

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**  
**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

Paulo Henrique Ferreira Santos

**AUMENTO DA VIDA EM FADIGA DE UM DESCARREGADOR DE NAVIOS**

Belo Horizonte

2024

Paulo Henrique Ferreira Santos

## **AUMENTO DA VIDA EM FADIGA DE UM DESCARREGADOR DE NAVIOS**

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Rodrigo Barreto Caldas

Coorientador: Rafael Eclache Moreira de Camargo

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **cinco dias** do mês de **novembro de 2024**, às 17h, o estudante **Paulo Henrique Ferreira Santos**, matrícula 2022672610, defendeu o Trabalho intitulado "**Aumento da Vida em Fadiga de um Descarregador de Navios**".

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** ( 90 ) noventa pontos

**Orientador(a):** Prof. Rodrigo Barreto Caldas

**Nota:** ( 90 ) noventa pontos

**Examinador(a):** Prof. Rafael Eclache Moreira de Camargo



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Membro de comissão**, em 04/12/2024, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Eclache Moreira de Camargo, Usuário Externo**, em 05/12/2024, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3701460** e o código CRC **50A05E1A**.

#### INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

## **Resumo**

Após décadas de desenvolvimento, o nível de segurança e eficiência dos descarregadores de navios (DN) evoluiu muito nos países em desenvolvimento. Eles são equipamentos essenciais para a eficiência e segurança das operações portuárias. São responsáveis pela transferência de cargas dos navios para a terra, e sua eficácia impacta diretamente a velocidade e a segurança do processo de descarga. A importância desses equipamentos se reflete na sua capacidade de manusear grandes volumes de carga de maneira rápida e segura, reduzindo o tempo de espera dos navios no porto e otimizando a logística.

Este trabalho propõe investigar a importância da análise por elementos finitos na avaliação e extensão da vida de um DN em operação há mais de 30 anos. Serão explorados os métodos de análise via elementos finitos (FEA) aplicados ao estudo da análise elástica e fadiga estrutural, com o objetivo de propor soluções às inconformidades encontradas, para garantir sua operação segura e eficiente, caso seja possível. A pesquisa busca contribuir para o avanço das práticas de engenharia.

Palavras-chave: Análise por elementos finitos; descarregador de navios; Fadiga estrutural.

## **Abstract**

After decades of development, the level of safety and efficiency of ship unloaders (SUs) has significantly evolved in developing countries. These are essential equipment for the efficiency and safety of port operations. They are responsible for transferring cargo from ships to land, and their effectiveness directly impacts the speed and safety of the unloading process. The importance of these machines is reflected in their ability to handle large volumes of cargo quickly and safely, reducing ships' waiting times at ports and optimizing logistics. This study aims to investigate the importance of finite element analysis (FEA) in the evaluation and lifespan extension of an SU that has been operating for over 30 years. It will explore finite element methods (FEM) applied to elastic analysis and structural fatigue studies, aiming to propose solutions for any nonconformities found, to ensure its safe and efficient operation, if feasible. The research seeks to contribute to the advancement of engineering practices.

**Keyword:** Finite Element Analysis; Ship Unloader; Structural Fatigue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um descarregador de navios tipo concha. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024.) .....	11
Figura 2 – Sistema de conchas. (fonte: Ferroindustria, 2024. Disponível em: < <a href="https://www.ferroindustria.com.br/descarregador-navio">https://www.ferroindustria.com.br/descarregador-navio</a> >. Acesso em: 16 Out 2024) .....	12
Figura 3 – Visão geral de um descarregador de navios METSO. (fonte: Metso, 2024. Disponível em < <a href="https://www.metso.com/pt">https://www.metso.com/pt</a> >. Acesso em:16 Out 2024). .....	13
Figura 4 – Bandas de deslizamento e propagação de trincas. (Fonte: Jannuzzi, 2011).....	15
Figura 5 – Estrias de fadiga. (Fonte: Giordani, 2002).....	15
Figura 6 – Medição de espessura por ultrassom. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	18
Figura 7 – Medição de espessura por ultrassom. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	18
Figura 8 – Mapa de perdas de espessura. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	19
Figura 9 – Mapa de perdas de espessura. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	19
Figura 10 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	20
Figura 11 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	20
Figura 12 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	21
Figura 13 – Nuvem de pontos. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) ...	22
Figura 14 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	25
Figura 15 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Elaborado pelo Autor).....	25
Figura 16 – Tensão lança fixa. (Fonte: Elaborado pelo autor) .....	26
Figura 17 – Tensão solicitante lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor).....	26
Figura 18 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	27

Figura 19 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	27
Figura 20 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	28
Figura 21 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	28
Figura 22 – Trincas na lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor) .....	29
Figura 23 – Detalhe trinca na lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor).....	29
Figura 24 – Trinca nos blocos das rótulas dos trucks/pórticos. (Fonte: Elaborado pelo autor)	30
Figura 25 – Detalhe trinca nos blocos das rótulas dos trucks/pórticos. (Fonte: Elaborado pelo autor).....	30
Figura 26 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) ...	31
Figura 27 – Tensão solicitante pórtico com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	31
Figura 28 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) ...	32
Figura 29 – Tensão solicitante lança móvel com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	32
Figura 30 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) ...	33
Figura 31 – Tensão solicitante lança fixa com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	33
Figura 32 – Fatores de concentração de tensão. (Fonte: FEM, 1997) .....	34
Figura 33 – Análise fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	34
Figura 34 – Análise fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	35
Figura 35 – Análise Fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	35
Figura 36 – Ilustração falha por fadiga. (fonte: Inspeção Equipto, 2014 Disponível em: < <a href="https://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/falha-por-fadiga.html">https://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/falha-por-fadiga.html</a> >. Acesso em: 16 Out 2024).....	36
Figura 37 – Inspeção nos blocos das rótulas dos trucks e regiões adjacentes. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	37
Figura 38 – Inspeção nas almas do caixão e regiões adjacentes. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024) .....	38
Figura 39 – Pontos críticos de sustentação da lança móvel. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	38

Figura 40 – Locais de alta tensão atuante. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	39
Figura 41 – Locais de alta tensão atuante. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024).....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>09</b>
1.1 Objetivo .....	09
<b>2 EXTENSÃO DE VIDA EM FADIGA DE UM DESCARREGADOR DE NAVIOS ....</b>	<b>09</b>
2.1 Componentes principais .....	10
2.2 Fenômeno da fadiga .....	14
2.3 Desenvolvimento .....	17
2.4 Solução .....	37
<b>3 CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>4 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Um descarregador de navios (DN) com uma expectativa de vida útil superior a 30 anos deve ser projetado para suportar não apenas cargas estáticas e dinâmicas, mas também os efeitos de fadiga que podem se acumular ao longo do tempo. A fadiga, resultante da aplicação repetida de cargas, pode levar ao enfraquecimento gradual dos materiais e ao surgimento de falhas estruturais, o que torna a análise detalhada e a manutenção periódica essenciais.

Neste contexto, a análise estrutural por elementos finitos (FEA) emerge como uma ferramenta crucial para garantir a segurança e a longevidade dos descarregadores de navios. A FEA permite simular e avaliar o comportamento estrutural dos equipamentos sob diversas condições de carga, incluindo o impacto da fadiga. Ao utilizar esta técnica avançada, é possível identificar pontos críticos e minimizar o risco de falhas, maximizando a eficiência operacional.

### **1.1 Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação da extensão da vida útil de um descarregador de navios para portos, destacando os principais desafios e benefícios do uso dessa prática no contexto de estender a vida de um ativo reprovado, visando trabalhar com segurança até a data de sua completa desmobilização. Serão abordados aspectos teóricos e práticos com foco na identificação e mitigação de problemas estruturais potenciais.

## **2. EXTENSÃO DE VIDA EM FADIGA DE UM DESCARREGADOR DE NAVIOS**

Descarregadores de navios são equipamentos essenciais para a operação eficiente e segura de terminais portuários. Eles são responsáveis por remover a carga dos navios e transferi-la para transporte. Existem vários tipos de descarregadores, variando em funcionalidade a depender dos tipos de cargas e necessidades específicas do porto.

A escolha do equipamento certo depende, principalmente, da carga manuseada, o layout do porto e da eficiência operacional desejada. As tecnologias continuam a evoluir, e novos

equipamentos, principalmente automatizados, estão em desenvolvimento para melhorar ainda mais a eficiência e segurança operacional nos portos. (MILLS, 2023)

A história dos descarregadores de navios está diretamente relacionada ao avanço tecnológico nas operações portuárias ao longo dos tempos.

Em épocas medievais, o descarregamento de navios era feito manualmente por trabalhadores utilizando equipamentos como sacos, o que resultava em grande esforço físico e processo lento.

Na idade média, começaram a ser utilizados guindastes rudimentares, porém possuíam limitação de alcance, eles eram movimentados manualmente ou por força animal.

Com a Revolução Industrial, houve um avanço significativo na tecnologia dos descarregadores de navios. O uso de guindastes movidos a vapor começou a se tornar comum nos portos. Esses guindastes eram mais potentes e eficientes do que os anteriores movidos manualmente (GUINDASTES BRASIL, 2021). O desenvolvimento de portos mais adequados também ajudou no avanço e melhor operação dos descarregadores.

A invenção dos contêineres de carga na década de 1950 revolucionou a indústria portuária. O novo sistema permitiu transportes mais eficientes de mercadorias, e com isso, desenvolveu-se novos tipos de descarregadores, como os guindastes de contêineres (*Ship-to-Shore Cranes*).

O avanço da tecnologia fez com que os descarregadores de navios passassem a utilizar sistemas de controle automatizados. Tais avanços proporcionaram maior segurança operacional e pessoal, que vem alinhado com a necessidade de sustentabilidade nas operações. Isso incentivou o desenvolvimento de descarregadores menos agressivos ao meio ambiente, focados em minimizar o impacto ambiental das atividades portuárias. Guindastes autônomos e sistemas de transporte automatizados têm se tornado cada vez mais comuns. (TRANS. INFO, 2021)

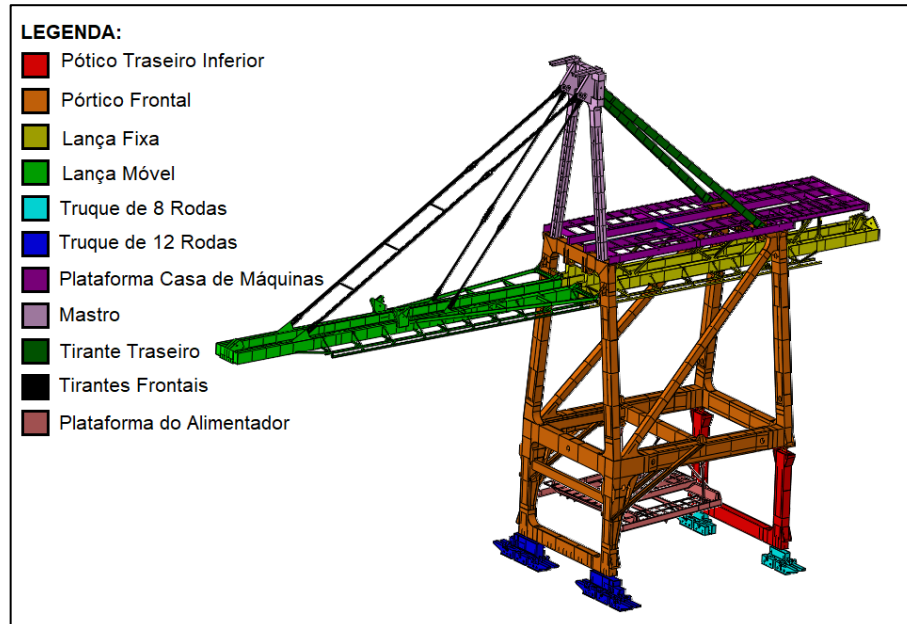
## **2.1 Componentes principais**

O descarregador de navios do estudo em questão é o descarregador com conchas, também conhecido como *grab unloaders*. Tais descarregadores são projetados para manejar cargas a

granel, como minérios e carvão. Esses equipamentos são especializados em remover grandes volumes de material de navios e transferi-los para o cais ou para sistemas de transporte no porto. Seus principais componentes estão apresentados abaixo:

- Estrutura Principal

Como indicado na Figura 1, a estrutura principal do descarregador de concha é composta pela base e a fundação, que pode ser uma estrutura fixa no cais ou uma estrutura móvel montada sobre trilhos ou rodas. A base serve como fundação, sobre a qual o descarregador é montado. A partir do sistema de translação (truques), ergue-se então a torre ou pórtico, que sustenta a lança do descarregador e o mecanismo de elevação. A lança, também conhecido como *boom*, é uma estrutura horizontal que se estende a partir do pórtico e alcança o navio. Este é geralmente ajustável em comprimento e ângulo para permitir o acesso a diferentes áreas do navio e do cais. As plataformas são regiões onde se localizam componentes mecânicos como moto redutores, alimentador, etc.



