



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUGUSTO ADOLFO SALGADO NETO

**PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARRA DE CARGA PARA UMA
OFICINA MECÂNICA**

FORTALEZA

2018

AUGUSTO ADOLFO SALGADO NETO

**PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARRA DE CARGA PARA UMA
OFICINA MECÂNICA**

Trabalho de final de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção de título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gera da automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S158p Salgado, Augusto Adolfo.
Projeto e análise estrutural de uma barra de carga para uma oficina mecânica / Augusto Adolfo Salgado. – 2018.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

1. Análise estrutural . 2. Análise de Elementos Finitos. 3. Projeto. 4. Movimentação de carga. I. Título.
CDD 620.1

AUGUSTO ADOLFO SALGADO NETO

**PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARRA DE CARGA PARA UMA
OFICINA MECÂNICA**

Trabalho de final de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção de título de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pierre Maurice Christophe Lamary
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado vida, saúde, força e determinação para seguir em frente sempre.

Aos meus pais, Ricardo Salgado e Diolanda Bruno Salgado que, com toda dedicação e amor, tornaram minha jornada possível. A vocês devo tudo que sou e serei.

À minha namorada, Andreza Freitas Siqueira e Sousa, por todo o amor e suporte concedidos a mim.

Ao professor Dr. Rômulo Nascimento Rodrigues, por todo suporte e confiança provido durante a produção desse trabalho.

Aos meus amigos Lucas Moreno, Levi Pio, Handerson Rodrigues, Rafael Marques, Eliezer Batista, Raiane Costa, Tito Livio, Cecília Mesquita, Francisco Lucas, Rodrigo Chaves, Gilderlanio Palacio e Thiago Casimiro por me acompanharem durante toda a graduação, sem vocês esse trabalho não existiria.

Aos meus colegas de estágio Afonso Segundo, Renato Braga, Calebe Dantas, Isadora Machado e Lucas Pereira por estarem presentes nessa fase da minha vida.

Aos meus colegas de trabalho Alan Lobo, Kelio Carvalho, José Américo, Rafael Farias, Erick Santos, Pedro Bento, Alexandre Alves, Thiago Neves, Pedro Leão, Ricardo Sales, Felipe de Sá, Caio Kaizer, Alessandro Amorim, Tauan Vieira, Reginaldo Pimenta, Wanderson Santos, Tiago de Jesus e Jorge Augustus por não medir esforços em compartilhar conhecimento. Espero um dia me tornar um profissional tão bom quanto vocês.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo o projeto de uma barra de carga a ser instalado em uma oficina de manutenção. Para isso foram estudados diversos modelos de barra de carga como referência para elaboração da estrutura do projeto. Na concepção do projeto foi avaliado o material que iria compor a estrutura, o método de içamento das chapas e os acessórios da estrutura, sempre buscando atender aos requisitos levantados pelo cliente. O modelo da estrutura foi definido através de cálculos de resistência dos materiais. Para avaliação estrutural do projeto e validação foi utilizado a norma NBR 8400 – Cálculo de equipamentos para elevação e movimentação de carga. Também foi executada uma simulação computacional por elementos finitos executada no programa *ANSYS DISCOVERY AIM*. O projeto atendeu as necessidades do cliente e os critérios estabelecidos pela norma vigente.

Palavras-chave: Análise Estrutural, Projeto, Análise de Elementos Finitos, Movimentação de cargas.

ABSTRACT

The main objective of this work is the design of a metal sheet lifter to be installed on a maintenance workshop. To achieve that objective various models of lifters have been researched as a design reference. Material analysis, lifting methods and structure accessories have been studied to fulfill the client requirements. The structure model was elaborated using the analytical method established by strength of materials. To validate and analyze the structure of the project the method provided by the standard NBR 8400 – Cranes and lifting appliances basic calculations for structures and components and a finite element method computer simulation using the software ANSYS DISCOVERY AIM were applied. The project met the client requirements and the criteria established by the standard.

Key-words: Structural Analysis, Design, Finite element analysis, Lifting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Barra de carga.....	14
Figura 02 – Workflow do ANSYS Discovery.....	24
Figura 03 – Ilustração demonstrando o efeito de um concentrador de tensão e do adoçamento sobre o mesmo.....	27
Figura 04 – Exemplo de singularidade de tensão.....	28
Figura 05 – Ilustração demonstrando a forma correta de içar chapas para evitar sua deflexão	30
Figura 06 – Modelo simplificado da estrutura da viga principal com os apoios e forças aplicadas.....	32
Figura 07 – Perfil da viga principal da barra de carga.....	34
Figura 08 – Modelo simplificado da estrutura da viga secundária com os engastes da chapa de conexão e forças aplicadas.....	35
Figura 09 – Perfil da viga secundária da barra de carga.....	36
Figura 10 – Levantador magnético permanente de capacidade nominal 600 kg.....	36
Figura 11 – Fator de espessura para diferentes levantadores magnéticos permanentes.....	37
Figura 12 – Geometria dos olhais de içamento de chapa soldada e carga admissível.....	39
Figura 13 – Vista isométrica da barra de carga.....	40
Figura 14 – Vista lateral da barra de carga.....	40
Figura 15 – Vista isométrica da barra de carga com indicação da restrição dos pinos na estrutura.....	42
Figura 16 – Conjunto de forças aplicado na estrutura.....	43
Figura 17 – Propriedades da malha na primeira simulação.....	44
Figura 18 – Propriedades da malha na segunda simulação.....	45
Figura 19 – Local de aplicação do refino local de malha.....	45
Figura 20 – Propriedades da malha na terceira simulação.....	46
Figura 21 – Refino local de malha e detalhe da malha gerada.....	46
Figura 22 – Curva de momento fletor atuante [kN/m] no modelo simplificado da estrutura da viga principal.....	48
Figura 23 – Curva de momento fletor atuante [kN/m] no modelo simplificado da estrutura da viga secundária.....	48
Figura 24 – Tensões atuantes na estrutura.....	50
Figura 25 – Tensão atuante na viga principal próximo ao olhal.....	50
Figura 26 – Tensão atuante próxima à chapa de conexão na viga secundária.....	51

Figura 27 – Tensão atuante na viga secundária.....	51
Figura 28 – Tensão atuante na interface olhal-viga principal.....	52
Figura 29 – Perfil de deslocamento da estrutura.....	52
Figura 30 – Tensões atuantes na estrutura.....	53
Figura 31 – Tensão atuante na viga principal próximo ao olhal.....	53
Figura 32 – Vista frontal da estrutura e tensão atuante.....	54
Figura 33 – Tensão atuante na viga secundária.....	54
Figura 34 – Tensão atuante na interface olhal-viga principal.....	55
Figura 35 – Perfil de deformação da estrutura.....	55
Figura 36 – Tensões atuantes na estrutura.....	56
Figura 37 – Tensão no ponto de singularidade.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classe de funcionamento de um mecanismo.....	20
Tabela 02 – Estados de solicitação dos mecanismos.....	20
Tabela 03 – Grupos dos mecanismos.....	21
Tabela 04 – Valores de q	22
Tabela 05 – Valores do coeficiente de segurança.....	22
Tabela 06 – Geometria e massa das chapas a serem transportadas.....	29
Tabela 07 – Composição química da liga ASMT A36.....	31
Tabela 08 – Propriedades mecânicas da liga ASMT A36.....	31
Tabela 09 – Classificação e tensão admissível do mecanismo conforme a norma ABNT NBR 8400.....	32
Tabela 10 – Geometria do perfil caixão da viga principal.....	33
Tabela 11 – Propriedades do perfil caixão da viga principal.....	33
Tabela 12 – Geometria do perfil caixão da viga secundária.....	35
Tabela 13 – Propriedades do perfil caixão da viga secundária.....	35
Tabela 14 – Capacidade efetiva do conjunto de levantadores magnéticos permanentes.....	38
Tabela 15 – Resultado do método analítico para a viga principal.....	48
Tabela 16 – Resultado do método analítico para a viga secundária.....	49
Tabela 17 – Resultado do método analítico das tensões nos pinos.....	49
Tabela 18 – Resultado do método analítico das tensões nos olhais.....	49
Tabela 19 – Comparação entre os metodos para as vigas.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivos	13
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	14
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ANÁLISE ESTRUTURAL	15
2.1	Cargas e tensões atuantes nas estruturas	15
2.2	Crítérios de falha	18
2.3	Tensão admissível	19
2.4	Método dos elementos finitos (MEF)	22
2.5	Simulação de estruturas através do MEF	23
<i>2.5.1</i>	<i>Configurações de malha</i>	24
<i>2.5.2</i>	<i>Condições de contorno</i>	25
2.6	Singularidade de tensão	26
3	PROJETO E DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Requisitos de projeto	28
<i>3.1.1</i>	<i>Requisitos de equipamento</i>	28
3.2	Concepção do projeto	29
3.3	Elaboração do modelo da estrutura	30
<i>3.3.1</i>	<i>Definição do material e tensão admissível de projeto</i>	31
<i>3.3.2</i>	<i>Viga principal</i>	32
<i>3.3.3</i>	<i>Viga secundária</i>	34
<i>3.3.4</i>	<i>Levadores magnéticos permanentes</i>	36
<i>3.3.5</i>	<i>Olhais de içamento</i>	38
<i>3.3.6</i>	<i>Modelo da estrutura</i>	39
3.4	Análise de elementos finitos	40
<i>3.4.1</i>	<i>Premissas de análise</i>	41
<i>3.4.2</i>	<i>Parâmetros de simulação - Restrições</i>	42

3.4.3	<i>Parâmetros de simulação - Cargas</i>	42
3.4.4	<i>Parâmetros de simulação - Malha</i>	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Resultados do método analítico	47
4.1.1	<i>Viga principal</i>	47
4.1.2	<i>Viga secundária</i>	48
4.1.3	<i>Olhais de içamento e pinos</i>	49
4.2	Resultados da análise de elementos finitos	50
4.2.1	<i>Resultados da primeira simulação – Malha grossa sem refino local</i>	50
4.2.2	<i>Resultados da primeira simulação – Malha fina com refino local</i>	53
4.2.3	<i>Resultados da primeira simulação – Malha grossa com refino local</i>	56
4.3	Discussão	57
5	CONCLUSÃO	58
6	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O aço, que é uma liga composta por ferro, carbono e outros elementos químicos, é um dos produtos mais fundamentais para o desenvolvimento tecnológico industrial, sendo utilizado nas mais diversas aplicações, como, por exemplo, produção de máquinas, construção civil, utensílios domésticos e etc.

A indústria siderúrgica é um dos ramos mais competitivos mundialmente e segundo a *Worldsteel Assotiation* a produção de aço em 2017 está na ordem de 1,6 bilhões de toneladas, tendo em vista esse cenário, as plantas siderúrgicas tomam diversas decisões com o objetivo de reduzir o custo de produção para manter sua competitividade no mercado, um exemplo desse tipo de decisão é a inclusão de uma oficina mecânica interna para reparos de equipamentos da planta.

Uma das matérias-primas mais utilizadas para realizar os procedimentos de reparo são as chapas de aço, as quais precisam ser cortadas antes de serem trabalhadas em procedimentos de solda e usinagem para serem usados nos mais diversos procedimentos de reparo. Na Companhia Siderúrgica do Pécem essas chapas são adquiridas no tamanho padrão de 6000 x 2440 mm e são trabalhadas nas máquinas de corte da oficina mecânica com o objetivo de reduzir seu tamanho para serem usadas nos mais diversos processos de fabricação ou reparo de peças. Essas chapas são armazenadas em um galpão e precisam ser transportadas até as máquinas de corte, no momento essas chapas são transportadas por empilhadeiras alugadas pela empresa, fato que aumenta muito o custo dos reparos executados na oficina da empresa.

1.2 Justificativa

Acidentes com equipamentos de elevação e movimentação de carga são os mais comuns na indústria segundo o Anuário Brasileiro de Proteção, esse tipo de acidente de trabalho também está entre os mais letais.

Com o objetivo de reduzir os gastos com o aluguel de empilhadeiras e aumentar a segurança no processo de transporte de chapas foi solicitado ao setor de engenharia da empresa que desenvolvesse uma barra de carga (Figura 01). A barra de carga substituirá as empilhadeiras no processo de transporte de chapas até as máquinas de corte.

Figura 01 – Barra de carga (Fonte: Ekkoll)



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal o projeto e análise estrutural de uma barra de carga que será conectada a ponte rolante do galpão da oficina mecânica da Companhia Siderúrgica do Pécem, visando atender todas as necessidades do cliente, os requisitos de segurança e os requisitos da norma ABNT NBR 8400 – Cálculo de equipamentos para elevação e movimentação de carga.

1.3.2 Objetivos específicos

Tendo em vista o que foi requerido, os objetivos específicos desse trabalho são:

- 1) Elaborar o desenho inicial da barra de carga com auxílio do programa de CAD licenciado da empresa (CREO PARAMETRIC 4.0).
- 2) Projeto e desenvolvimento da estrutura onde serão definidas suas características geométricas, qual material será utilizado e quais serão os componentes da barra de carga.
- 3) Determinação dos carregamentos (magnitude e posição) atuantes na estrutura.

- 4) Análise estrutural dos componentes da barra de carga utilizando o método analítico ensinado durante a graduação.
- 5) Análise estrutural da barra de carga através do método de elementos finitos utilizando o software ANSYS DISCOVERY AIM.
- 6) Apresentação dos resultados e comparação dos métodos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ANÁLISE ESTRUTURAL

2.1 Cargas e tensões atuantes nas estruturas

No projeto de qualquer estrutura ou máquina se faz necessário determinar quais cargas externas estão atuando sobre o corpo e quais são as cargas internas produzidas, essas cargas surgem no interior do corpo como resposta às cargas externas e são necessárias para manter sua integridade (Norton, 2013). A distribuição desses esforços na seção do corpo é chamada de tensão, as distribuições que agem perpendiculares à seção do corpo são chamadas de tensões normais e as que agem paralelas a seção do corpo são chamadas de cisalhamento.

Existem quatro tipos de esforços internos e suas descrições seguem abaixo.

- a) Momento fletor: é consequência de cargas externas que tendem a fletir o corpo em torno de um eixo que se encontra no plano da área. Esse tipo de esforço gera tensão de flexão no corpo que é constituída por tensões normais de compressão e tração.
- b) Força normal: age perpendicularmente ao plano da área e tendem a unir ou separar dois segmentos do corpo. Esse tipo de esforço gera tensões normais de compressão ou de tração no corpo.
- c) Força de cisalhamento: encontra-se no plano da área e surge como resposta a cargas externas que tendem a produzir o deslizamento de um dos segmentos do corpo sobre o outro. Esse tipo de esforço gera tensões de cisalhamento no corpo.
- d) Momentos de torção: são esforços resultantes de cargas que tendem a torcer um segmento do corpo em relação ao outro. Esse tipo de esforço gera tensões de cisalhamento no corpo.

Na determinação das tensões se faz necessário determinar as cargas externas atuantes e as características geométricas do corpo em análise que influenciam nos diferentes tipos de tensões resultantes.

Para determinação das tensões de flexão atuantes no corpo se faz necessário determinar o momento de inércia da área que está sendo analisada e o momento fletor atuante. Vale ressaltar que o momento de inércia da área possui valores diferentes dependendo do eixo neutro de referência. Segue abaixo a fórmula de cálculo da tensão de flexão.

$$\sigma_{fl} = \frac{M * c}{I} \quad (1)$$

Onde:

σ_{fl} é a tensão de flexão atuante na área;

M é o momento fletor atuante na área calculado em torno do eixo neutro da sessão;

c é a distância perpendicular do eixo neutro até o ponto o qual se deseja calcular a tensão de flexão;

I é o momento de inércia da área calculado em relação ao eixo neutro.

Alguns elementos estruturais possuem seções de área constantes, logo a razão entre o momento de inércia de área [I] e a distância perpendicular máxima do eixo neutro até a fibra mais externa [c] é constante, essa razão é chamada de módulo de resistência à flexão [W], essa propriedade é de suma importância na seleção de elementos estruturais, pois ela facilita na identificação de perfis adequados aos projetos.

Na determinação de tensões de tração ou compressão puras a seguinte fórmula é usada.

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ_n é a tensão de compressão ou tração resultante;

F é a força normal agindo sobre a área analisada;

A é a área de seção transversal cuja tensão está sendo calculada.

Para determinação das tensões atuantes de cisalhamento primeiro se faz necessário estabelecer que tipo de carga produziu a tensão cisalhante. Em caso de esforços cortantes a fórmula para determinação da tensão de cisalhamento segue abaixo.

$$\tau = \frac{V * Q}{t * I} \quad (3)$$

Onde:

τ é tensão de cisalhamento resultante;

V é a força de cisalhamento atuante na seção transversal;

Q é o momento estático da área logo acima do ponto que se deseja calcular a tensão de cisalhamento;

t é a largura da área da seção transversal do elemento;

I é o momento de inércia da área da seção transversal inteira.

