



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE CORRENTES DE ELOS PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

VINICIUS COSTA PEREIRA

São Luís

2024

VINICIUS COSTA PEREIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE CORRENTES DE ELOS PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Mecânica como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof^a: Dr. Dalmo Inacio Galdêz Costa.

São Luís

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Costa Pereira, Vinicius.

ANÁLISE ESTRUTURAL DE CORRENTES DE ELOS PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS / Vinicius Costa Pereira. - 2025.

43 p.

Orientador(a): Dr. Dalmo Inacio Galdêz Costa.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2025.

1. Correntes de Elos. 2. Atracação. 3. Modelagem
Computacional. I. Inacio Galdêz Costa, Dr. Dalmo. II.
Título.

VINICIUS COSTA PEREIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE CORRENTES DE ELOS PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho aprovado. São Luís – MA ____ de ____ 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Orientador – UFMA/Orientador

Prof. Dr. 1º Membro da Banca – UFMA/Engenharia Mecânica

Prof. Dr. 2º Membro da Banca – UFMA/Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

A Deus por ter me concedido o dom da vida e aos meus pais por serem as pessoas mais essenciais na minha vida, sempre me apoiando e concedendo suporte desde o início.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por seu infinito amor e proteção. Pela minha vida e a das pessoas ao meu redor.

Aos meus pais, José Andrelino e Marilaque Miranda, por todo amor, carinho, dedicação, ensinamentos e pelos sacrifícios feitos para que eu tivesse as condições necessárias para perseguir meus sonhos.

Aos meus irmãos, Vitor e Sarah por seu total apoio para que eu concluísse este curso.

A minha namorada Nádia Lypp por acreditar em mim e me incentivar a seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos amigos da universidade, em especial a Silas Moura, Victor Saraiva, Marcos Vinícios, Robson Leonarth, Davi Ávela, Gleydson Carlos, Lucas Carvalho, Estephane Ferreira, Ana Julia, João Victor, Willame Júnior, João Marcos e a tantos outros que me auxiliaram até aqui.

Aos amigos da igreja, Jedaias Rodrigues, Marcos Carvalho, Ithalo Almeida, Lucas Eduardo e Josiel Junior que sempre me aconselharam a nunca desistir.

Aos amigos de trajetória, Wanderson Henrique, Christiana Fontenele, Rhyan Jackone, Kaio Igor, Mikeyas Duque, Gabriel Rodrigues, Felipe Feitosa, Wylker Silva, Igor Alcantara, Mateus Prates, Erick Miranda, Marcos André, Danilo Oliveira, Carlos Prates, Thaumaturgo Santos, Victorya Sousa, Carlos Roberth, Rodrigo Sousa, Cassio Santos, Vitoria Dantas, Ana Vitória, Edson Oliveira, Lucas Carvalho, por sempre me incentivarem a crescer como pessoa.

Aos mestres Marcio Barbosa e Rildo Paiva, em adição aos demais companheiros do Jiu-Jitsu, pela a disciplina e por todos os conhecimentos adquiridos.

A meu professor orientador Dalmo Inacio Galdêz Costa pelo suporte, atenção e dedicação durante essa jornada.

Aos demais professores e profissionais da instituição que dedicaram seus tempos em transmitir os conhecimentos.

“Se você não é uma força formidável,
não há moralidade no seu autocontrole”

Jordan B. Peterson

RESUMO

As operações industriais geralmente demandam a movimentação de cargas, unir materiais ou erguer equipamentos. Na indústria portuária não é diferente. É fundamental a aplicação de meios de elevação com atividade a partir do solo, tendo em vista as grandes cargas transportadas pelas embarcações. Muitos são os aparatos necessários para a progressão das várias atividades dentro de um cais, um exemplo de material essencial para a movimentação de cargas são as correntes de elos. Essa corrente representa um tipo de produto utilizado para diversos fins, capaz de suportar elevadas cargas, e por isso, muito utilizado em processos industriais, como etapas de içamento e transporte de cargas pesadas. Uma de suas finalidades é a sustentação de diversos defensores marítimos, que por sua vez, têm a função de impedir o choque em atracagens. O impacto aplicado no contato entre defesa e a embarcação em certas condições provoca tração na corrente, o que pode gerar desalinhamento dos defensores marítimos. Dessa forma, a metodologia deste trabalho envolve um estudo dos aspectos relacionados à atracagem das embarcações em portos, visando a análise das condições geradas nas correntes de elos do sistema quando submetidas a diversas cargas. A realização e avaliação dos dados será produzida a partir de sistemas de modelagem computacional considerando fatores como a resistência dos materiais, capacidade de absorção de forças, a eficiência operacional e dimensionamento dos componentes.

Palavras-chave: Correntes de elos, Atracação, Modelagem Computacional.

ABSTRACT

Industrial operations generally require moving loads, tying materials or lifting equipment. The port industry is no different. It is essential to use lifting equipment that can be operated from the ground, given the large loads transported by vessels. Many devices are required for the progress of various activities on a dock. One example of an essential material for moving loads is link chains. This type of chain is a type of product used for various purposes, capable of withstanding high loads, and is therefore widely used in industrial processes, such as lifting and transporting heavy loads. One of its purposes is to support various maritime fenders, which in turn have the function of preventing collisions during docking. The impact applied in the contact between the fender and the vessel under certain conditions causes traction on the chain, which can cause misalignment of the maritime fenders. Thus, the methodology of this work involves a study of aspects related to the docking of vessels in ports, aiming at the analysis of the conditions generated in the system's link chains when subjected to various loads. The data will be produced and evaluated using computer modeling systems considering factors such as material resistance, force absorption capacity, operational efficiency and component sizing.

Keywords: Link chains, Berthing, Computational Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Defensas marítimas e cabeços de amarração.	14
Figura 2 - Defensas para proteção de navios.	15
Figura 3 - Defesa cilíndrica.	16
Figura 4 - Defesa cônica.	16
Figura 5 - Defensas tipo célula.	17
Figura 6 - Defensas pneumáticas com correntes e pneus.	18
Figura 7 - Defensas Flutuante de Espuma.	18
Figura 8 - Eficiência de vários tipos de defensas.	19
Figura 9 - Correntes usadas no controle das defensas.	22
Figura 10 - Diagrama de forças em corrente de elos: a) Demonstração das cargas e ponto de impacto entre os elos; b) Modelo dinâmico equivalente.	25
Figura 11 - Diagrama de forças de um elo redondo na corrente: a) Geometria do elo redondo; b) Diagrama de forças simplificado.	26
Figura 12 - Diagrama de deformações de indentação local na corrente de elos redondos.	28
Figura 13 - Defensas de células CSS usadas no Porto de Itaquí.	30
Figura 14 - Especificação das dimensões aplicadas.	30
Figura 15 - Discretização da análise: a) Malha da corrente com 20 mm de diâmetro; b) Visão em corte dos elos das extremidades; c) Visão em corte do elo que conecta as extremidades.	32
Figura 16 - Modelo das condições de contorno aplicadas nos elos para o diâmetro de 20 mm.	33
Figura 17 - Vista isométrica das tensões geradas com coeficiente de segurança de carga 1:1 em corrente de 60 mm.	34
Figura 18 - Tensões geradas na porção reta com coeficiente de segurança de carga 1:1 em corrente de 60 mm.	35
Figura 19 - Deformações geradas com coeficiente de segurança 8:1 em corrente de 20 mm: a) Vista em corte axial a carga; b) Ponto máximo de deformação; c) Vista das deformações na porção reta.	38
Figura 20 - Resultados do safety factor para corrente de 50 mm com um coeficiente de segurança de carga de 12:1: a) Em todo o elo central; b) Somente na porção reta do elo.	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise das máximas tensões equivalentes de von Mises na porção reta, gerada pelo software ANSYS associada a resposta analítica, para todos os diâmetros, com coeficiente de segurança de carga de 4:1.	36
Gráfico 2 – Análise das máximas tensões equivalentes de von Mises, geradas pelo software ANSYS e associada a resposta analítica, para todos os coeficientes de segurança de carga, na corrente de elos com 30 mm.	37
Gráfico 3 - Análise dos mínimos fatores de segurança na porção reta, geradas pelo software ANSYS associada a resposta analítica, para todos os diâmetros, com coeficiente de segurança de carga de 4:1.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos elos e Cargas Mínimas de Ruptura (CMR).	30
Tabela 2 - Cargas aplicadas de acordo com o coeficiente de segurança e o diâmetro do elo.	31
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020.....	32
Tabela 4 - Resultado do número de nós e elementos para cada um dos diâmetros.	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1. DEFENSAS.....	14
3.1.1. Tipos de defensas	15
3.1.2. Eficiência das defensas.....	19
3.2. CORRENTES DE ELOS	20
3.2.1. Aplicação das correntes em defensas.....	22
3.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ...	23
3.4. CRITÉRIO DE FALHA	24
3.5. ANÁLISE DE TENSÕES NOS ELOS	25
4. METODOLOGIA.....	29
4.1. CONFIGURAÇÕES DO ESTUDO	30
4.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES.....	34
5.2. DEFORMAÇÕES ELÁSTICA DE VON MISES.....	37
5.3. FATOR DE SEGURANÇA	38
6. CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica passa por desafios que abrangem a necessidade de otimização de seus processos, seja por meio do desenvolvimento tecnológico, seja pelo aumento da produtividade, eliminação de desperdícios, entre outros fatores. A partir da década de 1980 que as pesquisas associadas ao processo produtivo foram intensificadas, gerando ganhos significativos sobre os métodos tradicionais até então utilizados. Por outro lado, as pesquisas foram além e há uma consequente disseminação do "*efficiency seeking*", ou seja, a busca pela eficiência onde quer que ela esteja, tornando-se inerente à gestão das empresas (VARTANIAN e MCDONALD, 2016).

Na indústria portuária é indispensável a utilização de meios de elevação com operação a partir do solo, um exemplo de material vital para a movimentação de cargas são as correntes de elos. Essa corrente representa um tipo de produto utilizado para diversos fins, capaz de suportar peso, e por isso, muito utilizado em processos industriais, como etapas de içamento e transporte de cargas pesadas (PICOLI e LENNAN, 2022). Segundo a JB Academy (s.d.), as correntes são fabricadas em diversas formas e qualidades. Primeiramente os elos são dobrados e depois soldados. Posteriormente é feito o tratamento térmico (correntes de grau) e ensaio de tração. Diversos testes são feitos durante e após a fabricação para que as correntes sejam certificadas. O passo de um elo é o seu comprimento interno. Somente correntes que tenham elos com passo igual a 3 vezes o seu diâmetro, podem ser utilizadas para movimentação e amarração de cargas. Esta regra se explica pelo fato de que correntes assim construídas, quando aplicadas em ângulos retos, os elos se apoiam nos elos vizinhos, evitando assim que a corrente se dobre.

