na figura acima são modeladas para simular a presença de uma mola nos eixos X e Y com coeficiente de elasticidade igual a 10 N/mm, permitindo pequenas translações nesses eixos. As eslingas são elementos modelados para que não transfiram momentos de flexão.

Segundo BUDYNAS (2011), os nós dos elementos são suas entidades governantes fundamentais, pois é no nó que o elemento se interliga com outros elementos e onde as propriedades elásticas do elemento eventualmente são estabelecidas, as condições de contorno são atribuídas e as forças são finalmente aplicadas. Um nó possui graus de liberdade. Graus de liberdade são os movimentos de rotação e de translação independentes que podem existir em um nó. Este pode ter, no máximo, três graus de liberdade translacionais e três rotacionais.

### **3.2.2. Análise das Tensões**

Após inserir no *software* o modelo do *container* (contendo suas especificações de formato, material e massa), as seções transversais, as cargas atuantes sobre o modelo, os coeficientes de segurança e as condições de contorno, é realizada a simulação desse tipo de içamento, em que o *software* dá como resultado as tensões e deformações atuantes.

A tensão calculada pelo *software*, ou tensão atuante, é de acordo com o critério de Von Mises ou teoria da energia de distorção. Segundo BUDYNAS (2011), a teoria da energia de distorção originou-se por causa da observação de que materiais dúcteis tensionados hidrosticamente exibiam resistências de escoamento bem acima dos valores dados pelo ensaio de tração simples. Consequentemente, foi postulado que o escoamento não era um fenômeno simples de tração ou compressão em absoluto, mas, pelo contrário, que estava relacionado de alguma maneira à distorção angular do elemento tensionado.

Após verificadas as tensões atuantes, deve-se compará-las com as tensões admissíveis pelas vigas, tensão máxima que as vigas devem suportar. A tensão admissível no içamento por 4 pontos é calculada da seguinte forma:

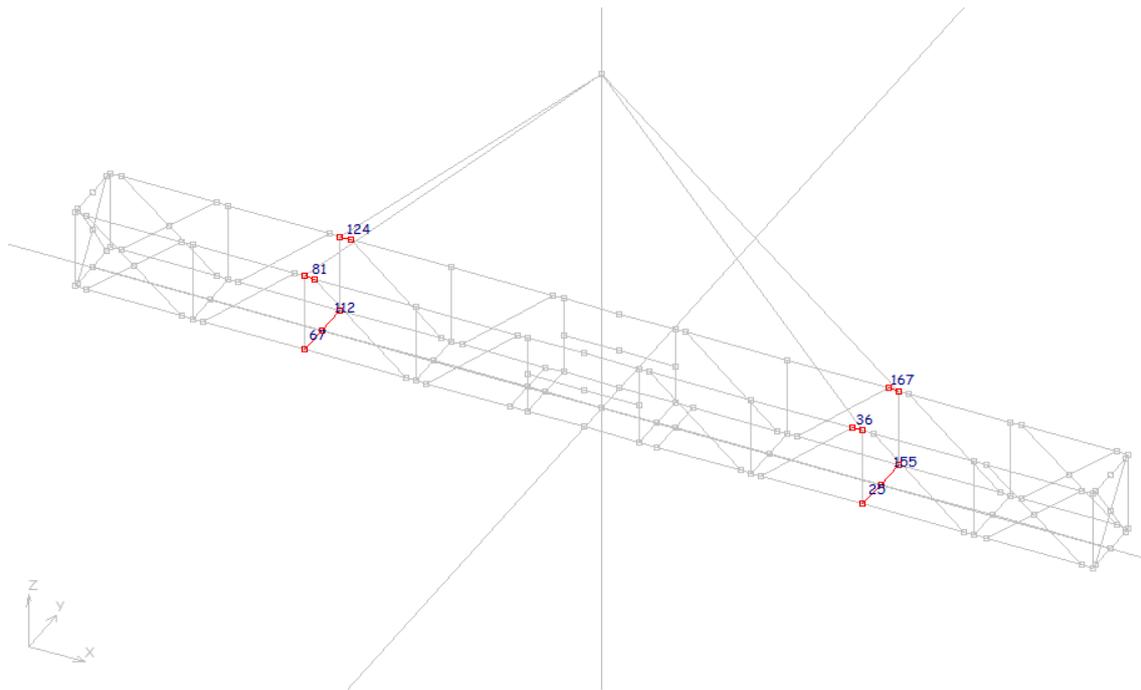
$$\sigma_e = 0.85 * C \quad (4)$$

Onde  $\sigma_e$  é a tensão admissível e C é a tensão de escoamento do material na zona termicamente afetada. Para aço, C é definido como sendo igual a Re, tensão de escoamento. Devido à dificuldade de garantir a homogeneidade do material antes e principalmente depois da soldagem, utiliza-se um fator de correção de 0,85. Para o caso estudado,  $C = Re = 345$  MPa, logo tem-se que a tensão máxima admissível é de 293,25 MPa, conforme o cálculo abaixo:

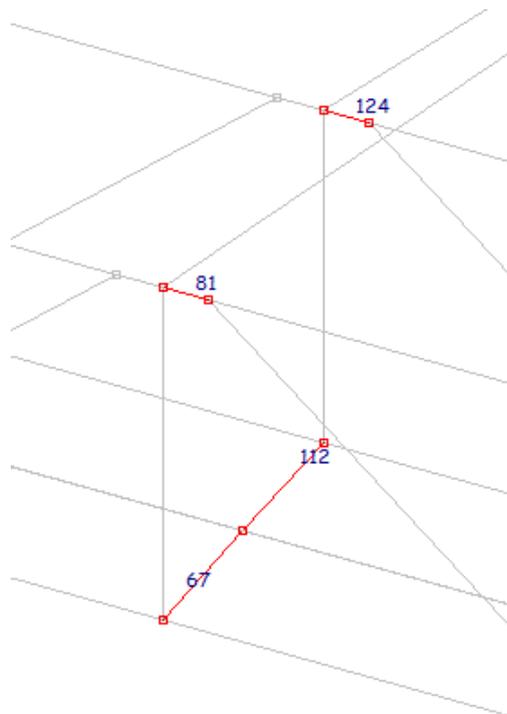
$$\sigma_e = 0.85 * 345$$

$$\sigma_e = 293,25 \text{ MPa}$$

O resultado da simulação identificou que as oito vigas representadas na figura abaixo são as que estão sofrendo maior tensão devido ao carregamento no içamento por 4 pontos.



**Figura 3.2.4 - Vigas mais solicitadas na análise de Içamento por 4 Pontos**



**Figura 3.2.5 - Imagem ampliada das vigas mais solicitadas no Içamento por 4 Pontos**

Na tabela abaixo, pode-se verificar as informações das oito vigas mais solicitadas. Na segunda coluna da tabela 3.2.1, estão os resultados das tensões atuantes sobre as vigas.

| Beam No. | $\sigma_{\text{eff}}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | x-pos [mm] | y-pos [mm] | z-pos [mm] |
|----------|--|------------|------------|------------|
| 36       | 238  | 142,75     | -36,85     | -36,85     |
| 167      | 238  | 142,75     | 36,85      | -36,85     |
| 81       | 237  | 142,75     | 36,85      | -36,85     |
| 124      | 237  | 142,75     | -36,85     | -36,85     |
| 155      | 227  | 497        | 36,85      | 36,85      |
| 112      | 227  | 497        | -36,85     | 36,85      |
| 25       | 226  | 497        | -36,85     | 36,85      |
| 67       | 226  | 497        | 36,85      | 36,85      |

**Tabela 3.2.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento por 4 Pontos**

Conforme a tabela acima e a figura 3.2.4, as vigas que compõe o quadro superior estão submetidas a uma tensão equivalente de aproximadamente 237 MPa, enquanto as vigas que compõe o quadro inferior estão submetidas a uma tensão equivalente de aproximadamente 226 MPa. Verifica-se que nenhuma das vigas do modelo está sujeita a uma tensão maior que a tensão admissível, uma vez que a tensão admissível para esse tipo de içamento é de 293,25 MPa. Pequenas discrepâncias podem ocorrer comparando-se vigas semelhantes posicionadas em lados opostos, devido a erros de aproximação do *software*.

### 3.2.3. Análise das Deformações

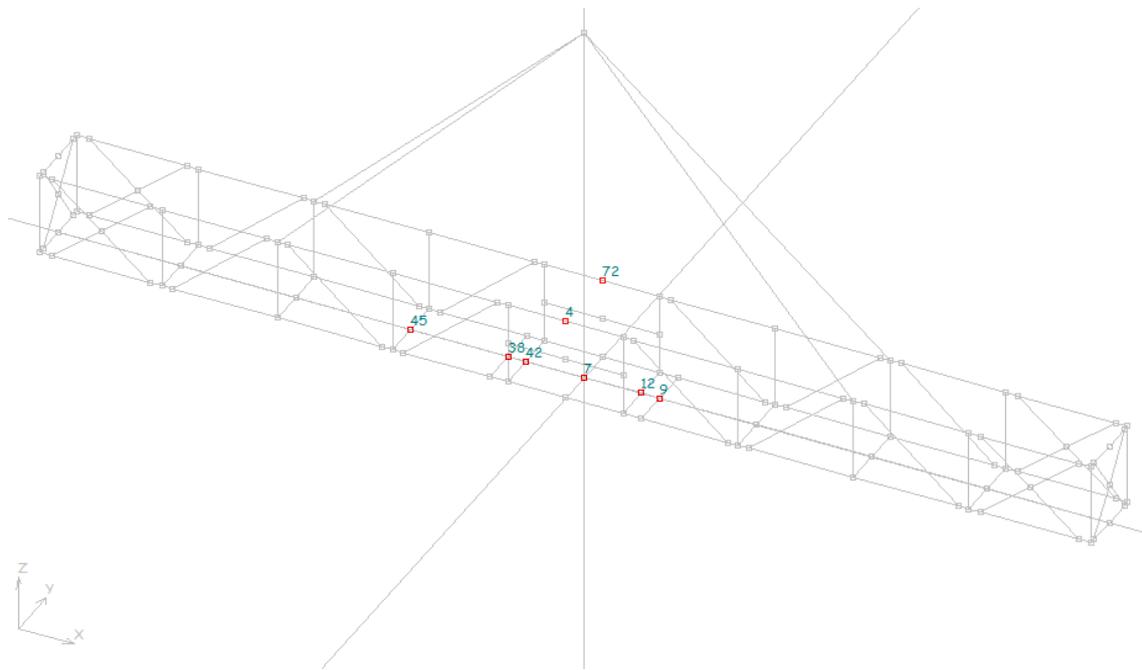
O cálculo da deformação relativa máxima permitida é empírico, pois baseia-se em visualizações experimentais e assegura que abaixo desse valor, não haverá deformações permanentes. Tal cálculo pode ser feito globalmente, utilizando o comprimento da viga inteira ou localmente, utilizando apenas um pedaço da viga que seja considerado crítico. A deformação relativa máxima permitida pode ser calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{Ln}{300} \quad (5)$$

Dado que Ln = Comprimento da viga (mm).

Após o *input* dos dados descritos anteriormente, o *software 3D Beam* traz como resultado os deslocamentos dos nós consequentes das cargas a que o *container* está sendo submetido. Comparando-se o nó que sofreu o maior deslocamento na viga com o

nó localizado em uma das extremidades, calcula-se a deformação global a que as vigas estão sujeitas. Em seguida é feita uma comparação com a deformação relativa máxima permitida. Os nós selecionados em vermelho são os nós que mais se deslocaram em relação ao eixo Z, porém, não significa que as vigas correspondentes a esses nós são as que mais se deformaram.



**Figura 3.2.6 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Z**

A tabela a seguir exibe os oito nós que mais se deslocaram e as colunas dois, três e quatro exibem seus deslocamentos em relação aos eixos X, Y e Z, respectivamente.

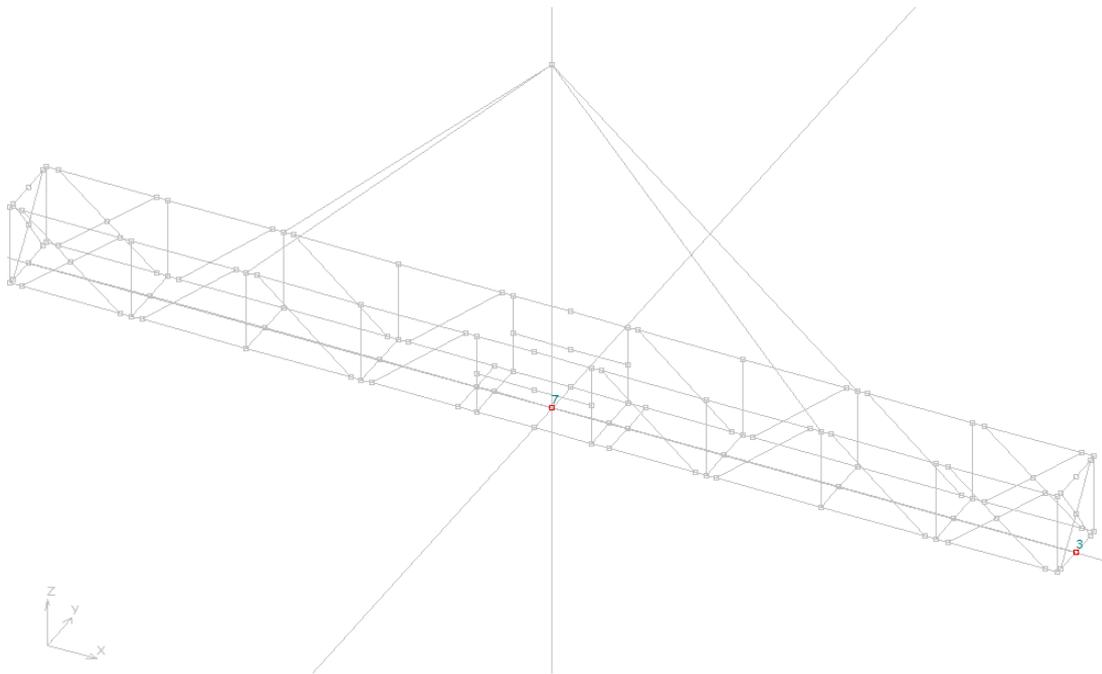
| Node No. | $\delta_x$<br>[mm] | $\delta_y$<br>[mm] | $\delta_z$<br>[mm] |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 7        | 0                  | 0                  | -10,268            |
| 42       | -0,033128          | 0                  | -9,2856            |
| 12       | 0,033128           | 0                  | -9,2856            |
| 38       | -0,042879          | 0                  | -9,1631            |
| 9        | 0,042879           | 0                  | -9,1631            |
| 4        | 0                  | 4,3134             | -9,0053            |
| 72       | 0                  | -4,3134            | -9,0053            |
| 45       | -0,038285          | 0                  | -8,9179            |