Caso a carga seja produzida por momentos de torção a fórmula para o cálculo da tensão cisalhamento resultante é a seguinte.

$$\tau = \frac{T * c}{J} \quad (4)$$

Onde:

τ é tensão de cisalhamento resultante;

T é o momento de torção;

c é o raio externo do eixo sobre torção;

J é o momento polar de inércia da seção transversal;

I é o momento de inércia da área da seção transversal inteira.

Fórmula esta que é utilizada para os cálculos de tensões de torção em elementos circulares, onde é possível encontrar diferentes formulações para os mais diferentes tipos de geometria.

2.2 Critérios de falha

O elemento de estudo desse trabalho é uma estrutura metálica constituída por uma liga de aço, logo serão apresentados critérios de falha para materiais dúcteis, que é a categoria a qual as ligas metálicas de aço estão inseridas.

Em estruturas metálicas é comum considerar o escoamento como principal critério de falha em uma estrutura, pois quando esse fenômeno ocorre no material suas características geométricas são alteradas de forma permanente, pois ocorrem deformações plásticas no material, as mudanças na geometria do material podem tornar mais fáceis o acúmulo de deformações plásticas que, eventualmente, podem levar o material a uma falha catastrófica chamada de ruptura.

Na literatura é possível encontrar dois critérios de falha predominantes na análise de materiais dúcteis: o critério de von Mises e o critério de Tresca (SHIGLEY,2011). Na análise da estrutura projetada nesse trabalho o critério usado será o de von Mises, pois a norma referência para o projeto, ABNT NBR 8400 – Cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas, utiliza esse critério nos cálculos.

Segundo Shigley(2006), o critério de von Mises é definido como:

O escoamento de um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material for igual ou superior à energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando ele atinge o escoamento em um ensaio de tração (p.233).

Baseando-se nesse princípio, o critério estabelece uma tensão equivalente que deve ser comparada com o limite de escoamento do material, se a tensão equivalente for superior o material irá escoar. A tensão equivalente de von Mises é definida pela seguinte equação.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (5)$$

Onde:

σ_{vm} é a tensão equivalente de von Mises;

σ é o somatório das tensões normais atuantes em um ponto da estrutura;

τ é o somatório das tensões cisalhantes atuantes em um ponto da estrutura.

O escoamento é um critério de falha aceitável para materiais, entretanto, em projetos mecânicos, nem sempre é possível prever de forma confiável quais serão as condições de fabricação, de carregamento, de uso, de deterioração da estrutura ou de manutenção do equipamento, todas essas variáveis afetam no quanto a estrutura de um projeto pode suportar as cargas aplicadas, fazendo com que o escoamento não seja um critério de falha confiável para projetos. Portanto se faz necessário estabelecer uma tensão admissível para o projeto, levando em consideração as variáveis citadas previamente, para garantir uma maior segurança e vida útil à barra de carga.

2.3 Tensão admissível

A tensão admissível utilizada no projeto foi estabelecida conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 8400. Na determinação dessa tensão a norma estabelece que os mecanismos utilizados para transporte de cargas devem ser agrupados conforme sua classe de funcionamento, estado de carga e caso de solicitação. Após a definição do grupo do

mecanismo é utilizada uma fórmula para determinar a tensão admissível levando em consideração as propriedades mecânicas da liga utilizada no projeto.

O primeiro fator que influencia em qual grupo o mecanismo se encaixa é seu tempo de uso, que é estabelecido conforme a tabela abaixo. O tempo médio de funcionamento diário deve ser estabelecido com as informações providas pelo solicitante do projeto e pelos operadores do mecanismo.

Tabela 01 – Classe de funcionamento de um mecanismo (fonte: ABNT NBR 8400)

Classe de funcionamento	Tempo médio de funcionamento diário estimado (h)	Duração total teórica da utilização (h)
V0,25	$t_m \leq 0,5$	≤ 800
V0,5	$0,5 < t_m \leq 1$	1600
V1	$1 < t_m \leq 2$	3200
V2	$2 < t_m \leq 4$	6300
V3	$4 < t_m \leq 8$	12500
V4	$8 < t_m \leq 16$	25000
V5	$t_m > 16$	50000

Notas: a) Os tempos diários de funcionamento são considerados para uma utilização na velocidade nominal do mecanismo.

b) As classes V1 a V5 referem-se a mecanismos utilizados de modo regular.

c) A classe V0,5 refere-se principalmente a movimentos para trazer o equipamento a uma posição determinada e a partir da qual uma série de operações se efetua sem utilização deste movimento (por exemplo: translações de grua portuária).

d) A classe V0,25 se refere a movimentos de utilização casual.

e) As durações de uso da terceira coluna devem ser consideradas como valores convencionais, servindo de base ao cálculo de elementos de mecanismos, para os quais o tempo de utilização serve de critério para a escolha do elemento (rolamentos, engrenagens em certos métodos).

f) A duração total de utilização não pode em caso algum ser considerada como garantia de vida útil.

O segundo fator é o estado de solicitação do mecanismo, que tem como definição a proporção na qual o mecanismo é submetido a sua solicitação máxima. O estado de solicitação é definido na norma conforme a seguinte tabela.

Tabela 02 – Estados de solicitação dos mecanismos (fonte: ABNT NBR 8400)

Estados de solicitação	Definição	Fração da solicitação máxima
1	Mecanismos ou elementos de mecanismos sujeitos a solicitações reduzidas e raras vezes a solicitações máximas	$P = 0$
2	Mecanismos ou elementos de mecanismos submetidos, durante tempos sensivelmente iguais, a solicitações reduzidas, médias e máximas	$P = 1/3$
3	Mecanismos ou elementos de mecanismos submetidos na maioria das vezes a solicitações próximas à solicitação máxima	$P = 2/3$

O último fator que influencia na determinação da tensão admissível de um mecanismo de transporte de cargas é o caso de solicitação, que são divididos em três categorias:

- a) Caso I – Serviço normal sem vento: durante o transporte da carga o equipamento não sofre ação do vento ou o vento atuando na estrutura possui valor menor que 20 m/s. Exemplo: mecanismos utilizados dentro de galpões ou em regiões com ventos fracos.
- b) Caso II – Serviço normal com vento: durante o transporte da carga o equipamento sofre ações de ventos com velocidades superiores a 20 m/s. Exemplo: mecanismos utilizados em locais abertos.
- c) Caso III – Serviço com solicitações excepcionais: mecanismos que funcionam sobre regimes de impacto ou aceleração e desaceleração altas. Exemplo: mecanismos conectados a pontes rolantes de alta velocidade.

Após a determinação desses fatores o mecanismo é agrupado conforme a tabela abaixo.

Tabela 03 – Grupos dos mecanismos (fonte: ABNT NBR 8400)

Estados de solicitação	Classes de funcionamento						
	V 0,25	V 0,5	V1	V2	V3	V4	V5
1	1Bm	1Bm	1Bm	1Am	2m	3m	4m
2	1Bm	1Bm	1Am	2m	3m	4m	5m
3	1Bm	1Am	2m	3m	4m	5m	5m

Com o grupo do mecanismo estabelecido a seguinte equação é usada para determinar a tensão admissível de projeto.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_t}{q * FS_r} \quad (5)$$

Onde:

σ_a é a tensão admissível;

σ_t é a resistência à tração do material que constitui o mecanismo;

q é um coeficiente que leva em conta certa possibilidade de se ultrapassar a tensão calculada devido às imperfeições de cálculo e aos imprevistos de carga;

FS_r é o fator de segurança utilizado para mecanismos.

Os valores de q e FS_r podem ser determinados pelas tabelas abaixo.

Tabela 04 – Valores de q (fonte: ABNT NBR 8400)

Grupos de mecanismos	q
1 Bm	1
1 Am	1
2 m	1,12
3 m	1,25
4 m	1,40
5 m	1,60

Tabela 05 – Valores do coeficiente de segurança (fonte: ABNT NBR 8400)

Casos de solicitação	FS_r
Casos I e II	2,8
Caso III	2

A norma ABNT 8400 estabelece que a tensão admissível deve ser comparada com a tensão de von Mises atuante nos componentes do mecanismo para determinação dos fatores de segurança da estrutura.

2.4 Método dos elementos finitos (MEF)

Grande parte dos problemas da física envolvendo tempo e espaço são expressos por equações diferenciais parciais (EDP). Para a maioria desses problemas essas equações não podem ser resolvidas por métodos analíticos devido ao grande número de variáveis. Com o objetivo de resolver essas equações, vários métodos de discretização foram estabelecidos.

Discretizar consiste na divisão de um domínio de um problema em um sistema equivalente de domínios ou unidades menores, uma vez que o domínio do problema é discretizado a solução do sistema original pode ser encontrada solucionando combinando a solução de cada pequeno domínio gerado. A discretização é uma abordagem eficiente, pois ela torna sistemas que possuem infinitas variáveis em sistemas menores com variáveis bem definidas.

A concepção básica do MEF foi desenvolvida a partir do princípio explicado anteriormente. Em problemas de engenharia envolvendo o contínuo, a variável de campo (deslocamento, temperatura, pressão e etc.) possui infinitos valores, pois ela é representada por uma EDP que é uma função contínua do ponto genérico no corpo, sendo assim, o problema pode ser considerado como um sistema com infinitas variáveis desconhecidas. A discretização utilizada pelo MEF consiste na divisão do domínio em elementos, que são os pequenos domínios do problema a serem solucionados, e esses elementos são conectados por nós que são responsáveis por ligar e realizar a comunicação entre os elementos adjacentes. Elementos e nós, juntos, constituem a malha (DESA; ELDHO; SHAH, 2011). Em seguida, o sistema em análise é expresso em termos de funções de interpolação assumidas em cada elemento, essas funções são definidas em termos dos valores das variáveis de campo nos nós.

Uma vez que os valores iniciais para as variáveis de campo são estabelecidas, as funções de interpolação definem a variável de interesse por todo o conjunto de elementos em análise. Logo a solução representativa de todo o sistema é formulada pelo conjunto de soluções dos elementos da malha. O grau de precisão da solução depende do tamanho e do número de elementos e do tipo de função de interpolação utilizado. Malhas com elementos menores (finas) produzem resultados mais precisos. As funções de interpolação são escolhidas de forma que garantam que a variável em estudo e suas derivadas sejam contínuas através dos limites dos elementos adjacentes.

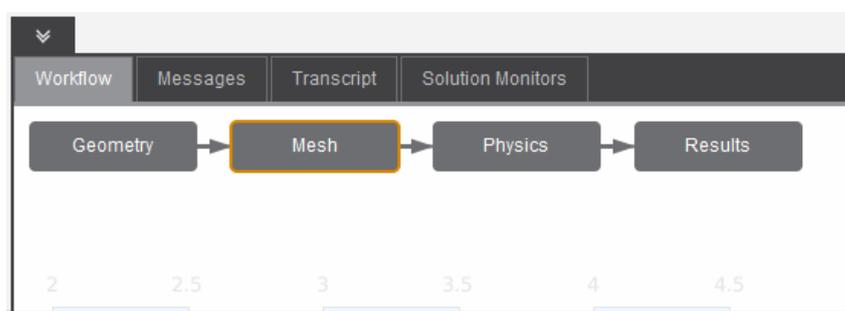
2.5 Simulação de estruturas através do MEF

Existem diversos programas que utilizam o MEF para análise dos mais diversos problemas de engenharia envolvendo, por exemplo, magnetismo, análise estrutural, transferência de calor, dinâmica dos fluidos, topografia e etc. O *ANSYS Discovery AIM*, programa utilizado nesse trabalho, tem como premissa simplificar a análise de elementos finitos, tornando-a mais acessível e diminuindo o tempo necessário de preparação da simulação, para atingir essa premissa o programa diminuiu consideravelmente o número de configurações a serem selecionadas antes da simulação, possui interface simplificada e

diversos tutoriais dentro do programa caso o usuário possua dúvida em alguma definição ou configuração.

Para executar uma simulação de análise estrutural o usuário precisa selecionar a opção *Structural* na interface inicial do programa e seguir o fluxo de trabalho (*workflow*) do programa para estabelecer as configurações desejadas para a simulação. Cada passo do *workflow* deve ser configurado antes de seguir para o próximo, os passos são representados pelo fluxograma abaixo.

Figura 02 – *Workflow* do ANSYS Discovery AIM (fonte: ANSYS)



Para executar uma simulação de análise estrutural o usuário precisa selecionar a opção *Structural* na interface inicial do programa e seguir o fluxo de trabalho (*workflow*) do programa para estabelecer as configurações desejadas para a simulação.

Na aba geometry o usuário importa para o programa o modelo da peça a ser analisada e define se análise será estática ou modal (onde vibração e frequência natural da estrutura são importantes). Também é definido se a análise será exclusivamente estrutural ou multiphysics que é uma simulação que pode envolver, além da análise estrutural, condução de calor, interação entre fluidos e sólidos e etc.

2.5.1 Configurações de malha

O próximo passo na simulação são as configurações de malha na aba *mesh*, existem cinco tipos diferentes de função de tamanho de malha, essas funções influenciam em como a malha é gerada na geometria da estrutura, as definições de cada uma das funções segue abaixo.

- a) *Adaptative*: a malha gerada se adapta a geometria da peça em análise, gerando uma malha mais grossa nas partes contínuas da estrutura e uma malha mais finas nas discontinuidades.

- b) *Curvature*: essa função examina a curvatura nas bordas e faces da geometria e produz elementos cujo tamanho não ultrapassa o tamanho máximo do elemento ou o ângulo de curvatura normal (ângulo máximo que um elemento pode ocupar) definido pelo usuário.
- c) *Proximity*: essa função permite o usuário selecionar o número de camadas de elementos que serão formados próximos as arestas da geometria.
- d) *Fixed*: essa função produz uma malha com elementos de tamanho uniforme por toda a estrutura.
- e) *Curvature and proximity*: essa função utiliza as configurações das funções *curvature* e *proximity* para gerar a malha.

Além de escolher a função de geração da malha o usuário deve escolher o tamanho dos elementos gerados pelo programa.

Além das funções de tamanho de malha também existem os controles locais de malha, que permitem o usuário definir tamanhos específicos de elementos em componentes, faces ou arestas. A malha tem influencia direta nos resultados da simulação, malhas grossas podem apresentar resultados não conformes e malhas finas podem exigir tempos de processamento muito altos, portanto se faz necessário adaptar a malha para o problema a ser analisado. É de extrema importância que a malha seja avaliada antes e após a execução da simulação de forma a evitar erros de simulação, garantir coerência nos resultados e também a convergência dos mesmos.

2.5.2 Condições de contorno

Após gerar e avaliar a malha produzida na geometria se faz necessário estabelecer as condições de contorno do problema na aba *Physics*, segue abaixo uma lista das condições que devem ser definidas na simulação estrutural.

- a) *Material assignments*: definição do material dos componentes da estrutura, nesse passo se faz necessário fornecer ao programa as propriedades mecânicas dos materiais aplicados nos componentes ou selecionar um material presente na biblioteca do programa.
- b) *Structural conditions*: definição das restrições ao movimento e esforços atuantes na estrutura (força, pressão, cargas inerciais e etc.).

- c) *Interface conditions*: definição dos tipos de contato entre os componentes da estrutura (se ocorre ou não separação/deslizamento entre as superfícies em contato).

Após estabelecer todas as condições de contorno o programa inicia o processamento da simulação e exibe os resultados na aba *results*, na simulação estrutural os resultados padrão são a tensão equivalente de von Mises e deslocamento da estrutura.

2.6 Singularidade de tensão

Singularidades são um dos problemas mais comuns em simulações utilizando o MEF, todo resultado que depende da área do elemento de malha está sujeito a esse tipo de problema (SÖNNERLIND, 2015). A singularidade acontece quando uma carga é aplicada em um pequeno elemento da estrutura (linha, ponto ou elemento de malha de pequena área) produzindo uma tensão altíssima, o resultado produzido nesse ponto da malha não converge e quando a malha é refinada no ponto de singularidade a tensão produzida aumenta. Esse problema ocorre em pontos da estrutura com aplicações pontuais de carga, cantos vivos na estrutura, cantos de componentes em contato e próximo a pontos de restrição de movimento da estrutura (ACÍN, 2015).

Embora os valores de tensão na singularidade tendam ao infinito esse fato não torna o modelo e a simulação incorretos, pois, mesmo com a presença de singularidades na simulação, os valores de deslocamento da estrutura ainda estão corretos, mesmo próximo da singularidade. Os resultados de tensão próximo da singularidade também estarão poluídos, porém, graças ao princípio de Saint-Venant, os resultados de tensão no resto do modelo estão corretos.

O princípio de Saint-Venant afirma que o efeito de distúrbios locais a campos de tensão uniforme permanecem locais, longe do distúrbio os resultados não são afetados (TOUPIN, 1964). A distância cujos resultados não são afetados é normalmente do mesmo tamanho do distúrbio no campo de tensão da estrutura. Esse princípio permite que as singularidades nas simulações sejam ignoradas, entretanto se faz necessário investigar se a tensão em que há uma suspeita de singularidade realmente é uma, pois esse distúrbio local de tensão também pode ser concentradores de tensão. A diferença básica entre um concentrador

de tensão e uma singularidade é que os resultados convergem no concentrador de tensão e os efeitos do concentrador afetam uma maior área da estrutura.