A fabricação da corrente de elos soldados se dá a partir de aço inox ou carbono, materiais rígidos, garantindo durabilidade ao produto e a redução de danos quando exposto a ambientes diversos. Dos modelos disponíveis de correntes de elos soldados, o Grau 08 merece destaque. O gênero corrente de elos soldados faz parte de estudos associados ao Comitê Brasileiro de Materiais, Equipamentos e Estruturas Oceânicas, voltados para Indústria de Petróleo e Gás Natural da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (PICOLI e LENNAN, 2022).

O comitê ABNT/CB-050 é detentor de um acervo de estudos acerca das normas aplicáveis à fabricação e uso das correntes de elos soldados – Grau 08, destacando-se a norma ABNT ISO 3076:2012 (corrente de elos curtos para elevação de carga – Grau (08), não calibrada, para lingas de corrente) [Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2012], subsidiada pelas normas NBR 15516-1 (ABNT, 2015) ISO 7593 (ABNT, 1986) e normas europeias EN 818-2 e 4 (Arena Técnica, 2021), abordando técnicas de conformação mecânica, técnica, segurança, soldagem, revenimento, tratamento térmico, e ainda em razão de sua aplicação, envolvem um alto nível de complexidade, em detrimento às exigências normativas (PICOLI e LENNAN, 2022).

Além da aplicação de içamento e transporte de cargas, as correntes de elos têm utilização primordial em defensas marítimas. As defensas marítimas são tipos de equipamentos que garantem a segurança quando um navio ou barco encontra a estrutura de atracação. São fixadas na parede do cais por âncoras de aço inoxidável ou galvanizado e contam com correntes de segurança que permitem recuperá-las em situações de avarias. Além das defensas marítimas presentes nas instalações portuárias, a embarcação pode ter suas defensas para impedir colisões com outras embarcações e até estruturas portuárias (BORIN, 2023).

1.1.JUSTIFICATIVA

A falha de um elemento no conjunto da defesa, pode provocar avarias no casco dos navios, liberar cabos de aço altamente tensionados, colocando trabalhadores em perigo, ou causar um acidente ambiental. As correntes de elos dentro de uma defesa, além do papel de sustentar o equipamento, tem a função primordial de auxiliar na absorção de cargas quando tracionadas, acarretando em diversas tensões geradas nos elos. A falha do conjunto de correntes, devido a essas tensões, ocasiona o desalinhamento das defensas, a retirada do equipamento da parede do cais ou até avarias em sua estrutura. Isso ocasiona custos adicionais e pausas não programadas para a manutenção.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos as tensões geradas nas correntes de elos utilizadas em defensas marítimas ao sofrerem pequenas cargas, cargas de trabalho e cargas excessivas no processo de atracação de embarcações.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar um estudo bibliográfico sobre as características do processo de atracação, visando a aplicabilidade dos diferentes tipos de defensas marítimas, bem como a eficiência em cada aplicação;
- Detalhar os vários modelos de correntes de elos e simular numericamente as tensões sofridas quando utilizadas em defensas marítimas;
- Discorrer sobre a ação com diversas cargas, bem como suas possíveis falhas ou deformações;
- Exprimir uma análise dos resultados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. DEFENSAS

Um complexo portuário possui uma grande demanda de navios diariamente, sejam estes porta contentores, petroleiros e graneleiros. Ao chegar ao porto, essas embarcações são recebidas com segurança, para que não ocorram acidentes no momento da atracação. A atracação correta é realizada essencialmente por dois equipamentos: os cabrestantes ou cabeços, responsáveis por amarrar os cabos de aço e as cordas que prendem o navio ao cais ou píer; e as defensas, interface entre o navio e o berço. Esses equipamentos (Figura 1) são as principais e mais importantes barreiras de segurança para proteger as pessoas, embarcações e estruturas (NETO, 2019).

Figura 1 - Defensas marítimas e cabeços de amarração.



Fonte: BARONI, s.d.

A defesa marítima se assemelha a um para-choque, utilizado para absorver a energia do impacto no contato entre o cais e o navio atracado. A maioria desses sistemas usam unidades de borracha, ar ou espumas especiais que atuam como mola para absorver a força cinética da embarcação. Assim, a energia cinética intrínseca do navio que está se aproximando para atracar, é convertida em energia potencial elástica. Conforme a mola se comprime, forças crescentes são transmitidas a outras partes do sistema de defesa – painéis, âncoras, e correntes – e assim para o caminho de carga selecionado dentro das estruturas de suporte (NETO, 2019).

3.1.1. Tipos de defensas

Há uma ampla diversidade de defensores marítimos no mercado para qualquer tipologia e tamanho, dependendo das categorias e dos fabricantes. As salvaguardas aquáticas estão disponíveis conforme a circunstância específica de cada embarcadouro ou doca. Os modelos de defensas podem ser definidos como:

- Defensas de Proteção de Navios: Sua principal aplicação é em embarcações com dimensões menores visando a redução ou anulação de impactos na atracação no cais ou com outras embarcações. São produzidas de acordo com o tamanho da embarcação e o local que será fixada (Figura 2). Geralmente as defensas produzidas pelo processo de extrusão, são as mais usadas em qualquer parte da embarcação, mas ainda assim, existem diversos modos de produção para a proteção lateral das embarcações (CAETANO, 2022a).

Figura 2 - Defensas para proteção de navios.



Fonte: CAETANO, 2022a.

- Defensas Cilíndricas: Por ser bastante eficaz, econômico, de fácil montagem e mantimento, produzida no início da década de 30, é um modelo de defensas que não estabelece fixação direta ao cais, permanecendo unicamente presa por correntes ou barras (Figura 3). Tal propriedade admite o seu emprego em cais que apresentem empecilhos de montagem, especificamente por espaço reduzido. Podem ser empregadas em praticamente todos os modelos de cais, para a abeiramento de múltiplos modelos de navios, principalmente navios graneleiros, pesqueiros, de carga, ou de reboque (CAETANO, 2022a);

Figura 3 - Defesa cilíndrica.



Fonte: NAUTICEXPO, 2024.

- Defensas cônicas: Apresentam uma extraordinária atuação, com uma incomparável competência de concentração de carga por unidade de força de reação e uma fantástica disposição de captação de carga por unidade de peso. Por ter aplicação nas paredes do cais, a forma geométrica aceita uma elevada resposta às atuações de compressão, com diferentes ângulos de requerimento (Figura 4). Compõe, por estes motivos, uma exímia solução para diversos cais de atracamento de diversos modelos de embarcações, como navios de carga a granel ou embaladas, transporte de contêineres, embarcações de deslocamento de petróleo e gás. Na sua montagem, é empregado uma placa frontal metálica, acoplado na frente de choque com um material com grau de atrito reduzido (CAETANO, 2022a);

Figura 4 - Defesa cônica.



Fonte: NAUTICEXPO, 2024.

- Defensas tipo Célula ou Tambor: São defensas cilíndricas (Figura 5), flangeadas em seus extremos, operando axialmente. Mesmo com uma performance menor do que às defensas Modulares, proporcionam uma bela atuação, com uma extraordinária habilidade de assimilação de energia por unidade de força de reação e uma fantástica aptidão de captação de energia por unidade de peso. Além disso, tem-se uma alta durabilidade e baixa despesa de manutenção, sendo aplicada usualmente em cais de atracagem multifuncionais (CAETANO, 2022a);

Figura 5 - Defensas tipo célula.



Fonte: NAUTICEXPO, 2024.

- Defensas Pneumáticas: As defensas pneumáticas funcionam como um sistema mecânico de compressão de ar que amortecem impactos entre embarcações e estruturas marítimas (Figura 6). Feitas de borracha resistente à abrasão e preenchidas com ar de alta pressão, as defensas são anexas ao cais por correntes devido à sua baixa densidade. Suas propriedades elásticas permitem excelente absorção de energia, garantindo alta performance em diferentes condições. Com fácil esvaziamento, essas defensas são de simples realocação, além de apresentarem instalação e manutenção pouco complexas, oferecendo ótimo custo-benefício (DESIGNER, 2014);

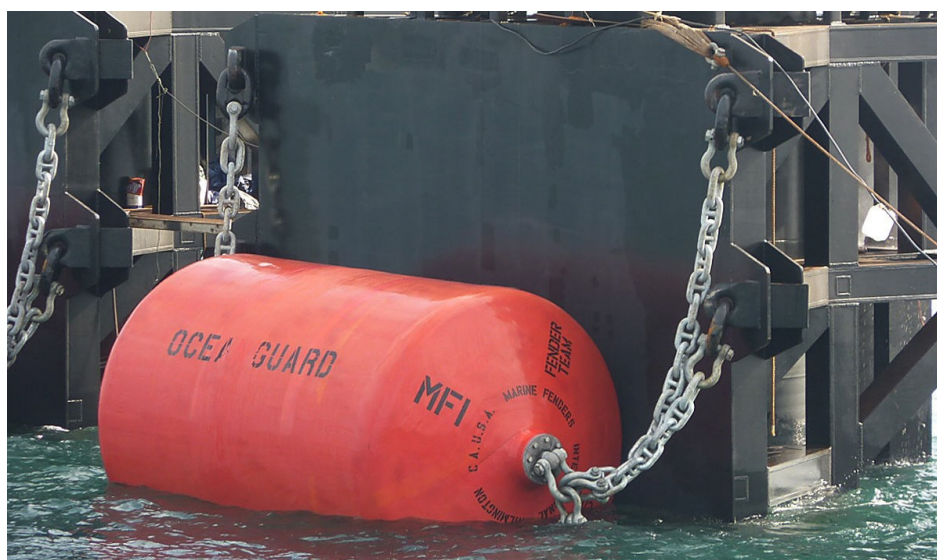
Figura 6 - Defensas pneumáticas com correntes e pneus.



Fonte: DESIGNER, 2014.

- Defensas Flutuantes de Espuma: Estabelecida como uma opção para quase todos os modelos apresentados, tendo ou não mobilidade. Análoga às pneumáticas, este modelo exibe um privilégio incomparável: ainda que danificado com rasgaduras ou furos, permanece a exercer o seu papel sem transtornos (Figura 7). São especialmente empregues para atracação entre embarcações e navios com facilidade de problemas causados por pressões elevadas no casco (CAETANO, 2022a);

Figura 7 - Defensas Flutuante de Espuma.



Fonte: NAUTICEXPO, 2024.

3.1.2. Eficiência das defensas

Os vários tipos de defensas apresentam características técnicas muito diferenciadas. Uma característica funcional muito importante é a eficiência da defesa (E_{fFR}); esta característica define-se como a energia absorvida ($kN.m$) por unidade de força de reação (kN). É variável com o modelo de proteção de acordo com sua geometria, dimensões e tipo de borracha utilizada. A eficiência de uma defesa (E_{FP}) pode ser também avaliada por um outro aspecto: pela energia absorvida ($kN.m$) por unidade de peso de borracha (P , kg) (CAETANO, 2022b). Na Figura 8 são indicadas as eficiências de diversos tipos de defensas.