**Tabela 3.2.2 - Deslocamentos críticos no Içamento por 4 Pontos**

O nó que sofreu maior deslocamento é reconhecido como nó 7 pelo programa, possui coordenadas (0; 0; 0) e um deslocamento no eixo Z de -10,268 mm. É o nó central do *container*. O nó 3 está localizado na extremidade do eixo X, possui coordenadas (7.111,5; 0; 0) e sofre um deslocamento de -1,9288 mm. A viga que contém esses dois nós é a mais crítica do *container* por ser a que apresenta a maior deformação relativa, calculada abaixo.

$$D = 10,2680 - 1,9288$$

$$D = 8,339 \text{ mm}$$



**Figura 3.2.7 - Seleção dos nós para o cálculo da deformação relativa global atuante na viga**

Como o requisito da norma é para deformação global da viga, é utilizado  $L_n$  como sendo o comprimento total do *container* no eixo X. Como  $L = 14.223,00$  mm no estudo de caso, tem-se:

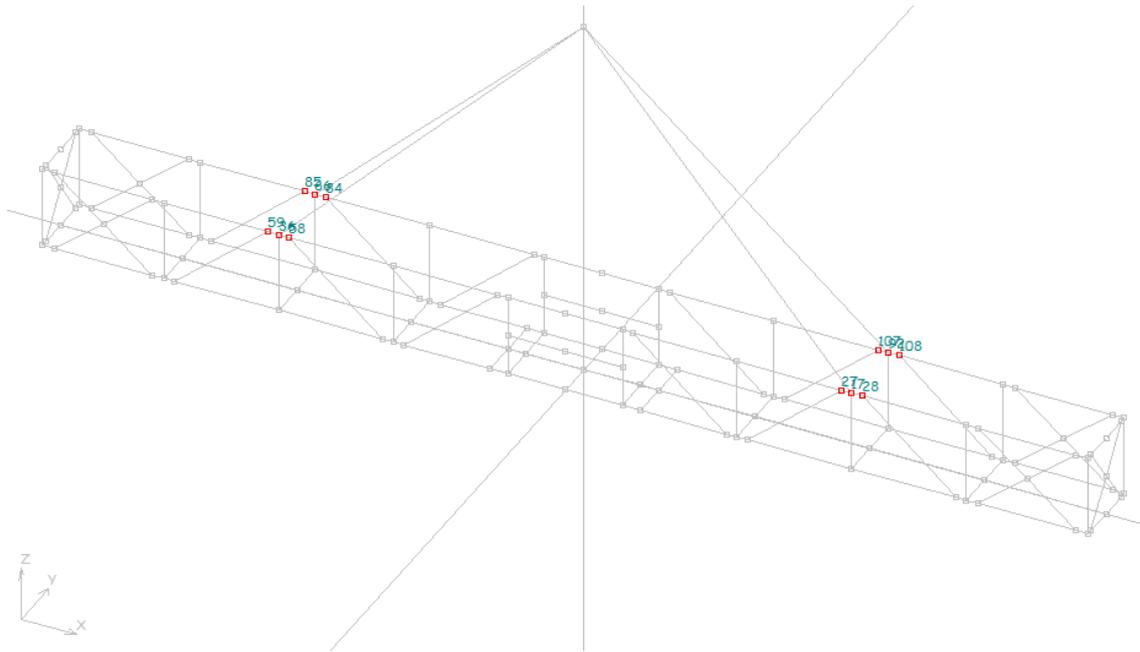
$$\varepsilon = \frac{L_n}{300}$$

$$\varepsilon = \frac{14.223}{300} = 47,41 \text{ mm}$$

Comparando-se os valores obtidos  $D = 8,339 \text{ mm}$  e  $\varepsilon = 47,41 \text{ mm}$ , é possível perceber que a deformação relativa da viga analisada no eixo Z, que ocorrerá durante a

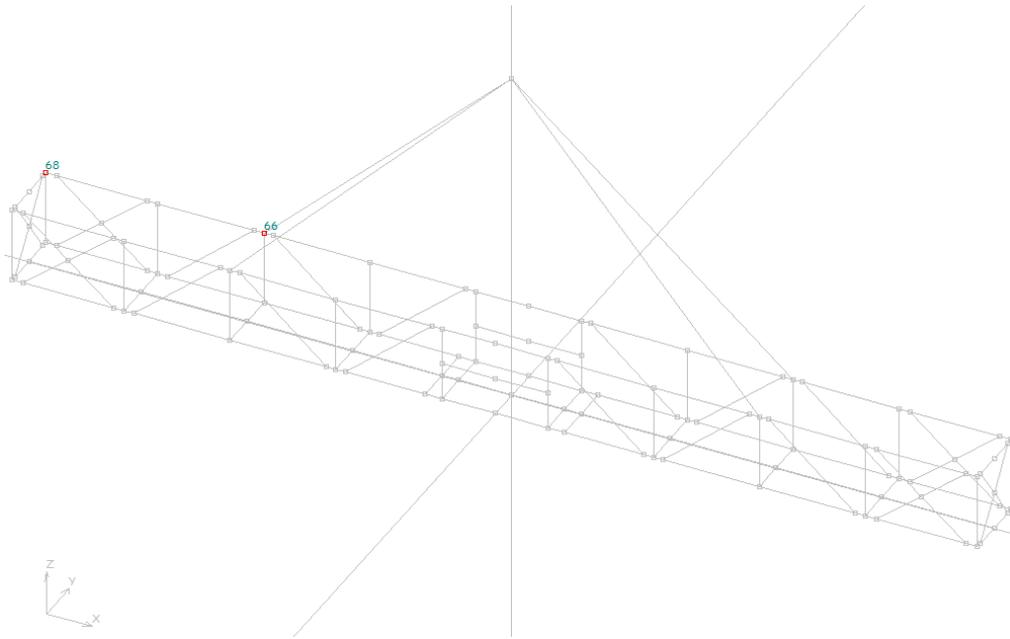
operação, não prejudicará a estrutura do *container*, uma vez que não provocará deformações permanentes.

Como forma de ser mais conservador e confirmar a segurança do equipamento nesse quesito, foi realizado também o cálculo da deformação local da viga no eixo Y. Na figura abaixo pode-se identificar os nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Y. Os resultados da análise estão a seguir.



**Figura 3.2.8 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Y**

O nó 66, de coordenadas (-3.900; 497; 1116), é o que apresenta maior deslocamento em relação ao eixo Y, de -14,81 mm. Comparando este nó com outro da mesma viga, localizado na extremidade (o nó 68), calcula-se a deformação ocorrida nessa parte crítica da viga. O nó 68, de coordenadas (-7.111,5; 497; 1116), possui deslocamento em relação ao eixo Y de -0,01 mm. Os nós estão representados abaixo:



**Figura 3.2.9 - Seleção dos nós para o cálculo da deformação relativa local atuante na viga**

Assim, a deformação relativa local entre esses dois nós é de:

$$D = 14,81 - 0,01$$

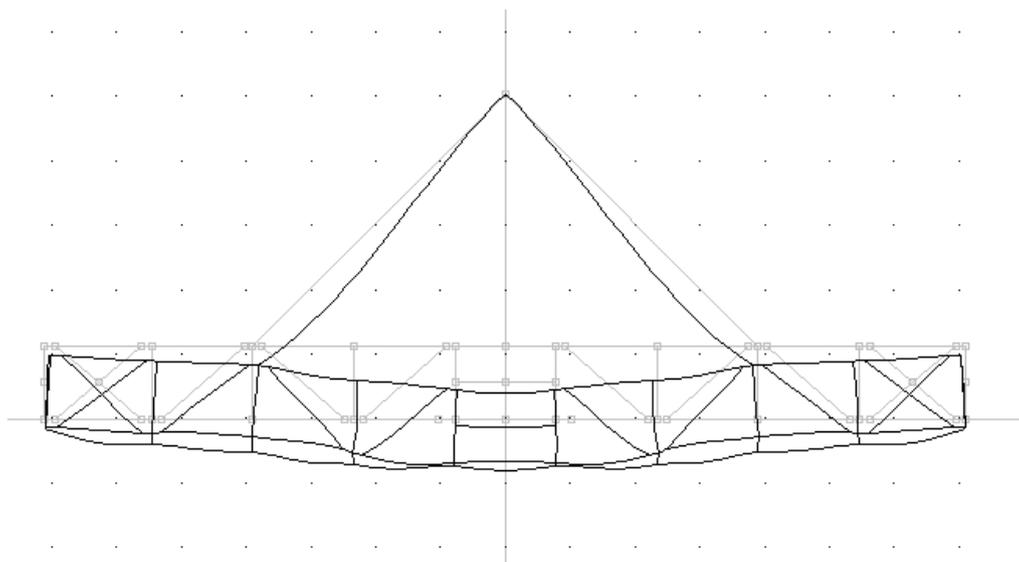
$$D = 14,80 \text{ mm}$$

Para o estudo de caso, para deformação local em relação ao eixo Y, o cálculo da deformação relativa máxima permitida será feito utilizando a distância entre os dois nós, uma vez que foi identificado que essa parte da viga pudesse ser crítica. A distância entre os dois nós estudados é de  $L_n = 7.111,50 \text{ mm}$ . Assim:

$$\varepsilon = \frac{7.111,50}{300} = 23,71 \text{ mm}$$

Comparando-se os valores obtidos  $D = 14,80 \text{ mm}$  e  $\varepsilon = 23,71 \text{ mm}$  é possível perceber que a deformação que ocorrerá durante a operação não prejudicará a estrutura do *container*.

Na vista lateral da figura 3.2.10 abaixo, pode-se visualizar uma representação da deformação que acontece no *container* ao ser submetido aos esforços provenientes do içamento por 4 pontos. Vale lembrar que, como calculado, as deformações atuantes serão deformações elásticas e não afetarão a integridade do *container*.



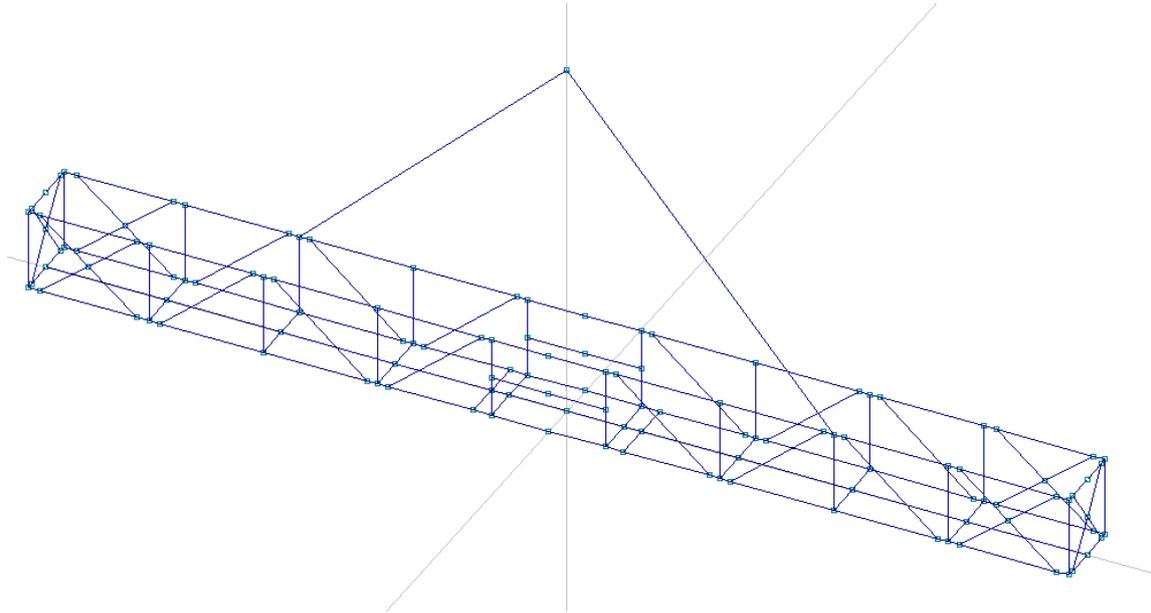
**Figura 3.2.10 - Vista lateral da deformação do *Container Offshore* no içamento por 4 Pontos**

Como forma de demonstrar as situações admissíveis e as atuantes já descritas acima, foi criada a tabela abaixo. Pode-se perceber que as condições analisadas estão abaixo dos valores admissíveis por norma, portanto, o *container* do estudo de caso foi considerado satisfatório para esse tipo de içamento e deverá ser analisado para os demais casos descritos.

| <b>Içamento por 4 pontos</b>              |                |                        |
|---|----------------|------------------------|
|   | <b>Atuante</b> | <b>Admissível</b>      |
| Tensão máxima (MPa)                       | 238            | $0,85 \cdot 345 = 294$ |
| Deformação relativa máxima no eixo y (mm) | 14,80          | 23,71                  |
| Deformação relativa máxima no eixo z (mm) | 8,37           | 47,41                  |

**Tabela 3.2.3 - Resultado das simulações do Içamento por 4 Pontos**

### 3.3. Análise de Içamento por 2 Pontos



**Figura 3.3.1 - Container Offshore içado por 2 Pontos**

#### 3.3.1. Análise das Tensões

Após as análises de içamento por 4 pontos, a regra exige que seja feita uma análise de içamento por 2 pontos, no qual 2 eslingas situadas em lados opostos e diagonais se rompem. É importante informar que esse tipo de condição de içamento é anormal, ou seja, não deve acontecer. Dessa forma, para essa análise, não é mandatório realizar as análises de deformação das vigas. Nessa análise, o fator de correção do limite de escoamento é 1,2, uma vez que não são modelados todos os elementos da estrutura, tais como chapeamento lateral e do fundo. Assim, a tensão admissível no içamento por 2 pontos não deve ser maior que a especificada a seguir:

$$\sigma_e = 1,2 * R_e \quad (6)$$

Lembrando que a tensão de escoamento do aço A572 Gr. 50 escolhido para o estudo de caso é de 345 MPa, temos:

$$\sigma_e = 1,2 * 345$$

$$\sigma_e = 414 \text{ MPa}$$

O valor encontrado para a tensão admissível é menor que o limite de resistência à tração do aço selecionado, que vale 450 MPa. Limite de resistência à tração é definido como a maior tensão que o material pode resistir, se esta tensão for aplicada e mantida, o resultado será a fratura. Esse fato indica que o *container* nessas condições de içamento

pode até se deformar plasticamente, uma vez que o *container* e seu conjunto de içamento deverão passar por reparos após a ocorrência desse incidente.