Os principais passos na investigação de uma singularidade seguem abaixo.

- 1) Executar uma simulação com malha grossa na estrutura para identificar os pontos de singularidade, após a simulação inicial, executar outra simulação com refinamentos de malha no local de suspeita de singularidade.
- 2) Verificar o deslocamento da estrutura entre as duas simulações, se há um aumento considerável de tensão, mas o deslocamento não muda a suspeita de que o ponto se trata de uma singularidade aumenta.
- 3) Verificar o gradiente de tensão próximo a singularidade, se a tensão reduz drasticamente a uma pequena distância da região de suspeita existem grandes chances do ponto em questão ser uma singularidade.

A principal diferença entre uma singularidade e um concentrador de tensão é a área de efeito desses distúrbios, enquanto o valor de tensão da singularidade diminui exponencialmente a uma pequena distância da mesma, o concentrador de tensão tem um efeito mais longo na estrutura. Os efeitos de um concentrador também podem ser reduzidos com a introdução de um adocamento, enquanto os de uma singularidade nem sempre podem ser solucionados com esse recurso, pois a singularidade normalmente só muda de local com a introdução de um adocamento.

Figura 03 – Ilustração demonstrando o efeito de um concentrador de tensão e do adocamento sobre o mesmo (Fonte: Autor)

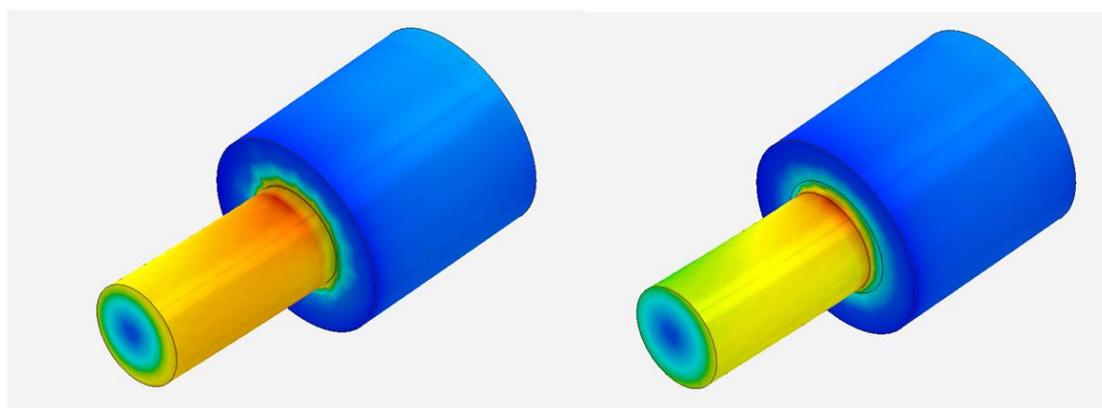
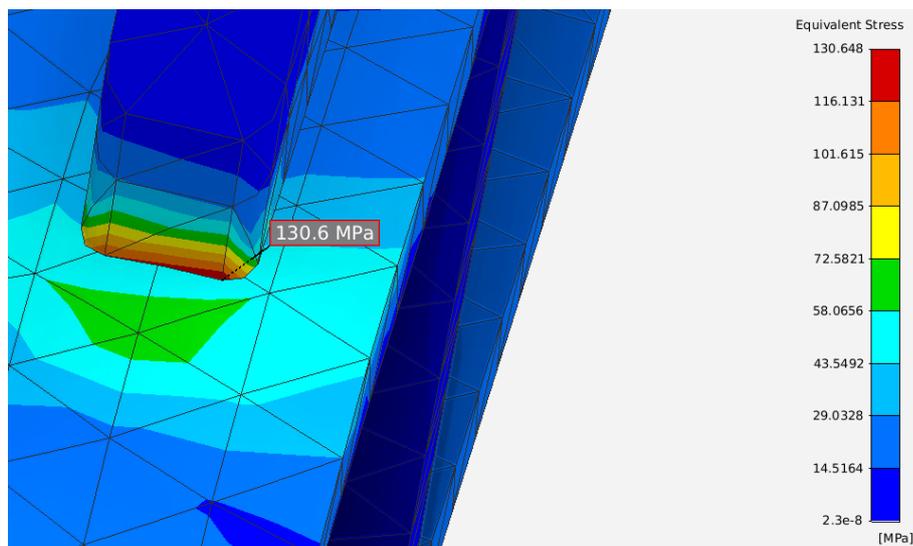


Figura 04 – Exemplo de singularidade de tensão (Fonte: Autor)



3 PROJETO E DESENVOLVIMENTO

3.1 Requisitos de projeto

Em todo projeto se faz necessário fazer o levantamento das necessidades do cliente. O mecanismo que será desenvolvido deverá atender todos os requisitos estabelecidos pelo cliente. Desta forma a geometria e o peso das chapas foram utilizados como requisitos para definir os parâmetros geométricos e componentes da barra de carga. Também foi levada em consideração a capacidade nominal da ponte rolante instalada no galpão como limitante do peso da barra de carga projetada. Outro requisito do cliente seria que a fabricação da barra de carga pudesse ser executada na própria oficina da empresa.

3.1.1 Requisitos de equipamento

Conforme estabelecido pelo cliente, o transportador de chapas deverá ser capaz de transportar as chapas de aço 1020 com geometria e massa mostradas na tabela 01. Visto que a capacidade nominal da ponte rolante instalada no galpão é de 10 toneladas a maior chapa que poderá ser transportada pelo mecanismo será a chapa de 50,8x2440x6000 mm com massa de 5838,14 kg, portanto essa será a condição de carregamento do mecanismo.

Tabela 06 – Geometria e massa das chapas a serem transportadas

Chapa	Massa[kg]
CHAPA LISA 6,35X2440X6000mm SAE 1020	729,77
CHAPA LISA 9,53X2440X6000mm SAE 1020	1095,23
CHAPA LISA 10,32X2440X6000 mm SAE 1020	1186,02
CHAPA LISA 12,70X2440X6000 mm SAE 1020	1459,53
CHAPA LISA 15,88X2440X6000 mm SAE 1020	1824,99
CHAPA LISA 19,05X2440X6000 mm SAE 1020	2189,30
CHAPA LISA 20,64X2440X6000 mm SAE 1020	2372,03
CHAPA LISA 25,40X2440X6000 mm SAE 1020	2919,07
CHAPA LISA 31,75X2440X6000 mm SAE 1020	3648,84
CHAPA LISA 38,40X2440X6000 mm SAE 1020	4413,08
CHAPA LISA 41,28X2440X6000 mm SAE 1020	4744,06
CHAPA LISA 50,80X2440X6000 mm SAE 1020	5838,14
CHAPA LISA 88,90X2440X6000 mm SAE 1020	10216,74

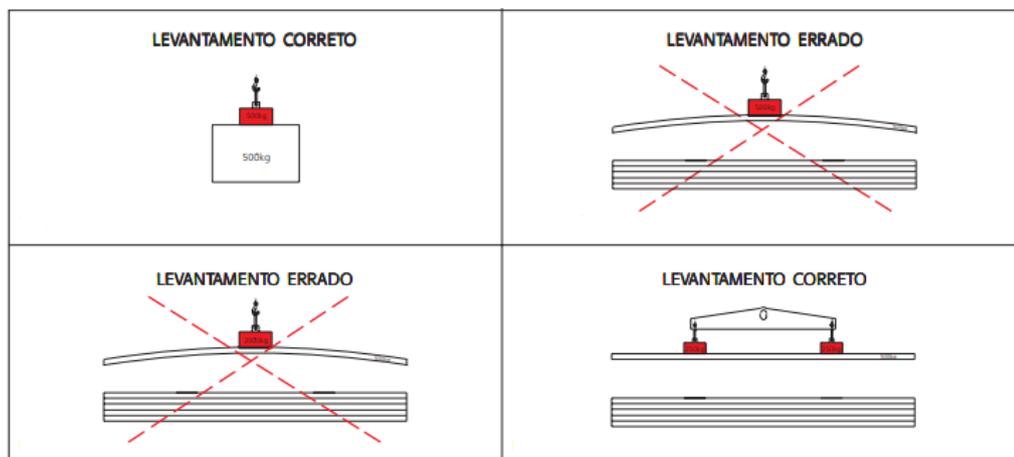
O mecanismo deve funcionar sem necessidade de energia elétrica para que caso ocorra alguma avaria no sistema de distribuição de energia da fábrica as chapas continuam fixadas no mecanismo evitando acidentes.

3.2 Conceção do projeto

Após serem estabelecidos os requisitos do equipamento o próximo passo é elaborar o desenho inicial do mesmo. Para execução dessa atividade se fazia necessária uma pesquisa de mercado para conhecer os diferentes designs de barra de carga e avaliar qual se adequaria as necessidades do cliente. Também era necessário levar em consideração que o design escolhido também deve ser fabricado na própria oficina.

Uma das principais preocupações do cliente era a deflexão das chapas ao serem transportadas, esse era um problema frequente quando se utilizava as empilhadeiras para o transporte, pois, devido à insuficiência de apoios para as chapas devido as limitações geométricas das empilhadeiras, as chapas acabavam se curvando devido ao esforços causados pelo seu próprio peso. Essa deflexão pode danificar o produto, gerando prejuízos para a empresa. Além da geometria das chapas, construir o mecanismo de forma a evitar a deflexão das mesmas foi um dos fatores que mais influenciou no *design* do projeto.

Figura 05 – Ilustração demonstrando a forma correta de içar chapas para evitar sua deflexão
(Fonte: Catálogo da empresa Ital)



Outro ponto a ser considerado nos cálculos envolvendo o projeto eram os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 8400, que definem uma tensão admissível para mecanismos de transporte de carga levando em consideração seu tempo de uso e condições de carregamento.

Conforme o levantamento realizado no item *3.1.1 Requisitos de equipamento* foi definido pelo projetista que devido a geometria das chapas a serem transportadas se faz necessário evitar que ela se curve tanto no sentido do seu comprimento (6000 mm) quanto no sentido da sua largura (2440 mm), portanto o mecanismo deverá içar as chapas por pelo menos dois pontos no sentido da sua largura e por pelo menos quatro pontos no sentido do comprimento de forma a evitar o problema da deflexão, logo a chapa será conectada ao mecanismo por oito pontos.

Tendo em vista os modelos de barra de carga pesquisados, a condição correta de levantamento das chapas e as condições de fabricação do mecanismo cabem ao projetista o desenvolvimento do projeto que envolverá a escolha do material da estrutura, a definição dos componentes, a elaboração do modelo do mecanismo e a análise estrutural do mesmo.

3.3 Elaboração do modelo da estrutura

Após a concepção do projeto, o próximo passo é o desenho do mesmo. Analisando as barras de carga disponíveis no mercado é possível perceber que todas são constituídas por: viga principal, dois olhais de sustentação para conectar a barra de carga a ponte rolante, componente que içe as chapas (ganchos, eletroímãs, levantadores magnéticos e etc.) e vigas secundárias que fazem a conexão do componente de içamento com a viga principal do

mecanismo. Então, para elaborar o desenho inicial do projeto, se faz necessário selecionar esses componentes de acordo com os critérios estabelecidos no item 5.2, além da seleção desses componentes também se faz necessário definir qual material irá compor as vigas da barra de carga.

3.3.1 Definição do material e tensão admissível de projeto

O material escolhido para as vigas e componentes metálicos do projeto é a liga de aço ASMT A36, também conhecido como aço estrutural, essa liga é aplicada principalmente na construção civil na estrutura de pontes e prédios, também existem registros da aplicação desse material na construção de plataformas de petróleo.

Abaixo seguem as tabelas 02 e 03, que informam a composição química e propriedades mecânicas do material, respectivamente.

Tabela 07 – Composição química da liga ASMT A36 (Fonte: MatWeb)

Elemento	Ferro (Fe)	Manganês (Mn)	Carbono (C)	Sílica (Si)	Cobre (Cu)	Enxofre (S)	Fósforo (P)
%	98	1,2	0,29	0,28	0,2	0,05	0,04

Tabela 08 – Propriedades mecânicas da liga ASMT A36 (Fonte: MatWeb)

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	7850	kg/m ³
Resistência à tração	400-550	MPa
Limite de escoamento	250	MPa

Esse material tem uma vasta aplicabilidade na construção de estruturas metálicas devido à sua soldabilidade, podendo ser soldado por qual quer processo de soldagem produzindo juntas de alta qualidade. Também vale lembrar que pelo fato dessa liga não possuir um alto índice de carbono equivalente (CEA) não é necessário nenhum cuidado especial (MODENESI, 2008), como, por exemplo, pré e pós-aquecimento da peça durante o procedimento de soldagem, pois não há transformação martensítica no material devido ao aporte térmico envolvido nos processos de soldagem. Outra vantagem do ASMT A36 é o seu baixo custo de aquisição quando comparado a ligas de propriedades mecânicas similares.

Após a definição do material se faz necessário determinar a tensão admissível de projeto, esse passo é importante para seleção dos componentes do mecanismo, pois os componentes serão selecionados comparando os valores de tensões atuantes no componente com a tensão admissível. Para determinar a tensão admissível foram utilizadas as diretrizes da norma NBR 8400.

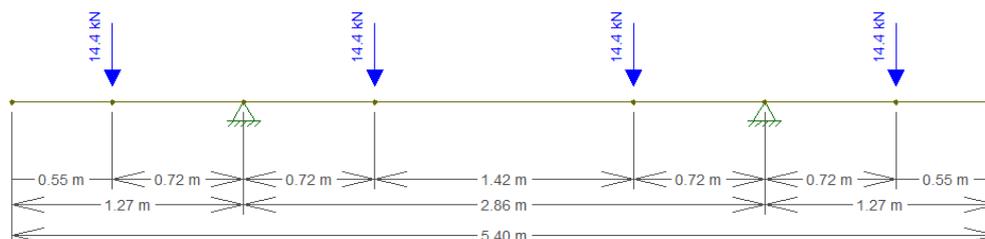
Tabela 09 – Classificação e tensão admissível do mecanismo conforme a norma NBR 8400

Classe de funcionamento	V1
Estado de solicitação	2
Caso de solicitação	Caso 1
Classificação do mecanismo	1AM
Tensão admissível	142,8 MPa

3.3.2 Viga principal

Para definir o perfil da viga principal primeiro era necessário determinar a carga que atuaria sobre ela, sabendo que o comprimento de chapa a ser transportado é de 6000 mm e que ela será conectada a viga principal por quatro apoios podemos elaborar um diagrama de momento fletor da viga, para isso foi estabelecido um comprimento para a viga principal de 5400 mm e o peso da maior chapa a ser içada foi dividido nos quatro pontos de apoio. Também foi estabelecido que a viga principal será içada por dois pontos pela ponte rolante, garantindo uma maior estabilidade no transporte do mecanismo.

Figura 06 – Modelo simplificado da estrutura da viga principal com os apoios e forças aplicadas (Fonte: Autor)



Com o momento fletor atuante na estrutura podemos estimar um valor mínimo de W_x necessário para o perfil utilizando a equação 01. Com essa informação foi selecionado o perfil de viga caixão 200 x 160 x 9,5 x 6,35 mm, esse perfil possui propriedades que o tornam resistente a esforços de flexão, devido ao seu elevado valor de módulo de resistência a flexão [W_x]. Esse perfil também possui a vantagem de ter elevado momento de inercia polar [J], quando comparado com perfis I com dimensões similares, fator que aumenta a resistência da estrutura a esforços torcionais que poderiam ser causados por um desalinhamento na fixação das chapas na barra de carga ou esforços causados pelo translado da ponte rolante.

