



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica



PROJETO SOBRE ANÁLISE DE TENSÃO ESTRUTURAL DE UM GUINDASTE HIDRÁULICO ARTICULADO

CARLOS RENATO SOUSA SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Uberlândia - MG
2024

CARLOS RENATO SOUSA SILVA

PROJETO SOBRE ANÁLISE DE TENSÃO ESTRUTURAL DE UM GUINDASTE HIDRÁULICO ARTICULADO

Proposta de fim de curso, apresentado à disciplina de Proposta de fim de curso II, do Curso Superior de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Uberlândia – UFU, como requisito obrigatório para obtenção da graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida.

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a análise estrutural do equipamento guindaste hidráulico articulado utilizando o método dos elementos finitos (MEF), o projeto desenvolvido em software CAD e fundamentado na NBR 8400. A metodologia baseada no comprimento, massa, material e geometria dos equipamentos, além das especificações da NBR 8400. Dois tipos de modelos para o cálculo utilizando o MEF o modelo local (analisando separadamente membro a membro) e o modelo global (análise do equipamento com todas as suas partes) e destacando as fixações principais das partes da máquina, que sofrem mais esforço, para se obter um resultado adequado. Posteriormente, foram definidas as forças que incidem no equipamento em função da massa das partes do equipamento e da carga içada obedecendo os critérios da norma. Para o MEF, foram definidas as condições de contorno e as forças aplicadas usando sistema de carga remota para os modelos locais. O modelo do equipamento verificado apresentou resultados satisfatórios para os limites de escoamento.

Palavras-Chave: guindaste hidráulico, MEF, carga remota, modelo local, NBR 8400.

ABSTRACT

In this work, the structural analysis of the articulated hydraulic crane equipment was conducted using the Finite Element Method (FEM), with the design developed in CAD software and based on NBR 8400 standards. The methodology relied on the length, mass, material, and geometry of the equipment, in addition to the specifications outlined in NBR 8400. Two types of models were employed for FEM calculations: the local model (analyzing each member separately) and the global model (analyzing the equipment as a whole), with emphasis on the main fixations of the machine parts experiencing higher stress to achieve adequate results. Subsequently, the forces acting on the equipment were defined based on the mass of its parts and the lifted load, complying with normative criteria. For FEM, boundary conditions and applied forces were defined, utilizing a remote loading system for local models. The verified equipment model exhibited satisfactory results concerning yield limits.

Keywords: hydraulic crane, FEM, remote loading, local model, NBR 8400.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVO.....	9
2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	9
2.2	<i>Objetivo Específicos.....</i>	9
3	JUSTIFICATIVA	9
4	DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
5.1	<i>Momento de carga.....</i>	10
5.2	<i>Tensão por Flexão.....</i>	11
5.3	<i>Tensão Admissível.....</i>	12
5.4	<i>Princípio de Saint-Venant.....</i>	12
5.5	<i>Concentração de tensão</i>	13
5.6	<i>Critério de Von Mises.....</i>	14
5.7	<i>Método dos Elementos Finitos (MEF)</i>	15
5.8	<i>Carga Remota.....</i>	16
6	Metodologia	18
6.1	<i>Componentes e processos de fabricação.....</i>	18
6.2	<i>Determinação da carga de içamento.....</i>	20
6.3	<i>Material</i>	21
6.4	<i>Simulação computacional - MEF.....</i>	21
6.5	<i>NBR 8400</i>	23
6.6	<i>Parâmetros de projeto.....</i>	27
6.7	<i>Tensão admissível.....</i>	28
6.8	<i>Condições de contorno.....</i>	28

7	análise numérica do guindaste harticulado	29
7.1	<i>Arvore de projeto ANSYS.....</i>	<i>30</i>
7.2	<i>Modelo Local - LANÇA.....</i>	<i>31</i>
7.3	<i>Modelo Local - BRAÇO.....</i>	<i>33</i>
7.4	<i>Modelo Local -COLUNA.....</i>	<i>35</i>
7.5	<i>Modelo Global – GUINDASTE</i>	<i>36</i>
7.6	<i>Deslocamento vertical</i>	<i>38</i>
7.7	<i>Alteração de projeto – GUINDASTE.....</i>	<i>39</i>
8	conclusão.....	43
9	BIBLIOGRAFIA.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Guindaste Hidráulico PALFINGER	8
Figura 2: Guindaste articulado - Grimaldi.....	8
Figura 3: Momento de carga.....	10
Figura 4: Eixo e deformação causada por carregamento.....	11
Figura 5: Distribuição em função do afastamento de "b"	13
Figura 6: Distribuição de tensões próximas a um furo circular em placa sujeita a carga axial.	13
Figura 7: Elemento sob tensão triaxiais, hidrostática e distorcional	14
Figura 8: Tipos de elementos finitos	15
Figura 9: Nós e elementos presentes em uma malha.....	16
Figura 10: Braço com cargas e restrições visíveis.....	17
Figura 11: Faces em vermelho que age a carga remota.....	17
Figura 12: Carga Remota.....	18
Figura 13 Lança:	18
Figura 14: Máquina escavadeira CAT.....	19
Figura 15: Perfil soldado da lança	19
Figura 16: Coluna com peças em aço 1020.....	19
Figura 17: Guindaste completo e com as dimensões padrão.....	20
Figura 18: Momento de carga ao longo do guindaste	20
Figura 19: Guindaste hidráulico projetado pelo autor	22
Figura 20: Resultado do MEF, para a tensão de Von-Mises	22
Figura 21:Arvore de projeto do ANSYS	30
Figura 22: Carga içada (A) e massa em C (1067 kg) da lança.	31
Figura 23: Simulação na lança.....	32
Figura 24: Representação dos pontos mais críticos.....	32
Figura 25: Suporte de fixação, carga e carga remota representada no Braço.....	33
Figura 26: Representação horizontal do MEF no braço.	34
Figura 27: Fixação do cilindro hidráulico do braço	34
Figura 28: Condições de contorno da Coluna	35
Figura 29: Simulação pelo MEF da coluna	35
Figura 30: Máxima tensão na coluna.....	36
Figura 31: Condições de contorno do modelo global.....	36

Figura 32: Distribuição de tensão do modelo global.....	37
Figura 33: Pontos de elevada concentração de tensão.....	37
Figura 34: Deslocamento vertical da lança.....	38
Figura 35: Deslocamento vertical do braço.....	38
Figura 36: Deslocamento vertical do guindaste.	39
Figura 37: Projeto 3D do guindaste atualizado	40
Figura 38: MEF do guindaste atualizado.....	41
Figura 39: Análise de tensão no braço.....	42
Figura 40: Análise de tensão da extremidade da lança.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Strenx 700MC propriedades mecânicas	21
Tabela 2:Tabela de propriedades do aço AISI 1020.....	21
Tabela 3: Tabela de Classes de Utilização	23
Tabela 4: Estados de carga	24
Tabela 5: Estados de tensões de um elemento.....	24
Tabela 6: Classificação da estrutura dos equipamentos em grupos.....	25
Tabela 7: Coeficiente de Majoração	25
Tabela 8: Tensões admissíveis à tração (ou compressão) simples	26
Tabela 9: Coeficiente dinâmico	27
Tabela 10: Tabela parâmetros de projeto	28

LISTA DE SÍMBOLOS

FS	Fator de segurança
F_{rup}	Fator de ruptura
F_{adm}	Fator admissível
α_a	Tensão normal / Tensão normal admissível
M	Momento interno resultante
I	Momento de inércia
c	Distância perpendicular ao eixo neutro
α_α	Tensão de flexão
$\tau_{méd}$	Tensão de cisalhamento média
V	Força devido a flexão
A	Área da seção
M_x	Coefficiente dinâmico
S_G	Solicitações estáticas
Ψ	Coefficiente dinâmico
S_L	Cargas de serviço
S_H	Efeitos horizontais desfavoráveis
S_W	Efeitos do vento
τ_a	Tensão de cisalhamento

1 INTRODUÇÃO

No mercado brasileiro, a indústria metal-mecânica está experimentando um notável crescimento nos segmentos de transporte de cargas pesadas e operações de elevação. Esse fenômeno é amplamente atribuído às concessões governamentais que viabilizam obras e serviços de cunho público. Atualmente, os setores de energia eólica, petróleo e gás destacam-se como os principais demandantes desse tipo de atividade. Dessa forma, tanto o Estado quanto diversos setores privados que atuam e fornecem esses serviços são beneficiados pela tecnologia em constante evolução (CRANE BRASIL, 2018).

O guindaste articulado, que é um dos principais equipamentos utilizados para a movimentação de cargas, consiste em partes, como na Figura 1, definidas por:

1. base com sistema de giro;
2. coluna;
3. braço;
4. lança;
5. telescópica;
6. garra.

O sistema de giro sustenta a máquina como um todo e permite sua acoplagem em determinados caminhões ou locais fixos e faz a máquina girar em torno de si mesma, possibilitando o transporte de cargas para um determinado raio de ação que vai depender do ambiente onde será posta para trabalho. “A coluna, estrutura montada sobre a base, na qual é instalado o braço, componente do guindaste interligado à coluna em uma extremidade e lança na outra, responsável por um dos movimentos do plano vertical que, por sua vez, sustenta a lança, componente do guindaste destinado a movimentar a carga nos planos horizontal e vertical, dotado de extensões telescópicas com acionamento hidráulico e mecânico e a telescópica que pode se estender até uma comprimento determinada” (NBR 14768, 2001, p. 1)

Figura 1: Guindaste Hidráulico PALFINGER

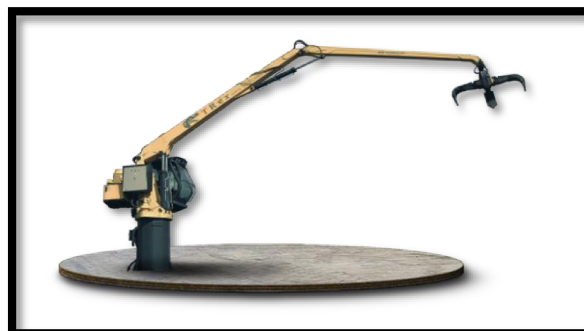


Fonte: <https://www.palfinger.com/pt-br/produtos/guindastes-florestais-e-sucateiros>

Os guindastes são construídos obedecendo normas regulamentadoras, que possibilitam o dimensionamento das partes do equipamento, como a NBR 8400 – Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas.