Figura 8 - Eficiência de vários tipos de defensas.

Tipo de defesa e dimensões	Peso, Kg	Eficiência	
		E_{fFR} (10)	E_{FP} (11)
Cônica - 1000x1600x875 (H-D-d), mm ⁽¹⁾	1114	0,525	0,288
Célula (ou tambor) - 1450x1820 (H-D), mm ⁽²⁾	2350	0,640	0,189
Elementos (ou "T") - 1000x1600x1002x507 (L-H-B), mm ⁽²⁾	1114	0,739	0,326
V (ou Arco), 1000x1800x800x1000 (H-W-w-L), mm ⁽³⁾	1397	0,421	0,163
Cilíndrica, 1400x700x1000 (D-d-L), mm ⁽⁴⁾	1386	0,286	0,159
Roda giratória 2550x895 (D-F), mm ⁽⁵⁾	–	0,170	–
Pneus 2900x1020 (D-F), mm ⁽⁵⁾	–	0,677	–
Flutuante, Pneumática 2000x3000 (D-L), mm, Pressão=189 kN/m ² ⁽⁶⁾	550 ⁽⁹⁾	0,367	0,589
Flutuante, Pneumática 2000x3000 (D-L), mm, Pressão=240 kN/m ²	550 ⁽⁹⁾	0,376	0,767
Flutuante, Hidropneumática 2000x6000 (D-L), mm ^{(6) (7)}	–	0,259	–
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=172 kN/m ² ⁽⁶⁾	1397 ⁽⁹⁾	0,537	0,387
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=224 kN/m ² ⁽⁶⁾	1397 ⁽⁹⁾	0,537	0,503
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=327 kN/m ² ⁽⁶⁾	1397 ⁽⁹⁾	0,537	0,734
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=447 kN/m ² ⁽⁶⁾	1397 ⁽⁹⁾	0,537	1,01
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=172 kN/m ² ⁽⁶⁾ (celular mais macio)	2566 ⁽⁹⁾	0,437	0,196
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=224 kN/m ² ⁽⁶⁾ (celular mais macio)	2566 ⁽⁹⁾	0,437	0,255
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=327 kN/m ² ⁽⁶⁾ (celular mais macio)	2566 ⁽⁹⁾	0,437	0,373
Flutuante, Enchimento celular 2000x4000 (D-L), mm, Pressão=447 kN/m ² ⁽⁶⁾ (celular mais macio)	2566 ⁽⁹⁾	0,437	0,510
Donut (em material celular) 4060x2286 (D-d _{ext}), mm ⁽⁸⁾	–	0,201	–

Fonte: CAETANO, 2022b.

Geralmente todos os modelos de defensas podem ser empregados em todos os estilos de cais (estruturas maciças, estacas, etc.), para a acostagem de todos os modelos de navios (carga, graneleiros, tanques de LPG, passageiros, carga, etc.). Não obstante, na triagem da defesa devem ser estimados outras condições, tais como:

- O valor das defensas;
- Montagem e valor do sistema;
- As despesas de manutenção do sistema de defensas;
- A resistência das defensas.

Tais condições podem revelar por si só o emprego de um determinado modelo de defensas, em sacrifício de outros modelos com melhor performance. Em determinadas situações são aplicadas combinações de defensas, de forma a aumentar a disposição de captação de energia (CAETANO, 2022b).

3.2. CORRENTES DE ELOS

As correntes de elos soldados são componentes extremamente versáteis, garantindo excelente flexibilidade, robustez e adequação para diversas finalidades. São extremamente empregados em tarefas como elevação de equipamentos, transporte e fixação de cargas, bem como em aplicações na linha pet e em artefatos variados. Formadas por elos conectados de forma contínua, essas correntes frequentemente superam os cabos de aço ocasionais em desempenho, proporcionando maior praticidade e confiabilidade nas operações (PICOLI e LENNAN, 2022).

As correntes de elos são produzidas a partir de aços com baixo teor de carbono ou ligas de aço com os seus elos comumente soldados, o que assegura uma resistência mais elevada. O acabamento superficial é feito com variados métodos, como o polimento, galvanização, oxidação preta, emborrachamento, além da possibilidade de serem tratadas termicamente com têmpera, revenimento ou cementação. Há também a produção de correntes em aço inox, em diferentes escalas, exercendo atividades em ambientes com altos índices de corrosão ou que requerem um grau de higiene superior (YAMAMOTO, 2021).

Em grande parte das atividades industriais, há a necessidade de transportar volumes de materiais elevados, assegurar que equipamentos não se movam ou sustentar pesos consideráveis. É algo habitual em diversos ambientes corporativos, seja em trabalhos complexos ou simplesmente em fechar um portão. Para tais aplicabilidades são usadas correntes de ligas de aço, com tratamento térmico, para cumprir essas funções com segurança. Entretanto, conforme a atividade, devem

satisfazer regulamentos próprios como ISO 3076 (que visa atividades de içagem de cargas) e ISO 3077 (que foca no içar de cargas por talhas) (YAMAMOTO, 2021).

As correntes G08 são produtos fabricados a partir de aço liga (*alloy steel*), interligados em elos, permitindo maior capacidade em um diâmetro menor. O processo de fabricação deste item pode ser explicado por quatro etapas, conforme a ISO 3076 (ABNT, 2012):

- Transformação do aço em fio máquina por elos interligados, com 50% a mais de resistência comparada com as correntes convencionais, nos diâmetros de 6 até 32 mm;
- Durante curvatura e soldagem são controladas as dimensões do elo;
- Revenimento e têmpera realizados de maneira contínua em fornos de indução controlados por computador com amostragens regulares;
- O teste de carga é de 2,5 vezes a carga máxima de trabalho permitida, e testes de ruptura com base em quatro vezes a sua carga de trabalho (PICOLI e LENNAN, 2022).

Para propósitos gerais, encontram-se as correntes fabricadas com base em aços com teor de carbono reduzido, as quais não são adequadas para atividades de içamento ou ancoragem de cargas. A versatilidade desse modelo gera bastante uso em diversas áreas de atuação: delimitação de zonas, atar objetos. Ainda assim, mesmo com toda essa multifuncionalidade, esse tipo de corrente também é normatizada e responde à ABNT NBR 15293, que garante atributos relativos à dimensão, resistência e acabamento. Em suma, há correntes não padronizadas, com aspectos de dimensão e resistência definidos pelo fabricante, as quais podem ter seus elos soldados (YAMAMOTO, 2021).

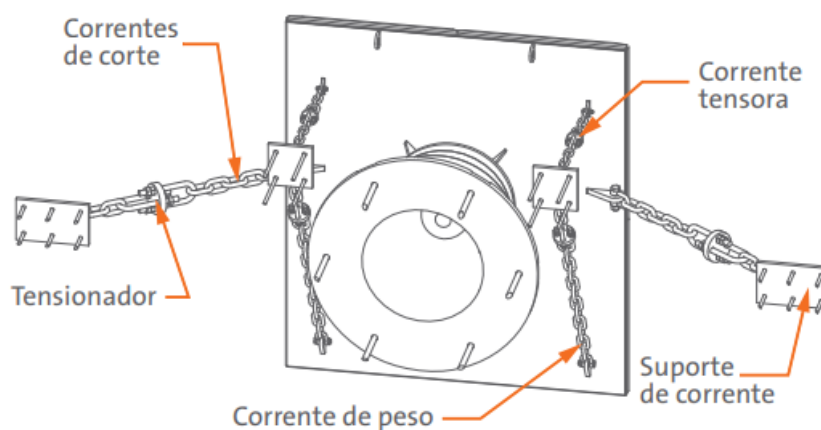
Essencialmente, as correntes apresentam uma variedade de modelos com capacidades que variam entre 50 kg e 50 toneladas. Por exemplo, no contexto de animais de estimação, são disponibilizadas opções como guias para cães, colares, mosquetões, guias com puxadores triangulares, entre outros. Todos esses acessórios visam proporcionar segurança e conforto, destacando-se como elementos fundamentais na interseção entre funcionalidade e bem-estar (PICOLI e LENNAN, 2022). Existem vários tipos de correntes de elo, cada um projetado para atender a requisitos específicos. Abaixo, estão alguns dos tipos mais comuns:

- Correntes com elos curtos;
- Correntes com elos longos;
- corrente com elos curtos e torcidos;
- Corrente calibrada com alta precisão;
- Corrente emborrachada (para compensação em elevadores);
- Corrente soldada para cadeado.

3.2.1. Aplicação das correntes em defensas

As correntes são empregadas para conter o movimento da defesa no decorrer do encontro com a embarcação e para impedir movimentos exagerados do painel. Elas podem dar auxílio na sustentação dos painéis e também elevar as deflexões da borracha e a captação da energia dos impactos durante a atracagem (SHIBATA, 2019).

Figura 9 - Correntes usadas no controle das defensas.



Fonte: SHIBATA, 2019.

Na Figura 9 as correntes de corte são aplicadas para restringir o deslocamento horizontal, enquanto as correntes de peso contêm o movimento vertical e moderam a inclinação. As correntes tensoras atuam em união com as correntes de peso para conter a angulação, além de favorecer a eficiência da defesa durante os choques advindos por baixo. Os suportes são projetados para acomodar-se em estruturas de aço ou concreto, devendo ser especialmente mais resistente do que o elemento mais

fraco do conjunto, em adição da possibilidade da corrente rotacionar em relação ao seu arco. Os suportes de fixação podem ser ancorados, aparafusados, soldados ou fundidos na estrutura, dependendo exclusivamente do projeto, assim como os tensionadores que restringem o afrouxamento das correntes por conta das tolerâncias ou desgaste (SHIBATA, 2019).

3.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Nessa nova era, a informação e o conhecimento assumem grande importância na preparação dos indivíduos e empresas ao entendimento e à adaptação à realidade. A simulação computacional é uma das ferramentas que podem ser utilizadas para a aquisição, organização e construção do conhecimento e da visão sistêmica. Esse recurso favorece a educação e o treinamento das pessoas e, conseqüentemente, sua adaptação às rápidas mudanças de nossa sociedade [12].

Modelagem e simulação podem ser usadas para prever o escoamento do material, análise de tensões, deformações e distribuição de temperatura, prever possíveis defeitos e falhas, melhorar a qualidade e a complexidade das peças, além de reduzir os custos. Através dela, pode-se adquirir a capacidade de identificar, formular e solucionar problemas ligados às atividades de projeto, operação e gerenciamento do trabalho e de sistemas de produção de bens e/ou serviços. Para uma avaliação estrutural em que se faz uso de recursos computacionais, pode-se utilizar o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite uma expressiva avaliação acerca de projetos e produtos (MAIA, 2022).