O motivo das eslingas estarem na diagonal, é para simular uma condição que pode ocorrer durante a operação, na qual uma quina do *container* se prende a outro equipamento ou à própria embarcação, fazendo com que a eslinga correspondente seja exposta a uma situação extrema e se rompa. Ao acontecer isso, o *container* sofre uma inclinação para baixo e a eslinga oposta a rompida fica “frouxa”, fazendo com que o *container* seja içado praticamente por apenas 2 pontos.

A carga considerada na simulação do *software* para a análise de içamento por dois pontos é um *input* do programa. Essa carga deverá atuar no nó que representa o ponto de contato do guindaste com a eslinga e é calculada de acordo com a fórmula abaixo:

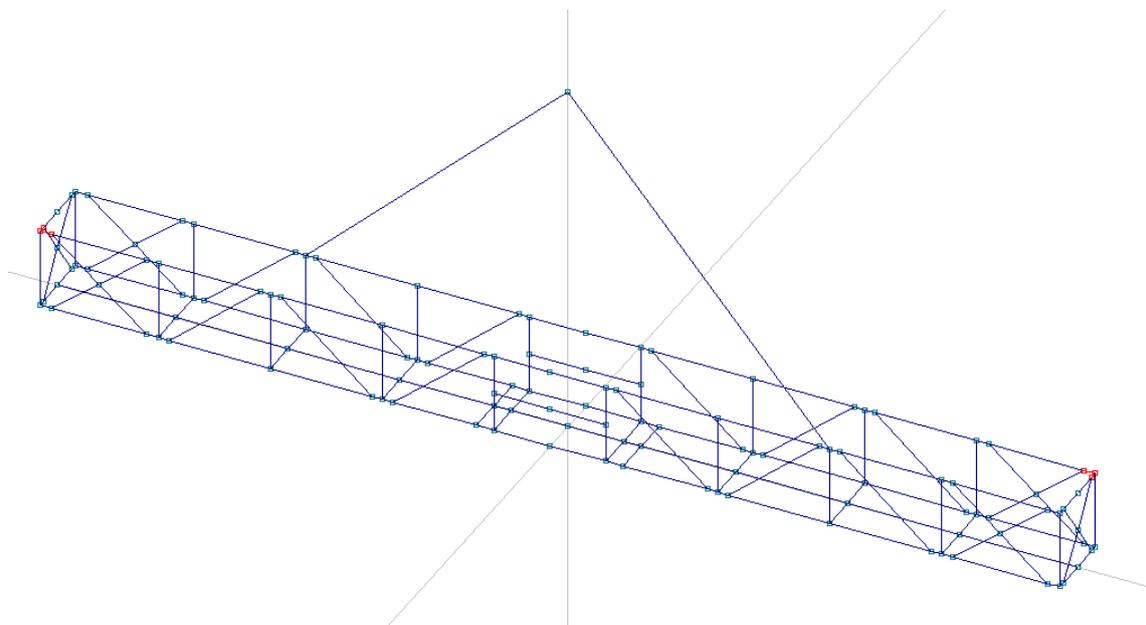
$$F = 1,5 * R * g \quad (7)$$

Dado que  $R = 16.203 \text{ Kg}$  para o estudo de caso analisado, temos que:

$$F = 1,5 * 16.203 * 9,81$$

$$F = 238.427,14 \text{ N}$$

O resultado da simulação identificou que as quatro vigas representadas na figura abaixo são as que estão sofrendo maior tensão devido ao carregamento no içamento por 2 pontos.



**Figura 3.3.2 - Vigas que estão sofrendo maior tensão devido ao Içamento por 2 Pontos**

A tabela gerada pelo *software* abaixo informa os valores das tensões atuantes. Os valores de tensão para vigas opostas não são iguais possivelmente por erros de aproximação do *software*.

| Beam No. | $\sigma_{\text{eff}}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | x-pos [mm] | y-pos [mm] | z-pos [mm] |
|----------|--|------------|------------|------------|
| 142      | 406  | 0          | -36,85     | 36,85      |
| 174      | 404  | 161,75     | -36,85     | -36,85     |
| 89       | 403  | 161,75     | -36,85     | -36,85     |
| 51       | 403  | 0          | -36,85     | 36,85      |

**Tabela 3.3.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento por 2 Pontos**

Como forma de demonstrar as tensões admissíveis e as atuantes, foi criada a tabela abaixo. O resultado mostrado na tabela pode ser considerado satisfatório, uma vez que a tensão atuante máxima é de 406 MPa e a tensão máxima admissível para esse tipo de içamento, para esse estudo de caso, é de 414 MPa.

| Içamento por 2 pontos |         |               |
|-----------------------|---------|---------------|
|                       | Atuante | Admissível    |
| Tensão máxima (MPa)   | 406     | 1,2*345 = 414 |

**Tabela 3.3.2 - Resultado das simulações do Içamento por 2 Pontos**

Situações onde duas eslingas do mesmo lado se rompem foram testadas por imaginar que seriam mais críticas do que a situação apresentada acima, porém, o *software 3D Beam* não permite que tal simulação seja realizada, uma vez que essa condição expõe o modelo a uma rotação maior que 90°. A imagem abaixo mostra a mensagem de erro que o *software* transmite após a tentativa de modelagem dessa situação. Vale ressaltar que essa situação não simula uma condição que tenha ocorrido historicamente e assim, sua análise foi descartada.

```

Preparing for analysis...
Extracting topology information and rebuilding beam and node numbers if necessary..
Extracting beam properties...
Extracting load information...
Number of nodes: 124 Number of beams: 198 ...
Calculating the response for 3 load cases ...
This problem failed the quality check!
Failed in Load Case: Tare
Error: Rotation larger than 90.0 degrees for node: 19
Please, check profiles and loads. Results discarded.
Error: Analysis failed!

Analysis failed after 0 seconds, 1 errors, 0 warnings

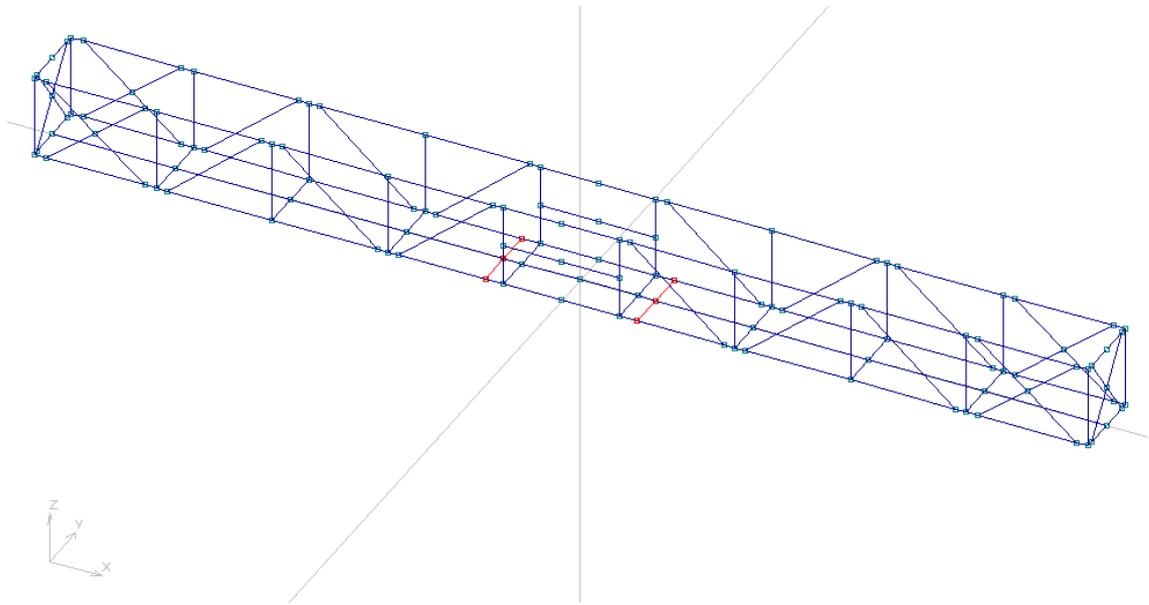
```

**Figura 3.3.3 - Mensagem de erro transmitida pelo *software* após a tentativa de análise de Içamento por 2 Pontos utilizando um método diferente**

### 3.4. Análise de Içamento pela Bolsa de Empilhadeira

#### 3.4.1. Análise das Tensões

Como citado anteriormente no item 2.2.1, a bolsa de empilhadeira compõe a estrutura da maioria dos *containers offshore* e sua função é permitir o transporte no porto do *container* pela empilhadeira. As vigas marcadas em vermelho na figura abaixo são as bolsas de empilhadeira.



**Figura 3.4.1 - Representação da Bolsa de Empilhadeira no Container**

De acordo com o item 4.4.6 da norma, é mandatório que o *container offshore* possua um ou mais pares de bolsa de empilhadeira na estrutura inferior. A abertura mínima das bolsas de empilhadeira deverá ser de 200 x 90 mm, pois existe uma restrição devido às dimensões dos garfos de empilhadeira.

As dimensões do *container* devem ser levadas em consideração na hora de projetar e dimensionar as bolsas. A tabela abaixo define a distância mínima entre os centros das bolsas de empilhadeira de acordo com as dimensões do *container* e as possíveis limitações operacionais.

| <b>Dimensão L (mm)</b>     | <b>Distância mínima entre centros da Bolsa (mm)</b> | <b>Limitações Operacionais da Bolsa de Empilhadeira</b>                           |
|----------------------------|---|---|
| $L < 6.000$                | De acordo com os requisitos acima                   | Se $3.000 \leq L < 6.000$ , as bolsas podem estar espaçadas a pelo menos 1.500 mm |
| $6.000 \leq L \leq 12.000$ | 2.050   | Projetadas para serem utilizadas com o <i>container</i> carregado                 |
|                            | 900   | Projetadas para serem utilizadas com <i>container</i> descarregado                |
| $12.000 < L \leq 18.000$   | 2.050   | Só podem ser utilizadas com o <i>container</i> vazio                              |
| $L > 18.000$               | -   | Não deve haver bolsa de empilhadeira  |

**Tabela 3.4.1 - Especificações da Bolsa de Empilhadeira**

Como o *container* estudado possui comprimento de 14.223 mm, ele só poderá ser transportado descarregado no porto pela bolsa de empilhadeira, ou seja, sem o *payload*. Como a distância entre os centros da bolsa do *container* estudado é de 2.053 mm, ele está de acordo com a especificação que estabelece que a distância mínima deva ser de 2.050 mm.

Além da análise dimensional da bolsa, são necessárias análises de verificação das tensões e deformações ocorridas nas vigas quando o *container* estiver sujeito a essa condição de içamento, com os garfos inseridos na bolsa de empilhadeira, sustentando toda a estrutura. Para essa análise, as condições de contorno definidas anteriormente não são mais válidas, sendo necessárias outras condições: os quatro nós do *frame* inferior são modelados para simular a presença de uma mola nos eixos X e Y com coeficiente de elasticidade igual a 10 N/mm, limitando a translação nos eixos X e Y, possibilitando a translação livre no eixo Z e rotação nos três eixos. Os nós onde o garfo de empilhadeira estará em contato com o *frame* inferior, são considerados nós que possuem translação no eixo Z nula. Ademais, é exigido que seja utilizado um coeficiente de segurança de 1,6 para análise de bolsas de empilhadeira, valor encontrado por meio de experimentos e vários estudos. Assim, a força aplicada na estrutura deverá ser um *input* no programa e será calculada da seguinte forma:

$$F = (1,6 * (R + S)) * g \quad (8)$$

Dado que  $R = 16.203 \text{ Kg}$  e  $S = 142 \text{ Kg}$  para o caso analisado, temos que:

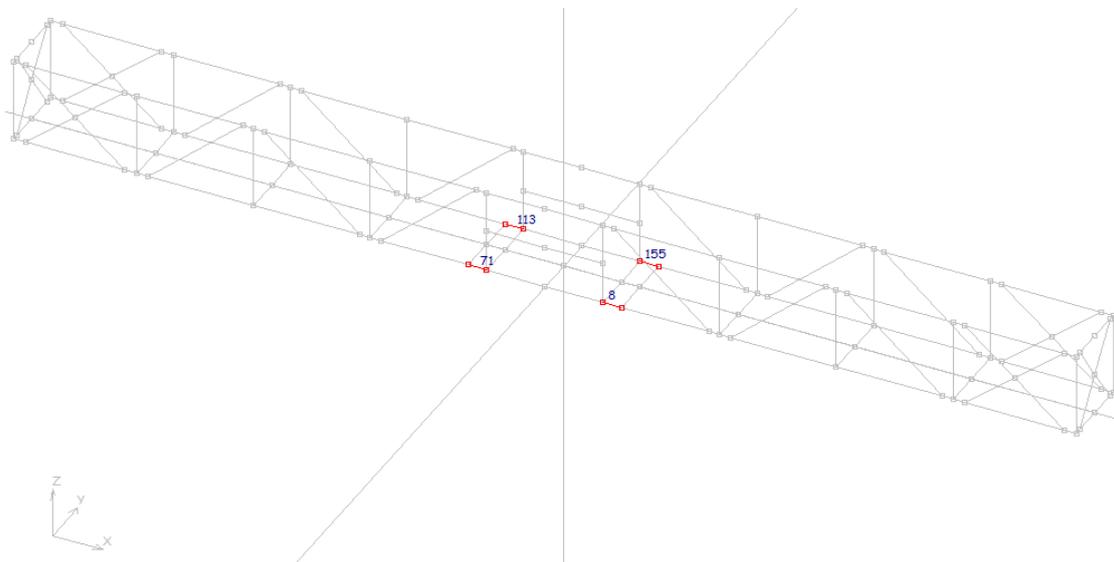
$$F = (1,6 * (R + S)) * g = (1,6 * (16.203 + 142)) * 9,81$$

$$F = 256.551,12 N$$

Como são quatro nós do *frame* modelado em contato com a empilhadeira, a força aplicada em cada nó será de:

$$F = 64.137,78 N$$

Após o *input* das forças atuantes e das condições de contorno, o programa fornece as tensões e deformações atuantes. A imagem abaixo evidencia as vigas que estão sofrendo maior tensão equivalente devido a esse tipo de içamento e a tabela a seguir mostra os valores encontrados para tal tensão.