Dessa forma, o presente trabalho visa projetar um protótipo de um Guindaste Hidráulico de grande extensão, levando em consideração projetar braço, lança e coluna, como exemplo a *Figura 2*, que é uma inovação da empresa Grimaldi, único no Brasil. Assim, a fim de tornar mais acessível para futuros empreendedores, que queiram fabricar e se inserirem no mercado Brasileiro, será utilizado, neste trabalho, alguns dos requisitos necessários para o seu desenvolvimento, porém, sem detalhar aspectos do projeto como manutenção e desenhos de fabricação. Além disso, trata-se de um equipamento cuja operação exige grande responsabilidade, demandando maior experiência do projetista e, em muitos casos, a construção de protótipos.

Figura 2: Guindaste articulado - Grimaldi



Fonte: <https://www.grimaldi.com.br/equipamentos/estacionario-t-rex/>

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

- Suprir uma demanda de mercado emergente e eminente no içamento de altas cargas de sucata, em ambientes insalubres, de difícil acesso e arriscado para operações manuais. Fornecendo um meio de fabricação de guindaste apresentado neste trabalho.

2.2 Objetivo Específicos

- Estudar a bibliografia e normas utilizadas no projeto;
- Projetar coluna, braço e lança;
- Fazer a simulação numérica computadorizada
- Discutir os resultados do MEF.

3 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Transparency Market Research, o mercado de sucata global movimentou cerca de US \$713.044 bilhões em 2017, podendo atingir US \$979 bilhões em 2026. Poucas são as empresas que atuam nesse mercado lucrativo e crescente no país. Devido à necessidade de mão de obra qualificada, controle de qualidade da produção de peças e de alto capital de investimento, esse ramo se torna muito seletivo. Um empreendedor com pouco capital e mão de obra não muito qualificada não consegue ascender nesse ramo.

A maioria dos guindastes estacionários no mercado tem cerca de 7m de comprimento com uma telescópica, dimensão que pode não ser suficiente dependendo do local de trabalho. Guindastes hidráulicos de grande porte e de alto momento de carga são uma necessidade para aumentar o alcance de recolhimento das sucatas, mantendo e ou aumentando a sua capacidade de carga. A área do ambiente onde é condicionado sucata pode aumentar drasticamente e até dificultar a utilização de pá-carregadeiras, que também são utilizadas para recolher esses insumos. Logo, o desenvolvimento de um guindaste de grande porte é uma inovação que pode acrescentar ainda mais no ramo de tecnologia desse tipo de negócio. Aumentando a capacidade de carga, aumentará também a velocidade de trabalho e os esforços devido a movimentação de carga, afetando menos a

estrutura da máquina pela sua robustez e garantindo maior alcance de coleta e deposição de resíduos.

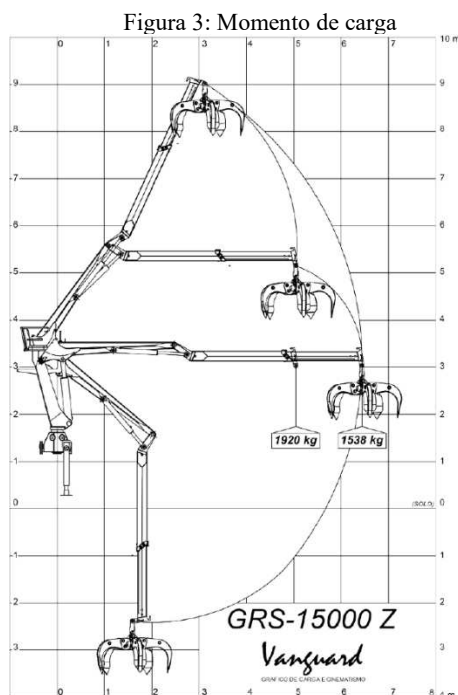
4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente estudo se restringe ao projeto de um guindaste hidráulico articulado de grande porte para equipamentos de elevação de cargas, utilizado principalmente em ambientes sucateiros. Este conjunto é responsável pela movimentação de alcance da máquina, a fim de coletar o máximo de insumos sucateiros em seu volume e peso em sua extremidade. Não serão considerados os efeitos hidráulicos dos cilindros e dos elementos de máquinas.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 Momento de carga

Em uma definição rápida o momento de carga é a capacidade necessária para içar ou suportar uma determinada carga a uma distância estabelecida, como se observa na Figura 3.



Fonte: <https://www.grimaldi.com.br/equipamentos/grs-15-000z-vanguard/>

Para uma variedade de comprimentos dos membros e várias intensidades de força, pode-se ter um mesmo valor de momento de carga, obedecendo a proporcionalidade entre força e distância. Toda máquina é dotada de um diagrama como o apresentado na Figura 3, para saber qual é a máxima carga que o equipamento suporta na posição em que o braço e a lança estão alinhados na posição horizontal.

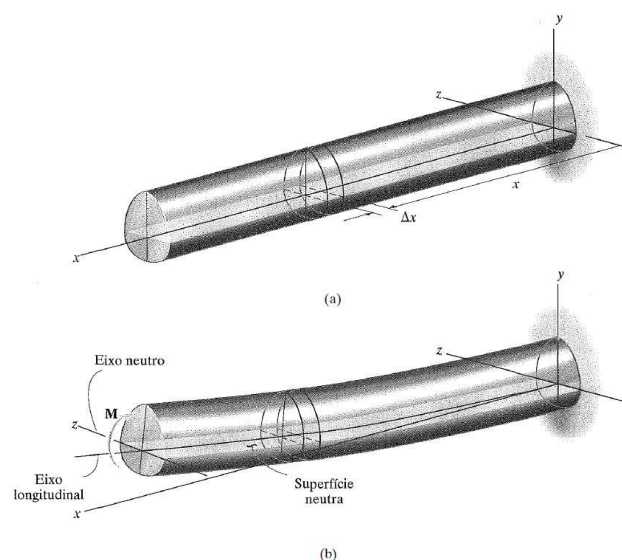
5.2 Tensão por Flexão

Para compreender corretamente a tensão por flexão é necessário saber que: “elementos delgados que suportam carregamentos aplicados perpendicularmente a seu eixo longitudinal são denominados vigas” (Hibbeler Russell, 2010, p181).

Os carregamentos aplicados nas vigas provocam o desenvolvimento de força de cisalhamento e momento fletor. Os valores máximos obtidos dessas nos cálculos de um projeto para a força de cisalhamento e momento fletor são necessários para dimensionar corretamente o projeto.

A Figura 4 representa o sistema de referência e o eixo envolvido para o cálculo e determinação da tensão por momento fletor e sua deformação.

Figura 4: Eixo e deformação causada por carregamento.



Fonte: Hibbeler, 7ª ed, p. 202.

Assim, é necessário saber a tensão provocada pelo momento fletor. Tal tensão é dada pela Equação (1), na qual M é o momento interno resultante, c é a distância perpendicular ao eixo neutro e I é o momento de inércia de área da seção transversal.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

5.3 Tensão Admissível

De acordo com Hibbeler (2009, p. 32) “[...] *um engenheiro responsável pelo projeto de um elemento estrutural ou mecânico deve restringir a tensão atuante no material a um nível seguro. [...], portanto, vale repetir, é necessário fazer os cálculos usando uma tensão segura ou admissível [...]*”. A fim de garantir a segurança, é necessário selecionar um fator de segurança que possa restringir a carga aplicada a um determinado valor de tensão que seja menor do que a tensão admissível σ_{adm} do material sujeito a esforços.

A tensão de segurança será a razão entre a tensão máxima de deformação elástica do material pela tensão admissível, dada na Equação (2).

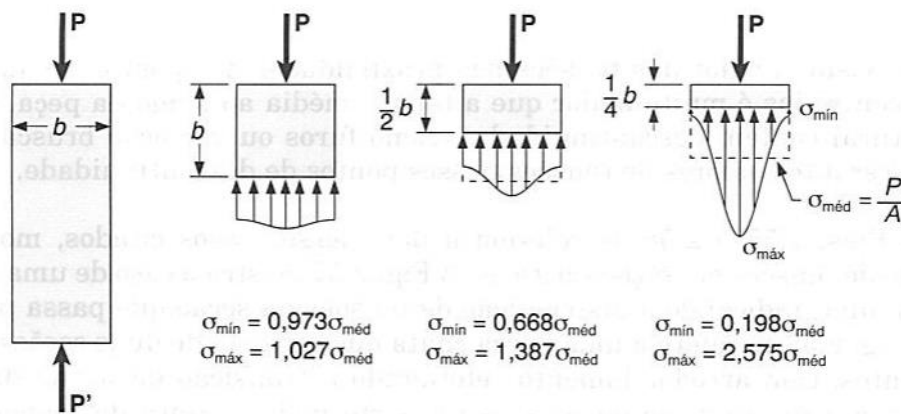
$$\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{adm}} \quad (2)$$

5.4 Princípio de Saint-Venant

O princípio de Saint-Venant permite analisar diferentes formas de carregamento, de aplicações de cargas concentradas. De uma mesma maneira, no entanto, deve-se desconsiderar as distribuições de tensões em regiões vizinhas ao ponto de aplicação da carga. Porque nestes pontos de proximidade de aplicação da força, a determinação das tensões é de difícil análise e se faz por meio de métodos matemáticos avançados ou métodos experimentais (BEER JOHNSTON, 2006, p. 155).