O Método dos Elementos Finitos se baseia na discretização do domínio de aplicação das equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento físico dos materiais através de subdomínios de tamanho finito. Cada elemento é constituído por pontos nodais nos quais são definidas as variáveis físicas, sendo o valor destas variáveis interpolado entre os pontos nodais. Inicialmente desenvolvido para sistemas lineares, com o aumento da capacidade de memória e velocidade, o Método dos Elementos Finitos pode ser empregado para os sistemas não-lineares, como, por exemplo, a plasticidade, nos quais as tensões não são proporcionais à deformação (ZANELLA, 2017).

Com o MEF, os problemas da engenharia, descritos por equações diferenciais parciais, são discretizados e então convertidos em equações algébricas. Esse método permite, desta forma, lidar com problemas envolvendo condições de estado estacionário ou transiente, em regiões lineares e não-lineares, em uma, duas ou três dimensões e para formas mais complexas, permitindo obter informações sobre o fluxo do material durante o processo e sobre suas deformações, tensões e temperaturas da peça (SOUZA, 2011).

Softwares mais recentes são capazes de introduzir parâmetros operacionais até então não disponíveis na simulação, tais como: tipo do equipamento (prensa hidráulica, martelos, laminadores, etc.) tipo da aplicação do carregamento (intermitente ou contínua) e a simulação de final de processamento, com o alívio de carregamento é a retirada das ferramentas, entre outras. Somem-se a isto as facilidades incluídas no pós-processamento com inúmeras ferramentas de análise de resultados (SOUZA, 2011).

3.4. CRITÉRIO DE FALHA

A avaliação das tensões e deformações é realizada conforme as propriedades do material. Os materiais apresentam características diferentes entre si, onde cada material pode vir a falhar de uma maneira distinta, dependendo dessas características. Estas definem os materiais como frágeis ou dúcteis, conforme o comportamento destes materiais. O material é considerado frágil quando se rompe, à tração ou compressão, ainda na fase elástica, ou seja, a falha ocorre por ruptura sem que haja escoamento. O material dúctil, por outro lado, suporta grandes deformações antes de romper, isto é, a falha acontece por escoamento após a ocorrência de deformações plásticas. Podem ser citadas quatro teorias de falha são: critério de Rankine, critério de Mohr, critério de Tresca e critério de Von Mises, sendo as duas últimas aplicáveis a materiais dúcteis e as duas primeiras a materiais frágeis (SOUZA, 2021).

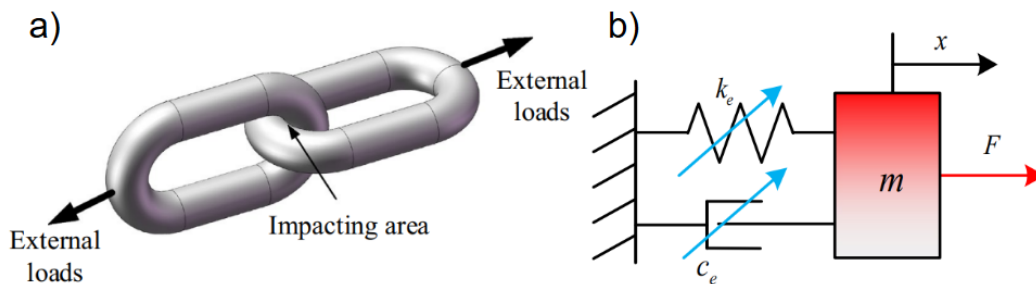
O presente estudo utilizará o critério de von Mises, pois a estrutura a ser analisada é composta por aço (material dúctil), além de apresentar uma melhor correlação de simulação numérica com dados experimentais. Nessa teoria, são considerados conceitos de energia de distorção de um dado elemento, isto é, a energia associada a alterações na forma do elemento e não em seu volume. O critério

de von Mises afirma que “um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à alteração da forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, exceder a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração” (SOUSA, 2021).

3.5. ANÁLISE DE TENSÕES NOS ELOS

Uma corrente de elos redondos sujeita a cargas na direção axial (Figura 10a) compõe um sistema viscoelástico não linear, o qual não sofrerá apenas deformação elástica linear, como também alteração plástica não linear e/ou por impacto (ZHANG et al., 2022).

Figura 10 - Diagrama de forças em corrente de elos: a) Demonstração das cargas e ponto de impacto entre os elos; b) Modelo dinâmico equivalente.



Fonte: ZHANG et al., 2022.

Como demonstrado na Figura 10b, a rigidez equivalente é modelada associando a rigidez linear e a rigidez de contato não linear, o amortecimento equivalente reflete a dissipação de energia do sistema no contato e a massa total dos elos é simulada com uma massa concentrada. Logo, tem-se a equação fundamental (1) descrita como:

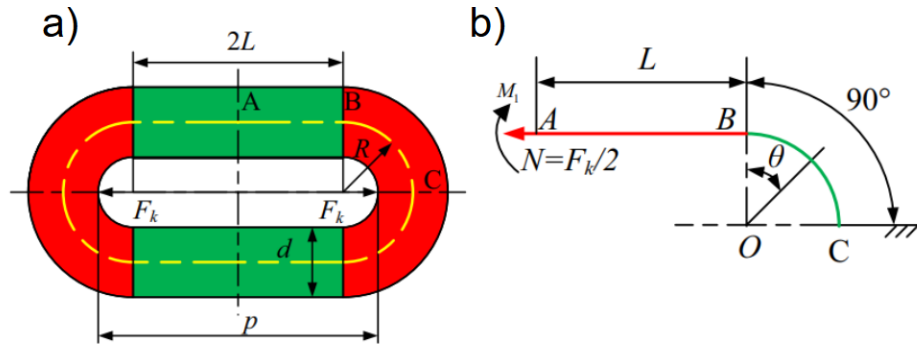
$$F = F_m + F_k + F_c \quad (1)$$

onde, F_m é a força de inércia, F_k é referente a força elástica e F_c é a força dissipada (ZHANG et al., 2022).

A análise assume que o contato entre dois elos ocorre em apenas um ponto e que, conseqüentemente, a pressão entre eles é concentrada neste ponto. Assim, como demonstrado na Figura 11a, a força elástica equivalente é igual a F_k , a qual se divide em duas parcelas. A força elástica linear é determinada pela alteração

proporcional à corrente (aplicando a teoria da deformação infinitesimal, tratando o material como homogêneo e isotrópico), enquanto a força elástica não linear resulta do contato entre os elos (ZHANG et al., 2022).

Figura 11 - Diagrama de forças de um elo redondo na corrente: a) Geometria do elo redondo; b) Diagrama de forças simplificado.



Fonte: ZHANG et al., 2022.

Em razão da deformação no trecho curvo BC, com a introdução de uma carga F , resultará em um momento de flexão M , uma força axial N e uma força de cisalhamento Q , agindo no segmento reto AB (Figura 11b). As forças e o momento são estipulados como:

$$\begin{cases} M = M_1 \\ N = \frac{F_k}{2} \\ Q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

As forças e o momento gerados na porção curva BC estão associados ao ângulo θ e podem ser expressos como:

$$\begin{cases} N_c = \frac{F_k}{2} \cos \theta \\ M_c = M_1 - \frac{F_k}{2} R (1 - \cos \theta) \\ Q_c = -\frac{F_k}{2} \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

A energia potencial total U é constituída pela energia potencial adquirida na parte reta (U_{AB}) e pela energia potencial na parcela curva (U_{BC}). Assim, a energia potencial total da corrente de elos redondos pode ser expressa como:

$$U = U_{AB} + U_{BC} = \int_0^L \left(\frac{N^2}{2EA_S} + \frac{M_1^2}{2EJ_1} \right) dx + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{M_C(\theta)^2}{2EJ_2} + \frac{N_C(\theta)^2}{2EA_S} + \frac{Q_C(\theta)^2}{2GA_S} \right) R d\theta \quad (4)$$

onde, E é o módulo de elasticidade, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ é o módulo de cisalhamento, μ é a razão de Poisson, A_S é a área da seção transversal, e os módulos de seção elástica dos segmentos reto (J_1) e curvo (J_2). Os módulos de seção elástica podem ser determinados como:

$$\begin{aligned} J_2 &= J_1 + \alpha^2 A_S \\ J_2 &= \frac{\pi d^4}{64} + \alpha^2 A_S \\ \alpha &= R - d^2 \left(8R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2R} \right)^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Uma vez que a geometria e a carga axial são apontadas como simétricas, a condição de deformação no ponto A é dada como:

$$\theta_A = \frac{\partial U}{\partial M_1(t)} \quad (6)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (6), o momento M é expresso como:

$$M_1 = \frac{(\pi-2)R^2 J_1 F_K}{4J_2 L + 2J_1 \pi R} = k_0 F_K \quad (7)$$

no qual, $k_0 = \frac{(\pi-2)R^2 J_1}{2LJ_2 + J_1 \pi R}$. Adicionando a Eq. (7) na Eq. (4), temos a energia potencial definida como:

$$U = \left(\frac{2k_0^2 L}{EJ_1} + \frac{L}{2EA_S} + \frac{R\pi}{8EA_S} + \frac{R\pi}{2GA_S} + \frac{R}{2EJ_2} \left(\frac{\pi}{2} (2k_0 - R)^2 + 2R(2k_0 - R) + \frac{R^2 \pi}{4} \right) \right) N(t)^2 \quad (8)$$

Assim, a deformação elástica linear ΔL do elo redondo pode ser dada como:

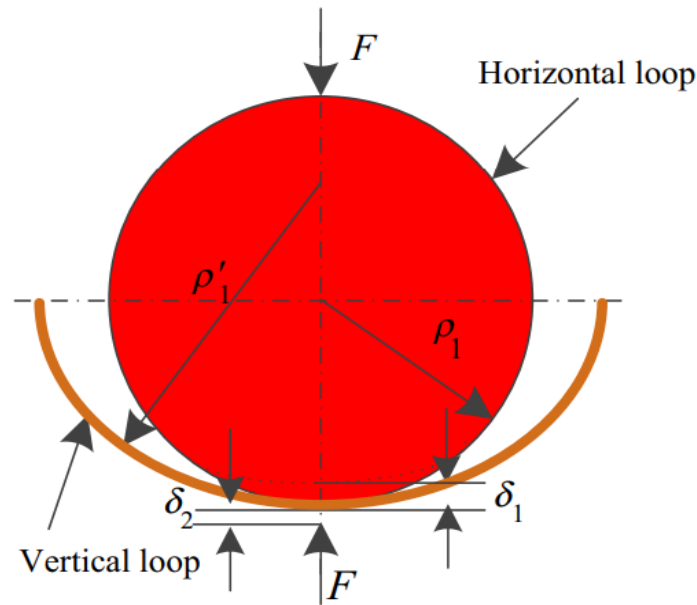
$$\Delta L = \frac{\partial U}{\partial N} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 \quad (9)$$

onde $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$ são definidos como:

$$\begin{cases} \Delta L_1 = \left(\frac{2k_0^2 L}{EJ_1} + \frac{L}{2EA_S} \right) F_k \\ \Delta L_2 = \left(\frac{R\pi}{8EA_S} + \frac{R\pi}{8GA_S} \right) F_k \\ \Delta L_3 = \frac{R}{2EJ_2} \left(\frac{\pi}{2} (2k_0 - R)^2 + 2R(2k_0 - R) + \frac{R^2\pi}{4} \right) F_k \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com Zhang et al., no caso da deformação elástica não linear por conta do contato, é utilizada como base a teoria do contato hertziano para derivar o vínculo entre a indentação e a força elástica equivalente. A indentação é induzida no contato entre os elos quando sujeitos a cargas axiais pesadas (Figura 12). O raio principal de curvaturas onde as porções curvas entram em contato são definidos como ρ_1 e ρ'_1 , respectivamente, assim como os outros raios principais de curvaturas do outro elo são definidos como ρ_2 e ρ'_2 .