**Figura 3.4.2 - Vigas mais solicitadas no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira**

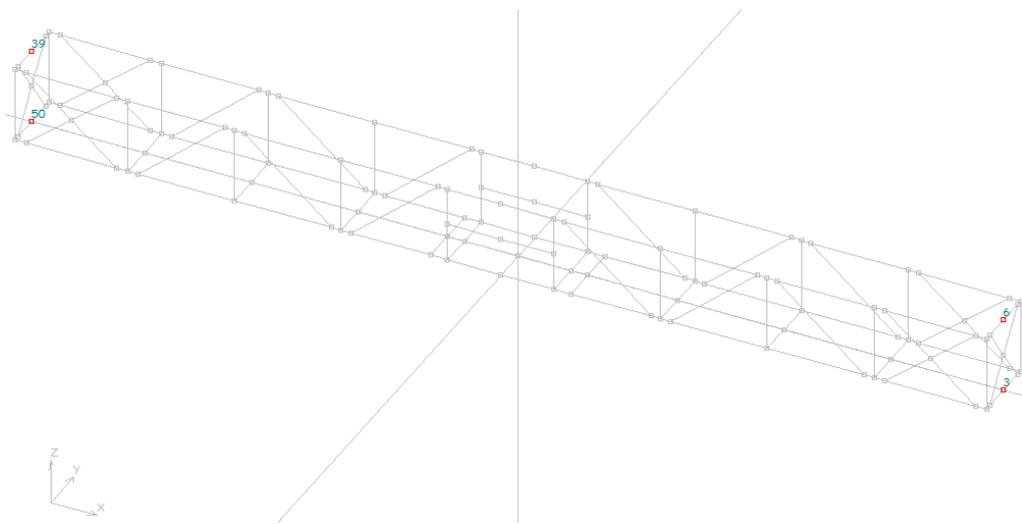
| Beam No. | $\sigma_{\text{eff}}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | x-pos [mm] | y-pos [mm] | z-pos [mm] |
|----------|--|------------|------------|------------|
| 8        | 194  | 246,5      | -36,85     | -36,85     |
| 155      | 194  | 246,5      | 36,85      | -36,85     |
| 71       | 193  | 246,5      | 36,85      | -36,85     |
| 113      | 193  | 246,5      | -36,85     | -36,85     |

**Tabela 3.4.2 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira**

Verifica-se que as tensões atuantes nas vigas mais solicitadas não ultrapassam 194 MPa, enquanto a tensão admissível é de 345 MPa. Portanto, o resultado dessa análise foi considerado satisfatório.

### 3.4.2. Análise das Deformações

Na análise de deformações para o caso do içamento pela bolsa de empilhadeira, é possível notar que os nós que mais se deslocaram se encontram nas extremidades do *container*.



**Figura 3.4.3 - Identificação dos nós que sofreram maior deslocamento em relação ao eixo Z**

A tabela abaixo exhibe os nós que estão sofrendo maior deslocamento no eixo Z. O nó que sofreu maior deslocamento foi o 3, que possui coordenadas (7.111,5; 0; 0) e deslocou-se -13,309 mm no eixo Z. Para o cálculo da deformação local da viga no içamento pela bolsa de empilhadeira, utilizou-se o nó 9, que possui coordenadas (1.026,5; 0; 0). Assim, o deslocamento relativo entre os dois nós, informado pelo programa, é de:

$$D = 13,309 - 0,263$$

$$D = 13,046 \text{ mm}$$

| Node No. | $\delta_x$ [mm] | $\delta_y$ [mm] | $\delta_z$ [mm] |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3        | -0,56213        | 0               | -13,309         |
| 50       | 0,56213         | 0               | -13,309         |
| 6        | 1,1404          | 0               | -13,188         |
| 39       | -1,1404         | 0               | -13,188         |

**Tabela 3.4.3 - Deslocamentos críticos no Içamento pela Bolsa de Empilhadeira**

Para o estudo de caso, o cálculo da deformação relativa máxima permitida será feito utilizando  $L = 7.111,5 - 1.026,5 = 6.085$  mm, que é a distância entre os nós estudados. Assim:

$$\varepsilon = \frac{L}{300}$$

$$\varepsilon = \frac{6.085}{300} = 20,28 \text{ mm}$$

Comparando-se os valores obtidos  $D = 13,046$  mm e  $\varepsilon = 20,28$  mm é possível perceber que a deformação relativa local, que ocorrerá durante a operação de içamento pela bolsa de empilhadeira, não provocará deformações permanentes no equipamento e, portanto, a análise foi considerada satisfatória. Com isso, foi gerada a tabela abaixo que sumariza as respostas para essa análise.

| <b>Bolsa de Empilhadeira</b>              |         |            |
|---|---------|------------|
|   | Atuante | Admissível |
| Tensão máxima (MPa)                       | 194     | 345        |
| Deformação relativa máxima no eixo z (mm) | 13,05   | 20,28      |

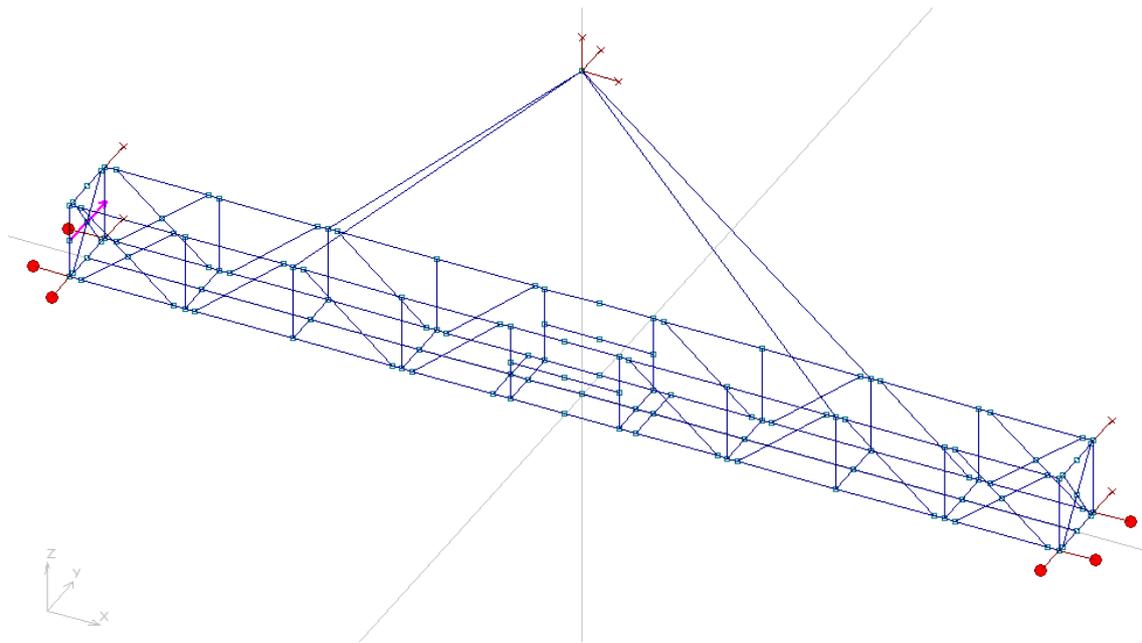
**Tabela 3.4.4 - Resultado das simulações do Içamento pela Bolsa de Empilhadeira**

### 3.5. Cargas Dinâmicas de Impacto na Coluna

#### 3.5.1. Análise das Tensões

Após as análises preliminares, que contemplam: análise de tensão e deformação no içamento por 4 pontos, análise de tensão no içamento por 2 pontos e análise de tensão e deformação no içamento pela bolsa de empilhadeira, foi feita uma análise de atuação de cargas concentradas em locais previamente definidos da estrutura, devido a possíveis esforços provenientes do choque de um *container* no outro.

Mais uma vez, as condições de contorno para essa situação serão diferente, de forma a simular a condição real. A diferença entre as condições de contorno utilizadas nessa análise e na análise de içamento por 4 pontos ocorre porque considera-se o *container* estando alinhado com outro atrás, não permitindo a translação deste no eixo Y. O coeficiente de 0,25 é utilizado para calcular a força que será aplicada na coluna vertical “*Corner Post*” e nos tubos que compõe o *frame* inferior.



**Figura 3.5.1 - Representação da força atuante no *Corner Post* e das condições de contorno necessárias para análise**

A carga considerada, proveniente de um impacto, deverá ser um *input* no *software*. Essa carga pode ser calculada da seguinte forma:

$$F = 0,25 * R * g \quad (9)$$

Dado que  $R = 16.203 \text{ Kg}$  para o caso analisado, temos que:

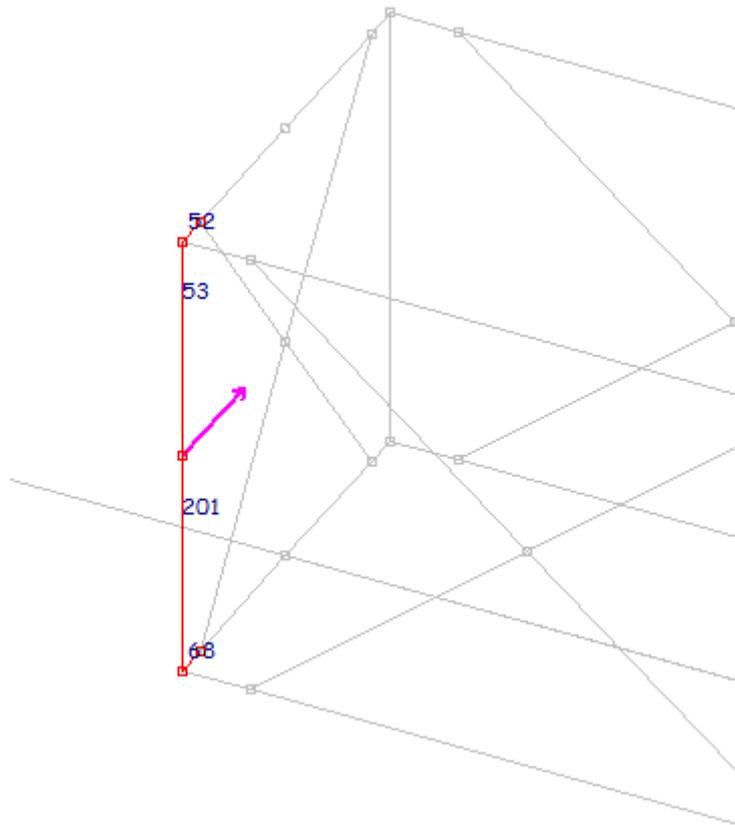
$$F = 0,25 * R * g = 0,25 * 16.203 * 9,81$$

$$F = 39.737,86 \text{ N}$$

Na tabela abaixo, pode-se verificar as informações das quatro vigas mais solicitadas. Na segunda coluna da tabela 3.5.1 estão os resultados das tensões atuantes sobre as vigas. A terceira coluna indica a posição das vigas no modelo e a quarta e quinta colunas indicam a posição do centro geométrico da seção transversal da viga. As vigas 53 e 201 são as mais solicitadas e estão submetidas a uma tensão equivalente de 153 MPa.

| Beam No. | $\sigma_{\text{eff}}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | x-pos<br>[mm] | y-pos<br>[mm] | z-pos<br>[mm] |
|----------|---|---------------|---------------|---------------|
| 53       | 153   | 558           | -36,85        | -36,85        |
| 201      | 153   | 0             | -36,85        | -36,85        |
| 52       | 115   | 0             | -36,85        | -36,85        |
| 68       | 103   | 0             | 36,85         | 36,85         |

**Tabela 3.5.1 - Tensões atuantes nas vigas mais solicitadas devido à atuação da força no *Corner Post***



**Figura 3.5.2 - Representação das vigas mais solicitadas devido à atuação da força no *Corner Post***

### 3.5.2. Análise das Deformações

No caso da análise das deformações na coluna da estrutura devido à atuação de uma força aplicada no nó intermediário desta coluna, a deformação máxima atuante deverá acontecer na própria coluna.

A tabela abaixo exhibe os nós que estão sofrendo maior deslocamento no eixo Y.

| Node No. | $\delta_x$ [mm] | $\delta_y$ [mm] | $\delta_z$ [mm] |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 125      | 0,26005         | 1,4781          | -0,63135        |
| 39       | 0,41552         | 0,063374        | -0,64957        |
| 41       | 0,055478        | 0,05171         | -0,61293        |

**Tabela 3.5.2 - Deslocamentos críticos devido à atuação da força no *Corner Post***

O nó que sofreu maior deslocamento foi o 125, que possui coordenadas (-7.111,5; -497; 558) e deslocou-se 1,4781 mm no eixo Y. Para o cálculo da deformação global da viga devido à ação dessa força localizada, utilizou-se o nó 41, que possui coordenadas (-7111,5; -497; 0). Assim, o deslocamento relativo entre os dois nós, informado pelo programa, é de:

$$D = 1,4781 - 0,05171$$

$$D = 1,4264 \text{ mm}$$

Para o estudo de caso, o cálculo da deformação relativa máxima permitida será feito utilizando  $L = 1.116$  mm, que é o comprimento da viga. Assim:

$$\varepsilon = \frac{L}{300}$$

$$\varepsilon = \frac{1.116}{300} = 3,72 \text{ mm}$$

Comparando-se os valores obtidos  $D = 1,43 \text{ mm}$  e  $\varepsilon = 3,72 \text{ mm}$  é possível perceber que a deformação relativa global, que ocorrerá durante a aplicação desta carga, não provocará deformações permanentes no equipamento e, portanto, a análise foi considerada satisfatória. Com isso, foi gerada a tabela abaixo que sumariza as respostas para essa análise.

| COLUNA                                    |         |            |
|---|---------|------------|
|   | Atuante | Admissível |
| Tensão máxima (MPa)                       | 153     | 345        |
| Deformação relativa máxima no eixo y (mm) | 1,43    | 3,72       |

**Tabela 3.5.3 - Resultado das simulações da atuação da força no *Corner Post***

Depois de realizar todas as análises previstas por norma, é possível concluir que o modelo selecionado para o estudo de caso foi bem dimensionado e todas as tensões e deformações atuantes possuem valores abaixo da admissível.