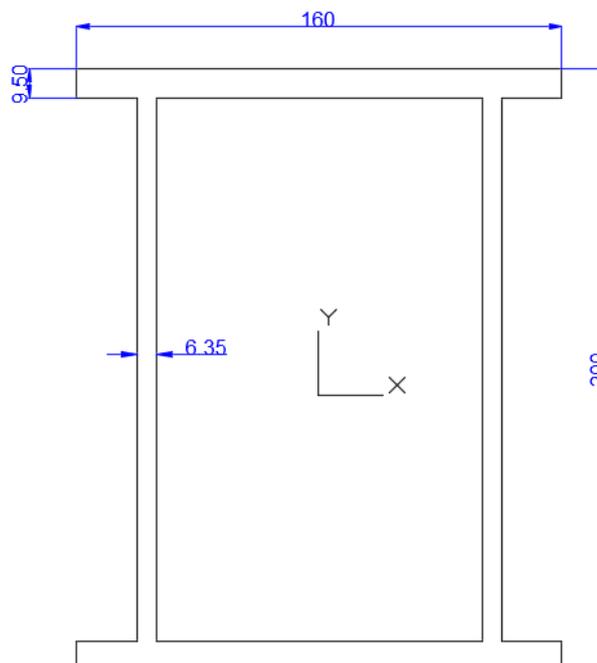
Tabela 10 – Geometria do perfil caixão da viga principal

Geometria do Perfil	
Altura(H)	20 cm
Base(B)	16 cm
Espessura de mesa(tf)	0,95 cm
Espessura de alma(tw)	0,635 cm

Tabela 11 – Propriedades do perfil caixão da viga principal

Propriedades do perfil	
Massa linear	41,9 kg/m
Momento de inércia eixo Y - I_y	3387,9 cm ⁴
Momento de inércia eixo X - I_x	2006,0 cm ⁴
Momento polar de inércia - J	5393,9 cm ⁴
Módulo de resistência à flexão eixo Y	338,8 cm ³
Módulo de resistência à flexão eixo X	250,8 cm ³

Figura 07 – Perfil da viga principal da barra de carga (Fonte: Autor)



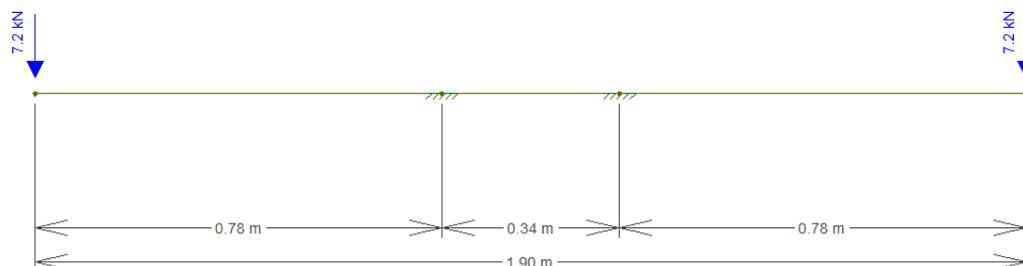
3.3.3 Viga secundária

Conforme definido no item 5.2 *CONCEPÇÃO DO PROJETO*, a viga principal possuirá quatro apoios para transportar as chapas, logo a barra de carga precisa de quatro vigas secundárias para içar as chapas. Também foi definido nesse item que a viga secundária estará conectada as chapas por dois pontos, logo a carga aplicada nessas vigas será o peso das chapas dividido por quatro, entretanto essa carga será distribuída em dois pontos da viga.

O próximo passo do projeto é definir o perfil da viga secundária, para isso será utilizada a mesma metodologia aplicada para a definição da viga principal mudando as condições de contorno aplicadas a viga. Essa viga será soldada a viga principal em conjunto com uma chapa e estará conectada as chapas por dois pontos de apoio. O objetivo de utilizar uma chapa para conectar a viga principal a viga secundária é reduzir o momento fletor resultante, pois o uso da chapa diminui a distância entre a carga aplicada e o engaste da viga secundária. Um momento fletor menor possibilita a escolha de um perfil menos robusto, diminuindo o peso total da estrutura.

O comprimento da viga será de 1900 mm e a chapa de conexão possui geometria de 450 x 340 mm e espessura de 12,7 mm.

Figura 08 – Modelo simplificado da estrutura da viga secundária com os engastes da chapa de conexão e forças aplicadas (Fonte: Autor)



O perfil selecionado também é do modelo caixão pelos mesmos motivos citados no item 5.3.2 *Viga principal*, a diferença entre os perfil é apenas seu tamanho e procedimento de fabricação, enquanto o perfil principal é constituído por quatro chapas soldadas, o perfil secundário será fabricado pela união de dois perfis U 6' x 12,2 kg/m soldados, pois esses perfis estão disponíveis na oficina como material sobressalente. Abaixo seguem as tabelas contendo as características geométricas e propriedades do perfil selecionado.

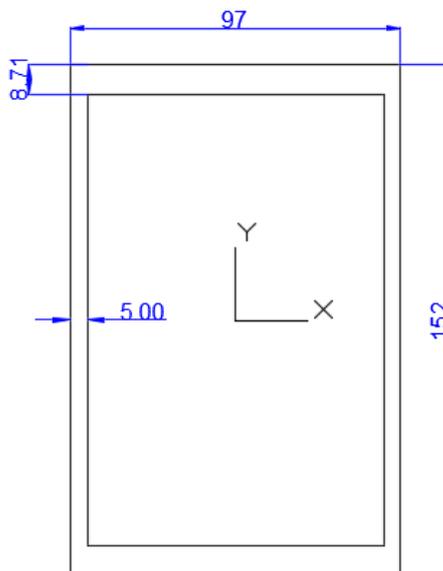
Tabela 12 – Geometria do perfil caixão da viga secundária

Geometria do Perfil	
Altura(H)	15,2 cm
Base(B)	9,7 cm
Espessura de mesa(tf)	0,87 cm
Espessura de alma(tw)	0,50 cm

Tabela 13 – Propriedades do perfil caixão da viga secundária

Propriedades do perfil	
Massa linear	24,2 kg/m
Momento de inércia eixo Y - I_y	1075,1 cm ⁴
Momento de inércia eixo X - I_x	421,7 cm ⁴
Momento polar de inércia - J	1496,8 cm ⁴
Módulo de resistência à flexão eixo Y	141,5 cm ³
Módulo de resistência à flexão eixo X	86,6 cm ³

Figura 09 – Perfil da viga secundária da barra de carga (Fonte: Autor)



3.3.4 Levantadores magnéticos permanentes

Para içar as chapas serão utilizados levantadores magnéticos, esses equipamentos, quando acionados, geram um fluxo magnético que passa através da chapa a ser transportada e atrai a mesma. Esse equipamento é acionado por uma alavanca que é responsável por mover os ímãs permanentes que estão dentro da carcaça do levantador, modificando o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes. Diferentes dos eletroímãs, esse equipamento não necessita de energia elétrica para gerar o fluxo magnético.

Figura 10 – Levantador magnético permanente de capacidade nominal 600 kg (Fonte: Catálogo da empresa IMATEC)



A intensidade da força de atração desses equipamentos depende da espessura da chapa a ser transportada, do material e do acabamento superficial da chapa, levando em consideração todos esses fatores, foi selecionado um conjunto de oito levantadores de capacidade nominal de 1000 kg para realizar o transporte das chapas, sabendo que as chapas transportadas são de aço 1020 e que seu acabamento superficial é similar ao de uma peça fresada podemos calcular a capacidade de içamento do conjunto de levantadores utilizando a seguinte fórmula:

$$C = CN \times F \times T \times M$$

Onde:

C = Capacidade de levantamento efetiva[kg];

CN = Capacidade nominal do levantador[kg];

F = Fator de acabamento;

T = Fator de espessura;

M = Fator de material.

Segundo a empresa Ital para o aço 1020, que é considerado um aço baixo carbono, o fator material é cem por cento, para o acabamento superficial de peças fresadas o fator acabamento é noventa por cento e o fator espessura varia conforme a seguinte imagem:

Figura 11 – Fator de espessura para diferentes levantadores magnéticos permanentes (Fonte: Catálogo da empresa Ital)

Espessura		Redução da capacidade de levantamento					
mm	polegada	ELM-3000	ELM-2000	ELM-1000	ELM-600	ELM-300	ELM-100
até 60	até 2.36"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
55	2.16"	95%	95%				
50	1.97"	90%	90%				
45	1.77"	85%	90%				
40	1.57"	80%	85%				
35	1.38"	70%	75%				
30	1.18"	60%	65%	80%	90%	90%	
25	0.98"	50%	55%	70%			
20	0.79"	40%	45%	60%			75%
15	0.59"	30%	35%	50%	60%	70%	70%
10	0.39"	20%	25%	35%	45%	50%	
5	0.20"	10%	15%	20%	25%	30%	

Abaixo segue a tabela elaborada que comprova a possibilidade de transportar as chapas utilizando o conjunto de levantadores de capacidade nominal 1000 kg.

Tabela 14 – Capacidade efetiva do conjunto de levantadores magnéticos permanentes (Fonte: Autor)

CN[kg]	Espessura da chapa[mm]	T[%]	M[%]	F[%]	C[kg]	Peso da chapa [kg]	Status
8000	12.7	35	100	90	2520	1456	OK
8000	15.88	50	100	90	3600	1820	OK
8000	19.05	50	100	90	3600	2184	OK
8000	25.4	70	100	90	5040	2912	OK
8000	31.75	80	100	90	5760	3640	OK
8000	38.1	90	100	90	6480	4367	OK
8000	44.45	100	100	90	7200	5095	OK
8000	50.8	100	100	90	7200	5823	OK

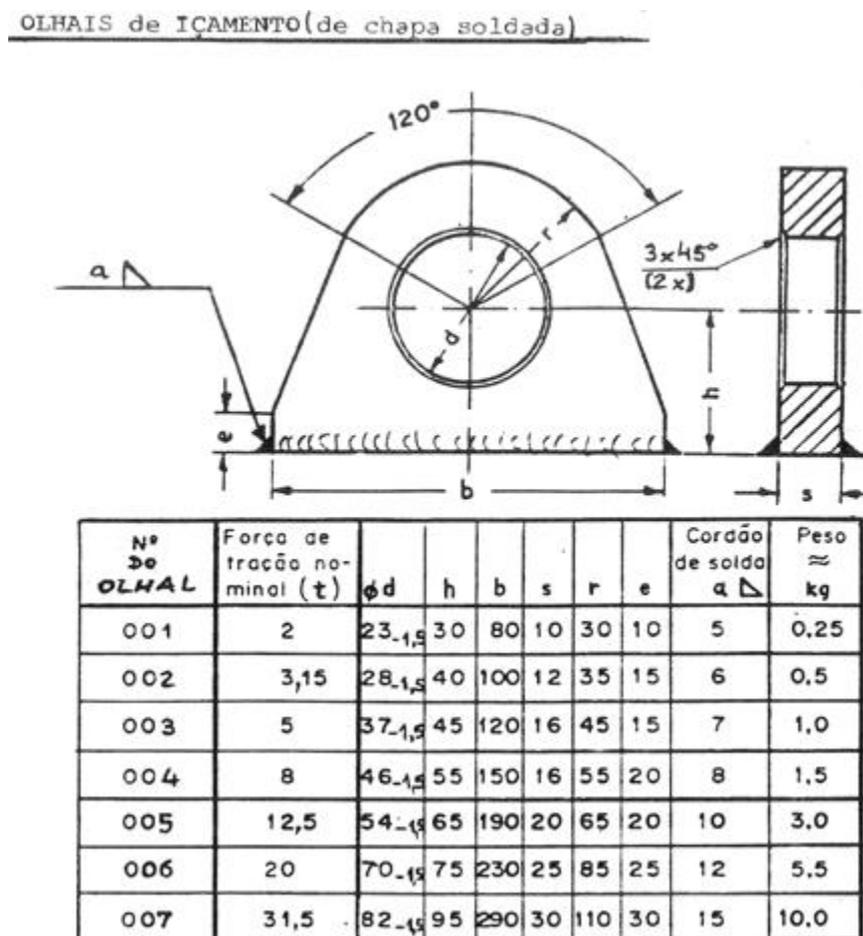
Os levantadores magnéticos permanentes serão conectados nas vigas secundárias por meio de olhais.

3.3.5 Olhais de içamento

Para içar a barra de carga e os levantadores magnéticos serão utilizados olhais de içamento, esses elementos estruturais possuem diversos modelos disponíveis no mercado, porém, para reduzir os custos do projeto da barra de carga, foi definido que os olhais utilizados no projeto seriam de chapa soldada, pois esse modelo pode ser facilmente produzido na oficina. Para facilitar o encaixe dos ganchos da ponte e diminuir o esforço na mesa das vigas foram especificados olhais duplos com pinos.

Foram utilizados dois tipos de olhais com geometrias diferentes, pois os olhais que são conectados aos ganchos da ponte devem ser mais robustos pelo fato de cada um estar içando metade do peso do mecanismo e metade do peso da chapa transportada, já os olhais das vigas secundárias são menos robustos por estarem transportando 1/8 do peso da chapa. O modelo dos olhais foi retirado do Manual de Projetos DEMAG e foi realizado um cálculo analítico para avaliar se os olhais e pinos atendem as condições de carregamento. Os olhais selecionados foram o de número 3 para os olhais da viga secundária e o número 5 para os olhais da viga principal.

Figura 12 – Geometria dos olhais de içamento de chapa soldada e carga admissível (Fonte: Manual de Projetos DEMAG)



A folga máxima entre o pino e o furo do olhal não deve ultrapassar um milímetro, pois folgas superiores a esse valor invalidam os cálculos de dimensionamento dos olhais devido às tensões de contato geradas pelo deslizamento das superfícies do olhal e do pino (ANSI/AISC360-10 - Specification for Structural Steel Buildings, 2010). Devido a essa restrição os pinos maiores possuem diâmetro de 53 mm e os pinos menores possuem diâmetro de 36 mm.

3.3.6 Modelo da estrutura

Após a escolha dos componentes do mecanismo foi elaborado o modelo da estrutura utilizando o software *CREO PARAMETRIC 4.0*. Foi solicitado pelo cliente à adição de olhais extras nas vigas secundárias para o transporte de chapas já cortadas. Também foi sugerida pelo cliente a adição de olhais na lateral da estrutura para que os operadores pudessem manusear a estrutura com o auxílio de uma haste quando a mesma estivesse içada pela ponte.

O volume da estrutura, fornecido pelo software de modelagem, é de 70356,23 cm³, sabendo que a liga utilizada no projeto tem 7,86 g/cm³ de densidade o peso da estrutura está na ordem de 553 kg, atendendo assim a limitação da ponte rolante.

Figura 13 – Vista isométrica da barra de carga (Fonte: Autor)

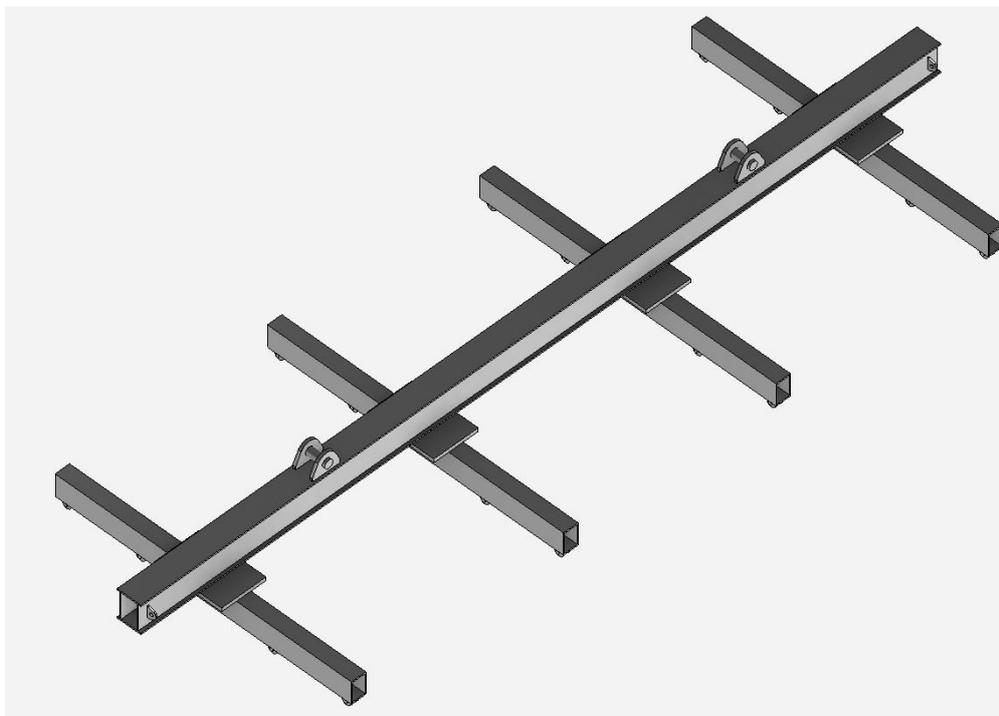
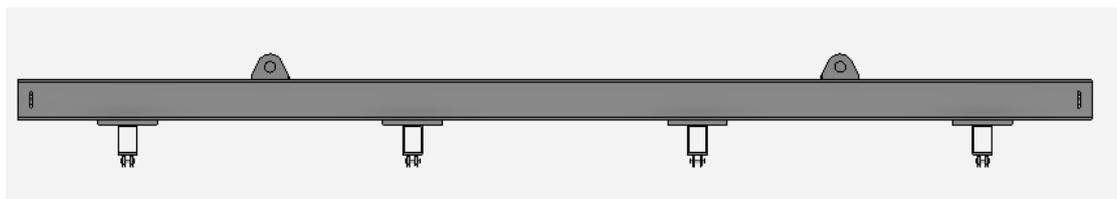


Figura 14 – Vista lateral da barra de carga (Fonte: Autor)



Após a elaboração do modelo, foi realizada sua importação para o software ANSYS DISCOVERY AIM para avaliação estrutural do mecanismo através do método dos elementos finitos.