**Figura 1 – Estrutura de um descarregador de navios tipo concha. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024.)**

- Sistema de Elevação

O sistema de elevação é essencial para a movimentação da carga. Inclui polias e cabos de aço, que são montados ao longo da coluna e do braço do descarregador e ajudam a movimentar a concha e o material. As polias facilitam a movimentação dos cabos, enquanto os cabos de aço transmitem a força necessária para levantar e abaixar a concha e a carga. O mecanismo de elevação, que pode incluir cilindros hidráulicos ou motores, controla o movimento de elevação e descida da concha. Cilindros hidráulicos são frequentemente utilizados devido à sua capacidade de fornecer força precisa e controlada.

- Sistema de Concha

O sistema de concha (Figura 2) é o componente que efetivamente realiza a coleta do material. A concha é composta por uma estrutura com duas ou mais partes móveis, chamadas de garras, que se abrem e fecham para agarrar o material. As garras são projetadas para cortar e agarrar o minério de forma eficiente e podem ser feitas de aço resistente, com bordas afiadas para penetrar facilmente em pilhas de minério. O sistema de abertura e fechamento da concha é geralmente acionado por mecanismos hidráulicos, pneumáticos ou eletromecânicos, permitindo que a concha se abra e feche com precisão.



**Figura 2 – Sistema de conchas. (fonte: Ferroindustria, 2024. Disponível em: <<https://www.ferroindustria.com.br/descarregador-navio>>. Acesso em: 16 Out 2024)**

- Sistema de Transporte

Após a concha coletar o material, o sistema de transporte é responsável por mover o material do ponto de descarregamento para os armazéns ou para sistemas de transporte adicionais. Correias transportadoras são frequentemente utilizadas para este fim, movendo o material horizontalmente ao longo do cais (Figura 3). Essas correias podem ser ajustáveis em comprimento e inclinação para atender às necessidades específicas do processo de descarregamento.



**Figura 3 – Visão geral de um descarregador de navios METSO. (fonte: Metso, 2024. Disponível em <<https://www.metso.com/pt>>. Acesso em: 16 Out 2024).**

## 2.2 Fenômeno da Fadiga

A fadiga em descarregadores de navios é um aspecto crucial a ser considerado na operação e manutenção desses equipamentos, pois pode ter um impacto significativo na segurança, eficiência e durabilidade do sistema. A fadiga refere-se ao enfraquecimento gradual dos materiais e estruturas devido à exposição a cargas repetitivas e variações de tensões ao longo do tempo (ROSA, 2002). Em descarregadores de navios, a fadiga surge como uma preocupação importante devido às exigências operacionais e ao ambiente agressivo em que esses equipamentos operam.

A fadiga é um fenômeno complexo que envolve a redução gradual da capacidade de elementos estruturais em suportar cargas repetitivas. O processo de dano por fadiga acumula-se devido à aplicação de um grande número de ciclos de tensão, mesmo quando a amplitude desses ciclos é relativamente baixa em comparação com a resistência de escoamento do material. Isso pode eventualmente levar à fratura do material. (ROSA, 2002)

Quando expostos a cargas cíclicas, defeitos nas áreas de concentração de tensão podem levar ao aparecimento de trincas. Essas trincas tendem a se unir em uma maior, que se propaga por toda a seção do elemento até que a capacidade da seção remanescente seja insuficiente para suportar a carga, resultando em uma fratura. Esse tipo de falha é conhecido como falha por fadiga. (ROSA, 2002)

A fadiga pode ser classificada em dois tipos principais de ciclos: baixo ciclo, com menos de  $10^3$  ou  $10^4$  ciclos, e alto ciclo, com mais de  $10^4$  ciclos, podendo chegar a  $10^6$  ou mais (ELLWANGER, apud SILVA, 2011).

O mecanismo da fratura por fadiga se desenvolve através de etapas estabelecidas como nucleação da fissura, propagação e ruptura final. A iniciação ou nucleação da fissura geralmente ocorre na superfície da peça ou estrutura, pois é na superfície que há maior concentração de tensões. Além disso, os grãos na superfície estão menos "ligados" entre si em comparação com os grãos no interior, onde estão em contato com outros grãos em todas as direções, tornando-os mais suscetíveis à deformação plástica sob tensão (JANNUZZI, 2011).

Após a fissura ser nucleada, ela inicialmente se propaga em um ângulo de  $45^\circ$  em relação à direção das sollicitações, representado na Figura 4, e depois a  $90^\circ$  em relação à direção das forças aplicadas.

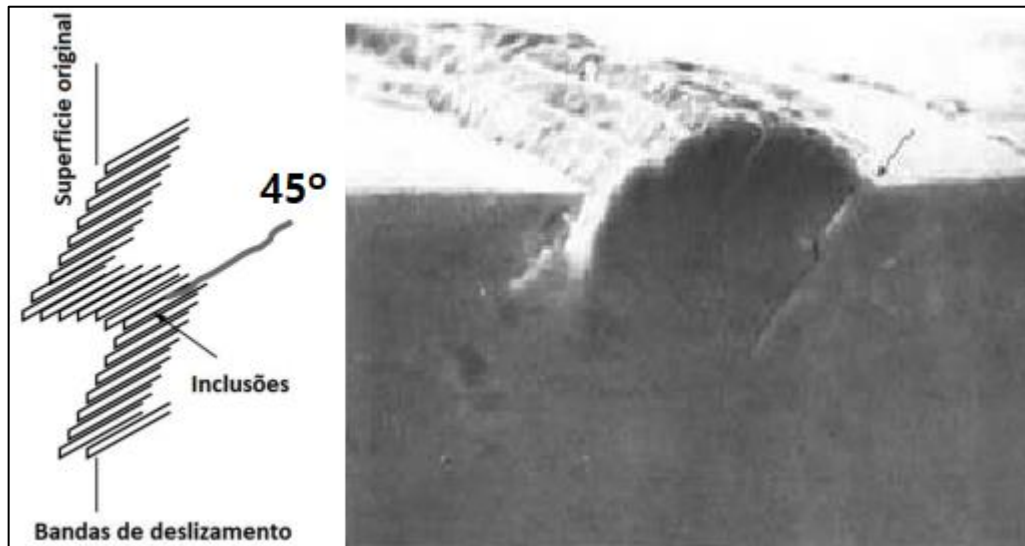


Figura 4 – Bandas de deslizamento e propagação de trincas. (Fonte: Jannuzzi, 2011)

A propagação ocorre quando a tensão é máxima em cada ciclo, causando uma deformação plástica na ponta da fissura. Quando a tensão diminui, parte da fissura se "fecha" novamente, mas ainda assim ocorre uma pequena deformação plástica, formando uma nova estria (em metais dúcteis). Essas estrias registram informações que podem ser usadas para deduzir as causas e a progressão da fratura (Figura 5). A velocidade de propagação da fissura depende da amplitude das tensões aplicadas. A fissura se desenvolve até que a seção restante não seja mais capaz de suportar a tensão aplicada, resultando na fratura instável da peça.

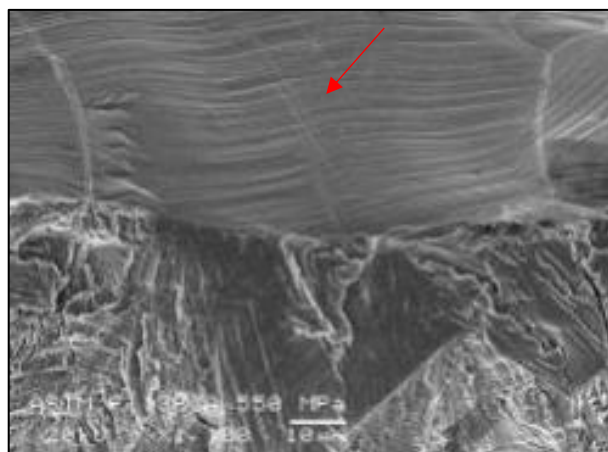


Figura 5 – Estrias de fadiga. (Fonte: Giordani, 2002)

Durante o processo de descarregamento, o descarregador é sujeito a cargas cíclicas repetitivas. Isso ocorre porque o equipamento realiza movimentos contínuos de levantamento e movimentação da carga, o que pode resultar em dano acumulativo nos componentes estruturais. Com o tempo, essa repetição pode levar ao desenvolvimento de fissuras e eventual falha das partes envolvidas.

Além das cargas cíclicas, as variações ambientais desempenham um papel importante na fadiga dos descarregadores. As condições climáticas adversas, como chuva e variações de temperaturas, afetam a integridade dos materiais do equipamento. A exposição constante ao ambiente marinho pode levar à corrosão dos componentes metálicos, diminuindo a resistência dos materiais e acelerando o processo de fadiga. A corrosão compromete a durabilidade dos componentes e pode tornar o equipamento mais suscetível a danos.

As consequências da fadiga são significativas. A falha estrutural é uma das principais preocupações, pois pode resultar em colapso da lança do descarregador, pórtico ou base. As rachaduras podem se propagar, comprometendo a segurança e a operação do equipamento.

Para prevenir e gerenciar a fadiga, é essencial adotar uma abordagem proativa. Inspeções regulares dos componentes estruturais e das partes móveis do descarregador são cruciais para detectar sinais de fadiga, como fissuras e deformações. Inspeções visuais e não destrutivas, como testes de ultrassom e radiografias, ajudam a identificar falhas internas que não são imediatamente visíveis. O uso de sistemas de monitoramento de condição pode fornecer informações contínuas sobre o estado dos componentes e permitir a detecção de problemas antes que se tornem críticos. Observa-se que a inspeção é fundamental para a mensuração dos riscos e correções necessárias. Reparos imediatos em componentes danificados também são necessários para evitar que pequenas falhas evoluam para problemas mais graves.

## 2.3 Desenvolvimento

No estudo em questão, o descarregador de navios apresenta mais de 30 anos de operação, e conforme explicado nos tópicos anteriores, o ambiente de portos é extremamente propenso à aceleração da corrosão, devido à maior concentração de sais, especialmente cloretos, no ambiente marinho.