### 3.6. Análise do Olhal

As dimensões do olhal devem atender aos requisitos de forças atuantes e da tensão de cisalhamento devido à operação de içamento. Além disso, o olhal dimensionado deve ser compatível com a manilha certificada que será utilizada.



**Figura 3.6.1 - Olhal**

O olhal é uma das partes mais críticas do *container offshore* e por isso é necessário que seja dimensionado criteriosamente. Os olhais devem ser projetados para suportarem a uma carga vertical total igual a:

$$Fp = 3 * R * g \quad (10)$$

$$Fp = 3 * 16.203 * 9,81 = 476.854,29 \text{ N}$$

A força  $Fp$  deve ser considerada igualmente distribuída entre  $(n-1)$  olhais, onde  $n$  é o número real de olhais. Por norma, para considerações de cálculo, o número de olhais não pode ser maior que quatro e nem menor que dois.

Para calcular a força resultante da eslinga no olhal, é importante considerar a angulação que a mesma possui com a vertical. Normalmente, as empresas utilizam  $30^\circ$  ou  $45^\circ$ . No estudo de caso em questão foi utilizado  $\alpha = 45^\circ$ . Assim, a força resultante em cada olhal, que possui direção coincidente com a eslinga, será dada por:

$$RSL = \frac{3 * R * g}{(n - 1) * \cos \alpha} \quad (11)$$

$$RSL = \frac{3 * R * g}{(4 - 1) * \cos 45} = \frac{3 * 16.203 * 9,81}{3 * \cos 45} = 224.791,27 \text{ N}$$

A força resultante é decomposta em duas: uma com a vertical e uma com a horizontal. Como o ângulo entre a eslinga e a vertical é  $\alpha = 45^\circ$  no estudo de caso, o resultado da decomposição será:

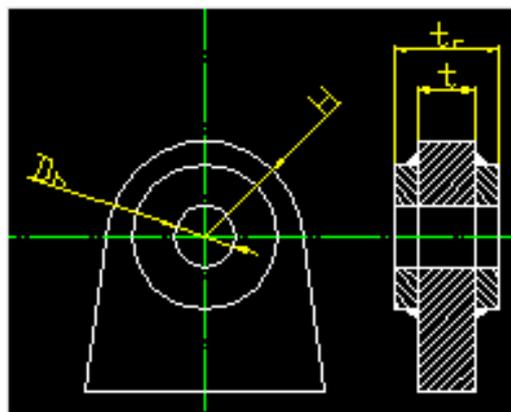
$$Fh = RSL * \sin 45 \quad (12)$$

$$Fv = RSL * \cos 45 \quad (13)$$

$$Fh = Fv = 224.791,27 * \cos 45 = 158.951,4 \text{ N}$$

Para o estudo de caso, percebe-se que a força que cada olhal é projetado para suportar é de  $Fh = \frac{R * g * \sin \alpha}{\cos \alpha}$  e  $Fv = \frac{R * g * \cos \alpha}{\cos \alpha}$  ou seja, cada olhal é capaz de suportar  $Fh = Fv = R * g$ , que é o *Rating* do equipamento multiplicado pela gravidade tanto na vertical, como na horizontal.

O projeto de olhal mais comum no mercado é similar ao do desenho abaixo. O olhal é uma chapa espessa com um furo no centro. Os *inputs* que devem ser dados ao sistema saber se o olhal suporta aos esforços atuantes, são: diâmetro do furo ( $D_h$ ), raio externo ( $H$ ), espessura do olhal ( $t$ ), espessura do olhal + chapa de reforço ( $t_c$ ) e tensão de escoamento do material ( $Re$ ).



**Figura 3.6.2 - Olhal e suas principais dimensões**

As dimensões do olhal do estudo de caso são:

$$D_h = 37 \text{ mm};$$

$$H = 60 \text{ mm};$$

$$t = 25 \text{ mm};$$

$$t_c = 41 \text{ mm};$$

$$R_e = 345 \text{ N/mm}^2.$$

Faz-se necessário avaliar se a tensão de cisalhamento atuante é aceitável. Para que o resultado seja satisfatório, o valor encontrado deve ser menor que o valor da tensão de escoamento do material. Lembrando que RSL é o valor da força atuante em cada olhal e foi calculada acima.

$$Re \geq \frac{3 * RSL}{(2 * H * t) - (D_h * t)} \quad (14)$$

$$Re \geq \frac{3 * 224.791,27}{(2 * 60 * 25) - (37 * 25)} = 325 \text{ MPa}$$

O resultado acima se mostra satisfatório uma vez que a tensão de escoamento do aço A 572 Gr. 50 é de 345 MPa.

### 3.7. Seleção da Manilha

Até o momento, o presente trabalho consistiu em verificar se as especificações do projeto do *container* estão compatíveis com os requisitos estabelecidos pela norma. Para a manilha e a eslinga, a equipe de certificação que deverá determinar quais as especificações que esses componentes precisam ter para poderem ser utilizados no *container* estudado. Dessa maneira, neste item, será selecionada uma manilha que seja adequada às condições existentes.

A diferença entre os diâmetros do olhal e da manilha não deve ser superior a 6%. Essa condição é imposta para evitar que o ponto de contato entre eles crie uma área de concentração de tensões e exponha o *container offshore* a risco.

$$D_{min} = 0,94 * D_h \quad (15)$$

$$D_{min} = 0,94 * 37 = 34,78 \text{ mm}$$

A outra condição diz respeito à largura interna que o pino da manilha deverá ter, para permitir o encaixe da manilha no olhal.

$$W_{max} = \frac{tc}{0,75} \quad (16)$$

$$W_{max} = \frac{41}{0,75} = 54,67 \text{ mm}$$

Depois de calcular os critérios que a manilha deve seguir, faz-se necessário selecionar a que for mais apropriada.

Para permitir a amplificação dinâmica que é experimentada em içamento *offshore* em condições de tempo e estado de mar adversos, o limite mínimo de carga de trabalho,  $WLL_{min}$ , deve ser considerado para o conjunto de içamento e cada um de seus componentes, conforme a tabela presente no Anexo I. Nesta tabela, a capacidade de um *container* é multiplicada pelo fator da carga de trabalho. Este fator de segurança reflete as cargas dinâmicas adicionais em içamento *offshore*. O fator de segurança é maior para *containers* leves porque esses *containers* estão sujeitos às amplificações dinâmicas mais severas. Considerando-se o Rating escolhido no estudo de caso de 16.203 Kg pode-se achar o limite mínimo de carga de trabalho,  $WLL_{min}$ , que vale 20,47 toneladas.

Para calcular o limite mínimo de carga de trabalho que cada manilha suporta, utiliza-se tabela 8.2 da norma DNV 2.7-1, presente abaixo:

| Requires Minimum Shackle WLLs       |                                     |                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 4 legged sling                      | 2 legged sling                      | Single leg sling |
| $\frac{WLL_{min}}{3 * \cos \alpha}$ | $\frac{WLL_{min}}{2 * \cos \alpha}$ | $WLL_{min}$      |

**Tabela 3.7.1 - Representação do limite mínimo de carga de trabalho para Manilha**

Como o içamento em condições de trabalho normais será feito por 4 pontos, utiliza-se a fórmula abaixo:

$$WLL_{manilha} = \frac{WLL_{min}}{3 * \cos \alpha} \quad (17)$$

$$WLL_{manilha} = \frac{20,47}{3 * \cos 45} = 9,65 \text{ toneladas}$$

A seguir, deve-se comparar este valor com o valor do WLL das manilhas já certificadas no mercado para poder identificar qual é a manilha adequada a ser utilizada no *container*. A tabela abaixo lista as manilhas certificadas, contendo suas especificações.

| Nominal WLL<br>(tonnes) | Pin diameter<br>(mm) | Inside width<br>at pin (mm) | Inside length<br>of Dee<br>shackles | Inside length of<br>Bow shackles (mm) |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 3,25                    | 19                   | 27                          | 47                                  | 57                                    |
| 4,75                    | 22                   | 31                          | 52                                  | 65                                    |
| 6,5                     | 25                   | 36                          | 65                                  | 76                                    |
| 8,5                     | 28                   | 43                          | 74                                  | 88                                    |
| 9,5                     | 32                   | 46,5                        | 83                                  | 101                                   |
| 12                      | 35                   | 51,5                        | 87                                  | 108                                   |
| 13,5                    | 38                   | 57                          | 104                                 | 126                                   |
| 17                      | 42                   | 60                          | 115                                 | 139                                   |
| 25                      | 50                   | 74                          | 139                                 | 168                                   |

**Tabela 3.7.2 - Lista das manilhas certificadas e suas especificações**

Como o limite mínimo de carga de trabalho que cada manilha deve suportar para o estudo de caso é 9,65 toneladas, a manilha mais adequada para ser utilizada nesse caso é a que suporta 12 toneladas. As especificações desta manilha são as seguintes:

Diâmetro do pino = 35 mm;

Largura interna do pino = 51,5 mm.

Como calculado anteriormente, o diâmetro mínimo deve ser de 34,78 mm e a largura máxima do pino da manilha deve ser de 54,67. Verifica-se que a manilha selecionada segue as condições estabelecidas.

### **3.8. Seleção da Eslinga**

Neste item, será selecionada a eslinga mais adequada para ser utilizada no içamento do *container* estudado. Primeiramente, serão calculadas suas condições mínimas e, em seguida, será selecionada, dentre as eslingas já certificadas, aquela mais apropriada.

Existem diversos tipos de eslingas certificadas que podem ser utilizadas para o içamento do *container offshore*. Podem ser feitas por cabos de aço ou por correntes, dependendo da disponibilidade do mercado.

Assim como feito para o dimensionamento da manilha, é utilizada a tabela localizada no Anexo I para determinar o limite mínimo de carga de trabalho WLL<sub>min</sub>

para a eslinga. Considerando-se o Rating escolhido no estudo de caso de 16.203 Kg pode-se achar o limite mínimo de carga de trabalho, WLLmin, que vale 20,47 toneladas.

Na tabela localizada no Anexo II, é possível determinar a dimensão nominal da eslinga dando como *input* o ângulo  $\alpha = 45^\circ$  entre a eslinga e a vertical e o limite mínimo de carga de trabalho que foi achado anteriormente. Verifica-se que o diâmetro da corrente deverá ser de 18 mm. Foi selecionada a eslinga de corrente tipo *standard*, pois atende às especificações de WLLmin e diâmetro.

Esta foi a última análise da etapa de projeto. Sendo assim, caso o *container* certificado esteja em conformidade com a norma DNV 2.7-1, os desenhos são aprovados e o cliente estará apto a fabricar *containers offshore* de acordo com o projeto em questão. Nessa fase, a DNV emite o DVR (*Design Verification Report*), documento que atesta a aprovação do projeto e especifica o conjunto de içamento que deverá ser utilizado. O *container* tratado no estudo de caso atendeu a todas as exigências.

#### 4. Análise Seção Transversal x Material x Custos

Neste capítulo, serão realizadas análises de tensões, utilizando as mesmas especificações de formato do *container* utilizado no estudo de caso, mas variando as seções transversais do equipamento e o tipo de aço utilizado. O objetivo do capítulo é realizar uma comparação de cada caso, considerando seus custos de adoção, possibilitando concluir acerca do custo-benefício dos tipos de aço e seções transversais possíveis.

Abaixo segue uma tabela com os aços mais utilizados no mercado de *container offshore* e seus respectivos limites de escoamento.

| AÇOS              |          | LIMITE DE ESCOAMENTO |
|-------------------|----------|----------------------|
| ASTM A 36/A 36M   |          | 250 MPa              |
| ASTM A 572/A 572M | GRADE 42 | 290 MPa              |
|                   | GRADE 50 | 345 MPa              |
|                   | GRADE 55 | 380 MPa              |
|                   | GRADE 60 | 415 MPa              |
|                   | GRADE 65 | 450 MPa              |
| ASTM A 500        | GRADE B  | 290 MPa              |
| ASTM A 500        | GRADE C  | 317 MPa              |
| ASTM A 131        |          | 315 MPa              |
| ASTM A 283        | GRADE A  | 165 MPa              |
|                   | GRADE B  | 185 Mpa              |
|                   | GRADE C  | 205 Mpa              |
|                   | GRADE D  | 230 Mpa              |
| NBR 8261          | GRADE A  | 269 Mpa              |

**Tabela 3.8.1 - Aços mais utilizados em *Container Offshore***

A análise do estudo de caso foi feita com seção transversal quadrada 80 x 80 x 6,3 mm e aço ASTM A 572 Gr. 50, que possui limite de escoamento de 345 MPa e, como visto, sua escolha foi satisfatória e atendeu às expectativas. Porém, o custo do equipamento é outra grande preocupação do mercado, pois além de atender às expectativas de projeto, o projeto deve ser viável economicamente.

Pensando nesse dilema existente, foi realizada uma análise na qual são testados aços e seções transversais diferentes das vigas, analisando juntamente os valores e a disponibilidade de encontrá-los no mercado. Com base nessa análise, pode-se ter uma visão clara de qual seria a configuração ótima a ser utilizada e fazer uma análise crítica da utilizada no estudo de caso.

Como resultado inicial, pode-se constatar que, utilizando a seção transversal 80 x 80 x 6,3 mm, nenhum aço presente na tabela acima com limite de escoamento inferior a 345 MPa resistiu ao critério de tensões pelo método de Von Mises no içamento por 2 pontos, pois a tensão atuante máxima no estudo de caso foi 406 MPa e o valor mais próximo da tensão admissível encontrado foi  $1,2 * 317 = 380,4$  MPa . Uma vez que a tensão admissível é inferior à tensão atuante máxima, esse tipo de aço e todos aqueles que possuam limite de escoamento inferior não atendem ao critério.

Utilizando a seção transversal 100 x 100 x 6,3 mm, pode constatar que o limite de escoamento mínimo necessário para as vigas modeladas para que o *container* seja aceito de acordo com as especificações é de 210 MPa (abaixo desse valor, o *container* falhará no teste de içamento por 2 pontos). Assim, olhando novamente a tabela, pode-se excluir os aços ASTM A 283 Grau A, Grau B e Grau C, pois possuem limite de escoamento menor que o requerido. Porém, a utilização da seção transversal 100 x 100 x 6,3 mm acarretará em um aumento aproximado de 570 Kg da estrutura. Considerando-se que 1 Kg de aço custe R\$3,00, o aumento do custo não justifica a necessidade de utilização desta seção pela utilizada anteriormente.