“*Notamos que a uma distância b de qualquer borda da placa, sendo b a largura desta a distribuição de tensões ao longo da seção transversal é praticamente uniforme[...]*” (BEER JOHNSTON, 2006, p. 154) exemplo da citação acima na Figura 5.

Figura 5: Distribuição em função do afastamento de "b"



Fonte: BEER resistência dos materiais 3 ed. pag. 155

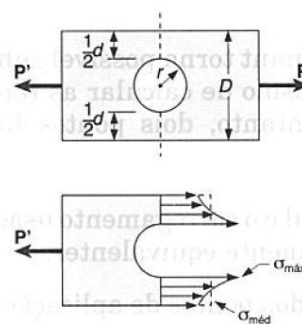
Essa teoria será importante para analisar pontos de singularidade na estrutura do guindaste com tensões muito elevadas que ultrapassam o limite de tensão admissível do material estabelecido em norma (NBR 8400).

5.5 Concentração de tensão

A magnitude da tensão nas proximidades dos pontos de aplicação de cargas concentradas é muito maior que a tensão média ao longo da peça. Nos pontos das peças estruturais que contêm descontinuidades, como furos ou variações bruscas de seção, podem surgir elevados valores de tensões (BEER JOHNSTON, 2006, p. 156).

A Figura 6 se refere a este tipo de caso citado, no qual mostra a distribuição de tensão em seções críticas. Neste caso a imagem mostra a distribuição de tensões na sessão que passa pelo centro do furo.

Figura 6: Distribuição de tensões próximas a um furo circular em placa sujeita a carga axial.



Fonte: BEER JOHNSTON, 2006, p. 156

Para o projetista o que interessa é o valor máximo da tensão em certa seção, sendo a distribuição real de tensões um dado de menor importância, porque o dimensionamento

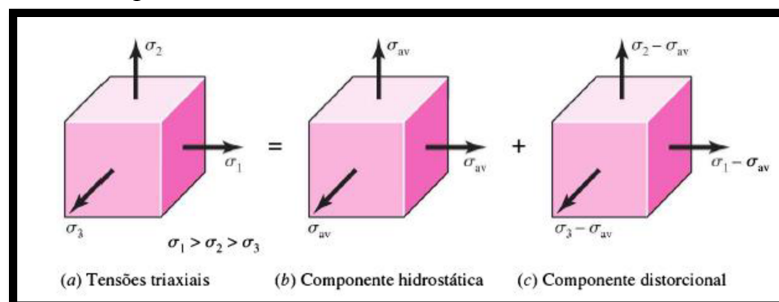
da peça/equipamento visa identificar e evitar que o valor máximo de tensão ultrapasse os valores de tensão admissíveis para o material.

5.6 Critério de Von Mises

De acordo com Shigley (2011, p. 239), “[...] a teoria da energia de distorção prediz que o escoamento ocorre quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por distorção por unidade de volume no escoamento sob tração ou compressão simples do mesmo material. [...]”

Os materiais dúcteis que são tensionados hidrostáticamente exibem resistências de escoamento muito acima dos valores dados pelo ensaio simples de tração. Dessa forma, foi postulado que o escoamento não era simplesmente um fenômeno simples de tração ou compressão, pelo contrário, uma relação com distorções angulares do elemento tensionado, como exemplificado na Figura 7. Para esta teoria, o Dr. R. Von-Mises desenvolveu Equação (3) que contribuiu para os estudos teóricos e dos métodos dos elementos finitos.

Figura 7: Elemento sob tensão triaxiais, hidrostática e distorcional



Fonte: Shigley 2011 p. 239.

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Na Equação 3 as incógnitas σ_1 , σ_2 , σ_3 são estados de tensão tridimensional que causam mudança de volume e distorção angular, já σ' é a tensão equivalente associada a todas as outras para o estado geral de tensão completo por meio de σ_1 , σ_2 , σ_3 (SHIGLEY, 2011, p. 263).

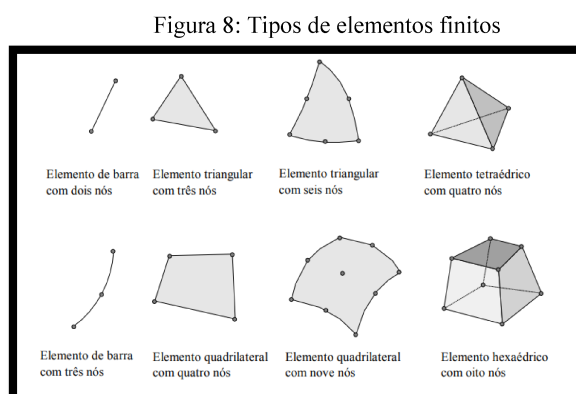
5.7 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo exato na estrutura em todos os infinitos pontos, dos deslocamentos, deformações e tensões. No entanto, essas soluções só são conhecidas para alguns casos, que, na maioria deles, fogem das aplicações práticas que são encontradas no dia a dia. A fim de desenvolver um procedimento que pudesse ser aplicado em caráter geral que independesse da forma da estrutura, condições de carregamento e precisão aceitável do problema de engenharia, deu-se origem ao Método dos Elementos Finitos (ALVES FILHO, 2002).

Uma dada geometria é subdividida em pequenas partes, que são denominadas de elementos. A divisão da geometria, nessas pequenas partes, permite resolver um problema complexo. Dividiu-se em problemas mais simples, possibilitando, assim, que o computador realizasse a tarefa de cálculo de maneira mais eficiente.

O método permite que um número infinito de variáveis desconhecidas sejam subdivididas em elementos menores de comportamento bem definido. Essas divisões podem ser de diferentes formas como triangular, quadrilateral, entre outras, que variam em função das dimensões do problema.

Há diversos tipos de elementos finitos, que variam em formas geométricas diversas, a depender do tipo de problema em resolução, se é uni, bi ou tridimensional. A Figura 8 demonstra vários tipos de elementos finitos. Elementos unidimensionais são aqueles que se considera apenas uma dimensão como elementos de barra; bidimensionais são os que possuem duas dimensões como elementos triangulares e quadrangulares; e tridimensionais são os elementos tetraédrico e hexaédrico.

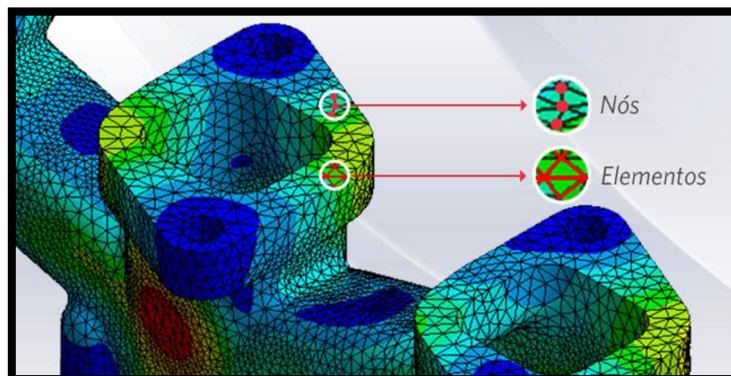


Fonte: SOUZA, 2003 p. 2

Esses elementos finitos são conectados entre si por nós, que também são chamados de pontos nodais. A combinação de nós e elementos dá-se o nome de malha, exemplificado na Figura 9. A precisão dos resultados da análise depende da quantidade

de nós e elementos, além do tamanho dos tipos de elementos. Assim, quanto menor for o tamanho e maior for a quantidade em uma determinada malha, maior será a precisão dos resultados obtidos.

Figura 9: Nós e elementos presentes em uma malha.



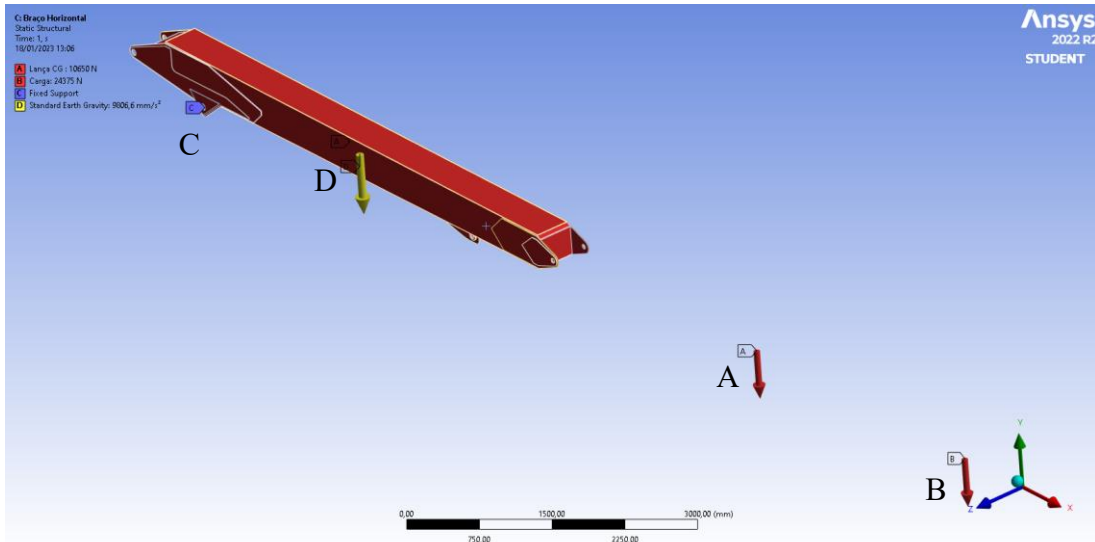
Fonte: <https://www.esss.com/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>

5.8 Carga Remota

O ANSYS proporciona uma opção na simulação Estrutural Estática do programa que se chama Carga Remota (Remote Force). As cargas remotas são forças e/ou momentos aplicados em um ponto, podendo ser definindo pelas coordenadas locais X, Y e Z, com relação aos sistemas de coordenadas global. A conexão entre o ponto remoto no espaço e a peça se dá através da seleção da face da peça onde os esforços atuam principalmente, como na Figura 11 que está na cor vermelho.