3.4 Análise de elementos finitos

Para validar o dimensionamento analítico do projeto será executada uma análise de elementos finitos da estrutura, nesse tópico serão apresentados as premissas de análise e os parâmetros de simulação para as três simulações executadas. Inicialmente serão listados os

parâmetros comuns as três simulações que são as condição de carregamento, as restrições, os contatos e o material da estrutura entre os componentes da estrutura. Depois serão evidenciados os parâmetros únicos de cada simulação que são a malha e os controles de tamanho de malha.

3.4.1 Premissas de análise

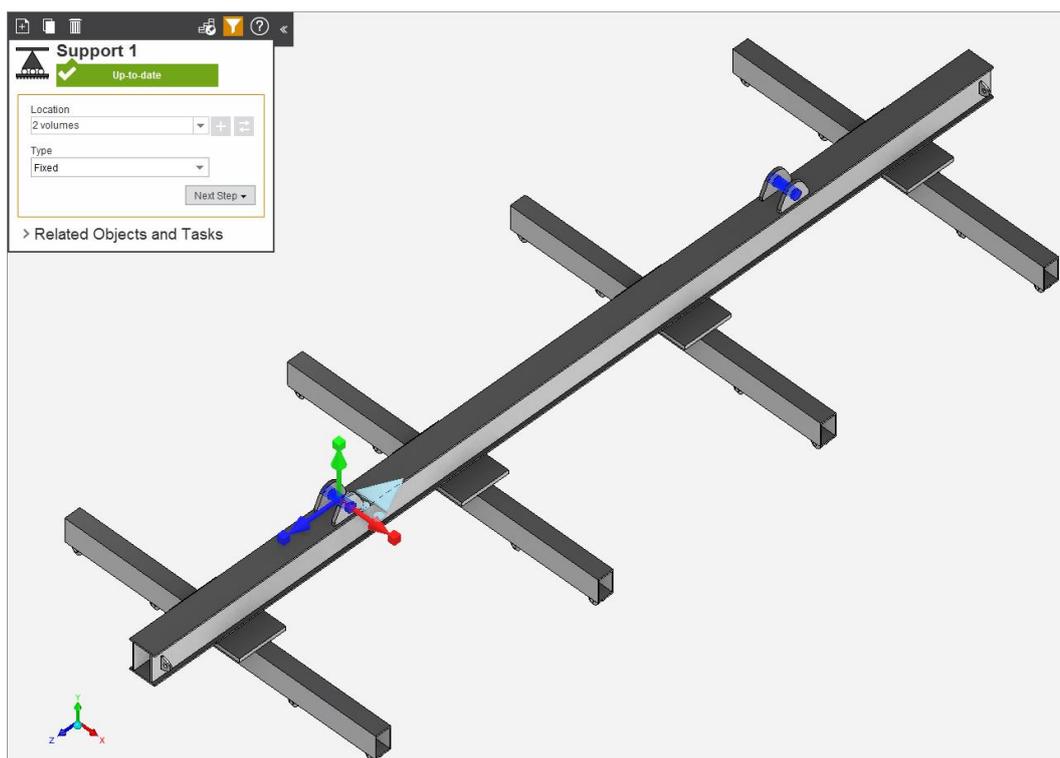
- i. Devido o comportamento do material após a zona elástica não ser linear, o software de simulação considera que as propriedades continuem obedecendo ao comportamento de linearidade após o limite de elasticidade. Assim, os resultados além deste limite não são válidos.
- ii. A análise assume que a deformação e deflexão de cada elemento são pequenas e que a deformação do elemento tem impacto insignificante sobre a sua rigidez.
- iii. Os elementos deformam igualmente em todas as três direções, isto é, as propriedades do material são isotrópicas.
- iv. A maioria dos acoplamentos entre os componentes foram considerados perfeitos e as uniões entre os metais foram selecionados como *bonded*, ou seja, foram interpretados como uma continuação do elemento adjacente. As únicas uniões que não foram selecionadas como *bonded* foram as dos olhais e pinos maiores, pois a interação entre esses dois componentes é de encaixe por interferência, logo o tipo de contato selecionado para essas uniões é o *rough*. As soldas não serão consideradas nessa análise de forma a evitar o fenômeno computacional de stress singularities que pode distorcer os valores da simulação.
- v. Análise de elementos finitos executada no software ANSYS DISCOVERY AIM.

3.4.2 Parâmetros de simulação – Restrições

De modo a se aproximar da condição real de içamento do equipamento pela ponte rolante, foi aplicado o suporte do tipo *fixed* nos pinos que estarão conectados aos ganchos da ponte rolante, esse tipo de suporte restringe o movimento dos pinos nos três eixos.

De forma a permitir que a estrutura se comportasse de acordo com as condições reais os contatos entre os pinos e os olhais maiores foram definidos como *rough*, esse contato permite uma movimentação relativa entre o pino e os olhais, essa configuração faz com que não sejam restringidos os momentos causados na estrutura pelas forças aplicadas, tornando a restrição similar a de um apoio. Nos olhais e pinos menores não foi utilizado esse tipo de contato com o objetivo de diminuir o tempo de processamento da simulação.

Figura 15 – Vista isométrica da barra de carga com indicação da restrição dos pinos na estrutura (Fonte: Autor)

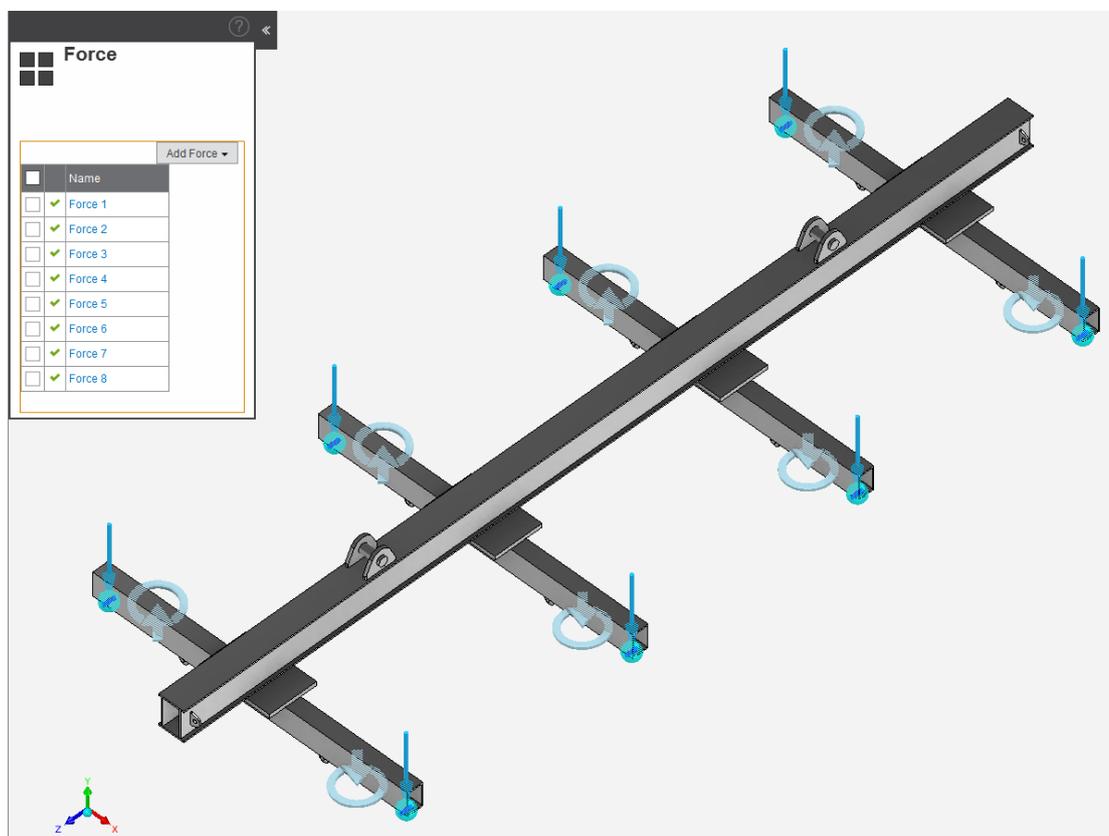


3.4.3 Parâmetros de simulação – Cargas

As cargas serão aplicadas nos pinos dos olhais das vigas secundárias na forma de força, pois os levantadores magnéticos que içam as chapas estão conectados a estrutura nesse componente. A carga aplicada é equivalente ao peso estimado dos levantadores somado ao

peso da chapa de maior peso (5823 kg), essa carga foi dividida nos oito pontos de apoio da chapa. Vale ressaltar que a gravidade também está afetando a estrutura.

Figura 16 – Conjunto de forças aplicado na estrutura (Fonte: Autor)



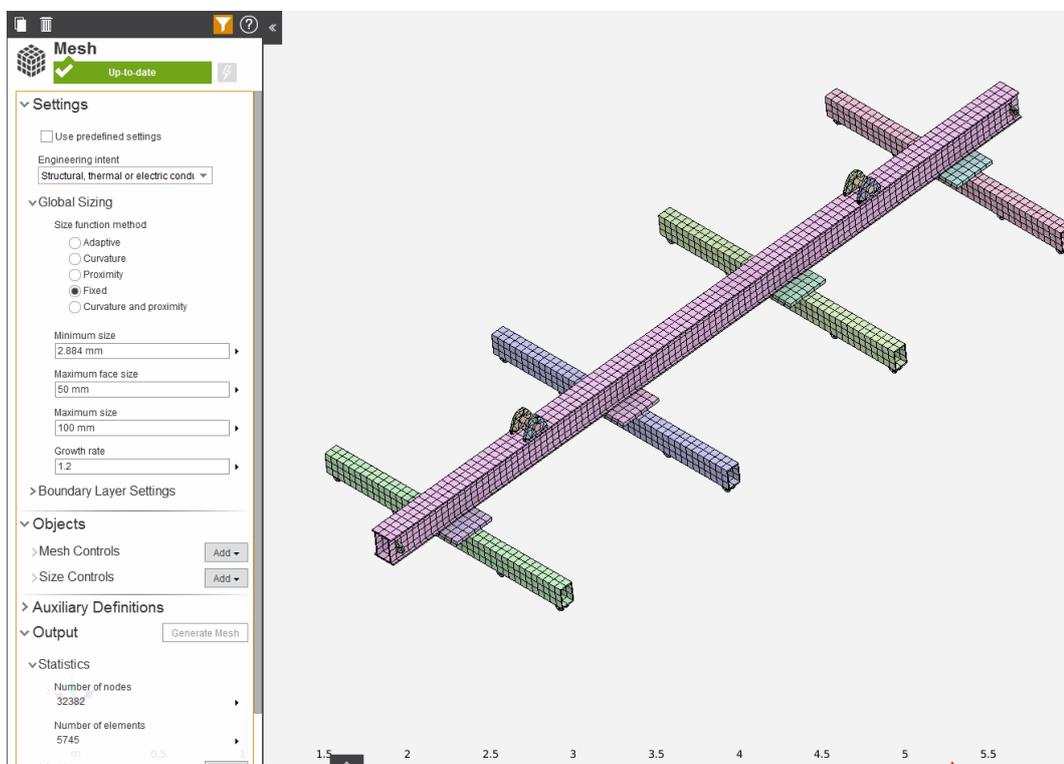
A intensidade de cada força é equivalente ao peso das chapas somado ao peso dos levantadores dividido por oito, resultando em uma carga de 7200 N.

3.4.4 Parâmetros de simulação – Malha

De forma garantir resultados coerentes e verificar a presença de *stress singularities* foram executadas três simulações da estrutura com diferentes parâmetros de malha, a primeira simulação foi realizada com uma malha grossa do tipo *fixed*, essa configuração faz com que os elementos de malha mantenham um tamanho constante por todo o modelo analisado. O objetivo dessa simulação inicial era verificar o perfil de tensão/deslocamento da estrutura e também identificar os possíveis concentradores de tensão e pontos com *stress singularities*, após os resultados dessa simulação foi identificado um ponto da estrutura cujo valor de tensão estava muito acima do esperado, entretanto para ter

certeza de que esse ponto era uma singularidade, se fez necessário a execução de mais simulações.

Figura 17 – Propriedades da malha na primeira simulação (Fonte: Autor)



A segunda simulação também foi executada com o tipo de malha *fixed*, entretanto o tamanho do elemento escolhido para essa simulação foi oito vezes menor que o da primeira simulação. Também foi adicionado um *size control* nas faces da estrutura que apresentaram tensões com valores acima do esperado para produzir uma malha ainda mais fina nessas faces com o objetivo de verificar se os valores de tensão nesse local da estrutura iriam convergir, porém, no ponto em que foi adicionado o *size control*, a tensão aumentou exponencialmente aumentando ainda mais a suspeita de que essa tensão elevada se trata de uma singularidade de tensão. Vale ressaltar que outro ponto que reforçou de que a tensão nesse ponto da estrutura se tratava de uma singularidade é que o deslocamento global da estrutura e o perfil de tensão da estrutura não sofreram mudanças significativas entre as duas simulações.

Figura 18 – Propriedades da malha na segunda simulação (fonte: Autor)

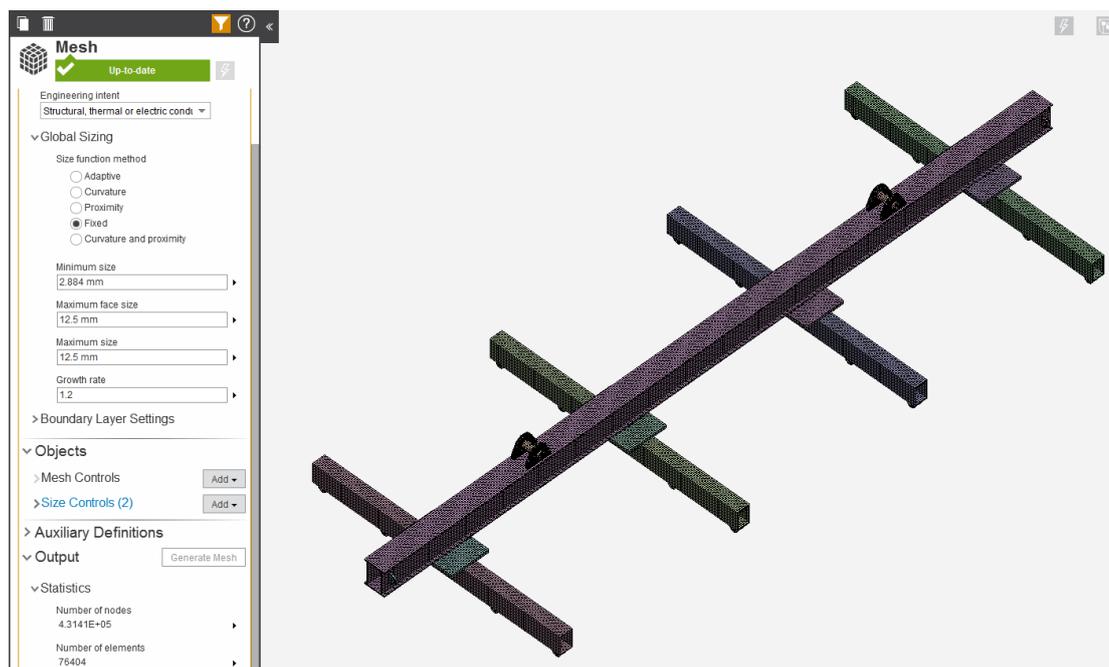
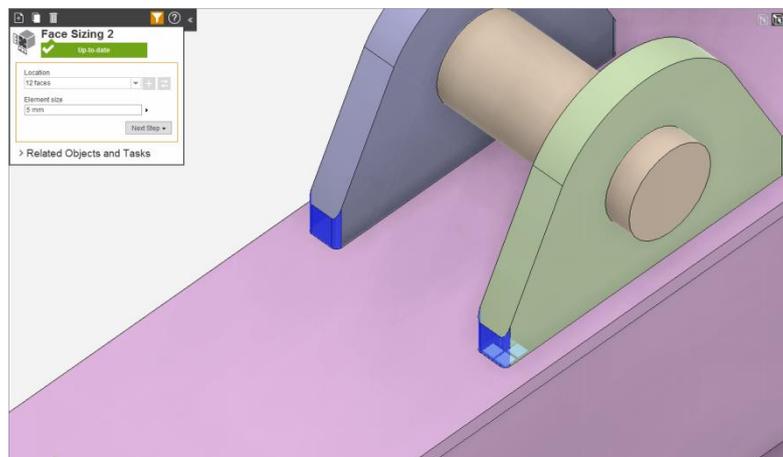


Figura 19 – Local de aplicação do refino local de malha (fonte: Autor)



A última simulação foi executada com uma malha idêntica à da primeira simulação para a estrutura com a adição de um *size control* no local de suspeita de singularidade. A malha grossa foi escolhida para a estrutura para diminuir o tempo de processamento da simulação e também pelo fato de que os resultados de tensão e deslocamento, na estrutura, já haviam convergido entre a primeira simulação e a segunda simulação. O *size control* gerou uma malha extremamente fina no ponto da estrutura em que havia suspeita de singularidade e, conforme o esperado, a tensão no ponto de suspeita aumentou exponencialmente, enquanto o

resto da estrutura manteve o mesmo perfil de tensão e deslocamento, confirmando a suspeita original de que o ponto em questão se tratava de uma singularidade de tensão.