A taxa de corrosão para aço carbono não protegido pode variar de 0,1 a 0,2 mm por ano. Em ambientes ainda mais agressivos, onde a estrutura está periodicamente submersa e exposta conforme a maré, a taxa pode aumentar significativamente, chegando a até 0,5 mm por ano ou mais.

Em contrapartida, em áreas longe da influência direta do mar, como ambientes urbanos ou rurais, a taxa de corrosão tende a ser muito menor. Em média, essas taxas variam de 0,01 a 0,02 mm por ano, dependendo das condições ambientais locais. Isso ocorre porque, nessas áreas, a exposição aos agentes corrosivos, como os sais presentes no ar, é significativamente reduzida.

Comparando as duas situações, a taxa de corrosão em áreas costeiras pode ser de 5 a 20 vezes maior do que em áreas mais afastadas do mar (SERRAMETAL, 2024).

Dessa forma, junto à fadiga a ser avaliada, é importante que os pontos de corrosão sejam tratados, a fim de promover a integridade estrutural do ativo. Cada perda de espessura resulta em menor resistência estrutural quanto aos esforços, e que ao extremo, resultam em colapso estrutural, além de potencializar a fadiga (JANNUZZI, 2011).

No equipamento, observou-se diversos pontos de perdas de espessura, variando entre 0% e 70%. A técnica utilizada foi a medição de espessura por ultrassom (figuras 6 e 7), que consiste em utilizar um equipamento capaz de emitir ondas ultrassônicas em um meio material e medir o tempo que essas ondas levam para se propagar entre as superfícies da chapa de interesse. A medida do tempo em conjunto com a velocidade de propagação, ambos mensurados pelo aparelho, resultam na espessura precisa da seção em que ele é utilizado.

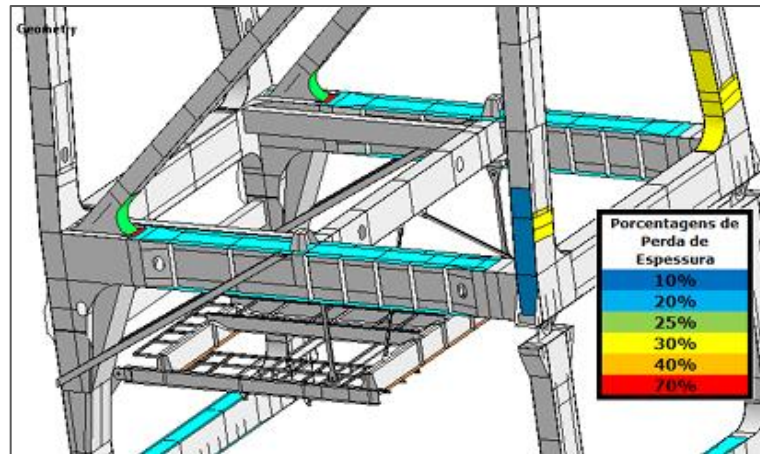


**Figura 6 – Medição de espessura por ultrassom. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

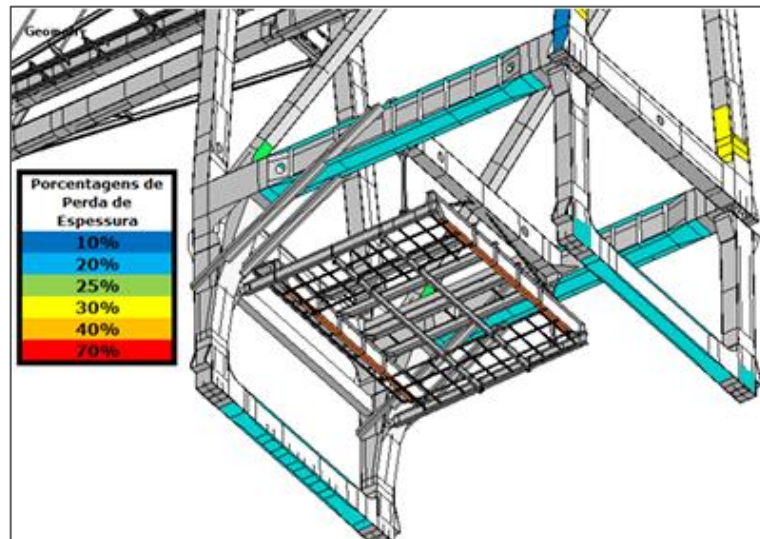


**Figura 7 – Medição de espessura por ultrassom. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

As figuras 8 e 9 a seguir, apresentam o mapeamento de perdas de espessura no equipamento.



**Figura 8 – Mapa de perdas de espessura. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 9 – Mapa de perdas de espessura. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

Considerando tais perdas no modelo computacional, é passível de ocorrerem diversos pontos apresentando tensão atuante acima do limite de escoamento e até mesmo de ruptura, devido a soma de perda de espessura e conseqüentemente resistência, a combinações de cargas de norma, e as majorações de cargas, ou seja, proporcionando situações extremas. Dessa forma, os resultados apresentados são conservadores e por apresentarem situações extremas justificam a não ocorrência de colapso em campo.

Abaixo estão apresentados pontos de corrosão para representar as condições observáveis em equipamentos de portos sujeitos a ambientes severos para corrosão, ou seja, servem para ilustrar os danos que acometem estas estruturas.



**Figura 10 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 11 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 12 – Exemplo de corrosão estrutural em descarregadores de navios. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

O cálculo estrutural foi realizado utilizando o software ANSYS, tendo como referência os desenhos estruturais do equipamento e nuvem de pontos (Figura 13), visando apresentar um modelo fiel a condição atual de campo. Utilizou-se como base a norma FEM (*Federation Europeenne de la Manutention Section I: Rules for the design of Hoisting Appliances*), organização que estabelece diretrizes e normas para equipamentos de movimentação de materiais. Ela atribui diferentes casos de combinações e diferentes limites de tensões admissíveis, os quais foram superados em diversos pontos pela análise em questão. Na tabela 1 estão apresentados apenas três pontos de alta solicitação para o estudo, pontos que automaticamente também falham quanto aos critérios de fadiga para a região.

O limite admissível para a estrutura (aço ASTM A36) foi determinado conforme metodologia da norma FEM, tendo o menor valor como 167 MPa. Observa-se tensões atingindo as faixas entre 167 até 573 MPa, identificando que as regiões estão reprovadas para a avaliação elástica, tais locais apresentam corrosão média a avançada e justificam a alta tensão localizada.

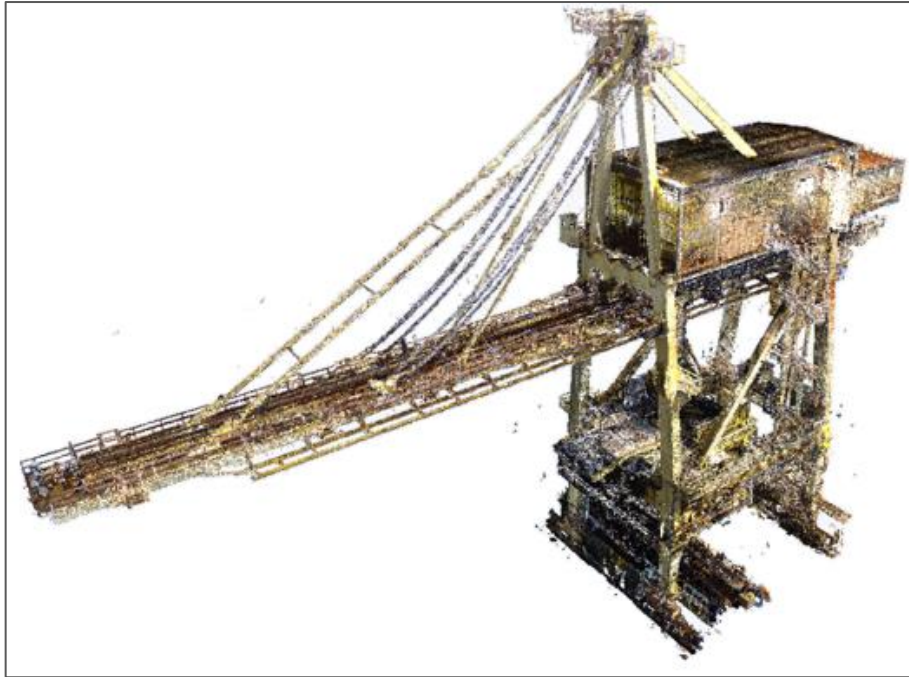


Figura 13 – Nuvem de pontos. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

Caso de Carregamento	Critério de Tensões	Tensão Admissível
<b>ASTM-A36 (<math>\sigma_y = 250</math> MPa)</b>		
<b>Caso I</b>	$\sigma_y / 1,5$	167 MPa
<b>Caso II</b>	$\sigma_y / 1,33$	188 MPa
<b>Caso III</b>	$\sigma_y / 1,2$	208 MPa

Tabela 1 – Critério de tensões. (Fonte: Elaborado pelo autor)

### Caso I (Main Loads)

#### • Combinação I-1:

o Peso próprio da Estrutura e dos componentes.

o Carga de material nos chutes e na calha

o Tensão nos Cabos do sistema de içamento

o Grab carregado e Carro Principal na ponta da lança móvel

#### • Combinação I-2:

o Peso próprio da Estrutura e dos componentes

- o Carga de material nos chutes e na calha
- o Tensão nos Cabos do sistema de içamento
- o Grab carregado e Carro Principal no meio da lança móvel

### **Caso II (Main and Additional Loads)**

#### **• Combinação II-1:**

- o Peso próprio da Estrutura e dos componentes.
- o Carga de material nos chutes e na calha.
- o Tensão nos Cabos do sistema de içamento
- o Grab carregado e Carro Principal na ponta da lança móvel.
- o Vento Incidindo transversalmente

#### **• Combinação II-2:**

- o Peso próprio da Estrutura e dos componentes.
- o Carga de material nos chutes e na calha.
- o Tensão nos Cabos do sistema de içamento
- o Grab carregado e Carro Principal na ponta da lança móvel
- o Vento Incidindo longitudinalmente

### **Caso III (Main, Additional and Special Loads)**

#### **• Combinação III-1:**

- o Peso próprio da Estrutura e dos componentes.

o Carga de material nos chutes e na calha.

o Grab carregado e Carro Principal na ponta da lança móvel.

o Vento com equipamento fora de operação incidindo transversalmente

• **Combinação III-2:**

o Peso próprio da Estrutura e dos componentes.

o Carga de material nos chutes e na calha.

o Grab carregado e Carro Principal na ponta da lança móvel

o Vento com equipamento fora de operação incidindo longitudinalmente

**Resultados das combinações:**

**Caso 1:**

Abaixo estão apresentadas as maiores tensões referentes ao caso 1 (Caso 1-Combinação1 e Caso 1- Combinação 2). As tensões máximas apresentadas são as maiores tensões de **von misses** a partir das duas combinações (considera perda de espessura):