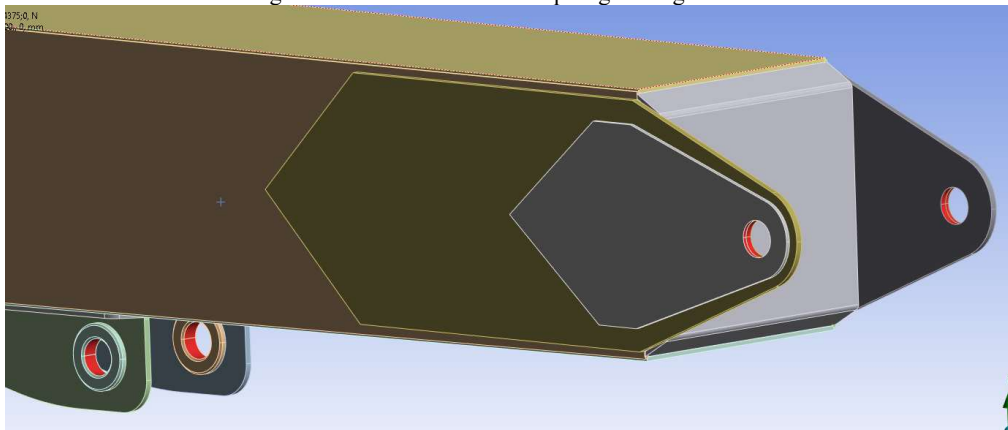
A Figura 10 mostra os pontos A, B, C e D que são, respectivamente, a carga remota devido ao centro de gravidade da lança que concentra peso em massa, a carga da massa içada pela lança, os pontos de fixação que restringe o movimento do braço no espaço e a atuação da gravidade (componente amarelo) que vai atuar sobre tudo que tem massa concentrado no centro de gravidade do componente.

Figura 10: Braço com cargas e restrições visíveis



Fonte: Do autor programa ANSYS

Figura 11: Faces em vermelho que age a carga remota

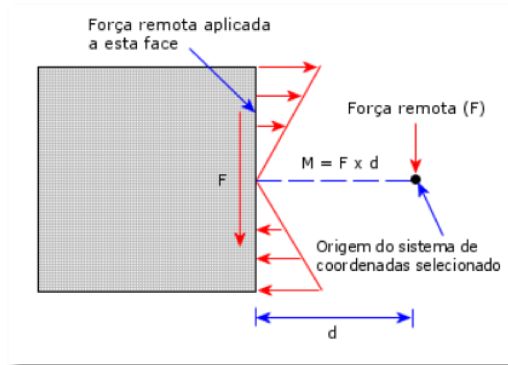


Fonte: Do autor programa ANSYS

Definido o ponto de aplicação da força e traçando uma linha de ligação do ponto até uma face ou ponto da peça, o programa calcula automaticamente os resultados obtidos, como tensão Von-Mises, deformação, deslocamento, entre outros fatores.

A força aplicada em um local remoto transfere-se como uma força e momentos equivalentes aplicados às faces selecionadas, Figura 12. Assim, aplicando uma força remota F a uma face, o programa calcula forças equivalentes a um momento $M = F \cdot d$ em adição a força F .

Figura 12: Carga Remota



Fonte: [https://help.solidworks.com/2017/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_remote_load_\(direct_transfer\).htm](https://help.solidworks.com/2017/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_remote_load_(direct_transfer).htm)

6 METODOLOGIA

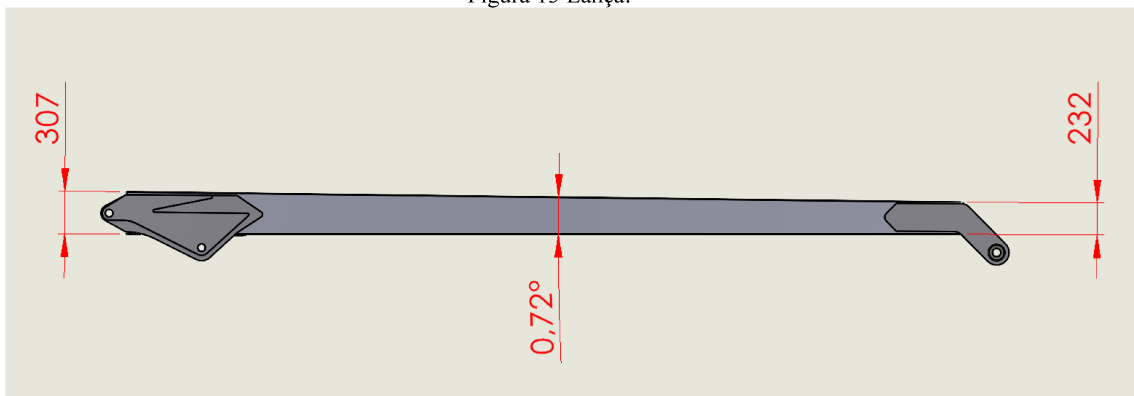
6.1 Componentes e processos de fabricação

As peças do guindaste serão cortadas em máquinas de plasma com chapas de até 10mm de espessura e com comprimento máximo de 6 metros.

Geralmente, os perfis dos guindastes têm seção transversal em U, porém para aplicações que requerem perfis mais longos e acima de 3 metros fica inviável comercialmente produzir esse perfil, porque o membro da máquina não é simétrico. O perfil tem uma inclinação para diminuir o peso na extremidade e melhorar a operação do equipamento, vide Figura 13.

Então, optou-se por produzir o componente como em máquinas escavadeiras ou guindastes (Figura 14), no qual as quatro chapas que formam o perfil quadrado são soldadas uma entre a outra nos pontos de contato indicado Figura 15.

Figura 13 Lança:



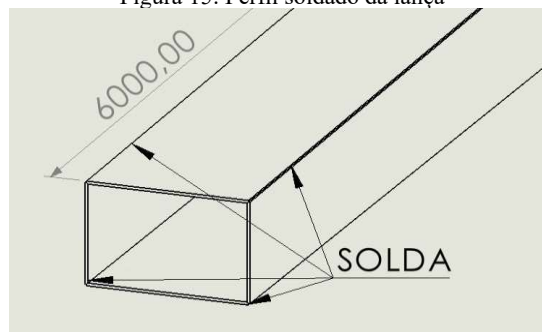
Fonte: Do autor SolidWorks

Figura 14: Máquina escavadeira CAT



Fonte: Notícias do grupo SOTREQ.

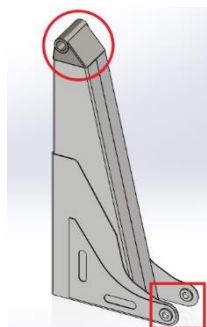
Figura 15: Perfil soldado da lança



Fonte: Do autor SolidWorks 2020

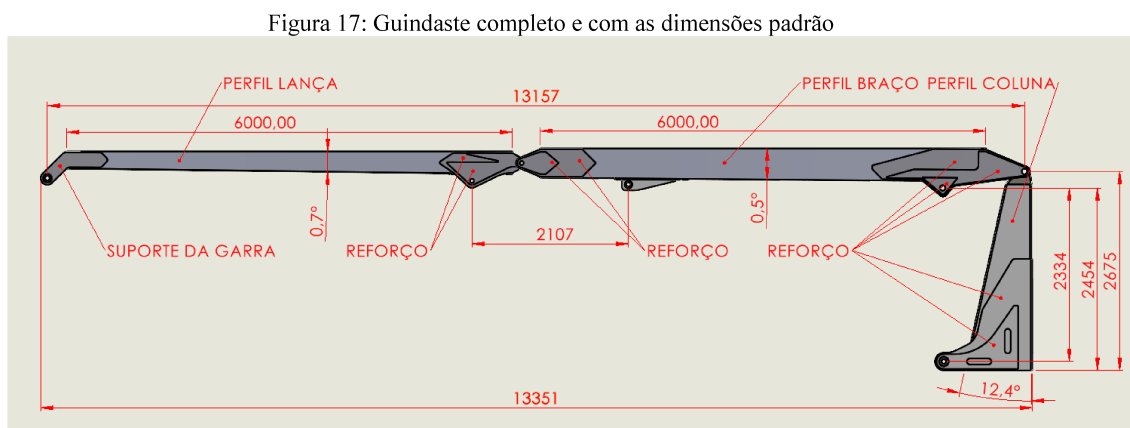
Algumas peças foram feitas de aço 1020, como o bloco soldado que compõe a parte superior da coluna e os olhais de fixação dos cilindros hidráulicos, pois serão peças usinadas. A Figura 16 mostra esses dois itens.

Figura 16: Coluna com peças em aço 1020



Fonte: Do autor SolidWorks

Assim, o equipamento será formado pelo perfil da lança e o perfil do braço com perfil soldado de chapa de 6,35mm de espessura e 6000 mm de comprimento, um suporte para acoplamento da garra, 9 chapas de reforço com espessura de 10mm nas duas laterais e uma coluna com chapa dobrada também de 10mm de espessura. A Figura 17 indica a explicação acima de uma maneira geral.