Figura 20 – Propriedades da malha na terceira simulação (fonte: Autor)

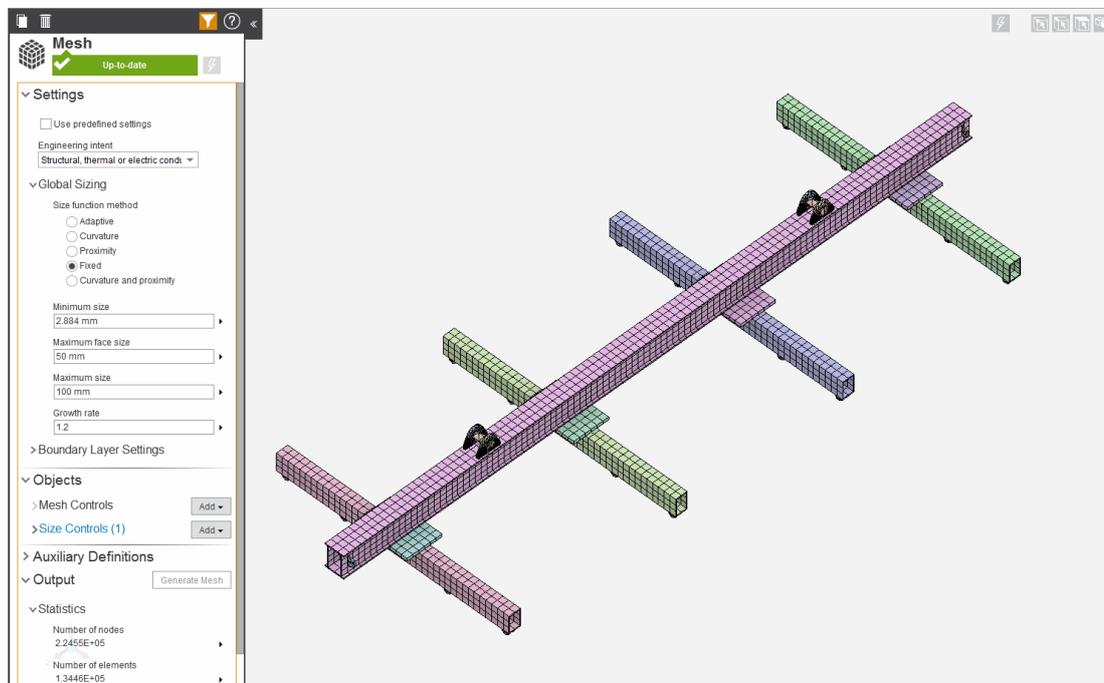
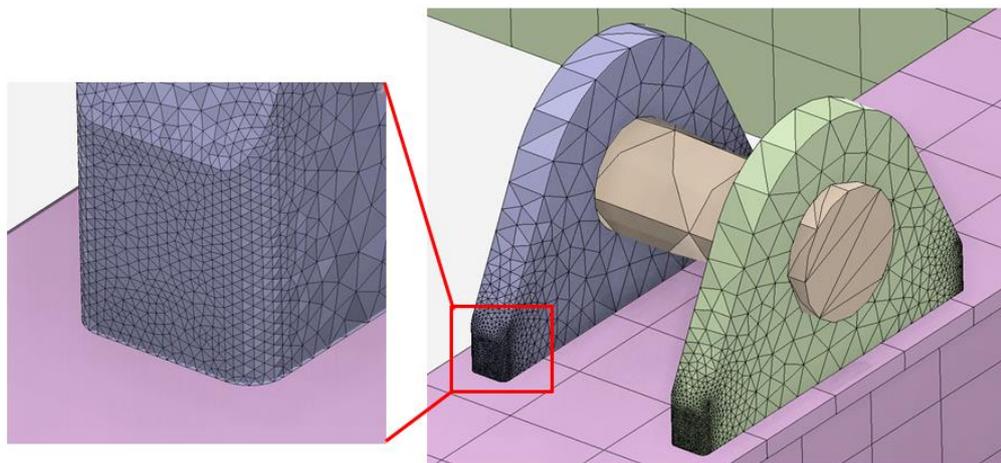


Figura 21 – Refino local de malha e detalhe da malha gerada (fonte: Autor)



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do método analítico

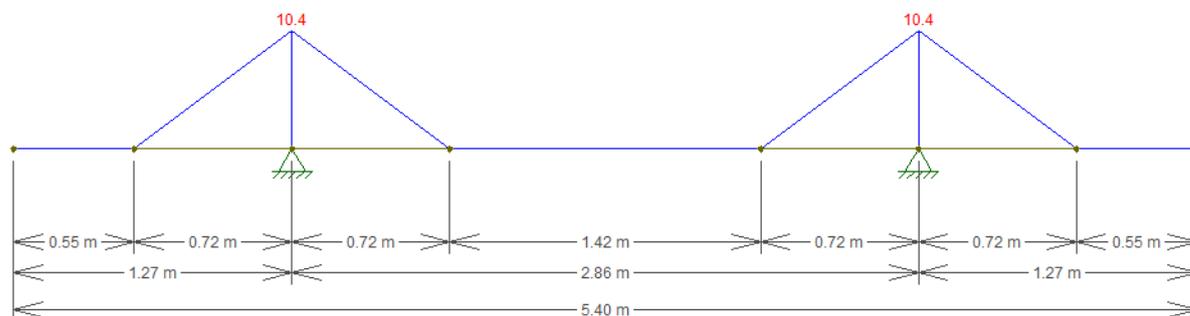
4.1.1 Viga principal

A viga principal sofre esforços de flexão e cisalhamento devido às cargas atuantes, entretanto, apenas a tensão de flexão será considerada para os cálculos estruturais, pois, de acordo com Norton (2013):

A tensão de cisalhamento devido à força cortante será pequena quando comparada à tensão de flexão Mc/I , no caso da viga ser longa em comparação à sua altura. A razão para isso pode ser observada na Equação 3.16 e nos diagramas de força cortante e momento fletor, como aqueles mostrados na Figura 4-18. Uma vez que a magnitude da função momento é igual à área abaixo da função cortante, para qualquer valor dado de V na figura 4-18, a área abaixo da função cortante, e, portanto, o máximo momento fletor, aumentará com o comprimento da viga. Desse modo, enquanto a máxima magnitude da tensão de cisalhamento permanece constante, a tensão de flexão aumenta com o comprimento da viga. Desse modo, enquanto a máxima magnitude da tensão de cisalhamento permanece constante, a tensão de flexão aumenta com o comprimento da viga, ultrapassando em algum momento o valor da tensão de cisalhamento. Uma regra prática comumente usada diz que a tensão de cisalhamento devido à força cortante em uma viga será suficientemente pequena a ponto de poder ser ignorada se a razão comprimento-altura da viga for igual ou superior a 10. Barras curtas abaixo dessa razão devem ser analisadas em termos tanto de tensão de cisalhamento devido à cortante como de tensão normal de flexão. (p.160).

O comprimento total da viga é 5400 mm e a sua altura é de 200 mm logo a razão comprimento-altura é superior a 10, com isso pode-se negligenciar as tensões de cisalhamento na viga. O momento fletor atuante na estrutura pode ser visto na figura abaixo.

Figura 22 – Curva de momento fletor atuante [kNm] no modelo simplificado da estrutura da viga principal (fonte: Autor)



Utilizando a equação 01 podemos calcular a tensão de flexão atuante na estrutura e comparar esse resultado com a tensão admissível calculada pela norma.

Tabela 15 – Resultado do método analítico para a viga principal

Momento fletor	W_y	Tensão atuante	Tensão admissível	Fator de segurança
10,4 kNm	338,8 cm ³	30,7 MPa	142,8 MPa	4,65

4.1.2 Viga secundária

Os princípios aplicados para a viga principal também serão aplicados nesse componente, sendo assim só será utilizada a tensão de flexão atuante no perfil para comparação com a tensão admissível de projeto.

Figura 23 – Curva de momento fletor atuante [kNm] no modelo simplificado da estrutura da viga secundária (fonte: Autor)

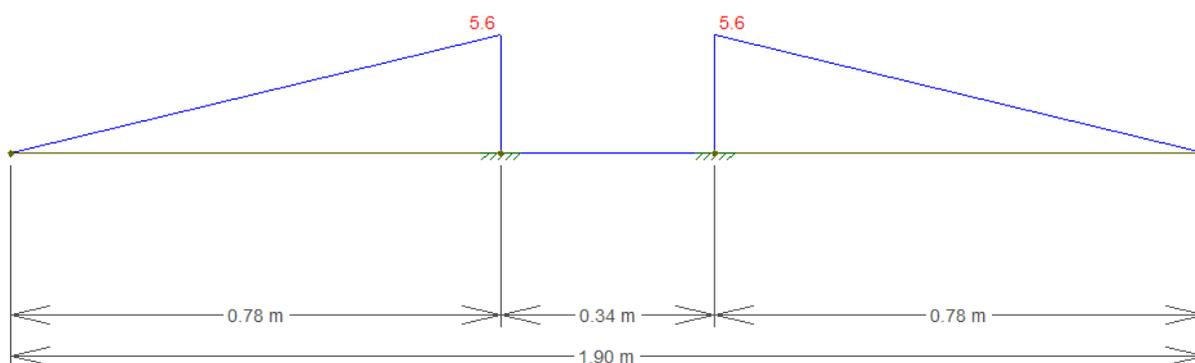


Tabela 16 – Resultado do método analítico para a viga secundária

Momento fletor	Wy	Tensão atuante	Tensão admissível	Fator de segurança
5.6 kNm	141,5 cm ³	39,6 MPa	142,8 MPa	3,6

4.1.3 Olhais de içamento e pinos

As tensões atuantes nos pinos dos olhais são de cisalhamento e flexão, a carga atuante no pino maior é equivalente à metade do peso da chapa transportada somado a metade do peso da estrutura, no pino menor a carga é equivalente a 1/8 do peso da chapa transportada.

Os pinos foram considerados engastados na determinação do momento fletor atuante nos mesmos.

Tabela 17 – Resultado do método analítico das tensões nos pinos

Pino	T. flexão	T. cisalhamento	Von mises	T. Admissível	F.S.
Maior	36 MPa	21,26 MPa	51,33 MPa	142,80 MPa	2,78
Menor	10 MPa	10,52 MPa	20,67 MPa	142,80 MPa	6,91

Nos olhais atuam tensões de cisalhamento e esmagamento, porém a intensidade do carregamento é equivalente à metade da carga atuante nos respectivos pinos, pois cada pino está conectado a um par de olhais.

Tabela 18 – Resultado do método analítico das tensões nos olhais

Olhal	T. Cisalhamento	T. Esmagamento	Von mises	T. Admissível	F.S.
Maior	20,58 MPa	14,75 MPa	38,57 MPa	142,80 MPa	3,70
Menor	8,82 MPa	6,20 MPa	16,48 MPa	142,80 MPa	8,67

4.2 Resultados da análise de elementos finitos

4.2.1 Primeira simulação – Malha grossa sem refino local

Figura 24 – Tensões atuantes na estrutura (Fonte: Autor)

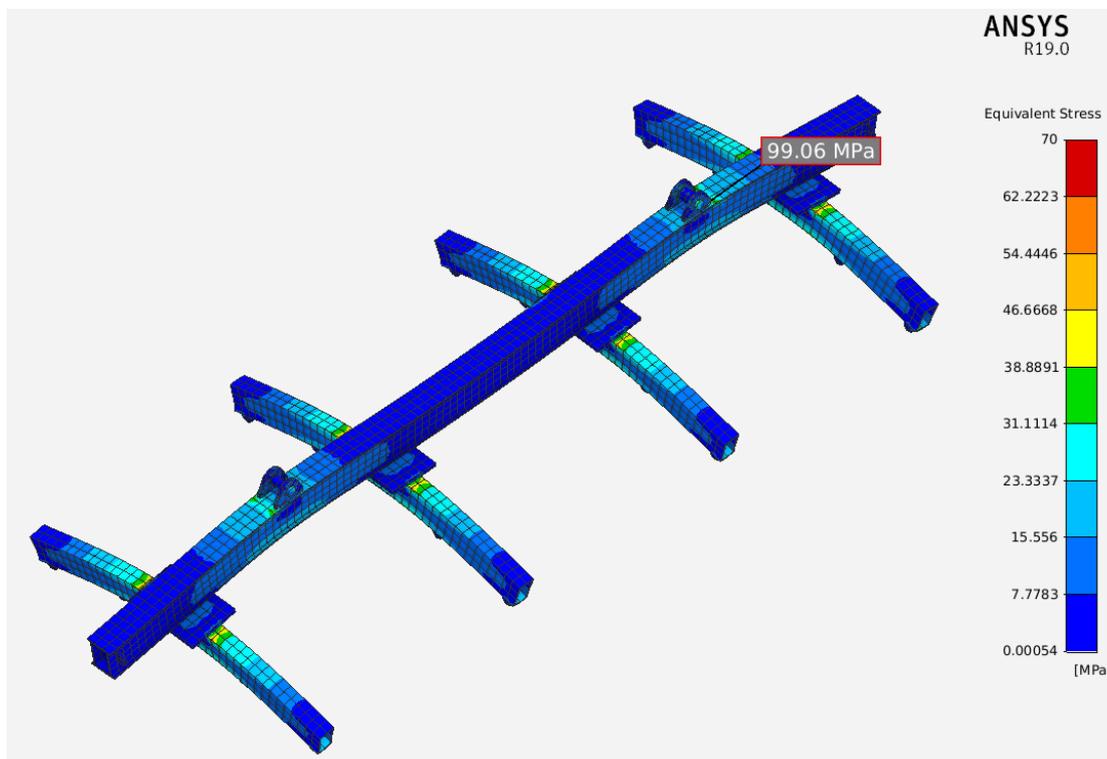


Figura 25 – Tensão atuante na viga principal próximo ao olhal (Fonte: Autor)

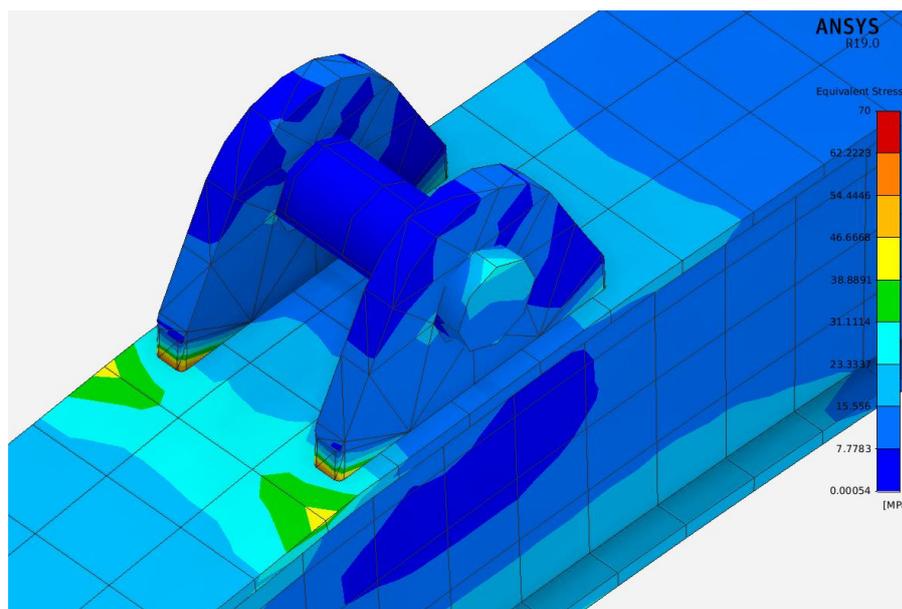


Figura 26 – Tensão atuante próxima à chapa de conexão na viga secundária (Fonte: Autor)