Fazendo a análise para a seção transversal 60 x 60 x 6,3 mm podemos perceber que o limite de escoamento necessário para resistir às tensões atuantes aumentará bastante em relação às outras seções transversais já calculadas. Podemos perceber que a tensão máxima atuante no içamento por 2 pontos atinge o valor de 746 MPa, exigindo que o limite de escoamento do aço seja em torno de 622 MPa. Porém, terei que descartar essa seção para o projeto em questão pois, como mencionado na norma, materiais com limite de escoamento alto, acima de 500 MPa, não deverão ser utilizados. Essa restrição acontece porque esse tipo de material possui menor fase plástica, ficando mais sujeito à fadiga.

Com isso, pode-se perceber que a seção 80 x 80 x 6,3 mm, utilizada no estudo de caso, de fato obteve os melhores resultados na questão custo-benefício. Portanto, a decisão de escolha dessa seção foi acertada.

## **5. Análise da Fabricação**

A fabricação das unidades deverá ser feita conforme os desenhos, especificações e procedimentos aprovados na etapa de projeto. Como a sociedade classificadora não acompanhará 100% da fabricação, é exigido que o fabricante adote procedimentos de qualidade e possua instalações que satisfaçam um Sistema de Gestão de Qualidade similar ao ISO 9001.

Algumas considerações devem ser realizadas para que a fabricação do projeto esteja de acordo com o recomendado pela norma. Todas as conexões entre partes da estrutura e entre os olhais e a estrutura devem permitir boa continuidade. Com isso, as vigas de diferentes seções transversais devem estar o mais alinhadas possível para minimizar a concentração de tensão nessas áreas. Como especificado no item 4.3.1 da norma, todas as soldas entre as estruturas primárias devem ser feita por penetração total, garantindo melhor comportamento mecânico da estrutura.

Os processos mais importantes na fabricação de *containers offshore* são:

- Soldagem adequada, fato que será comprovado na realização dos ensaios não destrutivos. Esses ensaios são realizados nas juntas soldadas e visam garantir a qualidade da solda e, portanto, da estrutura;
- Realização de ensaios mecânicos destrutivos nos corpos de prova para garantir que as propriedades descritas do material utilizado são verídicas e atendem aos requisitos de projeto.

### **5.1. Processo de Soldagem**

O processo de soldagem tem recebido nos últimos anos grande interesse devido a sua versatilidade, sendo considerada atualmente um método muito utilizado na união de metais para a construção de peças e estruturas.

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado atualmente na indústria. Este método tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios ou estruturas compostas por centenas de toneladas, tendo sua aplicação desde estruturas simples até estruturas com elevado grau de responsabilidade.

### 5.1.1. Definições de Soldagem

Um número grande de diferentes processos na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo "Soldagem". Classicamente, a soldagem é considerada como um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com a soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos estas operações se assemelham às operações de soldagem. Na literatura, encontram-se algumas tentativas de definição de soldagem:

- "Processo de união de metais por fusão."

Porém, deve-se ressaltar que não apenas os metais são soldáveis e que é possível se soldar sem fusão.

- "Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas."

Nessa definição, o termo "continuidade" é utilizado com um significado similar ao adotado na matemática. Isto é, considera-se que, embora as propriedades possam variar ao longo de uma junta soldada, esta variação não apresenta quebras abruptas como ocorre, por exemplo, em uma junta colada na qual a resistência mecânica muda abruptamente entre um componente da junta e a cola.

- "Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição."

Esta definição, adotada pela Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society - AWS*) é meramente operacional, não contribuindo com o aspecto conceitual.

- "Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos."

Esta última definição engloba também a brasagem, que pode ser considerada, neste contexto, como um processo de soldagem.

### 5.1.2. Histórico da Soldagem

Embora a soldagem, na sua forma atual, seja um processo recente, com cerca de 100 anos, a brasagem e a soldagem por forjamento têm sido utilizadas desde épocas remotas.

A soldagem foi usada, na Antiguidade e na Idade Média, para a fabricação de armas e outros instrumentos cortantes. Como o ferro obtido por redução direta<sup>7</sup> tem um teor de carbono muito baixo (inferior a 0,1%), este não pode ser endurecido por têmpera. Por outro lado, o aço, com um teor maior de carbono, era um material escasso e de alto custo, sendo fabricado pela cementação de tiras finas de ferro. Assim, ferramentas eram fabricadas com ferro e com tiras de aço soldadas nos locais de corte e endurecidas por têmpera.

Assim, a soldagem foi, durante este período, um processo importante na tecnologia metalúrgica, principalmente, devido a dois fatores: a escassez e o alto custo do aço e o tamanho reduzido dos blocos de ferro obtidos por redução direta.

Esta importância começou a diminuir, nos séculos XII e XIII, com o desenvolvimento de tecnologia para a obtenção, no estado líquido, de grandes quantidades de ferro fundido com a utilização da energia gerada em rodas d'água e, nos séculos XIV e XV, com o desenvolvimento do alto-forno. Com isso, a fundição tornou-se um processo importante de fabricação, enquanto a soldagem por forjamento foi substituída por outros processos de união, particularmente a rebitagem e parafusagem, mais adequados para união das peças produzidas.

A soldagem permaneceu como um processo secundário de fabricação até o século XIX, quando a sua tecnologia começou a mudar radicalmente, principalmente, a partir das experiências de Sir Humphrey Davy (1801-1806) com o arco elétrico, da descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica que possibilitaram o aparecimento dos processos de soldagem por fusão. Ao mesmo tempo, o início da fabricação e utilização do aço na forma de chapas tornou necessário o desenvolvimento de novos processos de união para a fabricação de equipamentos e estruturas.

Por volta de 1890, N. G. Slavianoff, na Rússia, e Charles Choffin, nos Estados Unidos, desenvolveram independentemente a soldagem a arco com eletrodo metálico

---

<sup>7</sup>Redução Direta: Neste processo, o minério de ferro era misturado com carvão em brasa e soprado com ar. Durante esta operação, o óxido de ferro era reduzido pelo carbono, produzindo-se ferro metálico sem a fusão do material.

nu. Até o final do século XIX, os processos de soldagem por resistência, por aluminotermia e a gás foram desenvolvidos. Em 1907, Oscar Kjellberf (Suécia) patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. Em sua forma original, este revestimento era constituído de uma camada de cal, cuja função era unicamente estabilizar o arco. Desenvolvimentos posteriores tornaram este processo o mais utilizado no mundo.

Nesta nova fase, a soldagem teve inicialmente pouca utilização, estando restrita principalmente à execução de reparos de emergência até a eclosão da Primeira Guerra Mundial, quando a soldagem passou a ser utilizada mais intensamente como processo de fabricação.

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para união permanente de metais. Esta importância é ainda mais evidenciada pela presença de processos de soldagem e afins nas mais diferentes atividades industriais e pela influência que a necessidade de uma boa soldabilidade tem no desenvolvimento de novos tipos de aços e outras ligas metálicas.

## **5.2. Ensaios não Destrutivos**

Um dos avanços tecnológicos mais importantes na engenharia pode ser atribuído aos ensaios não destrutivos. Esses ensaios investigam a sanidade dos materiais sem, contudo, destruí-los ou introduzir quaisquer alterações nas suas características. Aplicados na inspeção de matéria prima, no controle de processos de fabricação e inspeção final, os ensaios não destrutivos constituem ferramentas indispensáveis para o controle da qualidade dos produtos produzidos pela indústria moderna.

Assim, é necessária a realização de ensaios não destrutivos em corpos de prova soldados para atestar que a qualidade do material está de acordo com o especificado e que a estrutura do *container offshore* irá resistir aos esforços a que for submetida.

Os ensaios não destrutivos são largamente utilizados na indústria moderna para avaliação da qualidade e detecção de variações na estrutura, pequenas falhas superficiais, presença de trincas e outras interrupções físicas, medida de espessura de materiais e revestimentos e determinação de outras características de materiais e produtos industriais. As diversas técnicas e métodos de inspeção não destrutiva, utilizados em *container offshore*, serão vistos mais detalhadamente a seguir.

Qualquer ensaio não destrutivo envolve cinco elementos básicos:

- a) Uma fonte que fornece e distribui de forma adequada um meio de inspeção ao objeto em teste;
- b) Uma modificação do meio de inspeção ou sua distribuição no objeto ensaiado como resultado da presença de descontinuidades ou de variações da propriedade de interesse;
- c) Um detector sensível a essas modificações ou variação de distribuição do meio de inspeção;
- d) Uma indicação ou registro das indicações do detector de forma útil para interpretação;
- e) Um observador ou dispositivo capaz de interpretar as indicações ou registro em termos da propriedade de interesse ou da presença e localização de descontinuidades.

Abaixo, segue uma tabela retirada do item 5.2.3 da DNV 2.7-1 que especifica qual ensaio não destrutivo deve ser feito em qual categoria de estrutura do *container* e a necessidade da inspeção. Nas células escritas *SPOT* fica a cargo do vistoriador de escolher randomicamente as peças a serem ensaiadas.

| <b>Categoria</b>   | <b>Visual</b> | <b>Partícula Magnética(1)</b> | <b>Ultrassom</b>                    | <b>Radiografia</b> |
|--|---------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Estrutura primária: essencial e não redundante   | 100%          | 100%                          | 100% olhais e 20% outras estruturas | 10%                |
| Estrutura primária: não essencial  | 100%          | 20%                           | 20%                                 | 10%                |
| Estrutura secundária   | 100%          | SPOT(2)                       | SPOT(2)                             | SPOT(2)            |
| (1) Ensaio por líquido penetrante deverá ser utilizado quando o ensaio por partícula magnética não for possível. |               |                               |                                     |                    |
| (2) Fica a cargo do vistoriador de escolher randomicamente as peças a serem ensaiadas.                           |               |                               |                                     |                    |

**Tabela 5.2.1 - Aplicação dos ensaios não destrutivos**

A seguir, serão apresentados os ensaios não destrutivos que são realizados no processo de fabricação nas soldas da estrutura do *container offshore*, explicando suas principais características, limitações e o procedimento de ensaio.

### **5.2.1. Ensaio Visual**

O ensaio visual foi o primeiro método de ensaios não destrutivos aplicado pelo homem. Por este motivo, pode-se imaginar que seja o ensaio mais simples de todos,

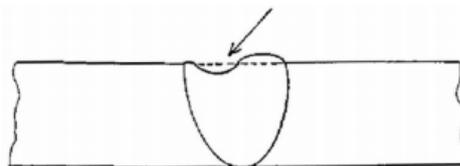
entretanto, esse ensaio ainda é fundamental. O ensaio visual é simples de ser aplicado, fácil de ser aprendido e, quando sua aplicação é bem projetada, ele é um dos mais econômicos. É importante ter em mente que um método de ensaio não destrutivo não é concorrente de outro, logo, o ensaio visual tem uma enorme área de aplicação. Esse ensaio é necessário, mas não suficiente, como qualquer outro método.

O cuidadoso exame visual fornece informação referente à necessidade de prosseguimento dos ensaios não destrutivos por outros métodos. De fato, examinando-se um objeto superficialmente e constatando-se a inexistência de defeitos superficiais, o objeto pode ser conduzido para outro tipo de inspeção. Porém, uma boa aparência, bom grau de acabamento e inexistência de defeitos na superfície não é conclusivo sobre o bom estado do mesmo, no que diz respeito ao seu interior. Ao se inspecionar uma peça metálica pelo método visual e nela se constatando a presença de uma trinca ou furo, a mesma pode ser recusada e nenhum outro ensaio não destrutivo deve ser mais utilizado. Com isso, pode-se dizer que em geral é um método para determinar a aceitabilidade dos componentes fabricados por usinagem, soldagem, ou qualquer outro processo produtivo que apresente como requisito um grau de qualidade, por menor que seja.

Os objetivos do ensaio são: garantir a preparação adequada da junta e a ajustagem das dimensões em conformidade com o projeto, fazer o acompanhamento durante a soldagem para corrigir possíveis erros, detectar discontinuidades inaceitáveis, conferir a precisão dimensional das soldas e garantir a conformidade das soldas com as especificações. A discontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas, porém, não é necessariamente um defeito. A discontinuidade só deve ser considerada defeito quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornara peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável.

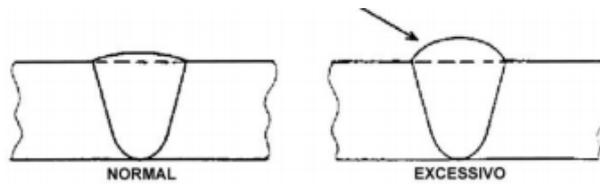
As discontinuidades inaceitáveis mais comuns são:

- Falta de deposição: Insuficiência de metal da face da solda



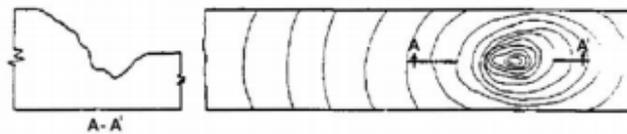
**Figura 5.2.1 - Deposição insuficiente de solda**

- Reforço excessivo: Excesso de metal da zona fundida, localizada na face da solda.



**Figura 5.2.2 - Reforço excessivo**

- Trincas: Descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material. São consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem, pois favorecem a concentração de tensões e o início de fratura frágil na estrutura soldada. As trincas podem ser de vários tipos diferentes.
- Rechupes de cratera: Falta de metal resultante da contração da zona fundida, localizada na cratera do cordão de solda.



**Figura 5.2.3 - Rechupe de cratera**

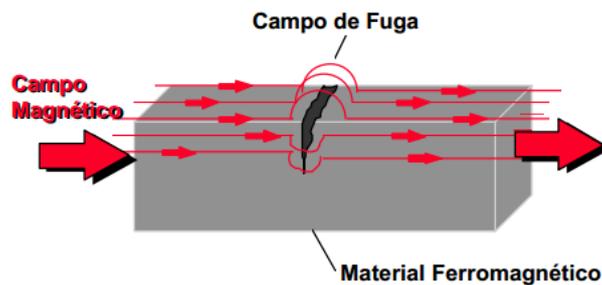
O ensaio visual, como dito anteriormente, é o ensaio não destrutivo que possui o menor custo operacional, pois os equipamentos utilizados são simples e baratos. A inspeção visual deve ser feita em três etapas: verificação antes, durante e após o processo de soldagem.