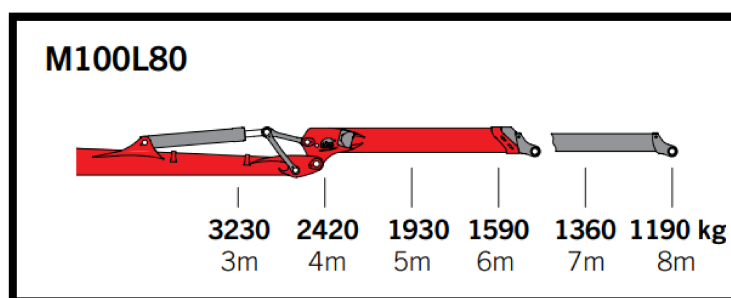


Fonte: Do autor SolidWorks

6.2 Determinação da carga de içamento

Para determinar qual seria a carga máxima possível para o guindaste, foram utilizados dados de algumas empresas que têm em seu catálogo, como PALFINGER, GUIMALDI e HFORT, as especificações da carga içada em seu alcance máximo como apresentado na Figura 18, que varia de 750kg a 1500kg. Assim, optou-se por içar uma média entre esses valores, obtendo 1125kg.

Figura 18: Momento de carga ao longo do guindaste



Fonte: Catálogo Palfinger Guindaste para Reciclagem 2022.

6.3 Material

A coluna, braço e lança devem ser construídos em aço estrutural de alta resistência mecânica, compatíveis com as especificações e características do respectivo equipamento (NBR 14768, 2001, p. 2).

Um material que é largamente empregado nesse tipo de equipamento é o Strenx 700. Há variações dele, mas este aço é comumente empregado com uma tensão de escoamento que varia de 750 a 950 Mpa. Para o estudo será considerado a média entre as tensões, supondo um material de média qualidade de processo, garantindo assim, 850 Mpa.

O Strenx 700MC é comercializado com espessuras de chapa que variam de 2.00mm à 10.00mm.

Será utilizado os valores de referência da Tabela 1, as propriedades mecânicas foram obtidas utilizando dados da empresa SSAB, que importa esse tipo de material para o Brasil, que é uma siderúrgica multinacional e especializada no ramo de siderurgia.

Tabela 1: Strenx 700MC propriedades mecânicas

Espessura (mm)	Limite de escoamento $R_{eH}^{(1) 2)}$ (min MPa)	Resistência à tração R_m (MPa)	Alongamento $A_{80}^{(4)}$ (min %)	Alongamento A_5 (min %)	Raio de dobra interno mínimo para uma dobra de $90^{(3)}$
2 - 3	700	750 - 950	10	12 ⁵⁾	0.8 x t
3.01 - 6	700	750 - 950		12	1.2 x t
6.01 - 10	700	750 - 950		12	1.6 x t

Fonte: Página da web SSAB.

Já para as partes do guindaste que serão necessárias peças usinadas, já mencionadas no tópico 6.1, será utilizado o aço 1020 com resistência a tração de 420 Mpa, representada na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela de propriedades do aço AISI 1020

Propriedade	Valor	Unidades
Módulos elástico	2,00E+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	7.7e+10	N/m ²
Massa específica	7900	kg/m ³
Resistência de tração	420507000	N/m ²
Limite de escoamento	351571000	N/m ²

Fonte: Propriedades dos materiais da biblioteca do SolidWorks 2020

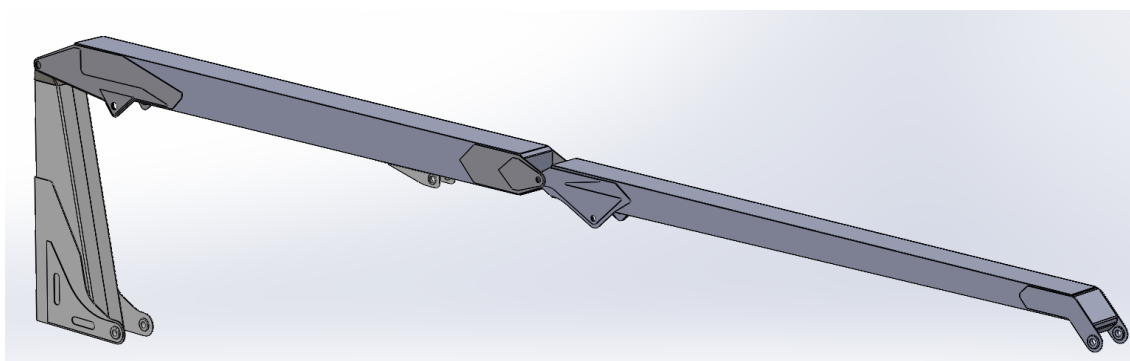
6.4 Simulação computacional - MEF

Com a finalidade de verificar se as peças projetadas para as partes específicas do guindaste estão dimensionadas de acordo com os padrões de projetos estabelecidos neste capítulo por meio dos Métodos de Elementos Finitos (MEF), o guindaste foi modelado,

em 3D, utilizando o Software SolidWorks. Neste modelo, serão considerados alguns componentes estruturais, de forma a se obter um modelo mais próximo possível da realidade, conforme mostrado na Figura 19. Assim, será possível simular os efeitos das distribuições de tensões na estrutura estática no momento da solicitação de içamento de cargas.

O modelo construído possui os principais componentes de um guindaste hidráulico articulado, verificar anteriormente Figura 17, como coluna, braço, lança, o perfil soldado e reforços para encaixe dos olhais dos cilindros e garantir a integridade estrutural do equipamento.

Figura 19: Guindaste hidráulico projetado pelo autor

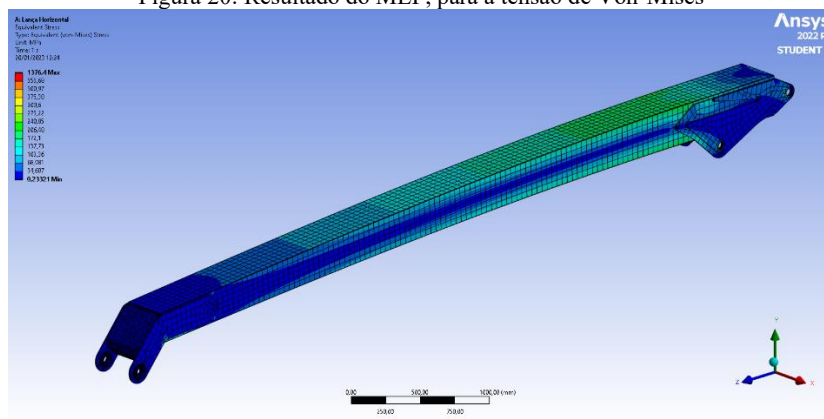


Fonte: Do autor SolidWorks 2020.

A análise foi realizada individualmente em cada parte do equipamento e também em um modelo geral, dito modelo global. O modelo individual é mais simples e exige menos processamento da máquina e o modelo global é mais complexo e exige mais processamento do computador, porem pode fornecer resultados satisfatórios.

O valor da tensão, o será fornecido pela formula de von Mises, como representado na Figura 20.

Figura 20: Resultado do MEF, para a tensão de Von-Mises



Fonte: Do autor.

6.5 NBR 8400

A norma NBR 8400 é necessária para o cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Esta norma oferece ao projetista informações necessárias para o desenvolvimento de cálculos e parâmetros a serem estabelecidos no projeto de equipamentos de elevação de cargas, condições de resistência e estabilidade. Nessa norma existem diversos elementos para o desenvolvimento do dimensionamento dos membros das estruturas

- I. **Classes de utilização:** determina em qual das 4 classes estabelecidas na Tabela 3, o equipamento vai estar inserido, devido a sua utilização. Sendo que um ciclo é determinado pelo início do trabalho de levantamento e o término será quando o equipamento estiver preparado para um novo trabalho de levantamento.

Tabela 3: Tabela de Classes de Utilização

Classe de utilização	Frequência de utilização do movimento de levantamento	Número convencional de ciclos de levantamento
A	Utilização ocasional não regular, seguindo de longos períodos de repouso	6.3×10^4
B	Utilização regular em serviço intermitente	2.0×10^5
C	Utilização regular em serviço intensivo	6.3×10^5
D	Utilização em serviço intensivo severo, efetuado, por exemplo em mais de um turno	2.0×10^6

Fonte: NBR 8400

- II. **Estado de Carga:** é o estado em que o equipamento levanta a carga máxima, ou somente uma carga reduzida ao longo de sua vida útil. Assim, é uma fração que representa se o equipamento levanta menos, igual ou superior a sua carga máxima, sendo igual ou superior a um equipamento de carga pesada, como identificado na Tabela 4.

Tabela 4: Estados de carga

Estado de carga	Definição	Fração mínima da carga máxima
0 (muito leve)	Equipamentos levantando excepcionalmente a carga nominal e comumente cargas muito reduzidas	P=0
1 (leve)	Equipamentos que raramente levantam a carga nominal e comumente cargas de ordem 1/3 da carga nominal	P=1/3
2 (médio)	Equipamentos que frequentemente levantam a carga nominal e comumente cargas compreendidas entre 1/3 e 2/3 da carga nominal	P=2/3
3 (pesado)	Equipamentos regularmente carregados com a carga nominal	P=1

Fonte: NBR 8400

III. **Estado de Tensão:** representado com uma tabela semelhante ao estado de carga. O estado de tensões classifica que uma determinada estrutura tem tensões em seus elementos que não são de mesma magnitude em todas elas, mas sim que algumas sofrem estados de tensões maiores e outros menores. A Tabela 5 identifica esses estados.