Figura 12 - Diagrama de deformações de indentação local na corrente de elos redondos.



Fonte: ZHANG et al., 2022.

Portanto como os laços verticais e horizontais têm a mesma geometria, devido os elos terem a mesma geometria, a soma das curvaturas ρ é dada como:

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho'_1} + \frac{1}{\rho'_2} \right) = \frac{4R}{d(2R+d)} \\ \rho_1 = \rho_2 = \frac{d}{2} \\ \rho'_1 = \rho'_2 = - \left(R + \frac{d}{2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

A indentação local é admitida como círculos, e o raio é muito inferior do que o da curvatura no ponto de contato. Dessa forma, conforme a teoria de contato hertziana, o raio e a tensão máxima na área de contato σ_{max} podem ser expressos como:

$$\begin{cases} e = \left(\frac{3\pi F_k (k_1 + k_2)}{4\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \\ \sigma_{max} = \frac{3F_k}{2\pi e^2} \end{cases} \quad (12)$$

onde os fatores $k_1 = k_2 = \frac{(1-\mu^2)}{(\pi E)}$. De acordo com Norton (2013), para a concepção de um projeto, é necessário estabelecer um coeficiente de segurança N , definido como:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (13)$$

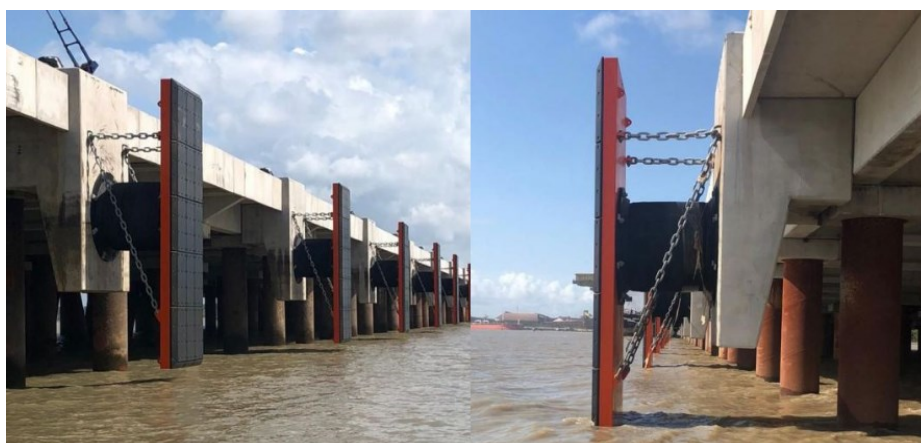
que decorre da relação entre a Resistência ao escoamento (S_y) e a tensão equivalente de von Mises (σ'). A tensão equivalente de von Mises é determinada como a tensão uniaxial de mesma proporção energética de tração que a combinação das tensões aplicadas em um objeto. Podendo ser definida para caso bidimensional como:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_y + \sigma_z)^2 + (\sigma_z + \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (14)$$

4. METODOLOGIA

No desenvolver deste trabalho, o objeto do estudo se caracteriza em analisar as tensões sofridas por correntes de elos quando são tracionadas no processo de atracação de embarcações. Para a produção do estudo, foi escolhida a defesa de modelo célula ou tambor devido aos esforços lineares sofridos pelas correntes. Como referência, foi usado os modelos da empresa Shibata Fender Team devido o modelo célula do grupo já ser empregado no Porto de Itaqui (Figura 13), nos terminais de granéis, localizados em São Luís do Maranhão.

Figura 13 - Defensas de células CSS usadas no Porto de Itaquí.



Fonte: SHIBATA, 2024.

4.1. CONFIGURAÇÕES DO ESTUDO

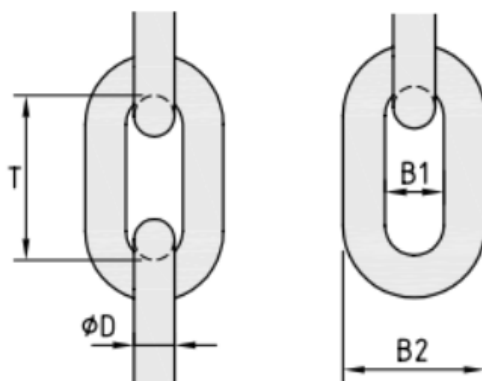
A modelagem foi realizada para diferentes diâmetros, com dimensões dos elos fornecidas pela própria empresa como demonstrado na Tabela 1 e apresentadas na Figura 14. Para cada geometria escolhida existe um *Minimum Breaking Load* (MBL) ou Carga Mínima de Ruptura, que consiste na mínima carga que leva o material à ruptura de acordo com as especificações da empresa.

Tabela 1 - Dimensões dos elos e Cargas Mínimas de Ruptura (CMR).

Ø D (mm)	T (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	CMR (kN)
20	80	28	68	264
30	120	42	102	566
50	200	70	170	1570
60	240	84	204	2260

Fonte: Adaptado de (SHIBATA, s.d.).

Figura 14 - Especificação das dimensões aplicadas.



Fonte: SHIBATA, s.d.

Em projetos com correntes de elos, o principal fator a ser considerado é o cálculo de carga segura de trabalho, o qual é calculado dividindo a mínima carga de ruptura (CMR) pelo fator de segurança. Para correntes de elo, a norma EN 818-2 define um coeficiente de segurança de carga 4:1, ou seja, a carga máxima de trabalho não pode exceder 25% da carga de ruptura mínima efetiva. No estudo foram aplicadas as cargas mínimas de ruptura, para cada diâmetro, em correntes com três elos, além da verificação dos coeficientes de segurança de carga 4, 8 e 12. A Tabela 2 evidencia as cargas empregadas para cada diâmetro de acordo com os diferentes fatores de segurança.

Tabela 2 - Cargas aplicadas de acordo com o coeficiente de segurança e o diâmetro do elo.

Diâmetro (mm)	Cargas em diferentes coeficientes de segurança (kN)			
	CMR	4:1	8:1	12:1
20	264	66	33	22
30	566	141,5	70,8	47,2
50	1570	392,5	196,3	130,8
60	2260	565	282,5	188,3

Fonte: Autor.

4.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O estudo foi realizado com o auxílio do software *ANSYS*, um programa amplamente utilizado em engenharia para simulações de elementos finitos (FEA), análise estrutural, mecânica, fluida, térmica e eletromagnética. O sistema de análise utilizado foi o *Static Structural*, que tem como finalidade central quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam com a aplicação de carregamentos, em condições de equilíbrio estático.

O aço AISI 1020 foi o material escolhido para a análise devido ser um dos aços carbono mais utilizados na indústria, além da combinação de ductilidade, resistência e maleabilidade. Como há diferentes valores de resistência inteiramente ligados ao tipo de tratamento aplicado, optou-se pelos dados relativos ao aço normalizado, por assomar ainda mais as propriedades mecânicas do material. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas do material que foram aplicadas no software.

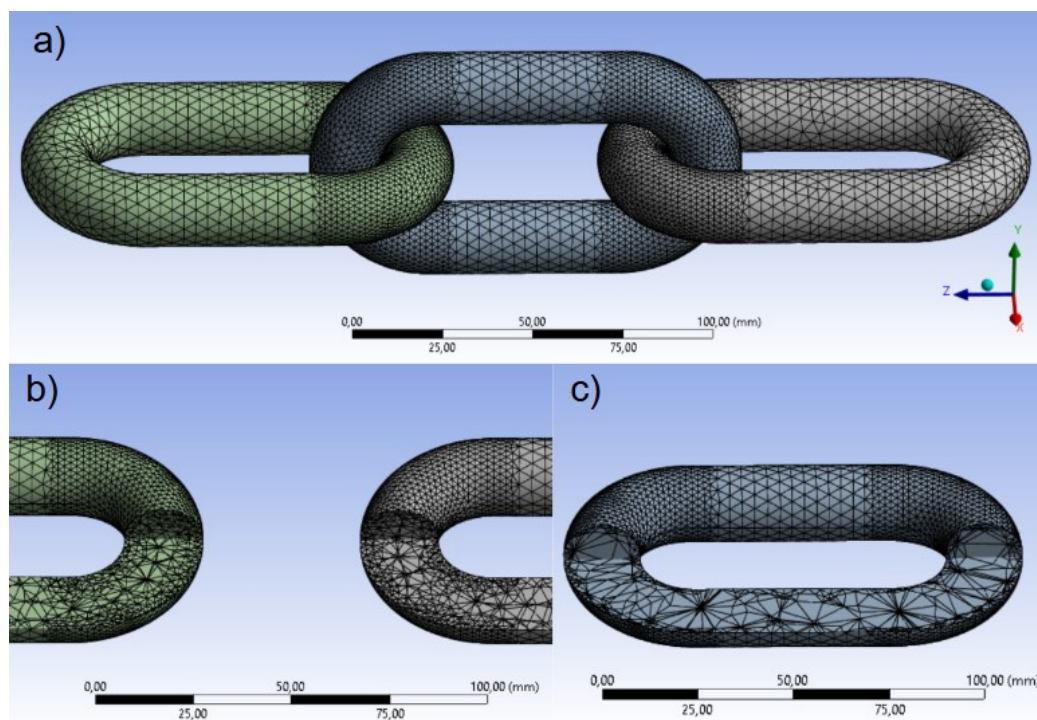
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020.

Aço AISI 1020	
Densidade (g/cm ³)	7,87
Modulo de Young (GPa)	206,00
Coeficiente de Poisson	0,29
Resistência à tração (MPa)	441,00
Resistência ao escoamento (MPa)	346,50

Fonte: BERTENE, 2024.