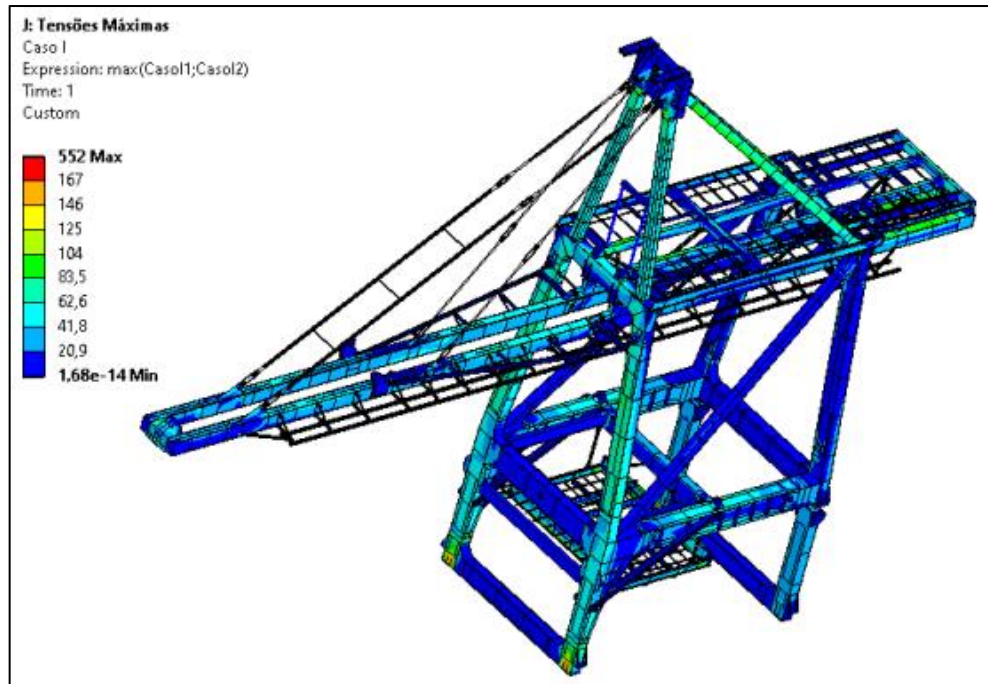


Figura 14 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

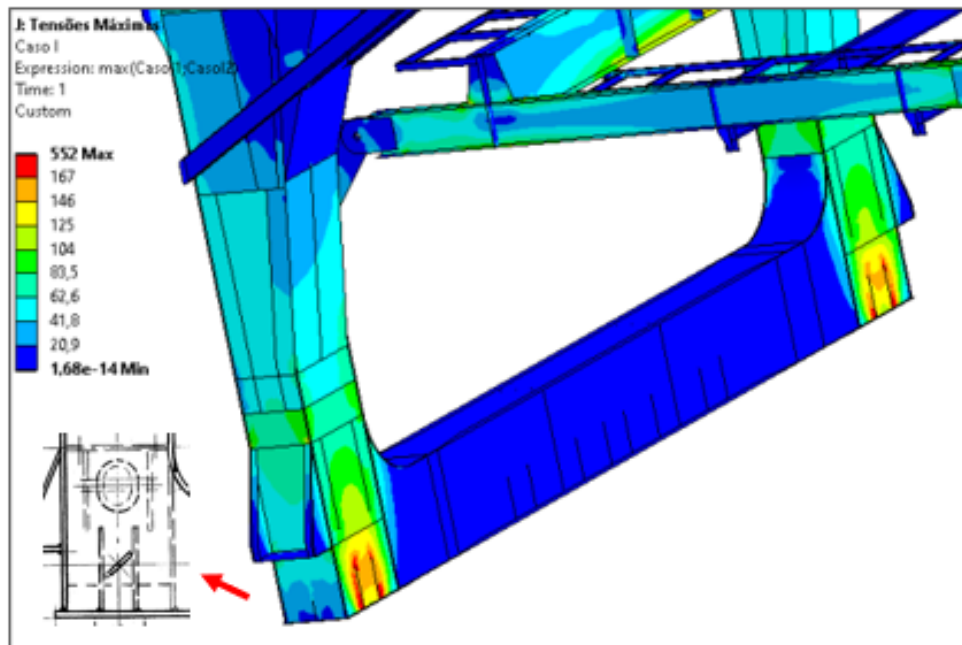


Figura 15 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Elaborado pelo Autor)

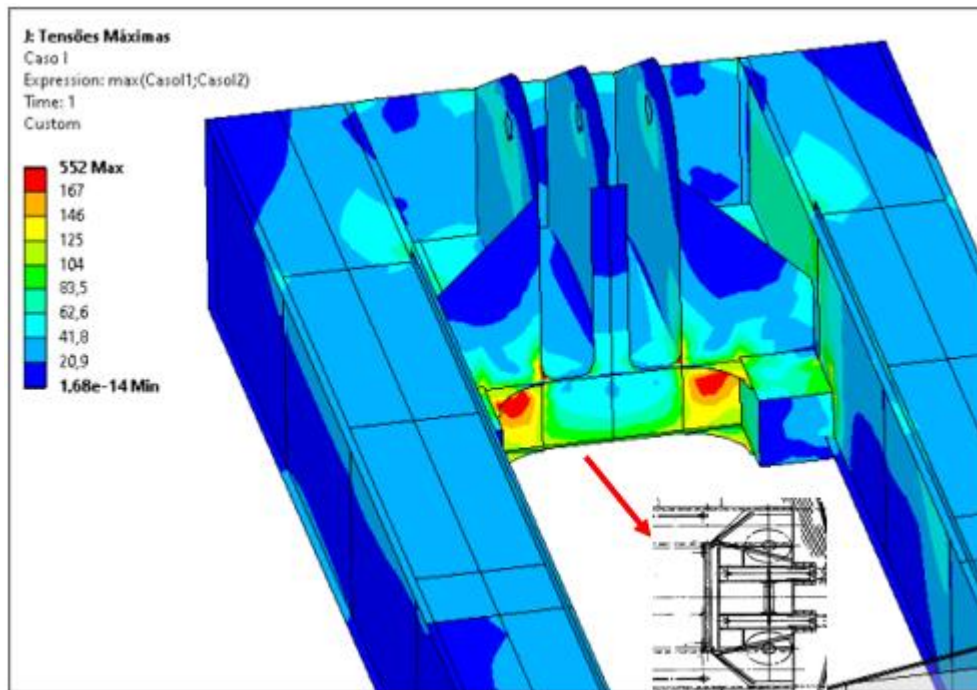


Figura 16 – Tensão lança fixa. (Fonte: Elaborado pelo autor)

Abaixo está apresentado apenas o caso 1 combinação 1 (von misses), considerando o carro na ponta da lança (pior cenário) e incrementando os tirantes na análise, realizando um estudo mais detalhado da região para avaliar o impacto das cargas nas lanças, considerando também as perdas de espessura.

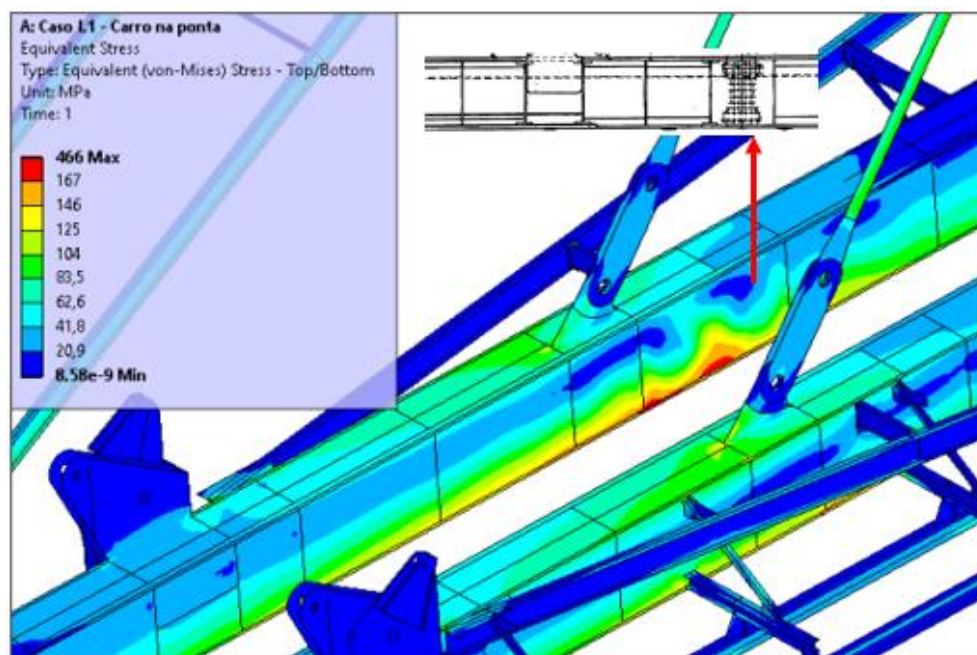


Figura 17 – Tensão solicitante lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor)

**Caso 2:**

Abaixo estão apresentadas as maiores tensões referentes ao caso 2 (Caso 2-Combinação1 e Caso 2- Combinação 2). As tensões máximas apresentadas são as maiores tensões de **von misses** a partir das duas combinações:

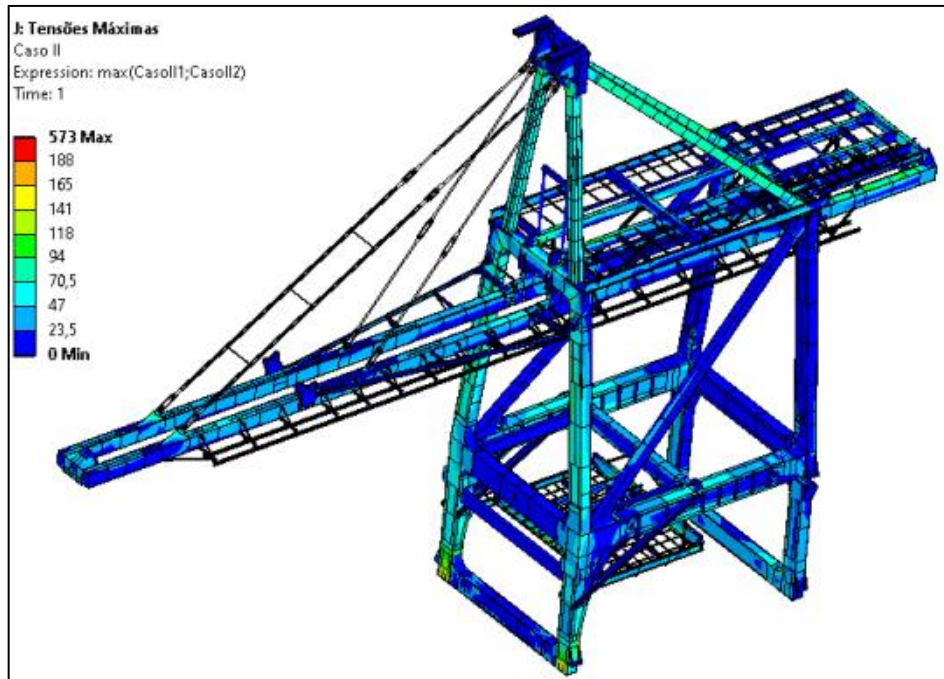


Figura 18 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

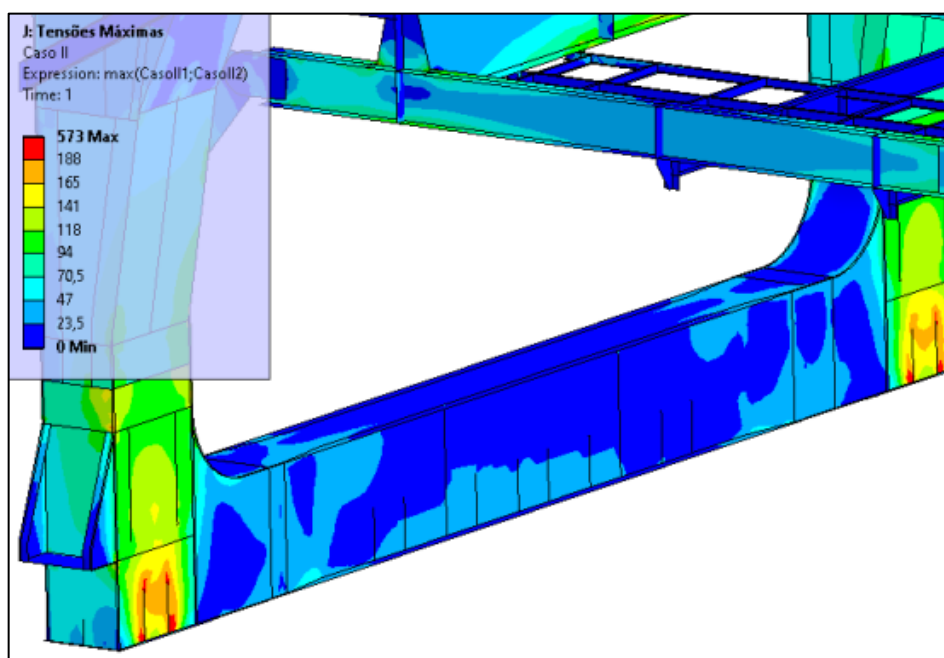


Figura 19 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

### Caso 3:

Abaixo estão apresentadas as maiores tensões referentes ao caso 3 (Caso 3-Combinação 1 e Caso 3- Combinação 2). As tensões máximas apresentadas são as maiores tensões de **von misses** a partir das duas combinações:

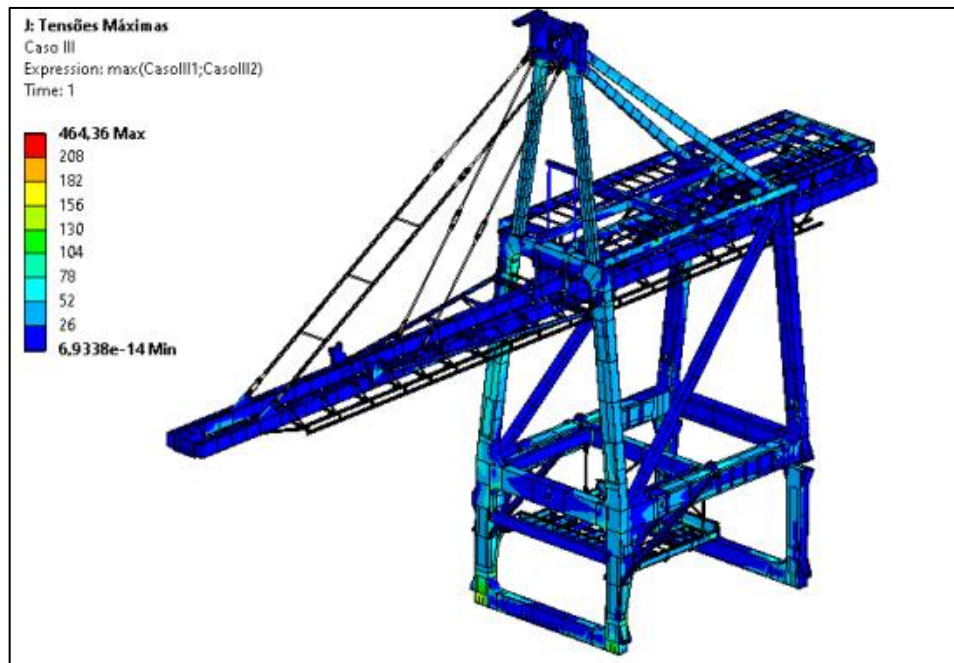


Figura 20 – Tensão solicitante DN. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

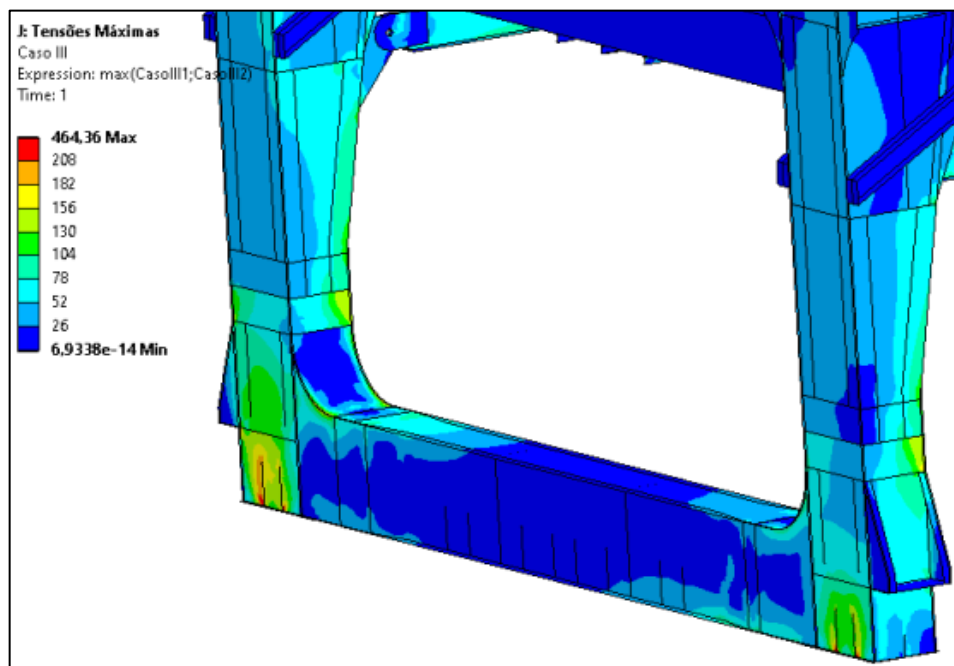
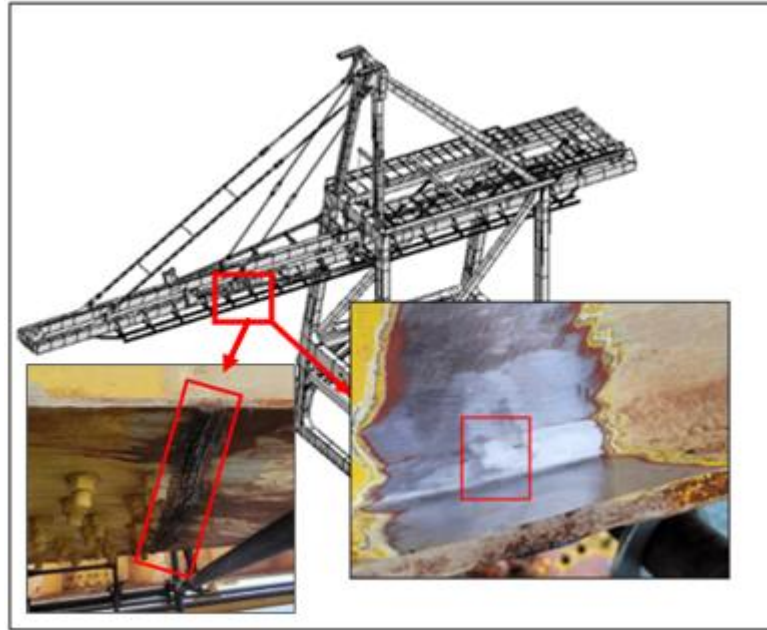


Figura 21 – Tensão solicitante pórtico. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

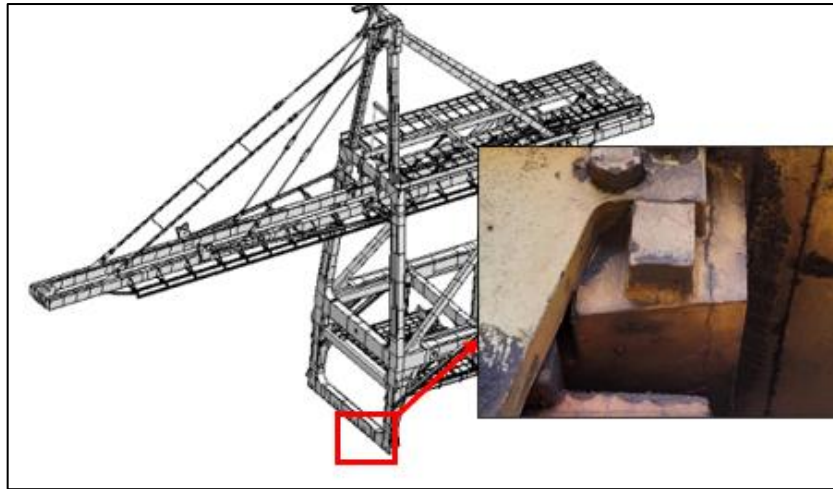
A partir da localização de tais pontos, inspeções de campo foram realizadas a fim de se verificar possíveis danos como plastificações, trincas, e observou-se que trincas evoluíam em algumas regiões, conforme imagens abaixo:



**Figura 22 – Trincas na lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor)**



**Figura 23 – Detalhe trinca na lança móvel. (Fonte: Elaborado pelo autor)**



**Figura 24 – Trinca nos blocos das rótulas dos trucks/pórticos. (Fonte: Elaborado pelo autor)**



**Figura 25 – Detalhe trinca nos blocos das rótulas dos trucks/pórticos. (Fonte: Elaborado pelo autor)**

A partir do exposto acima, ressalta-se a importância das análises via elementos finitos para a localização de pontos de alta tensão, que junto aos trabalhos de inspeções, detectam inconformidades estruturais.

Sabendo das características operacionais da estrutura, como longa vida e milhões de ciclos de utilização, é fundamental que tais inspeções sejam realizadas com frequência. Cada vez que a estrutura é utilizada para descarregar um navio, ela é submetida a esforços mecânicos, como tensões de tração e compressão, torções e vibrações.

Adicionou-se chapas de diferentes espessuras em diversos pontos da estrutura, somando-as com as chapas já existentes. A partir de reforços atribuídos à estrutura, tais locais de alta tensão puderam ser tratados e reduzidos para dentro dos limites admissíveis por Norma, conforme imagens abaixo:

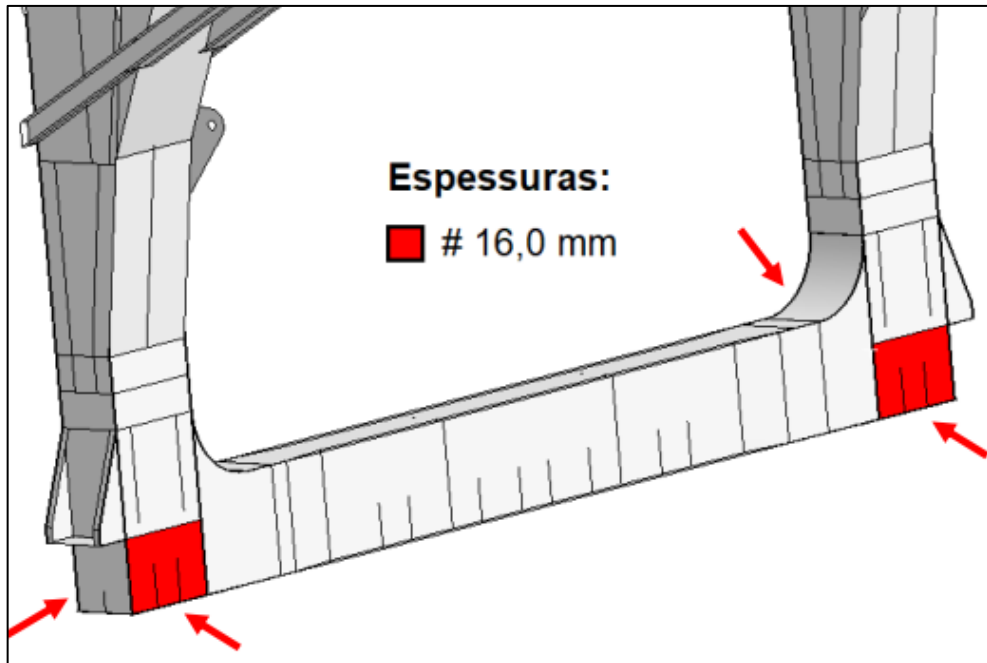


Figura 26 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

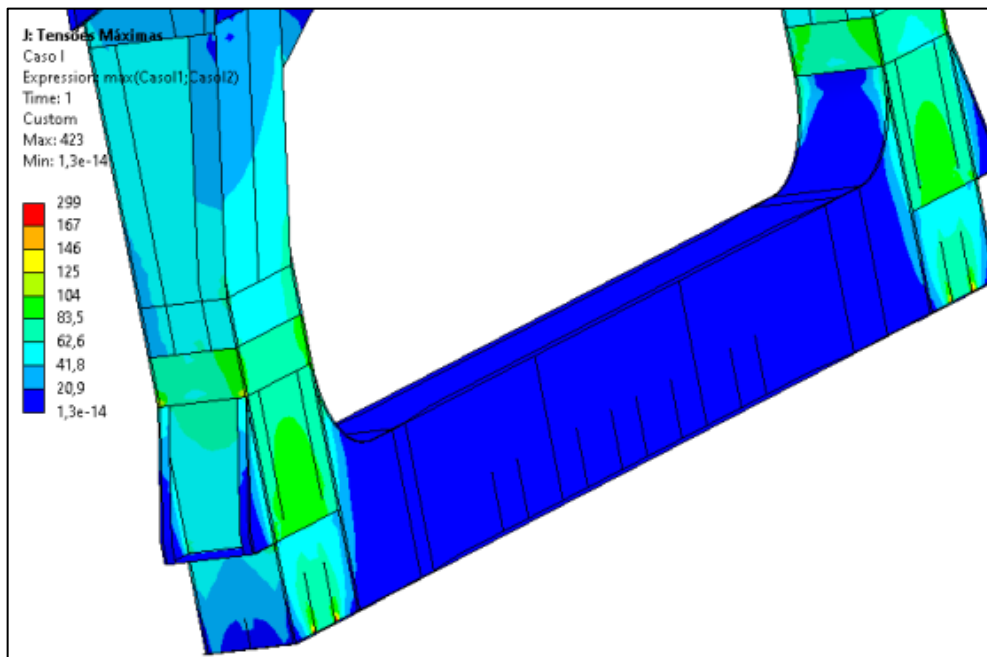


Figura 27 – Tensão solicitante pórtico com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

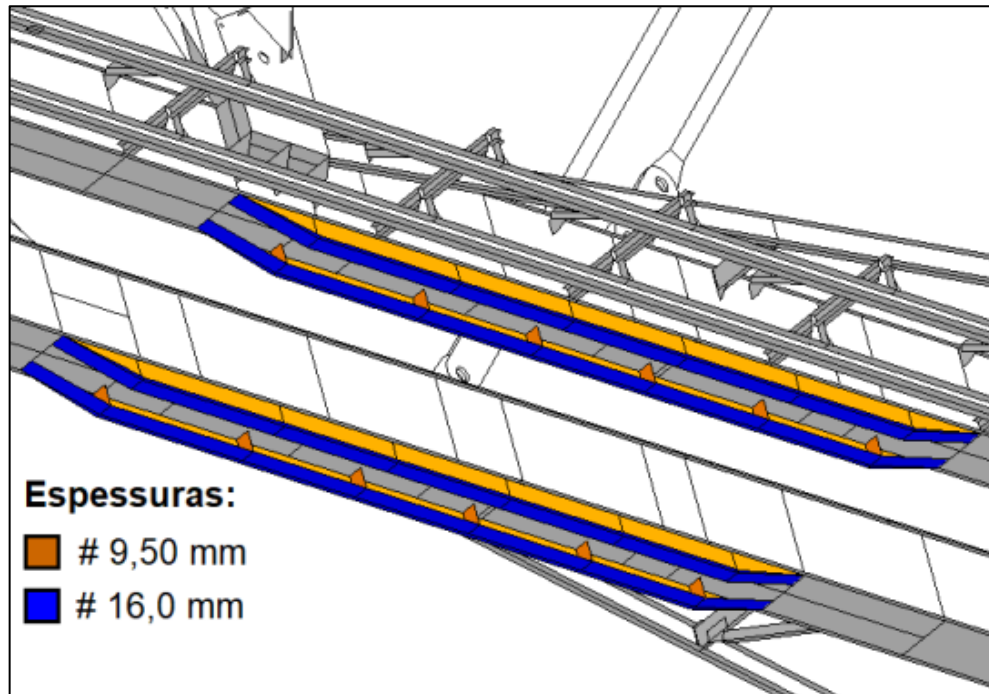


Figura 28 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

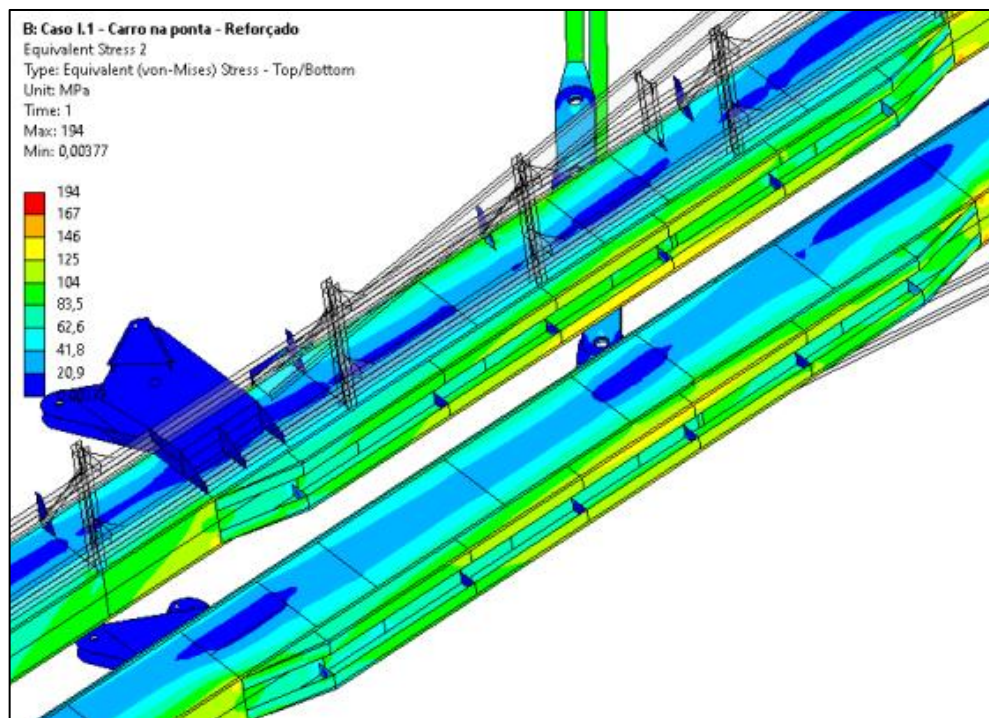
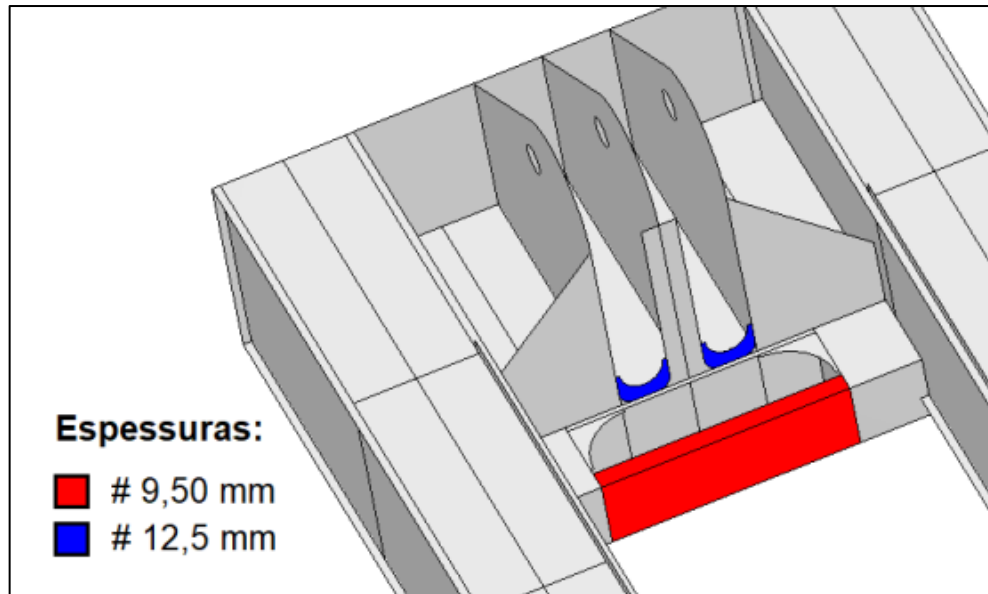
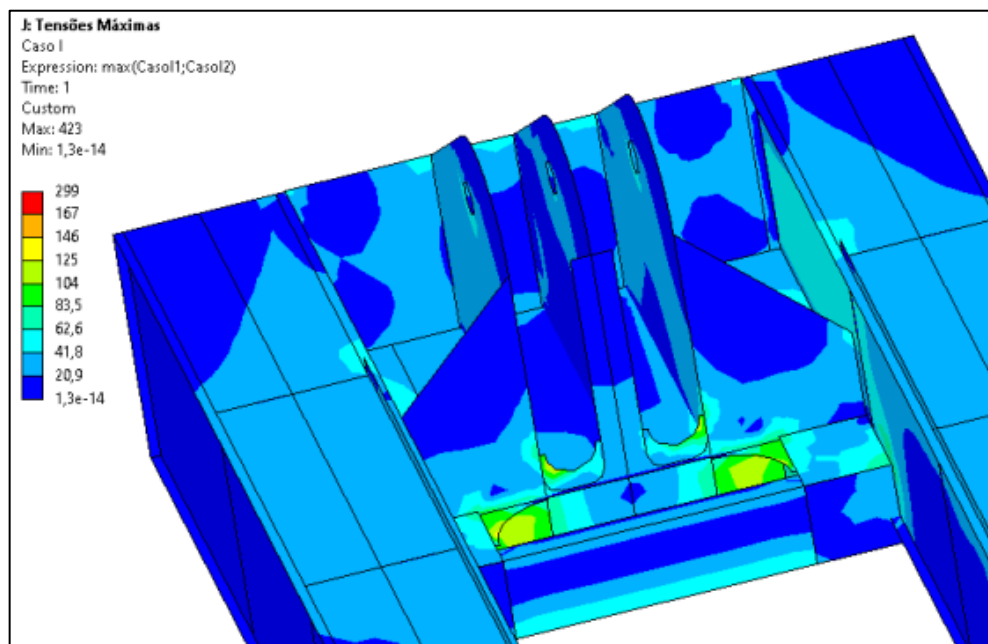


Figura 29 – Tensão solicitante lança móvel com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)



**Figura 30 – Local de reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 31 – Tensão solicitante lança fixa com reforços. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

Como próxima etapa temos a verificação a fadiga da estrutura completa, já com os reforços. Inicialmente verificou-se a estrutura pelo software ANSYS, a partir da norma FEM, considerando um fator de concentração de tensão severo K4 na formulação das tensões limites a fadiga de forma conservadora. Observou-se que a estrutura já estava apta a fadiga pela análise. Realizou-se então uma verificação menos severa K2 apenas por ser a que melhor se enquadra,

levando em consideração os tipos de estruturas e juntas características do descarregador de navios, onde pode-se reafirmar que a estrutura está aprovada quanto a verificação a fadiga.