Tabela 5: Estados de tensões de um elemento

Estado de tensões	Definição	Fração mínima de tensão máxima
0 (muito leve)	Equipamentos submetidos excepcionalmente à sua tensão máxima e comumente a tensões muito reduzidas	P=0
1 (leve)	Elemento submetido raramente à sua tensão máxima, mas comumente a tensões da ordem de 1/3 da tensão máxima	P=1/3
2 (médio)	Elemento frequentemente submetido à sua tensão máxima e comumente a tensões compreendidas entre 1/3 a 2/3 da tensão máxima	P=2/3
3 (pesado)	Elemento regularmente submetido à sua tensão máxima	P=1

Fonte: NBR 8400

IV. **Classificação das estruturas em grupos:** conforme a Tabela 6, o equipamento será classificado em determinado grupo, devido aos ciclos de funcionamento em um ano. A determinação desse grupo nos guiará para a utilização do coeficiente de majoração da Tabela 7 (para ir direto ao ponto, foi retirada apenas a parte da tabela que nos dá o coeficiente pretendido). Para o nosso caso, esse valor está vinculado a Pontes de viga giratória.

Tabela 6: Classificação da estrutura dos equipamentos em grupos

Estado de cargas (ou estado de tensões para um elemento)	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento (ou de tensões para um elemento)			
	6.3x10 ⁴ (A)	2.0x10 ⁵ (B)	6.3x10 ⁵ (C)	2.0x10 ⁶ (D)
0 (muito leve)	1	2	3	4
1 (leve)	2	3	4	5
2 (médio)	3	4	5	6
3 (pesado)	4	5	6	6

Fonte: NBR 8400, pag. 8

Tabela 7: Coeficiente de Majoração

Pontes, semipórticos e pórticos com guia de carga para manuseio de chapas, tarugos, trefilados, bobinas, barras e perfis	1,35
Pontes de viga giratória	
Pontes para recuperação de carepa	
Pontes, semipórticos e pórticos sem guia de carga para basculante e chapas (escarfagem)	
Pontes para carregamento de sucata na aciaria	
Semipórticos para carregamento da caçamba do BOF	
Pontes e pórticos para transporte da panela de escória	
Pórticos para coqueria	
Pórticos para coleta e mistura de minérios	

Fonte: NBR 8400

V. **Solicitações interferentes:** as solicitações que interferem no cálculo da estrutura do equipamento são cinco: equipamento imóvel (estático) no estado de cargas mais desfavorável; influência principalmente aos movimentos verticais; aos movimentos horizontais; aos efeitos climáticos; e, diversas. Para efeito de estudo, será abordado aqueles, que se apresentam mais críticos, aos movimentos verticais e o estático.

- VI. **Solicitações principais:** os S_G , que se refere ao peso próprio dos elementos e S_L , às cargas de serviço. As solicitações verticais são originadas a partir da movimentação brusca da carga de serviço de içamento e de choques verticais durante o deslocamento (NBR 8400, 1984, pag. 8).
- VII. **Casos de solicitação:** para os elementos que sofrem compressão ou tração simples, o valor atribuído ao cálculo não deve ultrapassar os valores da tensão admissíveis por tração ou compressão (α_a). Essa tensão é pré-determinada na Tabela 8 de acordo com o limite de escoamento do material (α_e). Cada valor está atribuído a um caso, que serão três:
- Caso I: Equipamentos em serviço normal sem vento;
 - Caso II: Equipamentos em serviços normais com vento em limite de serviço;
 - Caso III: Equipamento submetidos a solicitações excepcionais.

A equação utilizada para definir essa solicitação é dada abaixo (NBR 8400, 1984, pag. 14).

$$M_X(S_G + \Psi S_L + S_H) + S_W \quad (4)$$

$M_X =$ *Coefficiente de majoração*

$S_G =$ *Solicitações estáticas devido ao peso próprio*

$\Psi =$ *Coefficiente dinâmico*

$S_L =$ *Solicitações de cargas de serviço*

$S_H =$ *Efeitos horizontais desfavoráveis*

$S_W =$ *Solicitações de efeito do vento*

Tabela 8: Tensões admissíveis à tração (ou compressão) simples

Casos de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
Tensão admissível	$\frac{\sigma_0}{1,5}$	$\frac{\sigma_0}{1,33}$	$\frac{\sigma_0}{1,1}$
σ_a			

Fonte: NBR 8400, p. 16

VIII. **Coefficiente dinâmico:** de acordo com a NBR 8400 (1984, p. 8): “as solicitações devidas aos movimentos verticais são provenientes do içamento relativamente brusco da carga de serviço, durante o levantamento, e de choques verticais devidos ao movimento sobre o caminho do rolamento. Nas solicitações devidas ao levantamento de carga de serviço, levam-se em conta as oscilações provocadas pelo levantamento brusca da carga, multiplicando-se as solicitações devidas à carga de serviço por um fator chamado coeficiente dinâmico (Ψ)”. A tabela para inferir o valor do coeficiente dinâmico está abaixo (Tabela 9):

Tabela 9: Coeficiente dinâmico

Equipamentos	Coeficiente dinâmico (Ψ)	Faixa de velocidade de elevação da carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < V_L \leq 0,25$
	$1 + 0,6V_L$	$0,25 < V_L \leq 1$
	1,6	$V_L \geq 1$
Guindastes com lanças	1,15	$0 < V_L \leq 0,5$
	$1 + 0,3V_L$	$0,5 < V_L \leq 1$
	1,3	$V_L \geq 1$

Fonte: NBR 8400, p. 10.

6.6 Parâmetros de projeto

Neste tópico é apresentado os parâmetros de projeto estabelecidos anteriormente pela norma NBR8400.

Para o tipo de serviço do guindaste é estabelecido a de classe de utilização (I) de maneira severa, classe nível D. O estado de carga (II) desse equipamento é pesado (nível 3); o estado de tensão (III), semelhante ao estado de carga, também será de nível 3, porque o equipamento sofre variações de tensão muito elevadas em toda a estrutura; a classificação da estrutura (IV) que é de nível 6 fornece o valor do coeficiente de majoração, que é utilizado para aumentar a magnitude das carga de serviço (carga içada) e carga estática (peso próprio do equipamento), para posterior calculo e dimensionamento da máquina, assim, o coeficiente de majoração é 1,35; o caso associado ao equipamento será o I, que dará a tensão admissível para verificação nas simulações computacionais, e por fim, o coeficiente dinâmico, como nosso equipamento é de alta velocidade de trabalho, usaremos uma abordagem arbitraria de 1 m/s, já que qualquer valor acima disso dará o mesmo valor de coeficiente dinâmico. A Tabela 10 resume esse tópico:

Tabela 10: Tabela parâmetros de projeto

Item	Indicação	Tabela
Estado de carga	3	Tabela 4
Classe de utilização	D	Tabela 3
Grupo da estrutura	6	Tabela 6
Coefficiente de majoração	1,5	Tabela 7
Caso de solicitação	1,5	Tabela 8
Coefficiente dinâmico	1,3	Tabela 9

Fonte: NBR 8400

6.7 Tensão admissível

Uma vez que os parâmetros de projeto necessário com a NBR 8400 foram estudadas e selecionadas de acordo com o tópico 6.6, deve-se determinar o valor da tensão normal admissível que o equipamento poderá sofrer durante a operação.

A tensão determinada, na equação 5, de acordo com o material será de 850 Mpa para o STRENX 700 e de 420,5 Mpa para o aço AISI 1020. Essa tensão é a tensão de segurança que o equipamento pode suportar e à qual será usada como limite de tensão do projeto. Assim, verifica-se nas equações o valor da tensão admissível que as peças e componentes criados com aço de alta resistência será da ordem **566,67 Mpa** e para o aço 1020 será de **280,33 Mpa**.

- Tensão normal admissível:

$$\alpha_{STRENX\ 700} = \frac{\alpha_e}{1,5} = \frac{850}{1,5} = 566,67\ Mpa \quad (5)$$

$$\alpha_{AISI\ 1020} = \frac{\alpha_e}{1,5} = \frac{420,5}{1,5} = 280,33\ Mpa \quad (6)$$

6.8 Condições de contorno

Para o estudo, será analisado as propriedades de massa do equipamento separadamente para simulação, para tal será utilizado as equações 7 e 8 obtidas na norma NBR 8400.

A carga içada máxima é a que o equipamento só eleva quando está em operação, a carga no CG é a massa do componente concentrada no seu centro de gravidade e a carga associada significa a carga externa influenciada por outros componentes. Exemplo: o braço deve carregar a carga içada, a massa da lança e o seu próprio peso, assim, a carga

associada é a massa da lança e a carga içada. Essas diferenciações são muito importantes para a simulação computacional, já que é necessário acrescentá-las separadamente.

As equações 7 e 8 são as cargas majoradas respectivamente do peso próprio do equipamento e da carga içada.

$$F_1 = M_x S_G \quad (7)$$

$$F_2 = M_x \Psi S_L = 24375 \text{ N} \quad (8)$$

$S_G = \text{Solicitações estáticas devido ao peso próprio (Centro de gravidade)}$

$S_L = \text{Solicitações de cargas de serviço (carga de içamento máximo)} = 12.50 \text{ kN}$

$M_x = \text{Coeficiente de majoração} = 1.5$

$\Psi = \text{Coeficiente dinâmico} = 1.3$

7 ANÁLISE NÚMERICA DO GUINDASTE HARTICULADO

Após definidas as medidas do comprimento da lança, do braço, da coluna, as seções transversais, os pinos de sustentação, os parâmetros da NBR 8400 e os materiais envolvidos na construção do equipamento, a simulação computacional numérica foi executada no software ANSYS STUDENT. Assim, será utilizada malha com tipos de elementos selecionados automaticamente pelo software e com o mínimo de tamanho do elemento possível, como o equipamento tem uma altura de cerca de 3m, comprimento de 13m e uma largura da ordem de 50 cm, os elementos terão um tamanho mínimo de 20mm, que é a máxima capacidade que o computador em questão suporta desenvolver a simulação.