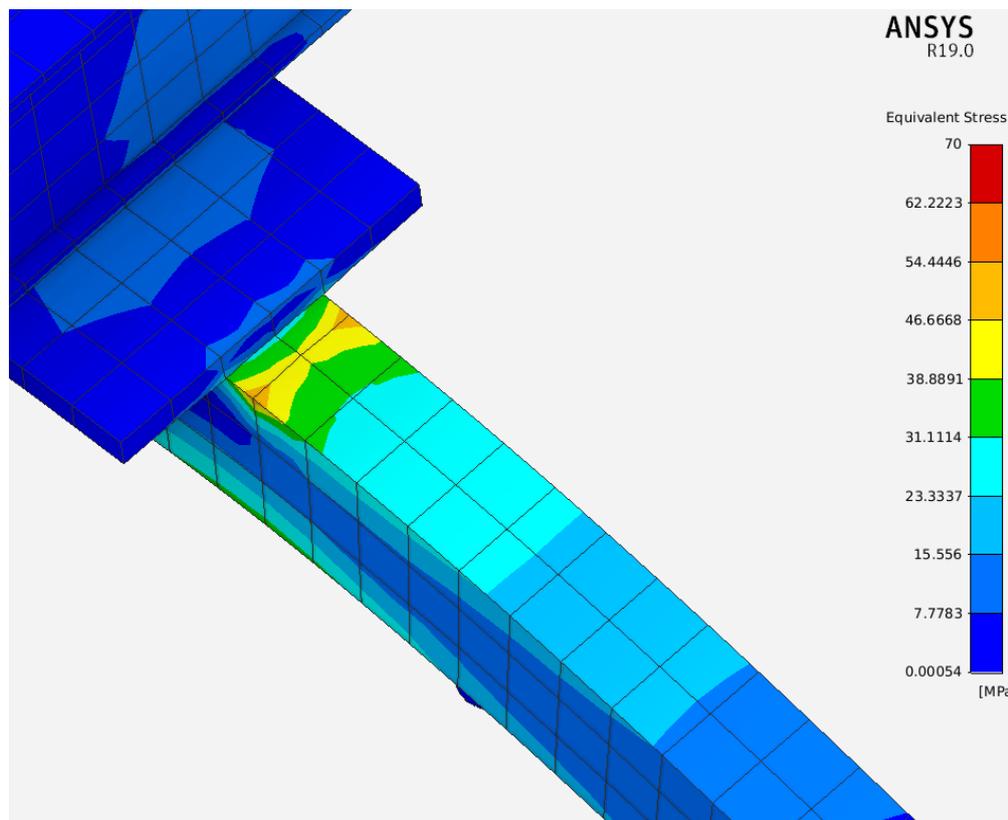


Figura 27 – Tensão atuante na viga secundária (Fonte: Autor)

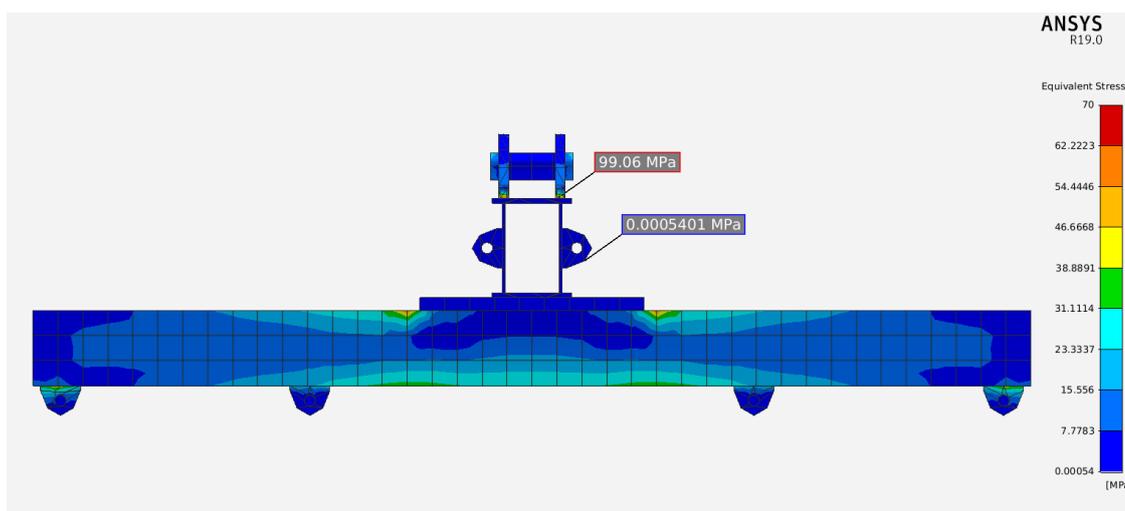


Figura 28 – Tensão atuante na interface olhal-viga principal (Fonte: Autor)

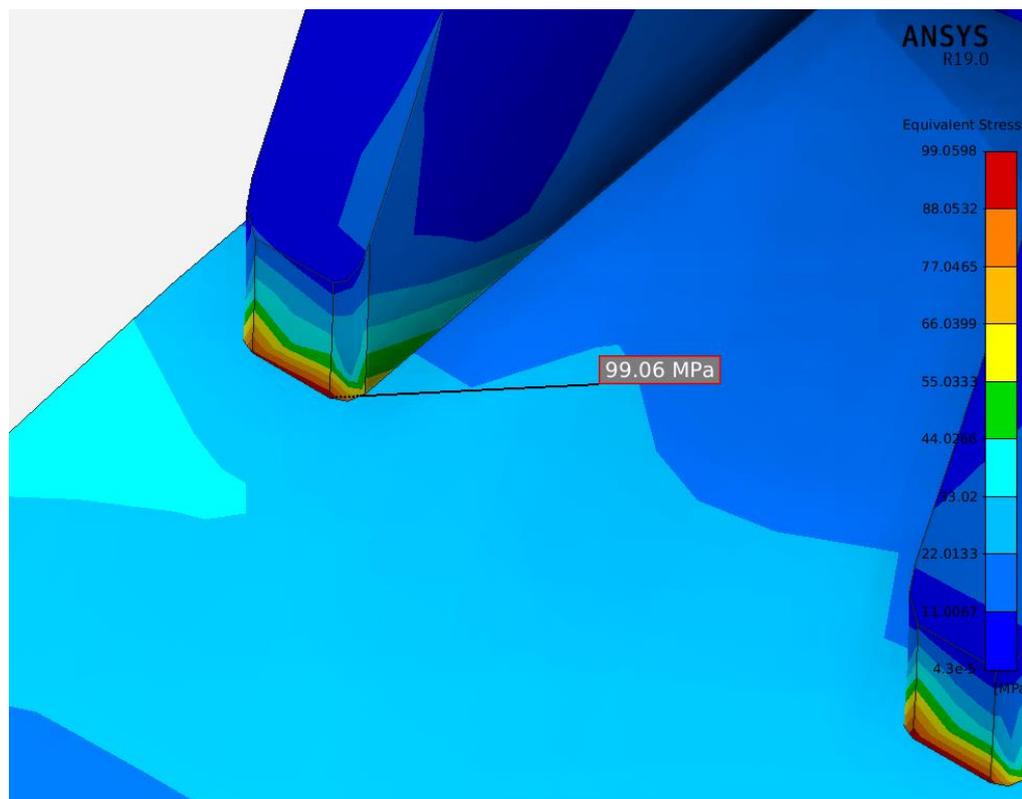
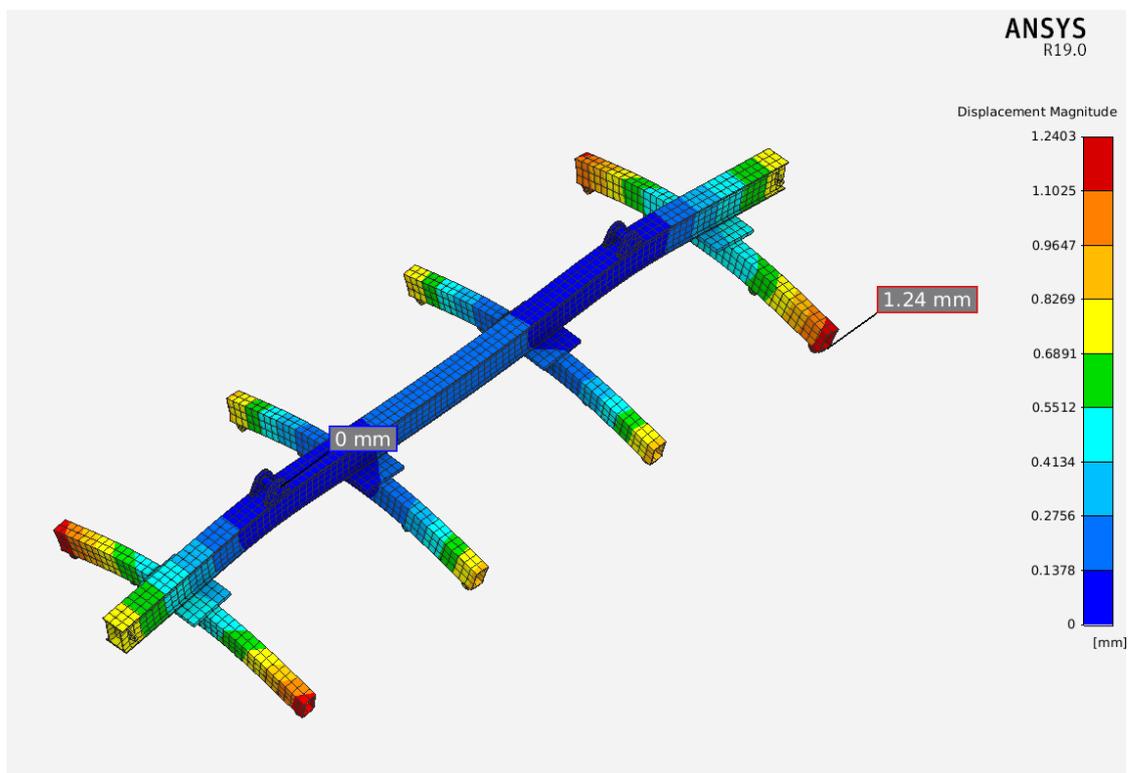


Figura 29 – Perfil de deslocamento da estrutura (Fonte: Autor)



4.2.2 Segunda simulação – Malha fina com refino local

Figura 30 – Tensões atuantes na estrutura (Fonte: Autor)

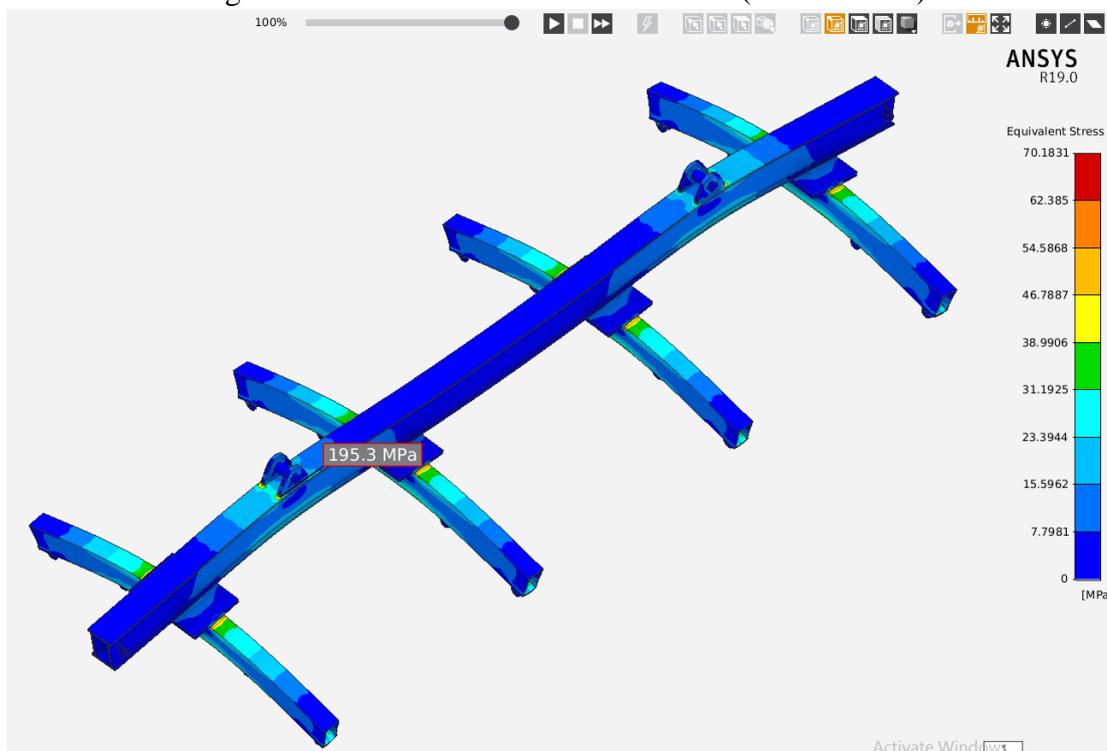


Figura 31 – Tensão atuante na viga principal próximo ao olho (Fonte: Autor)

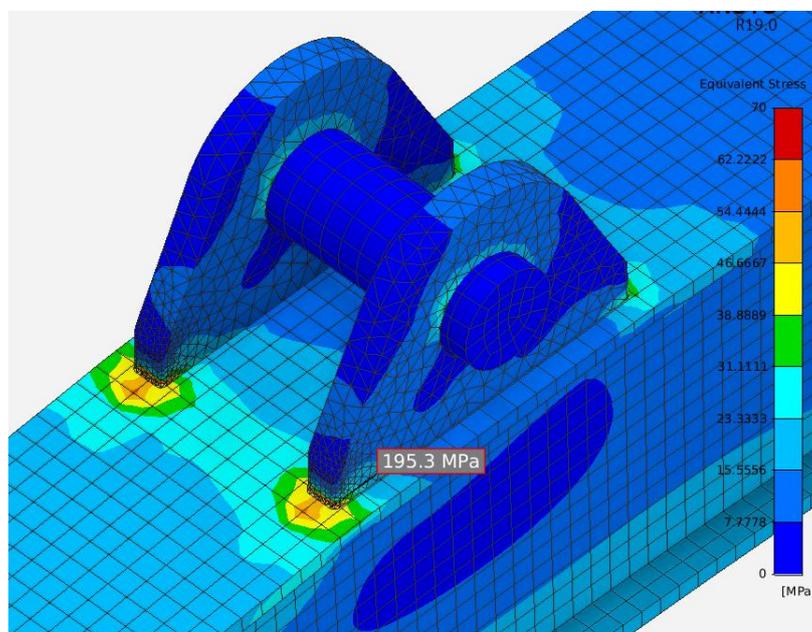


Figura 32 – Tensão atuante na viga secundária (Fonte: Autor)

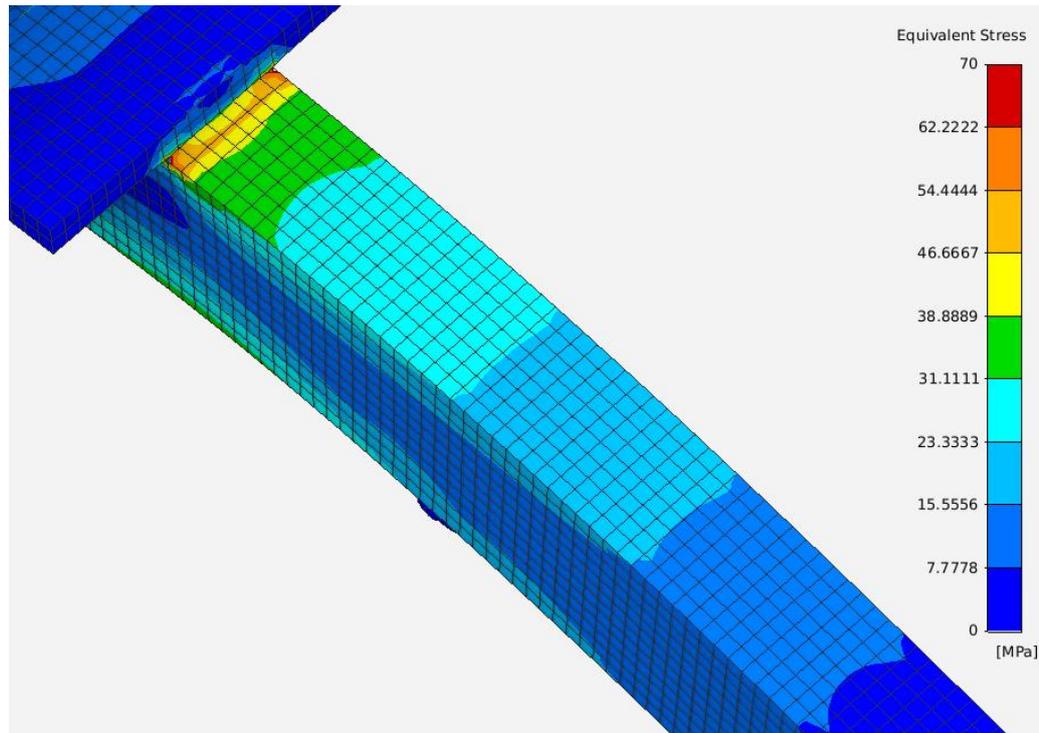


Figura 33 – Vista frontal da estrutura e tensão atuante (Fonte: Autor)