A discretização das correntes com 3 elos foi produzida com uma resolução de *Sizing* de valor 5, com a aplicação de um *Face Sizing* para controlar as configurações relacionadas a linearidade, tamanho e número de divisões dos elementos. Outra aplicação foi o refinamento das áreas de contato entre elos, totalizando, por exemplo, na corrente de diâmetro de 20 mm (Figura 15a), mais de 56 mil elementos e 95 mil nós.

Figura 15 - Discretização da análise: a) Malha da corrente com 20 mm de diâmetro; b) Visão em corte dos elos das extremidades; c) Visão em corte do elo que conecta as extremidades.



Fonte: Autor.

No caso da parte interna, a discretização foi superior nos elos das extremidades nas partes que foram refinadas (Figura 16b). Em uma vista de corte, o aprimoramento da malha é melhorado ao se aproximar da superfície dos elos. Entretanto, isso não foi observado no elo que conecta os elos das extremidades, o qual a qualidade da malha no interior ainda é reduzida, mesmo nas seções refinadas (Figura 15c). Sem o padrão de discretização para todas as aplicações, os dados variam de acordo com a quantidade de elementos e nós no sistema, mesmo que o estudo se mantenha com as mesmas condições. A Tabela 4 atesta o número de nós e elementos para cada uma das geometrias.

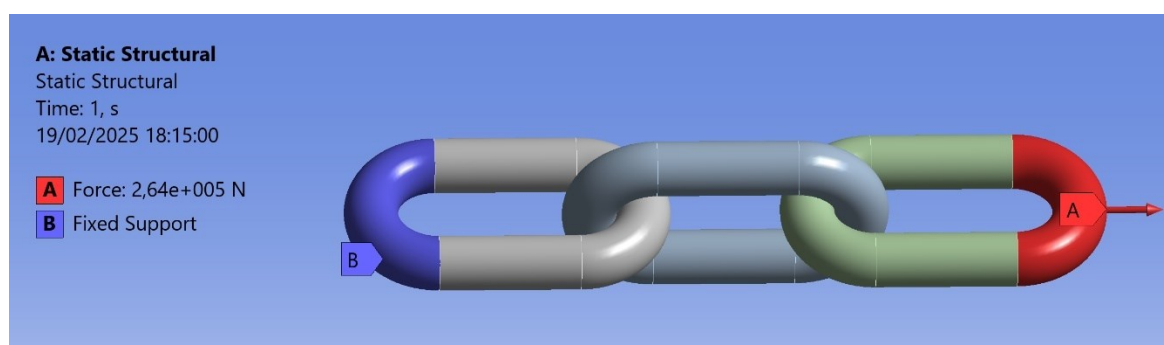
Tabela 4 - Resultado do número de nós e elementos para cada um dos diâmetros.

Diâmetro (mm)	Nós	Elementos
20	94.544	55.728
30	98.243	58.248
50	95.162	56.111
60	97.207	57.500

Fonte: Autor.

O processo de tração sofrido pela corrente se deu aplicando as condições de contorno em ambas as extremidades da corrente. No processo, o primeiro elo da extremidade foi fixado, enquanto na outra ponta (no terceiro ou quinto elo) foram manipuladas diferentes cargas no sentido da corrente (Figura 16). Os resultados observados foram examinados a partir da tensão equivalente de Von Mises, da deformação elástica equivalente e do fator de segurança aplicando um critério de falha para os quatro diâmetros e as demais cargas.

Figura 16 - Modelo das condições de contorno aplicadas nos elos para o diâmetro de 20 mm.



Fonte: Autor.

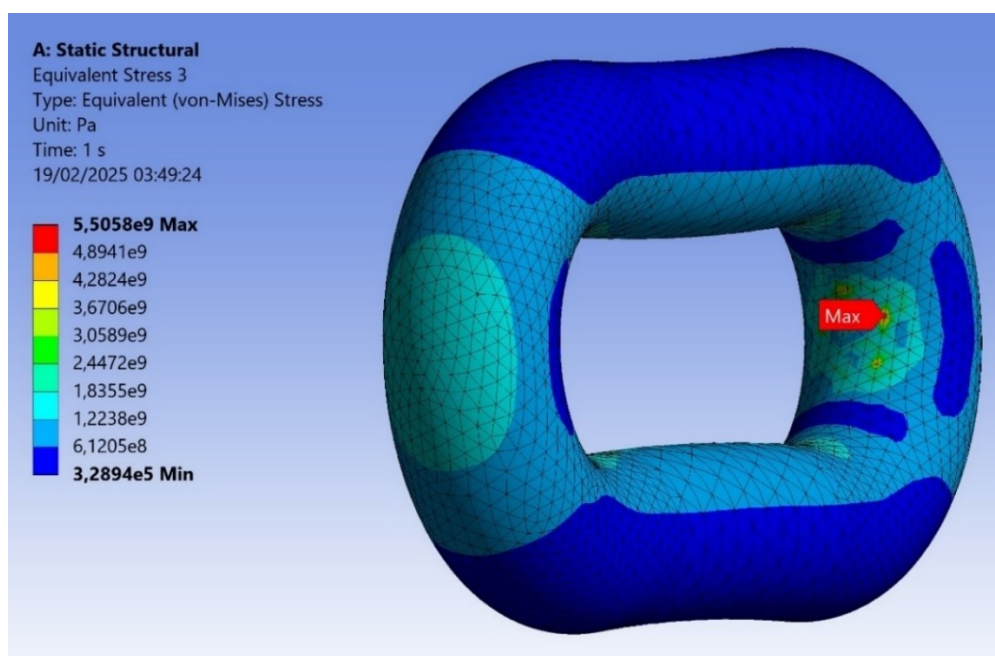
Para verificação dos resultados obtidos no software *ANSYS*, um estudo analítico foi produzido dentro do software *MATLAB*, aplicando as equações abordadas no referencial teórico para com os dados do experimento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES

A análise da simulação revela que ao tracionar as correntes de elos, independente do diâmetro, as maiores tensões se encontram na parte interna em maior escala nas áreas circulares onde há o contato entre elos. A tração também causa tensões na parte externa podendo ser visualizadas na porção circular, na direção axial a carga (Figura 17).

Figura 17 - Vista isométrica das tensões geradas com coeficiente de segurança de carga 1:1 em corrente de 60 mm.

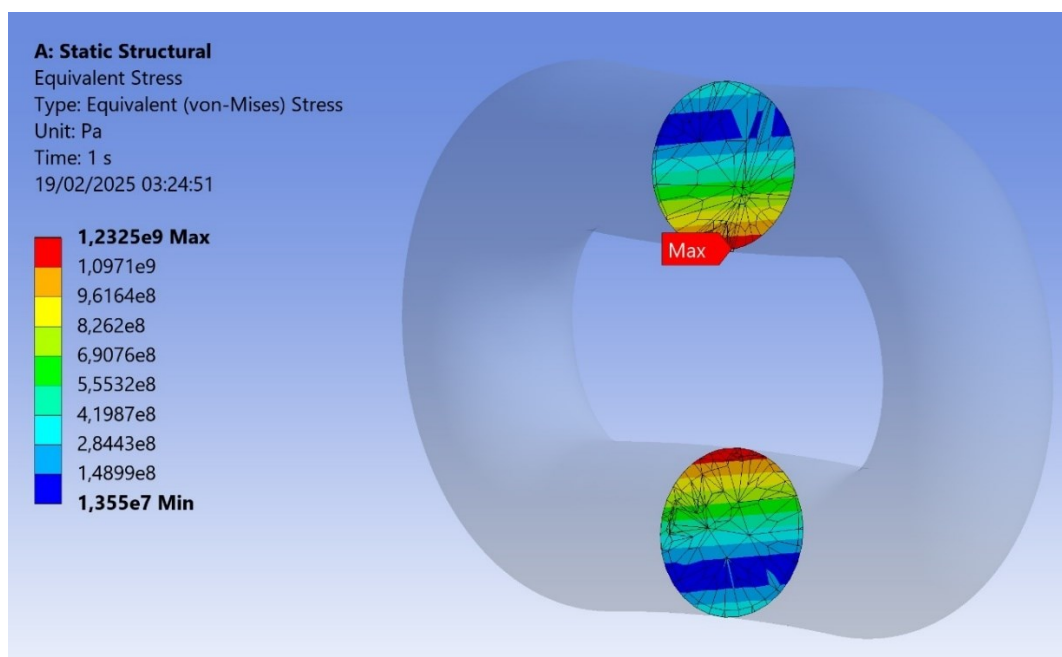


Fonte: Autor.

Em relação ao ponto de tensão máxima, foi encontrado na área circular que apresenta o contato com o primeiro elo (elo fixado), concentrando-se ao redor de um nó. É perceptível uma incongruência com a literatura, uma vez que, mesmo que as tensões superficiais sejam geradas na região de contato entre os elos, não deveriam estar de forma tão localizadas nos nós, ainda mais com uma distribuição aleatória dos pontos na região.

É notório observar, que as tensões equivalentes de von Mises tendem a ter valores bastante elevados ao verificar o elo por completo. Isso se dá em função das tensões superficiais geradas pelo próprio contato entre os elos ao tracioná-los. Contudo, visando identificar somente as tensões normais, em razão da carga normal e a flexão do elo, a porção reta é a mais viável devido a certeza que não há tensões superficiais por contato. A Figura 18 exemplifica a redução dos valores de tensão equivalentes quando examinado somente a porção reta do elo.

Figura 18 - Tensões geradas na porção reta com coeficiente de segurança de carga 1:1 em corrente de 60 mm.

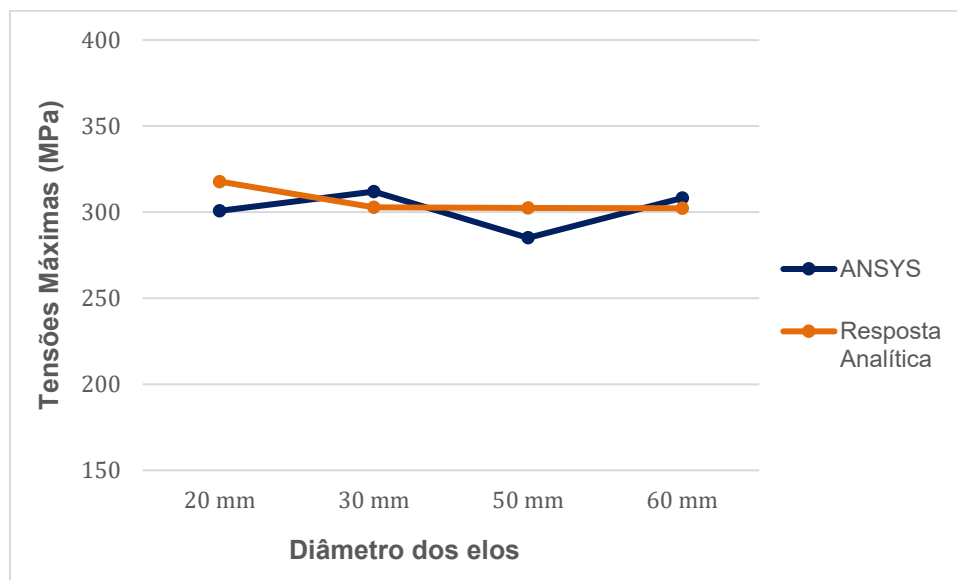


Fonte: Autor.