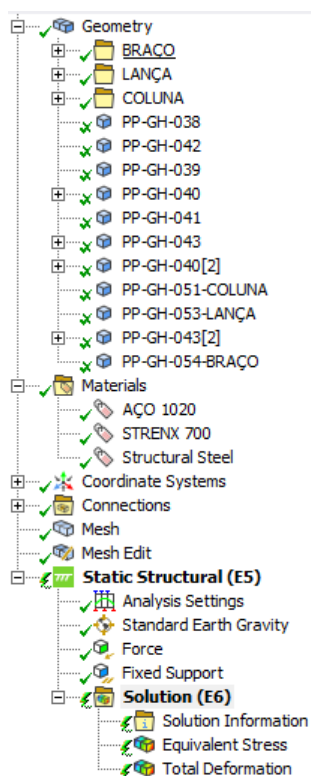
Tal simulação servirá para validar se o fator de majoração e a tensão do material é realmente suficiente, para garantir a segurança de construção e operação do equipamento. Sabendo-se que o guindaste será dimensionado para suportar as piores condições de posicionamento, realiza-se a simulação no posicionamento mais crítico, que é na posição horizontal e com os membros da máquina totalmente esticados. Além disso, o estudo foi desenvolvido utilizando dois modelos: o modelo global que abrange toda à estrutura com todos os seus componentes e o modelo local que estuda cada componentes separadamente, assim, lança, braço e coluna.

A simulação com carga irá permitir verificar os pontos onde há concentração de tensão acima da tensão admissível do material obtido com os critérios da norma NBR 8400. Portanto, caso haja tensões acima da admissível o equipamento será reprojetoado, para obter valores semelhantes ao limite admissível.

7.1 Arvore de projeto ANSYS

Para configurar o software ANSYS Workbench, pode-se verificar na Figura 21 a sua sequência respectivamente da geometria, materiais, coordenadas, conexões, estrutura estática e soluções da simulação.

Figura 21:Arvore de projeto do ANSYS



Fonte: Do autor.

Foi necessário determinar primeiramente os materiais e suas especificações, assim, dois tipos de materiais foram usados que é o Strenx 700 e o AISI 1020.

No ANSYS material flexível é aquele que tem capacidade de deformar e rígido é o componente não deformável, isso é importante determinar, pois os cilindros serão barras indeformáveis (rígidas). Já que, não serão projetados e serão necessários para verificar a reação nos olhais do guindaste, o que é algo importante para a análise.

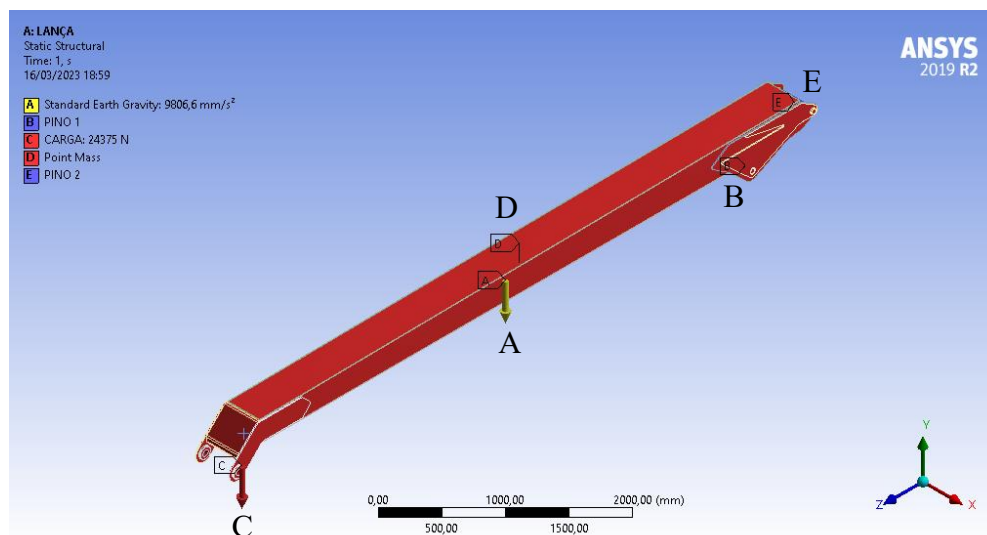
O usuário define o tipo de conexão entre as peças, no caso, do tipo colado (Bonded) simulando componentes soldados; o Mesh é a opção que gera a malha com os elementos, seu respectivo tamanho (20mm) e o tipo que mais se adequa ao modelo projetado; o item de estrutura estática (Static Structural) engloba as condições de contorno, os locais de fixação do guindaste no espaço que será na base da coluna; e habilitar a força gravitacional, que permite ao programa considerar a massa do equipamento na simulação, e a componente da força (Force) exercida pelo içamento da carga.

Para finalizar, a seção Solution, foi determinado o tipo de resultado analisado, para este projeto será a tensão de Von-Mises e a deformação sofrida ao longo do guindaste.

7.2 Modelo Local - LANÇA

A lança suporta a carga de içamento (24375 N ponto C) e a sua massa (1067 kg ponto D) majoradas, a fixação no espaço ocorre nos olhais B e E, o ponto A representando o vetor de ação da gravidade, Figura 22.

Figura 22: Carga içada (A) e massa em C (1067 kg) da lança.



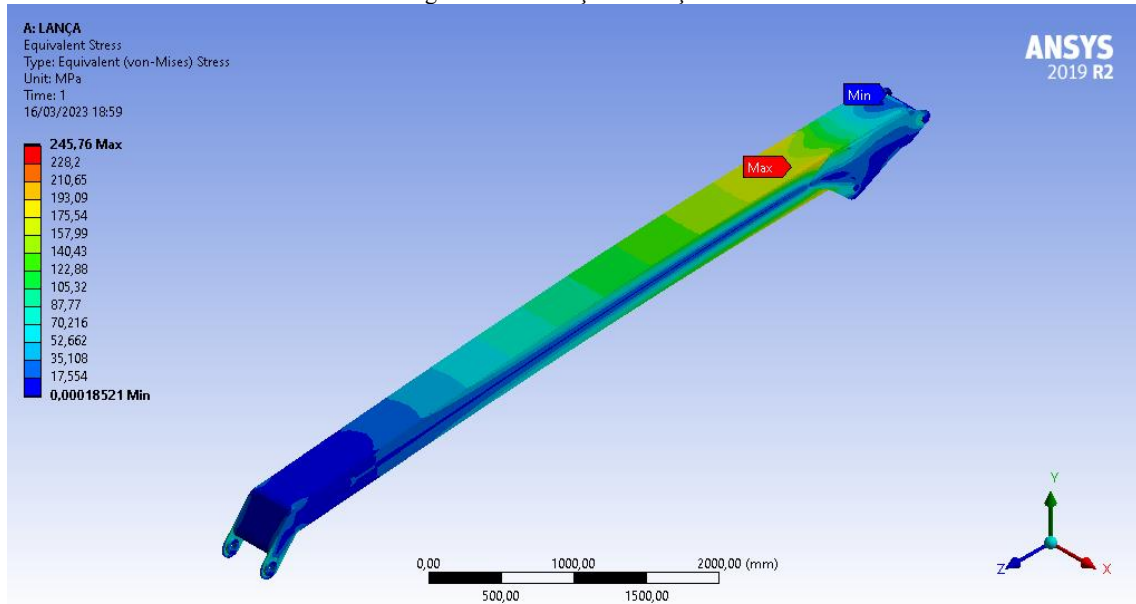
Fonte: Do autor.

O resultado da simulação da lança está identificado na Figura 23 o gradiente de tensão ao longo do componente pode ser identificado pelas cores representando a magnitude da tensão de Von Mises (energia de distorção máxima). O critério de tensão von Mises máxima é baseado na teoria de von Mises-Hencky, também conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima.

No geral, as regiões de tensão do modelo mostram uma transição suave entre elas, isso é bem identificado pelo gradiente de tonalidade ao longo da lança.

Assim, observa-se que o maior valor de tensão equivalente obtido na simulação é da ordem de **245,76 Mpa**, o que está de acordo com o limite de resistência estabelecido em norma (**566,67 Mpa**)

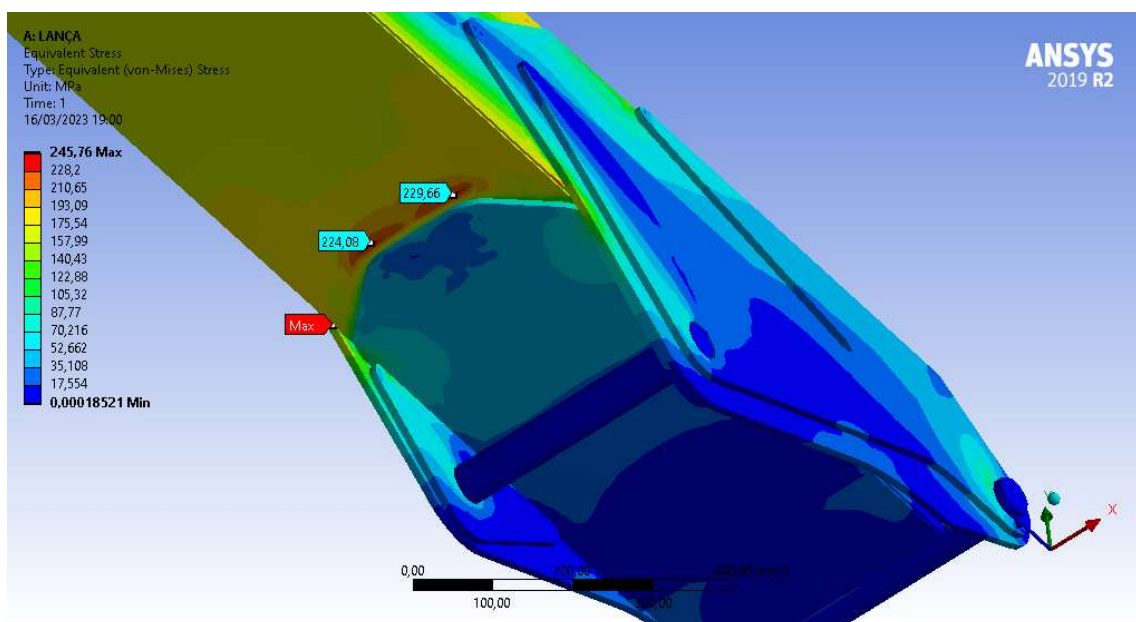
Figura 23: Simulação na lança



Fonte: Do autor.