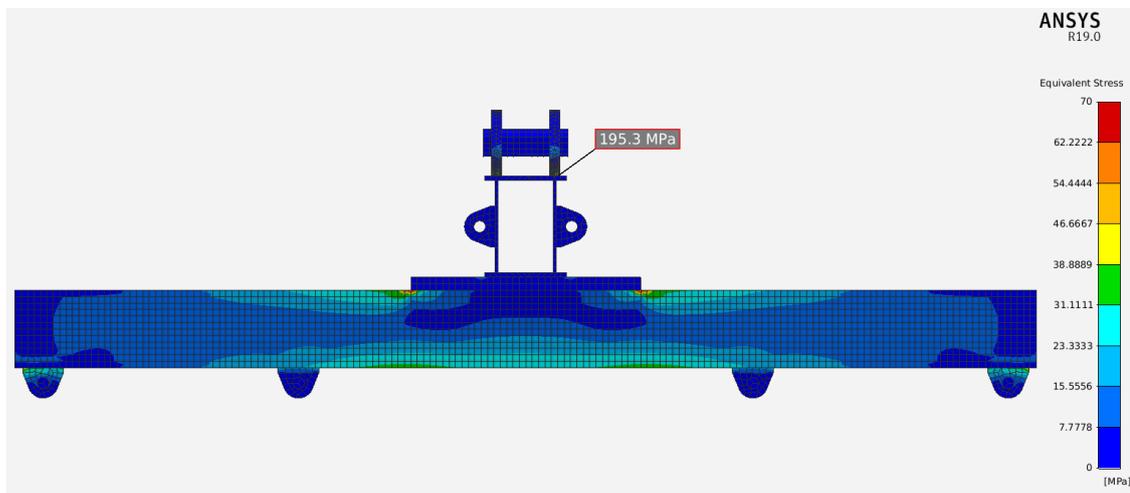


Figura 34 – Tensão atuante na interface olhal-viga principal (Fonte: Autor)

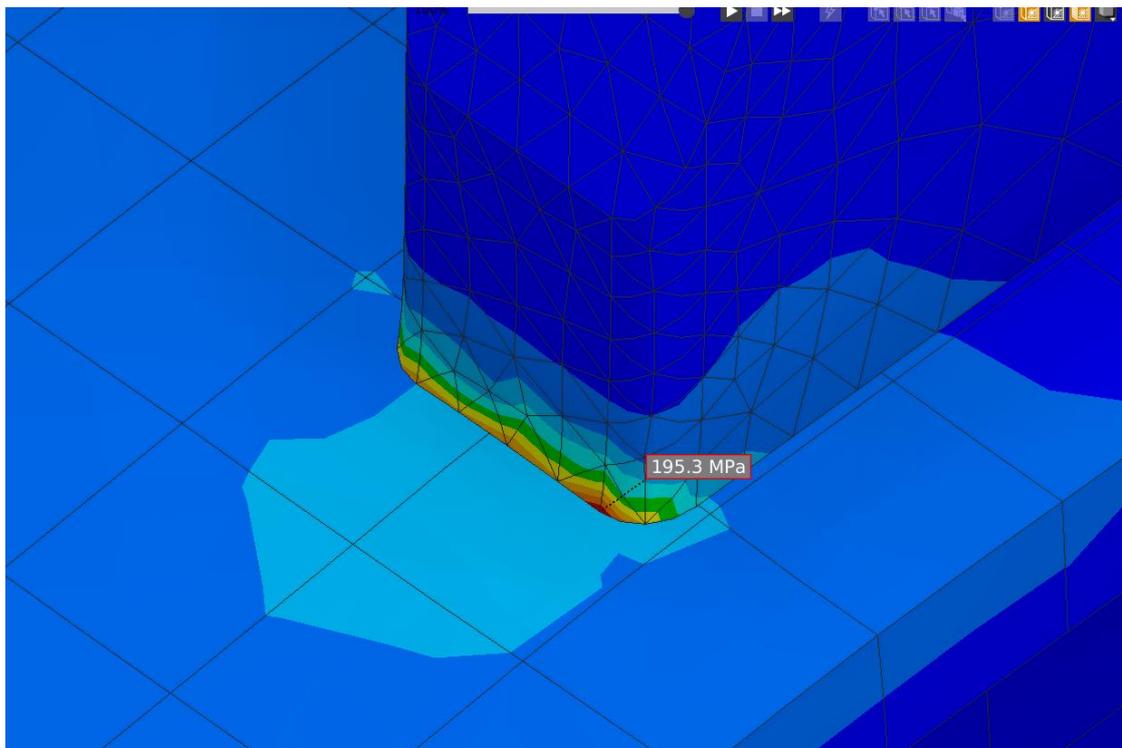
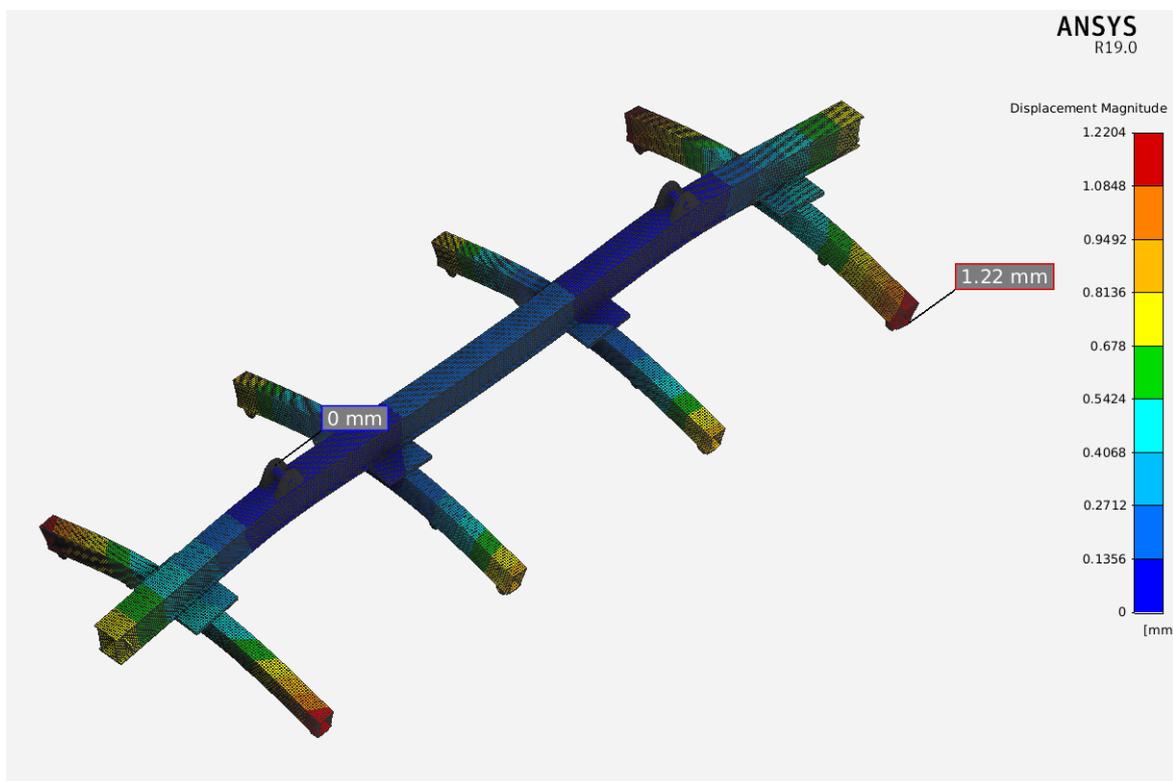


Figura 35 – Perfil de deformação da estrutura (fonte: Autor)



4.2.3 Terceira simulação – Malha grossa com refino local na singularidade

Figura 36 – Tensões atuantes na estrutura (Fonte: Autor)

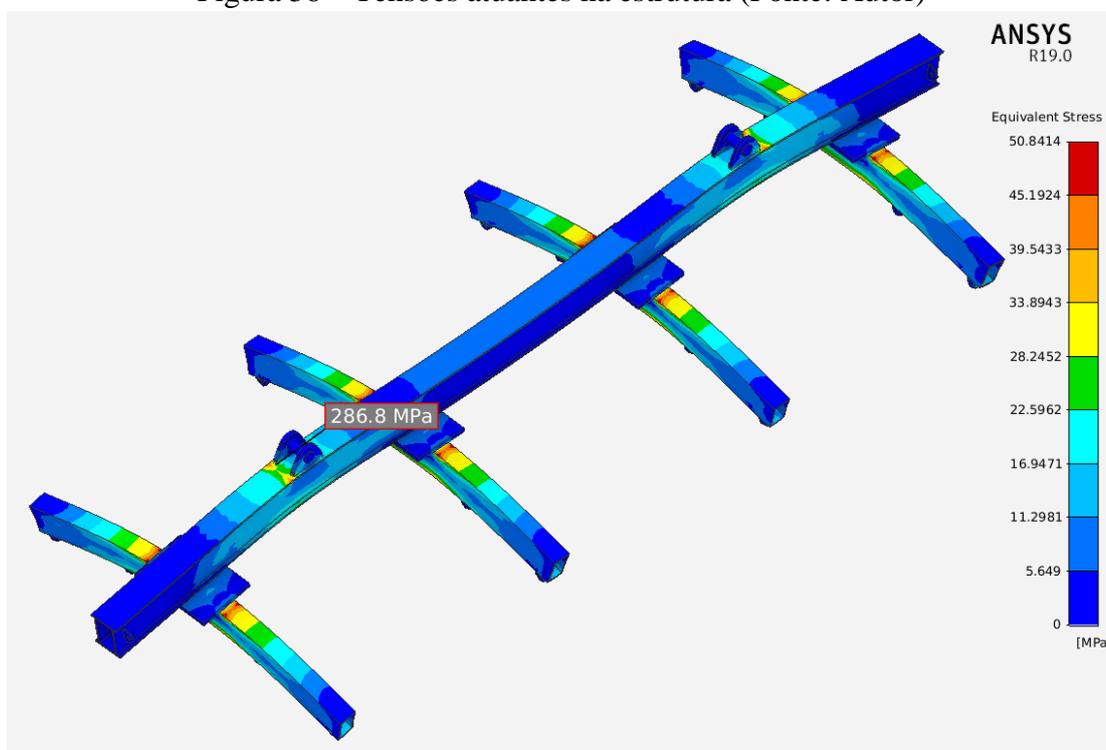
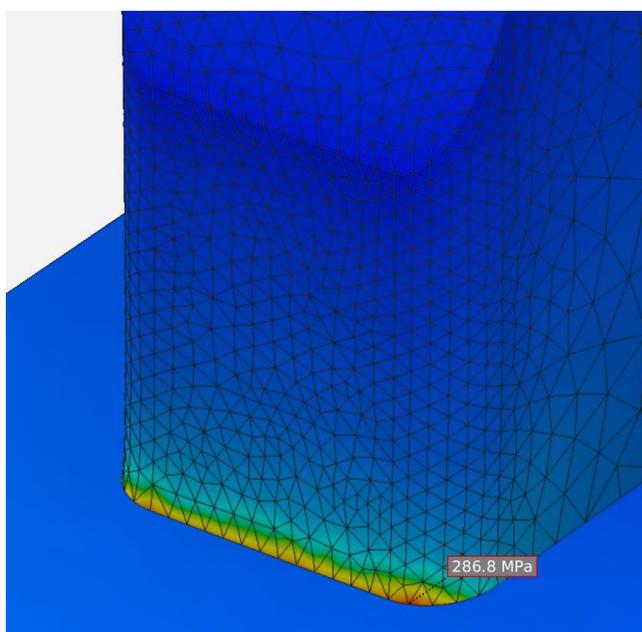


Figura 37 – Tensão no ponto de singularidade (Fonte: Autor)



4.3 Discussão

As tensões resultantes, tanto no método analítico quanto na simulação por elementos finitos, estão abaixo da tensão admissível para o projeto, logo a estrutura da barra de carga está aprovada para uso conforme os critérios levantados pelo cliente e pelo projetista. Para aplicações fora dessas especificações, como, por exemplo, içamento de chapas de peso maior que 5,8 toneladas, novos cálculos e simulações devem ser executados para verificar se a estrutura suporta as novas condições de carga.

Os resultados do método analítico e das simulações apresentaram resultados similares, as principais diferenças se encontraram nas tensões da principal e da viga secundária. Na viga principal os resultados de tensão próximos à singularidade ficaram na ordem de 50 MPa, entretanto essa tensão pode estar associada a interação do olhal com a mesa da viga caixão, que não está prevista nos cálculos analíticos. Outras partes da viga na simulação apresentaram resultados condizentes com os cálculos do método analítico.

Na viga secundária também foram encontrados valores de tensão acima do esperado (60 MPa), porém ainda dentro do limite de tensão admissível. Essa tensão aparenta ser produzida devido a um concentrador de tensão entre a chapa de conexão e a viga secundária, para afirmar que essa é a causa exata, mais uma simulação deveria ser executada com um refino de malha local. Vale ressaltar que os cálculos analíticos foram executados considerando que a viga secundária está engastada, porém na estrutura apenas a mesa superior da viga está de fato engastada, fato que explica também a divergência entre os resultados da simulação e os cálculos analíticos. Nas regiões longe do engaste o resultado da tensão na simulação foi similar ao do método analítico.

Os resultados de tensão nos olhais maiores foram condizentes entre a simulação e o método analítico. Os resultados de tensão nos olhais e pinos menores das simulações não podem ser avaliados, pois não foi aplicado o tipo de contato *rough*. Devido ao fato que a restrição está localizada nos pinos maiores da estrutura, o software não calcula tensões nesse componente, pois não há nenhum tipo de deslocamento nos pinos, logo não foi possível comparar os resultados da simulação com os dos cálculos analíticos para esse componente.

Tabela 19 – Comparação entre os metodos para as vigas

Componente	Localização	M. Analítico	Sim. 1	Sim 2.	Sim 3.
Viga principal	Face superior	30,7 MPa	26,5 MPa	27,2 MPa	27,2 MPa
	Face inferior	30,7 MPa	24,8 MPa	25,1 MPa	25,3 MPa
Viga secundária	Face superior	39,6 MPa	48,8 MPa	40,9 MPa	41,2 MPa
	Face inferior	39,6 MPa	32,4 MPa	32,6 MPa	32,9 MPa

5 CONCLUSÃO

O trabalho atingiu os objetivos propostos, a barra de carga projetada atende a todos os requisitos estabelecidos pelo cliente e também aos requisitos da norma vigente para este tipo de projeto. O modelo da barra de carga foi criado com base no *know-how* do projetista e modelos de barra de carga encontrados no mercado. A seleção de componentes teve como base cálculos analíticos e pesquisa de catálogos de empresas referência no ramo de fabricação de estruturas metálicas.

A simulação pelo método dos elementos finitos é uma ferramenta incrível para a verificação de projetos e cálculos, porém se faz necessário realizar uma análise profunda da simulação de forma a garantir que erros como singularidade de tensão não tenham influência nos resultados encontrados. Vale ressaltar que essa ferramenta não deve ser usada isoladamente e que é de suma importância que o profissional executando a simulação conheça o comportamento do objeto em análise.

Embora o projeto tenha atendido todos os requisitos, aqui se encontram algumas sugestões para aprofundar a análise do projeto e possivelmente melhorá-lo.

- 1) Melhorar a análise de elementos finitos de forma a torná-la capaz de calcular as tensões nos pinos da estrutura;
- 2) Realizar um estudo para aplicação de reforços na alma da viga principal e na viga secundária nos pontos que apresentaram tensões superiores às calculadas pelo método analítico para aumentar ainda mais o coeficiente de segurança da estrutura.

6 REFERÊNCIAS

- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4ª Edição, Ed. Bookman, 2013.
- SHIGLEY, Joseph E. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 8.Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- SOBRINHO, Castro. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**, LTC Editora, 2006.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Editora Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- SORIANO, Humberto Lima. **Elementos Finitos – Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. Editora Ciência Moderna Ltda, 2009.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PEFEIL W, PFEIL M. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. 8. Ed. Rio de Janeiro. 2009
- MODENESI, Paulo José. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.
- DESA, I.Y,N; ELDHO, T.I; SHAH, A.H. **Finite Element Method with Applications in Engineering**. Pearson Education India. 2011.
- FERRANTE, Maurício. **Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: Estratégia e Metodologia Básica**. Rio de Janeiro. 2000.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8400 – Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas**. Rio de Janeiro: 1984.
- DEMAG MANNESMANN ENGINEERING. **Manual de projeto**. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400 – Cálculo de equipamentos para elevação e movimentação de carga**. Rio de Janeiro. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto**. Rio de Janeiro. 2008.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **ANSI/AISC360-10 - Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago. 2016
- COMSOL MULTIPHYSICS CYCLOPEDIA. **The finite element method**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>>. Acesso em: 10 maio. 2018.

TIMBOBONG, Deus. **Behavior of contact.** Disponível em: <<https://deust.wordpress.com/2012/01/02/behavior-of-contact-in-ansys/>>. 2012. Acesso em: 18 maio. 2018.

SÖNNERLIND, Henrik. **Singularities in Finite Element Models: Dealing with red spots.** 2015. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/singularities-in-finite-element-models-dealing-with-red-spots/>>. Acesso em: 19 maio. 2018.

ACÍN, Marcos. **Stress singularities, stress concentrations and mesh convergence.** 2015. Disponível em: <<http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/>>. Acesso em: 19 maio. 2018.

MATWEB. **Material Property Data: ASMT A36.** Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a>>. Acesso em: 11 maio. 2018.

.