Comparando as Figuras 17 e 18, é verificado uma grande redução das tensões, visto que a tensão máxima encontrada na área de contato entre os elos equivale a 5505,8 MPa, enquanto a maior tensão na parte reta equivale a 1232,5 MPa. Logo, compreende-se que todas as resultantes acima do valor máximo encontrado na porção reta do elo, são caracterizadas como tensões superficiais. A Figura 18 também demonstra que as maiores tensões na parte reta são encontradas na porção interna, em razão da tração ocorrer pelo contato entre os elos, conforme a literatura.

Ainda assim, para verificar os dados observados no software *ANSYS*, o Gráfico 1 demonstra a comparação entre os resultados obtidos pela simulação computacional na porção reta e o estudo analítico de acordo com a Equação (14), aplicando um coeficiente de segurança para carga de 4:1.

Gráfico 1 – Análise das máximas tensões equivalentes de von Mises na porção reta, gerada pelo software ANSYS associada a resposta analítica, para todos os diâmetros, com coeficiente de segurança de carga de 4:1.



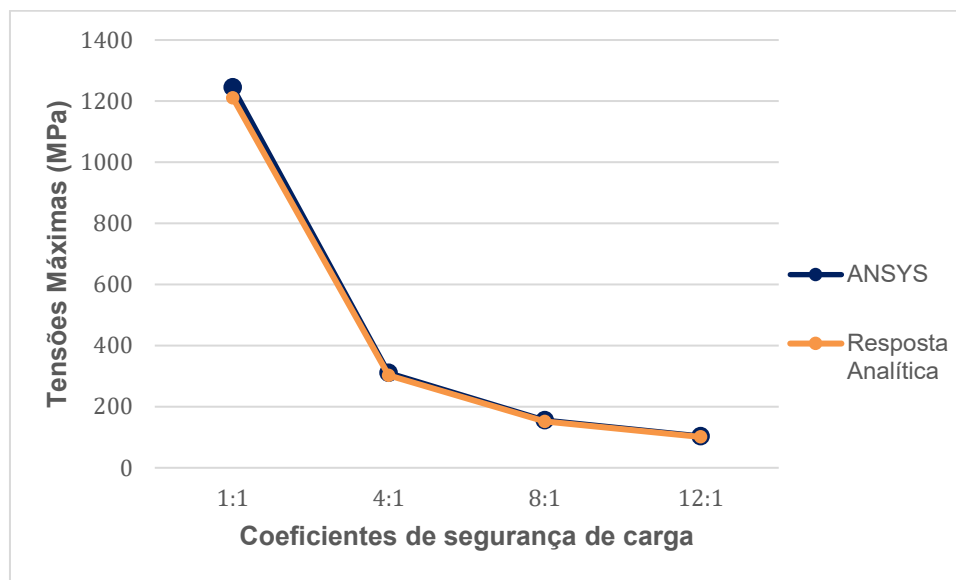
Fonte: Autor.

Ao examinar os dados adquiridos, nota-se algumas divergências nos dois processos. Como o coeficiente de segurança de carga de 4:1 é calculado de acordo com o valor da carga mínima de ruptura de cada diâmetro, tem-se que os dados de tensões deveriam ser iguais para todos os casos, o que só pode ser observado no sistema analítico, em exceção a corrente de 20 mm. No caso dos valores atribuídos a simulação computacional, os dados divergem tanto entre os diâmetros, quanto entre os dois processos no estudo. A possível explicação pode ser devida a produção da malha.

O primeiro possível fator se dá pela desproporção dos elementos da malha no interior do elo, os quais não seguiram uma linearidade como na superfície, além da limitação do número de nós e elementos na versão estudantil do software. Outra provável razão se tem nas condições de contato entre os elos, a qual a Figura 17 já evidencia problemas em relação a localização e distribuição das tensões de contato.

Com relação ao reflexo dos coeficientes de segurança de carga na redução das tensões nos elos, o Gráfico 2 demonstra os dados obtidos para correntes com 30 mm, tanto para a simulação, quanto analiticamente.

Gráfico 2 – Análise das máximas tensões equivalentes de von Mises, geradas pelo software ANSYS e associada a resposta analítica, para todos os coeficientes de segurança de carga, na corrente de elos com 30 mm.



Fonte: Autor.

É possível perceber em ambas as análises, que há uma adequação com a literatura, tendo em vista que as tensões equivalentes de von Mises reduzem proporcionalmente de acordo com as restrições das cargas aplicadas em virtude da adição de fatores de segurança de carga. Ao comparar os resultados, nota-se que os dois sistemas estão com os valores semelhantes, tendo uma pequena alteração no coeficientes de segurança de carga de 1:1. Diferentemente do Gráfico 1, todos os parâmetros geométricos e a qualidade da malha são iguais, modificando apenas a carga de acordo com o fator proposto, e assim mantendo os dados lineares.

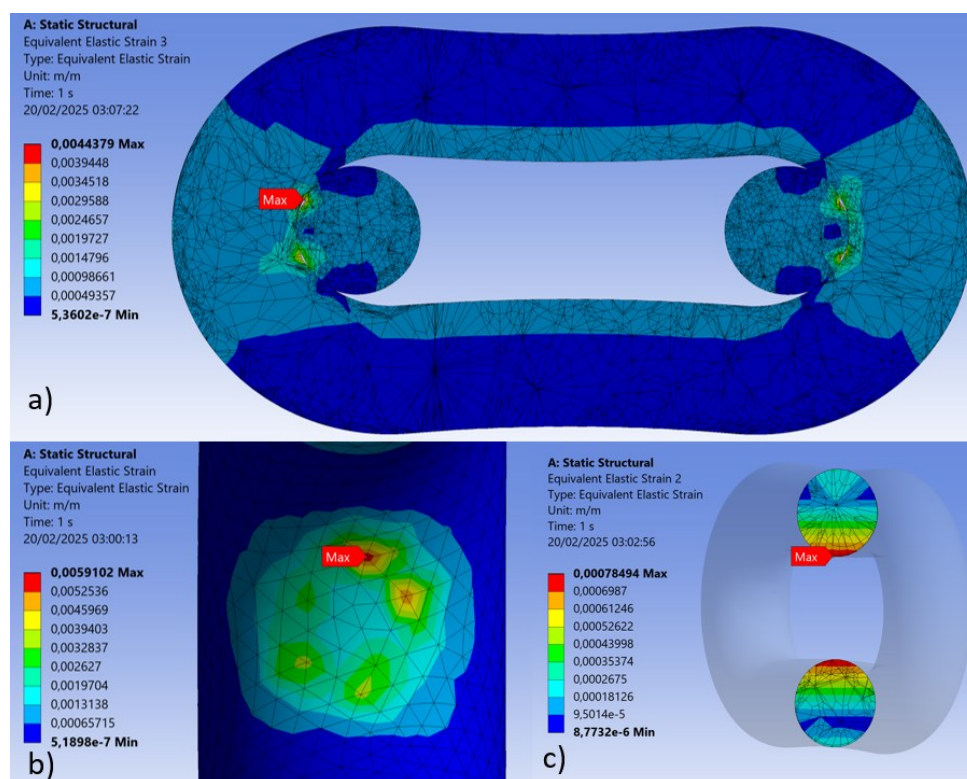
5.2. DEFORMAÇÕES ELÁSTICA DE VON MISES

Com relação à análise das deformações elásticas presentes nos ensaios, a localização e o grau de deformação elástica são proporcionais às áreas e o valor das tensões no elo. Como é visto na Figura 19a, as deformações se concentram na parte interior do elo, como também na porção circular exterior, com pontos mais elevados na área de contato entre os elos. Na questão dos resultados obtidos, constata-se que as deformações são bastante elevadas quando são analisadas toda a área do elo (Figura 19b), como também em um corte central paralelo a aplicação da carga (Figura 19a).

Isso acontece por efeito das tensões de contato presentes nas duas análises que elevam os valores de deformações equivalentes. Outro ponto constatado é em virtude das deformações equivalentes, serem um pouco menores no corte paralelo a carga, do que a análise completa do elo, demonstrando que os locais com maiores deformações são nas áreas de contato, mas não são centralizados.

Assim como observado na análise das tensões equivalentes no contato, os maiores pontos de deformações seguem localizados em nós específicos, com uma distribuição inconsistente. No caso do estudo visando somente as deformações em razão das tensões puramente normais (Figura 19c), é possível identificar resultados menos expressivos, tal como a conformidade dos valores em relação as tensões equivalentes no mesmo local.

Figura 19 - Deformações geradas com coeficiente de segurança 8:1 em corrente de 20 mm: a) Vista em corte axial a carga; b) Ponto máximo de deformação; c) Vista das deformações na porção reta.



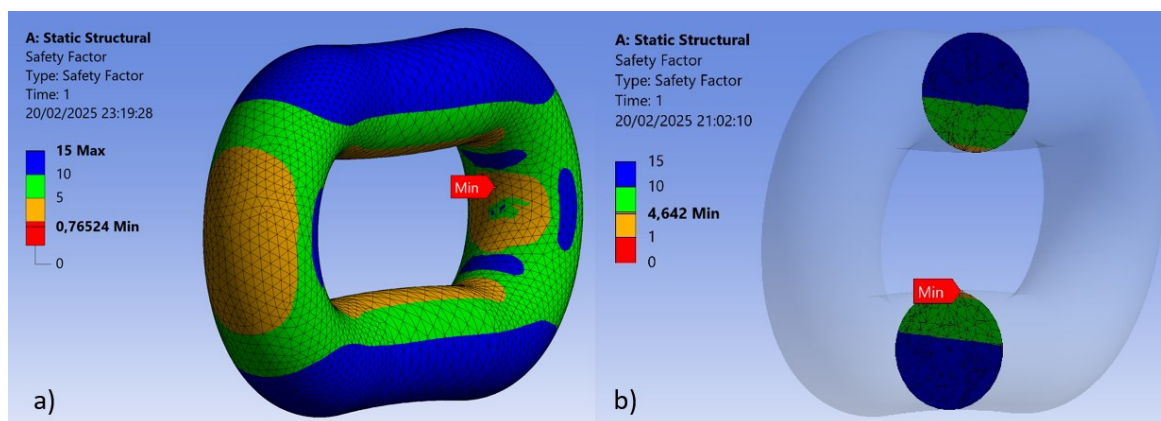
Fonte: Autor.