A norma FEM classifica os concentradores de tensão conforme suas severidades de concentração de tensão, em função da geometria da união soldada. Essa classificação é feita com fatores K, que variam de K0 (concentradores pouco severos) até K4 (concentradores bastante severos). Quanto mais alto o fator de concentração, menor será a tensão admissível para a análise de fadiga (Figura 32).

component group	unwelded components - notch effect						welded components - notch effect (steels Fe 360 to Fe 510)				
	W <sub>0</sub>		W <sub>1</sub>		W <sub>2</sub>		K <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>
	Fe 360 Fe 430	Fe 510	Fe 360 Fe 430	Fe 510	Fe 360 Fe 430	Fe 510					
E1	249.1	298.0	211.7	253.3	174.4	208.6	361.9	323.1	271.4	193.9	116.3
E2	224.4	261.7	190.7	222.4	157.1	183.2	293.8	262.3	220.3	157.4	94.4
E3	202.2	229.8	171.8	195.3	141.5	160.8	238.4	212.9	178.8	127.7	76.6
E4	182.1	201.8	154.8	171.5	127.5	141.2	193.5	172.8	145.1	103.7	62.2
E5	164.1	177.2	139.5	150.6	114.9	124.9	157.1	140.3	117.8	84.2	50.5
E6	147.8	155.6	125.7	132.3	103.5	108.9	127.5	113.8	95.6	68.3	41.0
E7	133.2	136.6	113.2	116.2	93.2	95.7	103.5	92.4	77.6	55.4	33.3
E8	120.0	120.0	102.0	102.0	84.0	84.0	84.0	75.0	63.0	45.0	27.0

Figura 32 – Fatores de concentração de tensão. (Fonte: FEM, 1997)

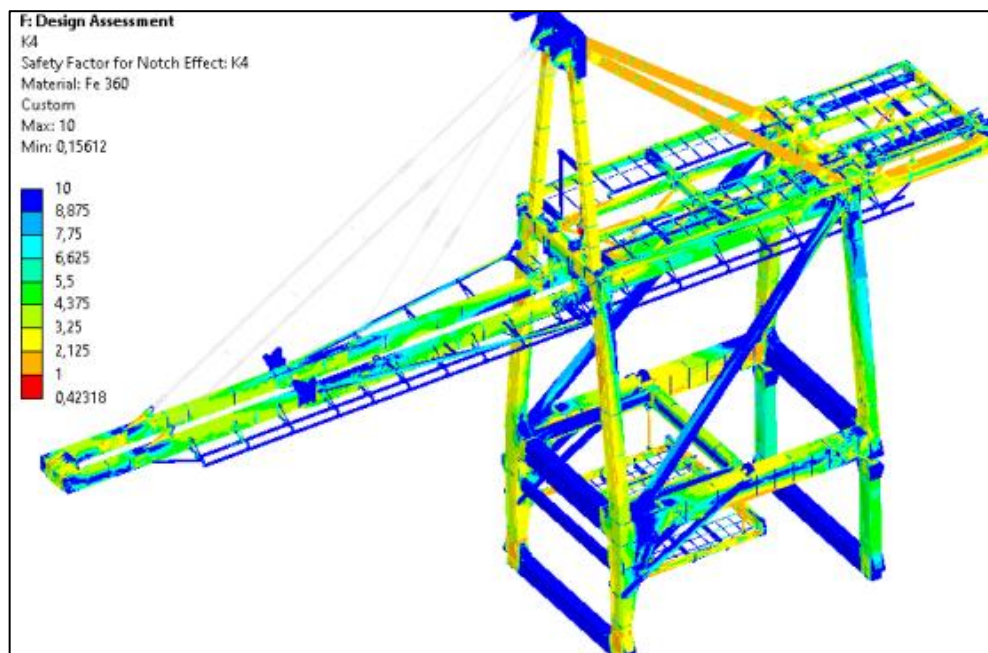
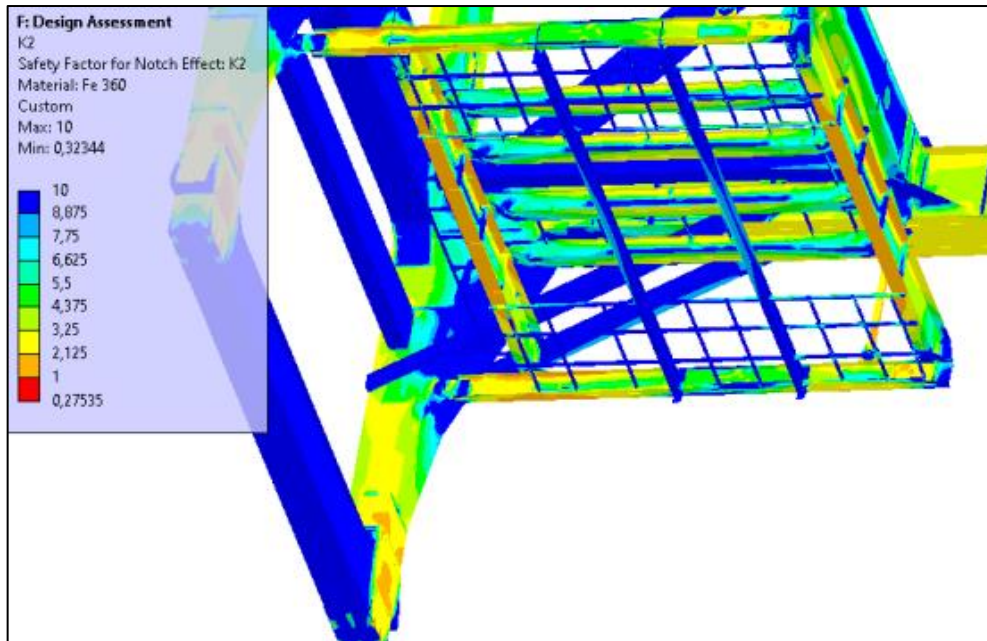
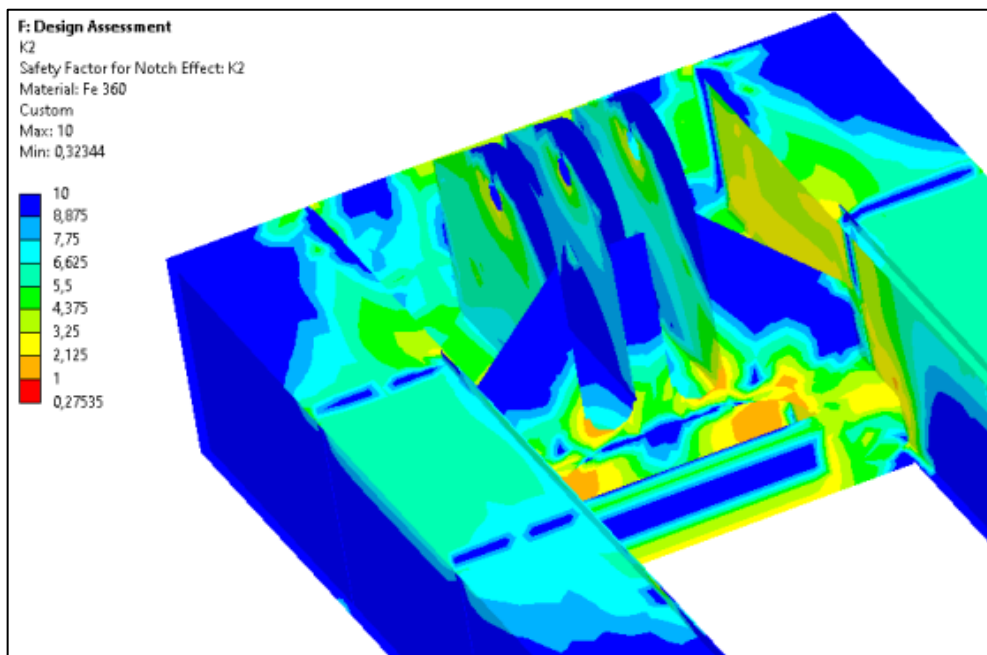


Figura 33 – Análise fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)



**Figura 34 – Análise fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 35 – Análise Fadiga. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

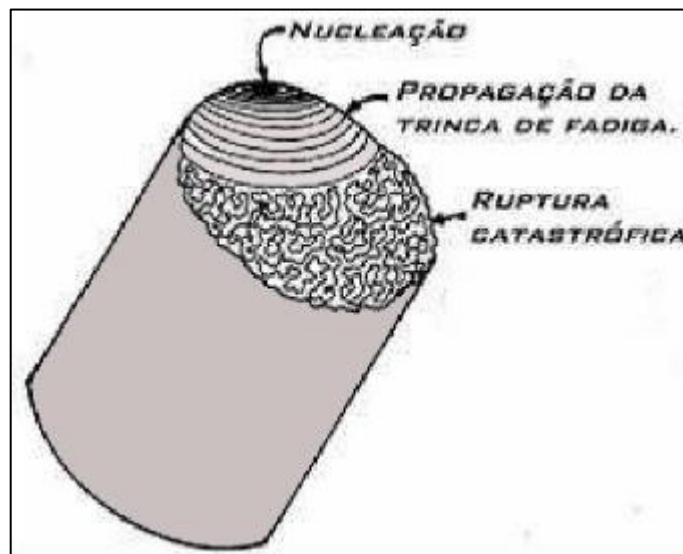
Conforme apresentado, o fator de segurança a fadiga é superior a 1, indicando que a estrutura reforçada não apresenta pontos reprovados a fadiga, dessa forma, a estrutura está apta a operar, porém sua vida superior a 30 anos nos leva a uma nova avaliação geral sobre a estrutura em questão, envolvendo a fragilidade de estruturas que sofrem há anos danos devidos aos diversos ciclos operacionais.

A formação de trincas por fadiga é um processo que pode ocorrer mesmo quando as tensões aplicadas são inferiores ao limite admissível do material. Esse fenômeno é explicado por uma combinação de dano acumulativo e fadiga de baixa tensão.

A fadiga de baixa tensão refere-se ao desgaste que ocorre quando a estrutura é submetida repetidamente a tensões cíclicas que, embora estejam abaixo da resistência ao escoamento do material, ainda são suficientes para causar dano ao longo do tempo. Essas tensões repetitivas, podem induzir a nucleação de trincas em áreas de concentração de tensão, como soldas, entalhes, poros, inclusões, rugosidades, entre outros.

À medida que esses ciclos de tensão são aplicados, ocorre o fenômeno de dano acumulativo, onde cada ciclo de carga contribui com uma pequena fração de dano. Embora o impacto de cada ciclo individual seja mínimo, o efeito cumulativo ao longo de um grande número de ciclos resulta em um desgaste progressivo.

Ao longo do tempo, mesmo tensões cíclicas baixas podem causar a iniciação e propagação de trincas, que se propagam com cada ciclo adicional. Este processo é insidioso, pois as trincas podem permanecer imperceptíveis até atingirem um tamanho crítico, levando a uma falha súbita e inesperada.