## 5.2.2. Ensaio por Partícula Magnética

Segundo ANDREUCCI (2007), o ensaio por partículas magnéticas é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. Pode ser aplicado tanto em peças acabadas quanto semiacabadas e durante as etapas de fabricação. O processo consiste em submeter a peça, ou parte desta, a um campo magnético. Campo magnético é uma região do espaço que foi modificada pela presença de um ímã. Sobre a superfície a ser inspecionada, é colocada limalha<sup>8</sup> de material ferromagnético.

<sup>8</sup>Limalha: Pó de metal limado.

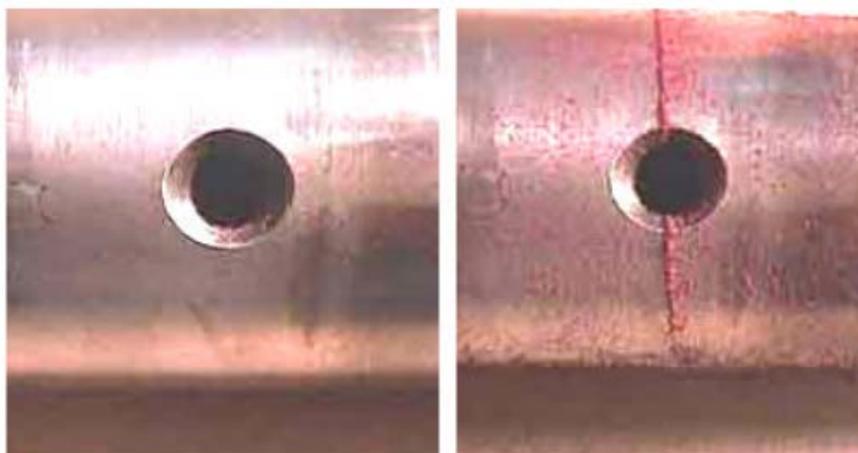
Na região magnetizada da peça, as discontinuidades existentes, ou seja, a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material causa um campo de fuga do fluxo magnético. Com a aplicação das partículas ferromagnéticas, ocorre a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que são atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da discontinuidade. A figura abaixo demonstra como as linhas de força são perturbadas pela presença de uma discontinuidade, dando origem ao campo de fuga.



**Figura 5.2.4 - Representação da trinca superficial e a formação do campo de fuga**

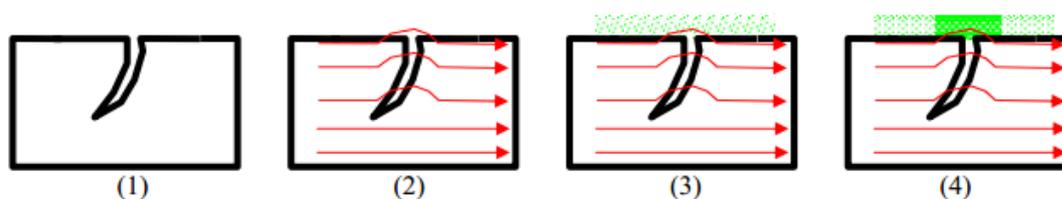
Verifica-se na prática que, para ocorrer um campo de fuga adequado na região das discontinuidades, a intensidade de campo deve atingir valores adequados e o campo magnético deve ser o mais perpendicular possível ao plano da descontinuidade, caso contrário não será possível o acúmulo das partículas de forma nítida.

Outro aspecto interessante que pode ser observado é que o campo de fuga somente ocorre quando existe uma diferença na continuidade das características magnéticas do material base inspecionado. Todas as descontinuidades a serem detectadas: trincas, falta de fusão, porosidade, inclusões, etc. possuem características magnéticas bem diferente do metal base, o que atribui ao ensaio grande sensibilidade de detecção. É importante ressaltar que não existe um tamanho mínimo de descontinuidade para que ocorra o campo de fuga, o que faz com que o método de ensaio por partículas magnéticas seja o mais eficiente dos métodos superficiais. Abaixo, pode-se observar na figura à direita a formação de um campo de fuga originado por descontinuidades no material.



**Figura 5.2.5 - Imagem do antes e depois do ensaio por partícula magnética**

As etapas de realização do ensaio são mostradas na figura 5.2.6 e descritas em seguida.



**Figura 5.2.6 - Etapas do processo de ensaio por partícula magnética**

1. Preparação inicial da peça: Consiste na limpeza da superfície de forma a permitir a interação das partículas com os campos de fuga, permitindo um bom contraste entre partículas e superfície. Podem ser usados meios químicos ou mecânicos, dependendo do estado da peça inicial;
2. Indução do campo magnético;
3. Aplicação das partículas magnéticas, secas ou em suspensão em líquido, de maneira uniforme ao longo da superfície e na quantidade correta. Pequena quantidade pode ser insuficiente para gerar as indicações e quantidade excessiva pode diminuir o contraste e a sensibilidade do ensaio;
4. Exame da superfície para identificação das possíveis indicações e interpretação dos resultados obtidos.

| <b>Vantagens</b>  | <b>Limitações</b>   |
|---|---|
| É capaz de detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais.                           | É aplicável apenas aos materiais ferromagnéticos.   |
| Não há necessidade das possíveis descontinuidades estarem necessariamente abertas à superfície. | A forma e a orientação das descontinuidades em relação ao campo magnético interferem fortemente no resultado do ensaio. |
| Preparação das peças para o ensaio é simples.   | Muitas vezes é necessária a desmagnetização da peça após a inspeção.  |
| O tamanho e a forma da peça inspecionada tem pouca ou nenhuma influência no resultado.          | Em geral são necessárias corrente elétricas elevadas, que podem causar aquecimento indesejado das partes examinadas.    |

**Tabela 5.2.2 - Vantagens e limitações do ensaio por Partícula Magnética**

### **5.2.3. Ensaio por Ultrassom**

O ensaio por ultrassom caracteriza-se por ser um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos e descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinado.

Segundo ANDREUCCI (2008), o ensaio não destrutivo por ultrassom, assim como todo ensaio não destrutivo visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade e o desperdício de peças utilizadas em ensaios destrutivos.

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica também reflete ao incidir numa descontinuidade ou falha interna de um meio considerado. Através de aparelhos especiais, é possível detectar as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.

Assim como todo ensaio não destrutivo, o ensaio ultrassônico possui vantagens e limitações nas aplicações. A maior vantagem em relação aos outros métodos não destrutivos é a alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas.

| <b>Vantagens</b>   | <b>Limitações</b>   |
|--|---|
| Possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas.   | Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor.               |
| Para interpretação das indicações, o ensaio por ultrassom dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção (Na radiografia existe a necessidade do processo de revelação). | Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método. |
| Não requer cuidados quanto a segurança.  | Requer o preparo da superfície para sua aplicação.                                    |
| Grandes espessuras não são uma limitação para o ensaio.  |   |
| Permite definir a profundidade e o tamanho da descontinuidade.   |   |

**Tabela 5.2.3 - Vantagens e limitações do ensaio por Ultrassom**

#### **5.2.4. Ensaio por Líquido Penetrante**

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material, tais como trincas, poros e dobras, podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito mal acabada.

Este método se iniciou antes da primeira guerra mundial, principalmente pela indústria ferroviária na inspeção de eixos, porém tomou impulso quando em 1942, nos EUA, foi desenvolvido o método de penetrantes fluorescentes. Nesta época, o ensaio foi adotado pelas indústrias aeronáuticas, que trabalhando com ligas não ferrosas, necessitavam um método de detecção de defeitos superficiais diferentes do ensaio por partículas magnéticas. A partir da segunda guerra mundial, o método foi se desenvolvendo, através da pesquisa e o aprimoramento de novos produtos utilizados no ensaio, até seu estágio atual.

O ensaio por líquidos penetrantes é muito usado em materiais não magnéticos como: alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio,

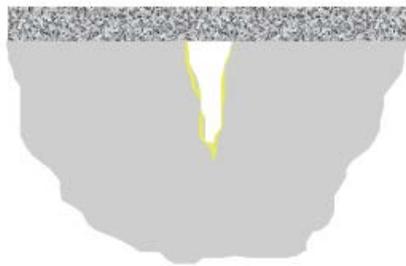
além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície.

Podemos descrever o método em seis etapas principais no ensaio, quais sejam:

a) Preparação da superfície - Limpeza Inicial:

Antes de se iniciar o ensaio, a superfície deve ser limpa e seca. Não deve existir água, óleo ou outro contaminante. Contaminantes, excesso de rugosidade ou ferrugem tornam o ensaio não confiável.



**Figura 5.2.7 - Penetração e limpeza inicial da superfície**

b) Aplicação do Penetrante:

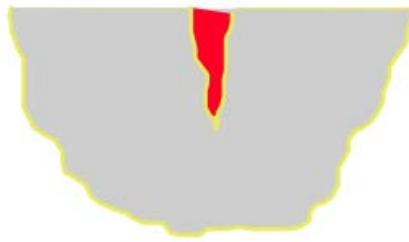
Consiste na aplicação de um líquido chamado penetrante, geralmente de cor vermelha, de tal maneira que forme um filme sobre a superfície e que por ação do fenômeno chamado capilaridade, penetre na descontinuidade. Deve ser dado um certo tempo para que a penetração se complete.



**Figura 5.2.8 - Tempo de penetração do líquido na descontinuidade**

c) Remoção do excesso de penetrante:

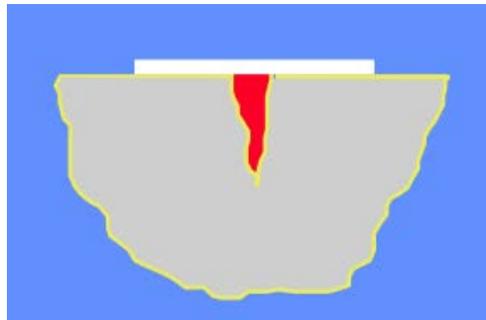
Consiste na remoção do excesso do penetrante da superfície, através de produtos adequados, condizentes com o tipo de líquido penetrante aplicado, devendo a superfície ficar isenta de qualquer resíduo na superfície.



**Figura 5.2.9 - Remoção do excesso de líquido da superfície**

d) Revelação

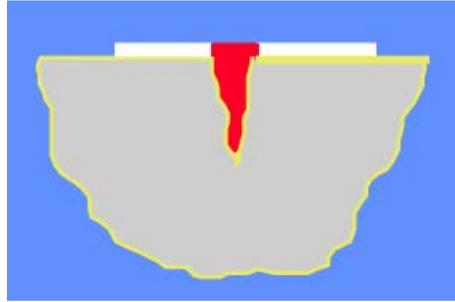
Consiste na aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície. O revelador é usualmente um pó fino branco. Pode ser aplicado seco ou em suspensão, em algum líquido. O revelador age absorvendo o penetrante das discontinuidades e revelando-as. Deve ser previsto um determinado tempo de revelação para o sucesso do ensaio.



**Figura 5.2.10 - Aplicação do revelador e observação da indicação**

e) Avaliação e Inspeção:

Após a aplicação do revelador, as indicações começam a ser observadas, através da mancha causada pela absorção do penetrante contido na abertura, e que serão objetos de avaliação. A inspeção deve ser feita sob boas condições de luminosidade se o penetrante for do tipo visível (cor contrastante com o revelador) ou sob luz negra, em área escurecida, caso o penetrante seja fluorescente.



**Figura 5.2.11 - Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura**

f) Limpeza pós ensaio:

A última etapa, geralmente obrigatória, é a limpeza de todos os resíduos de produtos, que podem prejudicar uma etapa posterior de trabalho da peça.

| <b>Vantagens</b>  | <b>Limitações</b>  |
|---|--|
| Simplicidade  | Apenas detecta descontinuidade aberta para superfície                        |
| Facilidade na realização e interpretação dos resultados                           | Aplicação do penetrante deve ser feita numa determinada faixa de temperatura |
| Não há limitação para o tamanho e forma das peças a ensaiar, nem tipo de material | Superfície da peça não pode ser muito rugosa e nem porosa                    |
| Capaz de revelar descontinuidades extremamente finas                              |  |

**Tabela 5.2.4 - Vantagens e limitações do ensaio por Líquido Penetrante**

### 5.2.5. Radiografia

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme, ou através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. A variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um

meio, irá indicara existência de uma falha interna ou defeito no material. Esse ensaio é amplamente utilizado na inspeção de soldas, materiais fundidos e forjados.

| <b>Vantagens</b>                                  | <b>Limitações</b>   |
|---|---|
| Permite o registro permanente do ensaio realizado | Radiações são altamente prejudiciais ao ser humano          |
| Custo relativamente baixo                         | Deve-se ter cuidados especiais de proteção ao meio ambiente |

**Tabela 5.2.5 - Vantagens e limitações do ensaio por Radiografia**

## 6. Testes de Aceitação

Essa etapa de certificação acontece depois que todas as etapas anteriores forem consideradas satisfatórias. Essa é considerada a última etapa de certificação, na qual o(s) protótipo(s) são testados de acordo com testes previamente estabelecidos por norma e verificamos se o resultado obtido está em conformidade com o esperado.

De acordo com a norma, o protótipo é um equipamento considerado representativo da produção e do produto a ser aprovado, utilizado para o teste de protótipo. O protótipo pode ser fabricado especialmente para os testes especificados ou selecionado aleatoriamente a partir de um lote de fabricação. Se fabricado especialmente, assume-se que as ferramentas e o processo produtivo sejam compatíveis àqueles usados para a produção subsequente.

Abaixo segue uma tabela que define quantos *containers* devem ser utilizados para os testes de produção de acordo com o número total do lote de *container* fabricado. A definição de teste de protótipo e de produção só difere na quantidade de equipamentos testados.

| Número total de <i>containers</i> fabricados | Número total a ser testado (1) |
|--|--------------------------------|
| 1 - 5  | 1                              |
| 6 - 10                                       | 2                              |
| 11 - 20                                      | 3                              |
| 21 - 40                                      | 4                              |
| $\leq 40$                                    | 10%                            |
| (1) O Teste de Protótipo pode estar incluso  |                                |

**Tabela 5.2.1 - Relação da quantidade de *Containers* fabricados e testados**

Independentemente do teste que for realizado, o *container* deverá ser içado por um conjunto de içamento com ângulo  $\alpha$  entre a eslinga e a vertical igual ao ângulo de projeto. Ele deverá ser içado de maneira que não ocorram forças de aceleração significantes. O içamento deverá ser mantido por cinco minutos e depois as medições adequadas deverão ser feitas.