5.3. FATOR DE SEGURANÇA

O fator de segurança do software *ANSYS*, seguindo a formulação do coeficiente de segurança de von Mises, divide o limite de resistência à tração do material pela tensão equivalente de von Mises gerada na aplicação de cargas. Dessa

forma, como o limite de resistência é uma propriedade mecânica do metal, os pontos onde houveram a máxima tensão equivalente terão os menores fatores de segurança. A Figura 20 exemplifica os dois modelos de processos observados no software aplicando o maior fator de segurança de carga proposto na metodologia.

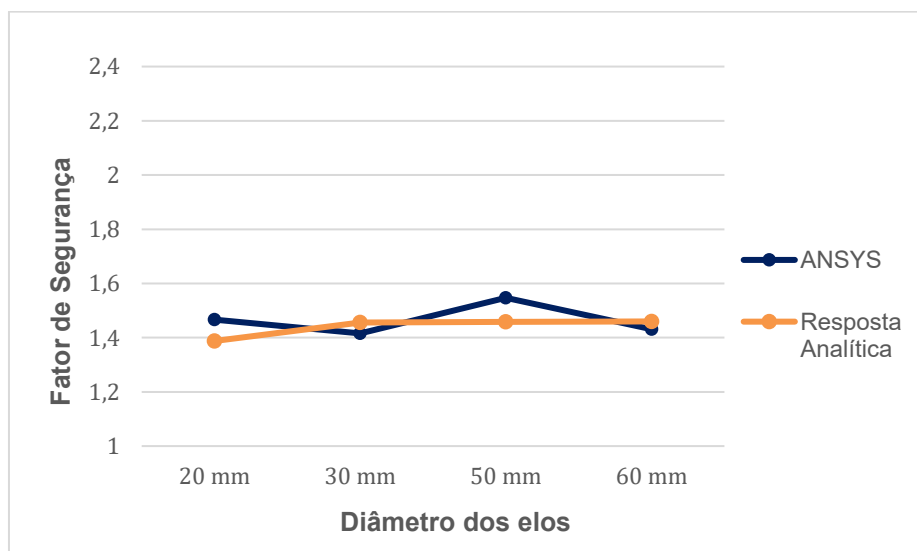
Figura 20 - Resultados do safety factor para corrente de 50 mm com um coeficiente de segurança de carga de 12:1: a) Em todo o elo central; b) Somente na porção reta do elo.



Fonte: Autor.

Para dissertar sobre os dados referentes ao fator de segurança em tensões puramente normais, o Gráfico 3 demonstra os fatores mínimos de segurança gerados para todos os diâmetros, com um coeficiente de segurança de carga 4:1 na porção reta do elo. Para verificação dos dados é também calculado o coeficiente de acordo com os valores de tensões observados analiticamente aplicando a Equação (13).

Gráfico 3 - Análise dos mínimos fatores de segurança na porção reta, geradas pelo software ANSYS associada a resposta analítica, para todos os diâmetros, com coeficiente de segurança de carga de 4:1.



Fonte: Autor.

Nos ensaios de *safety factor*, foi observado que ao fazer a verificação no elo central por completo (Figura 20a), para os quatro diâmetros, todos os resultados foram abaixo de 1, em função das altas tensões superficiais presentes no contato, gerando inconsistência na análise. Isso implica dizer que a área de contato entre os elos é a porção com menor índice de segurança, tendo maior probabilidade, entre todo o elo, de ocorrer fadigas, levando à formação de trincas e falhas ao longo do tempo devido com cargas cíclicas. Outros possíveis efeitos são a deformação plástica e a redução da vida útil por ação da corrosão, tendo em vista o ambiente agressivo onde as correntes deste estudo operam.

De acordo com o Gráfico 3, é demonstrado que, em todos os diâmetros, tanto os valores analíticos, quanto os resultantes das simulações, foram lineares as tensões equivalentes de von Mises calculadas no Gráfico 1. Os diâmetros com tensões mais elevadas resultaram em fatores de segurança menores que os demais. Entretanto, somente as respostas analíticas se mantiveram constante e coerente com a literatura nos diâmetros de 30, 50 e 60 mm. Como o estudo foi embasado nas cargas mínimas de ruptura de cada diâmetro proposto e com o mesmo material, ao reduzir a carga, tem-se que as tensões normais geradas também reduzam, o fator de segurança se eleve, e em ambos os casos, os resultados sejam iguais para todos os diâmetros.

Tendo isso em mente, somente ao reduzir a carga aplicada no elo, traria uma elevação do coeficiente de segurança. Tal fato pode ser observado comparando o fator de segurança de 4,64 demonstrado na Figura 20b, com coeficiente de segurança de 12:1 para o elo com diâmetro de 50 mm, com o valor de 1,54 obtido para o mesmo diâmetro coeficiente de segurança de 4:1

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho modelou e simulou o processo de tração gerado em correntes de elos aplicadas no auxílio de defensas marítimas na atracação de navios nos portos. Para o estudo, o aço AISI 1020 foi o material escolhido devido às suas propriedades mecânicas e a sua grande presença na indústria. A partir dos modelos de elos fornecidos pela empresa Shibata Fender Team, foi possível analisar o nível de esforços gerados, as deformações obtidas e o grau de segurança para 4 coeficientes distintos. As simulações foram produzidas utilizando o Método dos Elementos Finitos e o critério de falha de Von Mises no software *ANSYS*, assim como uma confirmação dos resultados de forma analítica. As cargas aplicadas foram de acordo com a Carga Mínima de Ruptura de cada diâmetro de elo, reduzindo de acordo com os 4 coeficientes de segurança propostos. Ao todo foram examinados 96 pontos diferentes para a produção dos resultados.

De acordo com o estudo, os pontos de maiores tensões equivalentes de von Mises, deformações equivalentes, e com os menores fatores de segurança, concentraram-se nas áreas circulares na porção interior dos elos em função das tensões superficiais geradas pelo contato ao tracioná-los. Para averiguar de forma mais clara, o estudo se dirigiu para as porções retas do elo, as quais obtiveram tensões e deformações equivalentes menores, tendo como consequência fatores de segurança mais elevados. Tais valores se deram em razão das partes retas dos elos sofrerem tensões puramente normais.

Como o estudo foi fundamentado nas cargas mínimas de ruptura e a geometria dos elos disponibilizada pela própria empresa Shibata Fender Team, ao utilizar um mesmo material, a redução da carga implica na limitação das tensões normais geradas. Consequentemente, o fator de segurança se eleva, garantindo que, em ambas as situações, os resultados sejam equivalentes para todos os diâmetros investigados. Entretanto ao comparar com resultados analíticos e/ou entre os próprios diâmetros, em alguns casos houveram pequenas disparidades. As possíveis razões dessas diferenças podem ser atribuídas a malha no interior dos elos, que não ficou linear como na superfície; a limitação do número de nós e elementos na versão estudantil do software; e por fim as condições de contato entre os elos, as quais demonstraram problemas em relação a localização, a distribuição e os valores das tensões de contato.

REFERÊNCIAS

BARONI, C. (n.d.). **O que são Defensas Marítimas e quais seus principais tipos?**. Disponível em: <https://ctcinfra.com.br/defensas-maritimas/>. Acesso em 2 jul. 2024.

BERTENE, L. (2024). **Propriedades do aço SAE AISI 1020**. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/propriedades-do-aco-sae-aisi-1020-resistencia-ao-escoamento-do-aco-carbono-c1020-equivalente?srltid=AfmBOoq6AOXy1a4vaHEaKLFJxsp3fJ4yUchuDfJMKPHNm21Rk7SfOxMO>. Acesso em: 1 jul. 2024.

BORIN, M. V. (2023) **Defensas Marítimas: o que são e principais tipos** [Guia completo]. Disponível em: <http://ctcinfra.com.br/defensas-maritimas/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

CAETANO, M. (2022a). **Tipos de Defensas**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/tipos-de-defensas/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

CAETANO, M. (2022b). **Eficiência das Defensas**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/eficiencia-das-defensas/>. Acesso em: 2 mar. 2024.

DESIGNER, L. (2014). **Defensas Pneumáticas – Aqua Fender do Brasil**. Disponível em: <https://aquafenderdobrasil.com.br/defensas-pneumaticas/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

JB EAD ACADEMY. (n.d.) Curso de NR 11 - **Amarração de Cargas (Reciclagem)**. Disponível em: <http://jbead.com.br/cursos/curso-de-nr-11-amarracao-de-cargas-reciclagem/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MAIA, G. DE B. **O uso da simulação computacional aplicada à programação da produção em uma fábrica de pequeno porte**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Produção) - Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Produção.

NAUTICEXPO CONNECT. Defesa - **Todos os fabricantes do setor náutico e marítimo**. Disponível em: <https://www.nauticexpo.com/pt/fabricante-embarcacao/defensa-996.html>. Acesso em: 17 jan. 2024.

NETO, I. S. D. S. **Projeto de uma estrutura metálica para remoção de defesa marítima de um complexo industrial portuário**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

NORTON, RL (2013). **Machine Design: Uma abordagem integrada**. 4. Ed. Divisão Pearson College. Porto Alegre.

PICOLI, M. A.; LENNAN, M. L. F. M. **Barreiras na indústria: um estudo sobre o produto corrente de elos soldados** - Grau 08. Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração - ANPAD, 23 set. 2022.

SHIBATA FENDER TEAM. (n.d.). **Accessories and Fixings**. Disponível em: https://www.shibata-fender.team/files/content/products/Accessories_and_Fixings/Product_Information_Accessories_and_Fixings.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

SHIBATA FENDER TEAM. (2019). **Manual para Projeto de Defesa**. Disponível em: <https://www.shibata-fender.team/files/content/Downloads/SFT-Design-Manual-A4-Portuguese-2019.pdf>. Acesso em 20 jan 2024.

SHIBATA FENDER TEAM. (2024). **Referências**. Disponível em: https://www.shibata-fender.team/en/references.html?country=Brazil&fender_type=&application=. Acesso em: 8 jul 2024.

SOUSA, V.; JÚNIOR, A.. **Análise de falha via método dos elementos finitos do painel metálico de uma defesa marítima**. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2021.

SOUZA, T. F. **Simulações computacionais para análise e minimização das tensões residuais no processo de trefilação**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia.

VARTANIAN, K., & MCDONALD, T. (2016). **Accelerating industrial adoption of metal additive manufacturing technology**. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 68(3), 806-810. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-015-1794-9>.

YAMAMOTO, F. **Afinal, quais são os principais tipos de correntes de elos e suas funcionalidades?**. 2021. Disponível em: <http://saoraphael.com/blog/tipos-de-correntes/>. Acesso em: 7 dez 2023.

ZANELLA, C. F. S. **Estudo de falha de correntes de compensação para elevadores**. 2017. Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia Mecânica.

ZHANG, K. et al. **Identification and modelling of dynamic parameters for round link chains subject to axial loads**. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 16155, 28 set. 2022.