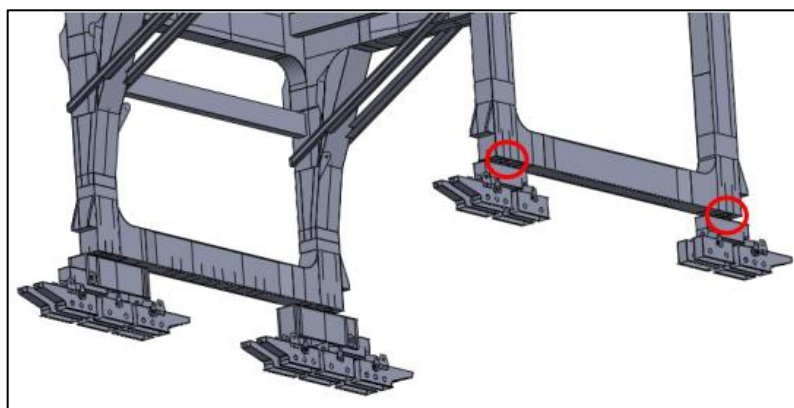
**Figura 36 – Ilustração falha por fadiga. (fonte: Inspeção Equipto, 2014 Disponível em: <  
<https://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/falha-por-fadiga.html>>. Acesso em: 16 Out 2024)**

Tal fato nos leva considerar o fato de que a estrutura completa do Descarregador de navios em questão deve receber um tratamento especial, e ser planejado sua desmontagem, podendo no máximo tais reforços ampliarem sua utilização mediante a combinação com inspeções periódicas antes de tal fato.

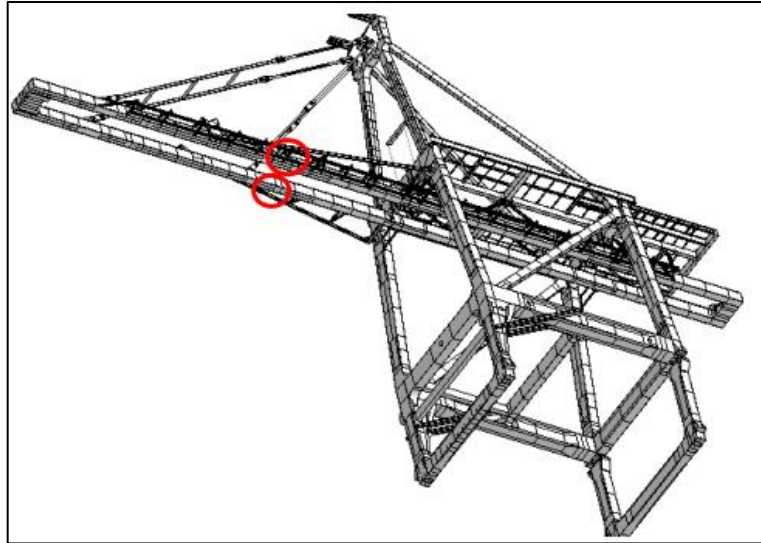
## 2.4 Solução

Através do estudo realizado, conseguimos identificar a melhor opção para tratar as inconformidades identificadas, porém tais ações não são soluções permanentes para a máquina. A estrutura, que já se encontra fadigada, necessita ser desmontada, e enquanto sua desmobilização não é programada, a combinação de reforços e inspeções darão sobrevida ao equipamento.

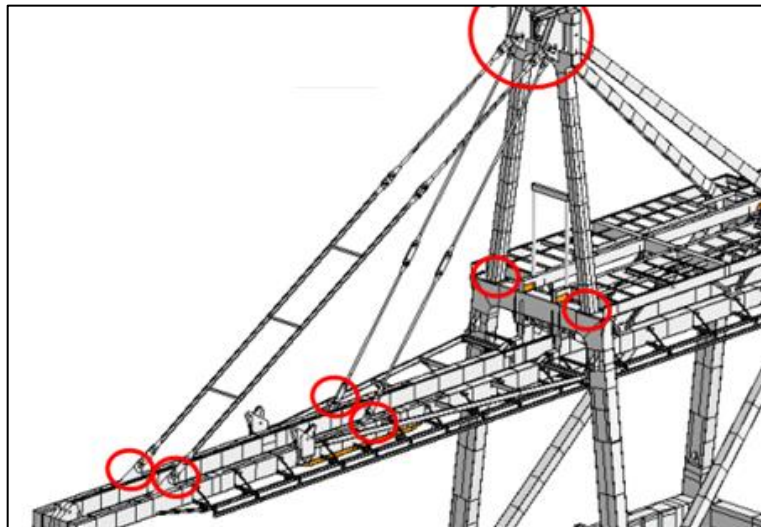
Os reforços foram apresentados nos itens anteriores e as inspeções sugeridas foram determinadas em locais conforme imagens abaixo a partir dos resultados do estudo, onde qualquer anomalia identificada deve ser prontamente solucionada.



**Figura 37 – Inspeção nos blocos das rótulas dos trucks e regiões adjacentes. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 38 – Inspeção nas almas do caixão e regiões adjacentes. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**



**Figura 39 – Pontos críticos de sustentação da lança móvel. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)**

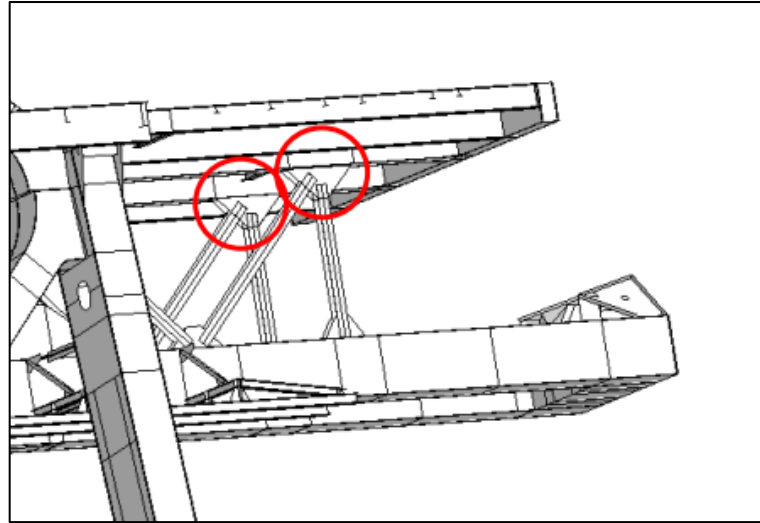


Figura 40 – Locais de alta tensão atuante. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

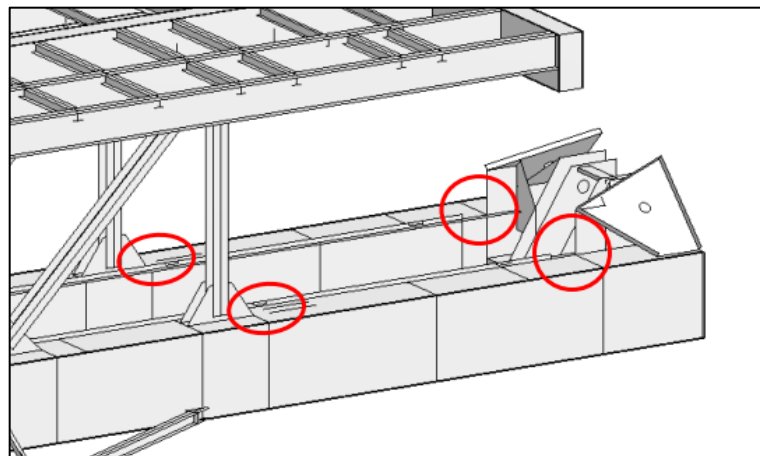


Figura 41 – Locais de alta tensão atuante. (Fonte: Relatório interno de empresa de engenharia, 2024)

### 3. CONCLUSÃO

A avaliação estrutural de descarregadores de navios tem passado por uma significativa evolução ao longo dos anos. Com avanços tecnológicos e métodos de análise mais sofisticados, tornou-se possível obter uma compreensão mais detalhada do comportamento estrutural desses equipamentos e garantir sua segurança operacional.

O estudo em questão mostrou a importância dos elementos finitos para a análise da condição atual do equipamento, considerando perdas por corrosão. Verificou-se no modelo computacional diversas inconformidades as tensões admissíveis de norma estabelecidos. O estudo também destacou o impacto da fadiga, tanto pela análise quanto pela quantidade de

ciclos ao longo tempo de utilização. Dessa forma, demonstrou que a máquina necessita ser desmontada e que os reforços e inspeções periódicas possibilitam continuar sua operação até o momento de sua desmobilização.

#### 4. REFERÊNCIAS

ROSA, Edison. *Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da fratura e fadiga*. Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto 2002.

SILVA, Thais Fernandes Ferreira da. *Análise de fadiga de plataformas metálicas fixas*. 2024. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9642/1/monopoli10006899.pdf>>. Acesso em: 29 julho. 2024.

GIORDANI, E. J.; GUIMARÃES, V. A.; PINTO, T. B.; FERREIRA, I. Estudo dos mecanismos de nucleação de trincas por fadiga e fadiga-corrosão do aço inoxidável ASTM F 138 utilizado como biomaterial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Anais... [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <[https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs\\_pdf/pdf\\_300/tc301-107.pdf](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_300/tc301-107.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2024.

VALLE, Amanda Moreira; OLIVEIRA, Ana Claudia Camargos Rotondo de; CARAZZAI, Érica Rani. *Análise de fadiga em ligações soldadas: ênfase na modelagem numérica*. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, 2017. Disponível em: <[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8042/1/CT\\_COECI\\_2017\\_1\\_01.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8042/1/CT_COECI_2017_1_01.pdf)>. Acesso em: 06 ago. 2024.

ANNUZZI, André Perez. *Um estudo sobre modelos de acúmulo de dano em fadiga uniaxial*. 2011. Projeto de graduação —Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/2906/1/2011\\_AndrePerezJannuzzi.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/2906/1/2011_AndrePerezJannuzzi.pdf)>. Acesso em: 06 ago. 2024.

ANSYS Inc. *ANSYS Workbench* [Software]. versão 2024. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024. Disponível em: <https://www.ansys.com>. Acesso em: 24 set. 2024

SURESH, S. *Fatigue of Materials*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998

CAMPBELL, F. C. *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. Materials Park: ASM International, 2012

FEM (Federation Europeenne de la Manutention). *Rules for the design of hoisting appliances*. Section I. Frankfurt: FEM, 1998

FEM (Federation Europeenne de la Manutention). *Rules for the design of mobile equipment for continuous handling of bulk materials*. Section II. Frankfurt: FEM, 1997

GUINDASTES BRASIL. A invenção do guindaste: conheça essa história. Guindastes Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.guindastesbrasil.com.br/a-invencao-do-guindaste-conheca-essa-historia/>. Acesso em: 06 ago. 2024.

POLIFITEMA. O papel do guindaste na elevação e movimentação de carga. Polifitema, [ano de publicação, se disponível]. Disponível em: <https://www.polifitema.com.br/o-papel-do-guindaste-na-elevacao-e-movimentacao-de-carga/>. Acesso em: 05 ago. 2024.

TRANS.INFO. Shipping container: the history of a simple box that changed the world. Trans.info, [s.d.]. Disponível em: <https://trans.info/en/shipping-container-the-history-of-a-simple-box-that-changed-the-world-236664>. Acesso em: 06 ago. 2024.

SERRAMETAL. Resistência à corrosão nos aços. Disponível em: <https://serrametal.com.br/resistencia-a-corrosao-nos-acos/>. Acesso em: 06 ago. 2024.