### 6.1. Teste de Içamento por 4 Pontos

No teste de aceitação para içamento por 4 pontos, o protótipo deve ser carregado até uma massa bruta de  $2,5 * R$ . A carga de teste pode ser obtida colocando uma massa de teste interna de  $(2,5 * R - T)$ . Nenhuma deflexão durante o teste deve exceder

$L/300$ , como já mencionado anteriormente na fase de projeto. O *container* não deverá possuir deformações permanentes ou qualquer outro dano após o teste.



**Figura 6.1.1 - Container Offshore sendo içado por 4 Pontos**

A carga interna utilizada nos testes de aceitação para içamento por 4 pontos deverá ser:

$$F_i = (2,5 * R - T) * g \quad (18)$$

$$F_i = (2,5 * 16.203 - 4.203) * 9,81$$

$$F_i = 356.147,15 \text{ N}$$

## **6.2. Teste de Içamento por 2 Pontos**

No teste de içamento por 2 pontos, o *container* deverá ser içado somente por dois olhais, localizados diagonalmente em lados opostos um do outro, com massa bruta total de  $1,5 * R$ . Para isso, o equipamento é carregado com uma massa de teste interna de  $(1,5 * R - T)$ . Se o *container* projetado fosse assimétrico, dois testes de içamento diagonais seriam necessários.



**Figura 6.2.1 - Container Offshore sendo içado por 2 Pontos**

A carga interna utilizada nos testes de aceitação para içamento por 2 pontos deverá ser:

$$F_i = (1,5 * R - T) * g \quad (19)$$

$$F_i = (1,5 * 16.203 - 4.203) * 9,81$$

$$F_i = 197.195,72 \text{ N}$$

### **6.3. Teste de Impacto Vertical**

O *container*, com uma massa interna de teste correspondente à carga útil P, deve ser baixado ou solto sobre o piso de concreto ou outra estrutura rígida da fábrica. No caso de ser baixado por um guindaste, a velocidade de impacto não deverá ser inferior a 1,5 m/s uma vez que impacto do *container* é amortecido pelo guindaste.

Em ambos os casos possíveis de realização do teste, o *container offshore* deverá ser inclinado de forma que a quina inferior do *frame* forme um ângulo de 5° com o piso nas duas direções.

Nenhum dano significativo deverá ocorrer na estrutura do *container*. Caso apareçam pequenas trincas nas soldas e/ou pequenas deformações, o *container* poderá ser reparado.



**Figura 6.3.1 - *Container Offshore* realizando o Teste Vertical de Impacto**

#### **6.4. Teste de Içamento por Bolsa de Empilhadeira**

Para *containers* de topo aberto e com comprimento total de 6,5m ou mais, que possuam bolsas de empilhadeira projetadas para serem utilizadas com o *container* carregado e que estejam de acordo com a tabela 3.4.1, a massa bruta total deverá ser  $1,6 * (R + S)$ . Nenhuma deflexão deverá exceder  $L/300$  e o *container* não deverá possuir nenhuma deformação permanente ou outros danos após a realização do teste.



**Figura 6.4.1 - *Container Offshore* sendo içado pela Bolsa de Empilhadeira**

E a carga interna considerada para essa análise, deverá ser:

$$F = (1,6 * (R + S - T)) * g \quad (20)$$

### 6.5. *Tilt Test*

O *tilt test*, ou teste de inclinação, é aplicável apenas em casos específicos quando a altura do equipamento tiver uma dimensão consideravelmente maior que o comprimento e largura. Assim, para mitigar dúvidas quanto a tombamento quando no convés do navio, o *container* é posicionado com uma angulação de 30° com a horizontal e é solto, de modo que esperasse que o mesmo retorne a sua posição original. Para evitar problemas posteriores, o próprio *3D Beam* alerta o usuário quando há uma suspeita, na fase de projeto, de possibilidade de tombamento, evitando futuros problemas.



**Figura 6.5.1 - *Container Offshore* no *Tilt Test***

## 7. Conclusão

O trabalho partiu do histórico do surgimento da utilização de *containers* para transporte marítimo e posteriormente, do surgimento de normas específicas para *containers offshore* visando aumentar as exigências para que os mesmos possuam maior segurança e possam ser operados em condições de mar adversas.

Visando estruturar o trabalho de uma melhor forma, foram mostradas as definições dos dois tipos de *containers* existentes: ISO e *offshore* e suas maiores diferenças. Foram explicadas quais são as etapas de certificação e dada ênfase na etapa da aprovação de projeto, na qual, através de um estudo de caso, foram realizadas diversas análises estruturais no *software 3D Beam* para garantir que o *container* estudado foi dimensionado corretamente. As análises de tensões e deformações são feitas considerando diferentes condições de içamento a que o *container* pode estar sujeito. Condição de içamento por 4 pontos simula condição real de trabalho, condição de içamento por 2 pontos simula condição anormal e de emergência, condição de içamento pela bolsa de empilhadeira simula operação de transporte do *container* no porto pela empilhadeira. Verificou-se que o *container* analisado atende às exigências estabelecidas pela norma DNV 2.7-1. O trabalho contribuiu para organizar de forma clara as etapas de um processo de certificação de *container offshore*, o que poderá facilitar o entendimento para pessoas e empresas que tenham interesse nessa atividade.

Além de organizar as etapas, busquei realizar uma análise original, verificando se a escolha do material e da seção transversal do estudo de caso havia sido ótima, atendendo as especificações técnicas a baixo custo. Esse tipo de análise não é feita pela equipe de certificação, mas sim pelas empresas fabricantes. Porém, como essas empresas não possuem muito conhecimento do processo de certificação, é possível que superdimensionem os projetos de *container*, arcando com custos mais elevados. Na análise realizada, verificou-se que a adoção do aço A 572 Gr. 50 e seção transversal 80 x 80 x 6,3 mm foi uma escolha acertada. A maior dificuldade encontrada para a realização dessa análise foi que a mudança da seção transversal da estrutura acarreta naturalmente em uma variação de massa do *container*. Essa mudança de massa foi considerada na análise em questão.

Baseado nas considerações acima, proponho que haja uma alteração na etapa de projeto da certificação. Atualmente, para cada processo de certificação, o cliente encaminha somente um projeto de *container* à certificadora, que irá aprová-lo ou não.

Caso não seja aprovado, o cliente o encaminha novamente, corrigindo os erros identificados no projeto anterior, gerando custo extra e atraso no processo. Além disso, conforme dito no parágrafo anterior, é possível que ocorra superdimensionamento do projeto, fato que não será corrigido pela certificadora. Por isso, proponho que na etapa de projeto o cliente possa encaminhar ao mesmo tempo três projetos semelhantes à certificadora, que irá analisá-los, verificando quais se adequam à norma. Baseado no resultado, o cliente terá a possibilidade de passar para a etapa seguinte da certificação, escolhendo o projeto aprovado de menor custo.

Como o *software* utilizado não possui características de modelagem de forças dinâmicas, as forças foram consideradas como sendo estáticas e foram amplificadas através da utilização de coeficientes dinâmicos para cada tipo de içamento. Essa consideração visou aproximar os resultados obtidos da condição real de trabalho. A maior limitação existente para a realização do trabalho foi a falta de informações para o cálculo desses coeficientes dinâmicos.

Na etapa de acompanhamento da fabricação, foi dado foco nos ensaios não destrutivos que as soldas devem ser submetidas para atestar a qualidade do produto e garantir que as especificações de projeto tenham sido seguidas.

Finalmente, verifica-se que a certificação de produto é um processo criterioso e rigoroso, que proporciona maior garantia às empresas usuárias de que esses equipamentos irão performar de maneira adequada, evitando acidentes e proporcionando maior segurança para os trabalhadores e para a atividade de transporte de carga.

## 8. Sugestões para Futuros Trabalhos

A partir desse trabalho, alguns direcionamentos podem ser interessantes para futuros desdobramentos:

- Elaboração de um passo a passo de como é realizada a etapa de fabricação no processo de certificação. Esse estudo englobaria o detalhamento dos processos, consumíveis, tipos e posições de soldagem. Este documento auxiliaria os clientes, uma vez que estes poderão se organizar melhor, aumentando as chances de sucesso nesta etapa do processo de certificação.
- Estudo de caso da fabricação de um *container offshore* em uma fábrica visando o emprego do planejamento e controle da produção. O PCP é a atividade de decidir sobre o melhor emprego dos recursos de produção, assegurando, assim, a execução do que foi previsto de maneira ótima. O principal objetivo do Planejamento e Controle é garantir que a produção ocorra eficazmente, aumentando a competitividade dos fabricantes. Esta abordagem pode ser utilizada em todos os momentos do processo de produção e tem o objetivo de traçar metas mais bem definidas, utilizar os recursos de maneira racional, corrigir possíveis falhas e distorções, obtendo com isso resultados mais satisfatórios.

Acredito que esse enfoque seria interessante, uma vez que tenho percebido que muitos clientes não possuem o conhecimento necessário de todas as etapas da certificação e mais especificamente da fabricação, fazendo com que ocorram visitas mais frequentes dos vistoriadores, o que aumenta o custo da certificação do *container*, podendo tornar o projeto inviável.

## Referências Bibliográficas

- ANDREUCCI, R., 2003, Ensaio por Líquidos Penetrantes;
- ANDREUCCI, R., 2007, Ensaio por Partículas Magnéticas;
- ANDREUCCI, R., 2008, Ensaio por Ultrassom;
- BUDYNAS, R., 2011, Elementos de Máquinas de Shigley, 8ª edição;
- Decreto - Lei nº 80.145/77, 1977, Definição de *Container* ISO;
- EN 12079-1, 2006, *Offshore Containers and associated lifting sets - Part 1: Offshore Container - Design, manufacture and marking*;
- ISO 668, 1995, *Series 1 Freight Containers - Classification, Dimensions and Ratings*;
- ISO 1496-1, 1990, *Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 1: General Cargo Containers for general purposes*;
- ISO 1496-2, 2008, *Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 2: Thermal Containers*;
- ISO 1496-3, 1995, *Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 3: Tank Containers for liquids, gases and pressurized dry bulk*;
- ISO 1496-4, 1991, *Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 4: Non-pressurized containers for dry bulk*;
- ISO 1496-5, 1990, *Series 1 Freight Containers - Specification and Testing - Part 5: Platform and platform-based containers*;
- ISO 1161, 1984, *Series 1 Freight Containers - Corner Fittings - Specification*;
- ISO 6346, 1995, *Freight Containers - Coding, Identification and Marking*;
- ISO 3874, 1997, *Series 1 Freight Containers - Handling and Securing*;
- LOUSADA, P., 2011, Documento Interno do Sistema Petrobras - DIP;
- MODENESI, P., 2002, Fundamentos e tecnologia da soldagem;
- MSC/Circ. 860, *Guidelines for the Approval of Offshore Containers handled in open seas*;
- RODRIGUES L., 2005, Análise e Otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular;

SANTOS, J., 1982, O transporte marítimo Internacional;

*Standard for Certification* n° 2.7-1, 2006, *Offshore Containers*;

*Standard for Certification* n° 2.7-2, 1995, *Offshore Service Containers*;

*Standard for Certification* n° 2.7-3, 2011, *Portable Offshore Units*.

## Anexo I

| <b>Determination of Working Load Limit</b> |                           |  |
|--|---------------------------|--|
| <i>Rating<br/>(kg)</i>                     | <i>Enhancement factor</i> | <i>Minimum required<br/>Working Load Limit<br/>(WLL<sub>min</sub>)</i> |
| 500  | -                         | 7.00   |
| 1000                                       | -                         | 7.00   |
| 1500                                       | -                         | 7.00   |
| 2000                                       | 3.500                     | 7.00   |
| 2500                                       | 2.880                     | 7.20   |
| 3000                                       | 2.600                     | 7.80   |
| 3500                                       | 2.403                     | 8.41   |
| 4000                                       | 2.207                     | 8.83   |
| 4500                                       | 1.962                     | 8.83   |
| 5000                                       | 1.766                     | 8.83   |
| 5500                                       | 1.766                     | 9.71   |
| 6000                                       | 1.766                     | 10.59  |
| 6500                                       | 1.733                     | 11.26  |
| 7000                                       | 1.700                     | 11.90  |
| 7500                                       | 1.666                     | 12.50  |
| 8000                                       | 1.633                     | 13.07  |
| 8500                                       | 1.600                     | 13.60  |
| 9000                                       | 1.567                     | 14.10  |
| 9500                                       | 1.534                     | 14.57  |
| 10000                                      | 1.501                     | 15.01  |
| 10500                                      | 1.479                     | 15.53  |
| 11000                                      | 1.457                     | 16.02  |
| 11500                                      | 1.435                     | 16.50  |
| 12000                                      | 1.413                     | 16.95  |
| 12500                                      | 1.391                     | 17.38  |
| 13000                                      | 1.368                     | 17.79  |
| 13500                                      | 1.346                     | 18.18  |
| 14000                                      | 1.324                     | 18.54  |
| 14500                                      | 1.302                     | 18.88  |
| 15000                                      | 1.280                     | 19.20  |
| 15500                                      | 1.267                     | 19.64  |
| 16000                                      | 1.254                     | 20.06  |
| 16500                                      | 1.240                     | 20.47  |
| 17000                                      | 1.227                     | 20.86  |
| 17500                                      | 1.214                     | 21.24  |
| 18000                                      | 1.201                     | 21.61  |
| 18500                                      | 1.188                     | 21.97  |
| 19000                                      | 1.174                     | 22.31  |
| 19500                                      | 1.161                     | 22.64  |
| 20000                                      | 1.148                     | 22.96  |
| 20500                                      | 1.143                     | 23.44  |
| 21000                                      | 1.139                     | 23.92  |
| 21500                                      | 1.135                     | 24.39  |
| 22000                                      | 1.130                     | 24.86  |
| 22500                                      | 1.126                     | 25.33  |
| 23000                                      | 1.121                     | 25.79  |
| 23500                                      | 1.117                     | 26.25  |
| 24000                                      | 1.112                     | 26.70  |
| 24500                                      | 1.108                     | 27.15  |
| 25000                                      | 1.104                     | 27.59  |