A Figura 24 evidencia a região mais crítica do equipamento e com regiões de contato no qual seria, se excedido a carga de serviço, local de atenção para uma possível falha do equipamento em operação.

Figura 24: Representação dos pontos mais críticos.

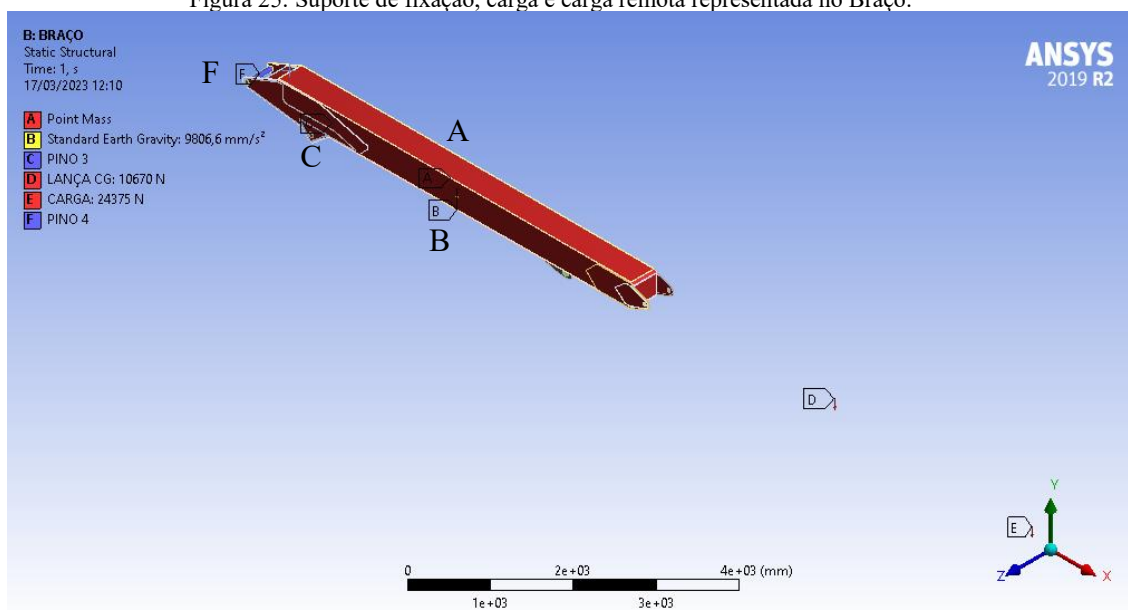


Fonte: Do autor.

7.3 Modelo Local - BRAÇO

Representado na Figura 25, o valor da carga envolvida na simulação do braço em B é de 24375N, já em A, a carga da lança de 10670N e em D a carga do braço de 14350N. Assim, não muito diferente da lança, apenas pelo fato de haver a carga associada do centro de gravidade da lança (ponto D) e da carga de içamento (E).

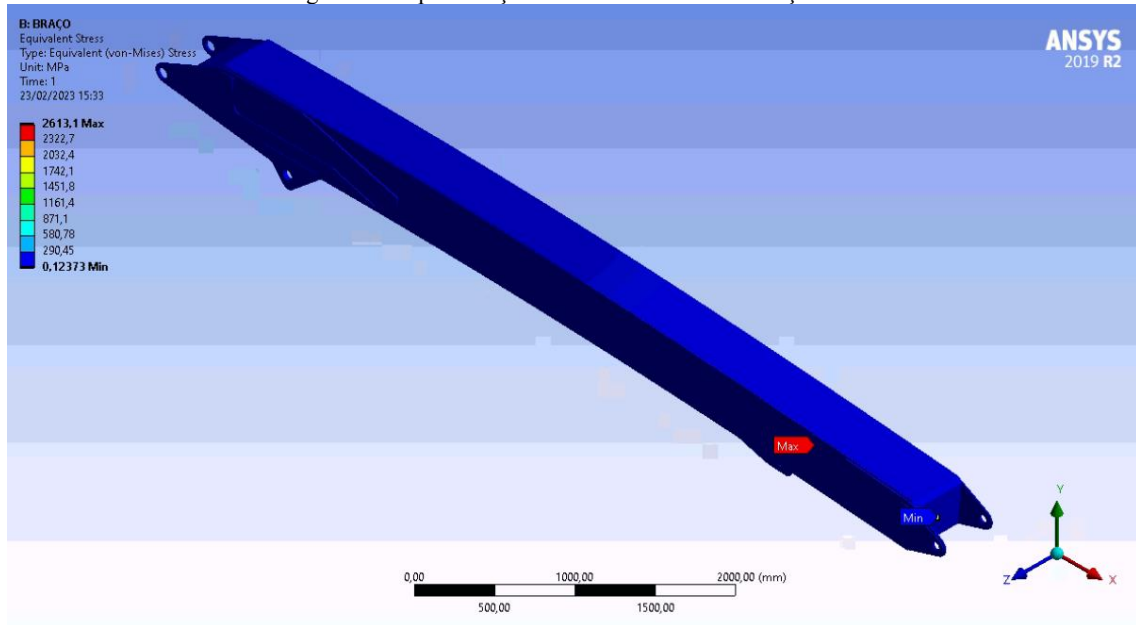
Figura 25: Suporte de fixação, carga e carga remota representada no Braço.



Fonte: Do autor.

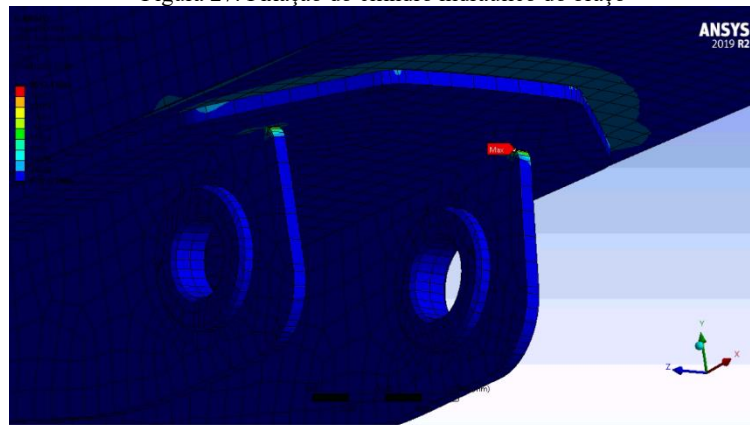
O valor da tensão ao longo do equipamento está de acordo com os limites obtidos pela NBR 8400 como na Figura 26. Porém, há setores pontuais onde essa tensão chega a **2613,1 Mpa**, como na Figura 27 (região em vermelho) em que existe concentração de tensão. Essa região é uma região de concentração de tensão devido a união dos materiais, havendo 2 peças unidas, o que intensifica a tensão de maneira pontual, assim, será considerado como uma singularidade utilizando o princípio de Saint-Venant. Neste caso, pode-se perceber uma pequena região de elevada tensão e em seguida a área do entorno que tem uma queda abrupta de tensão.

Figura 26: Representação horizontal do MEF no braço.



Fonte: Do autor.

Figura 27: Fixação do cilindro hidráulico do braço

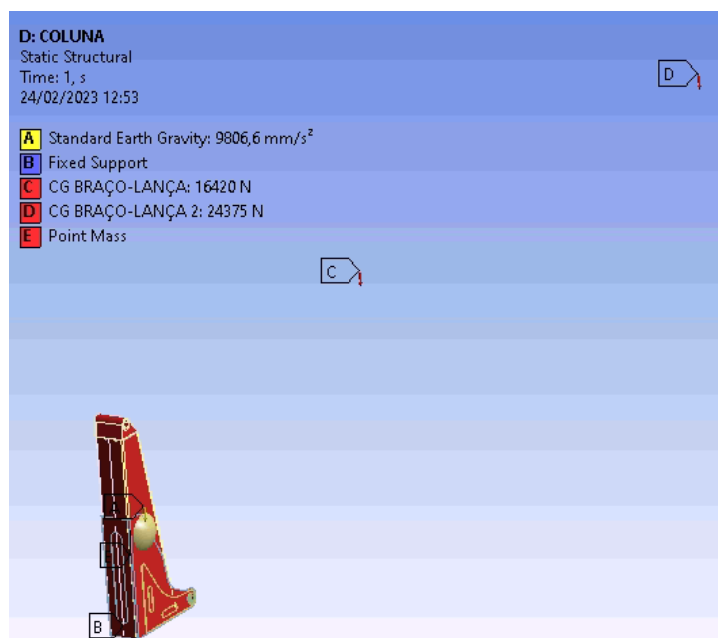


Fonte: Do autor.

7.4 Modelo Local -COLUNA

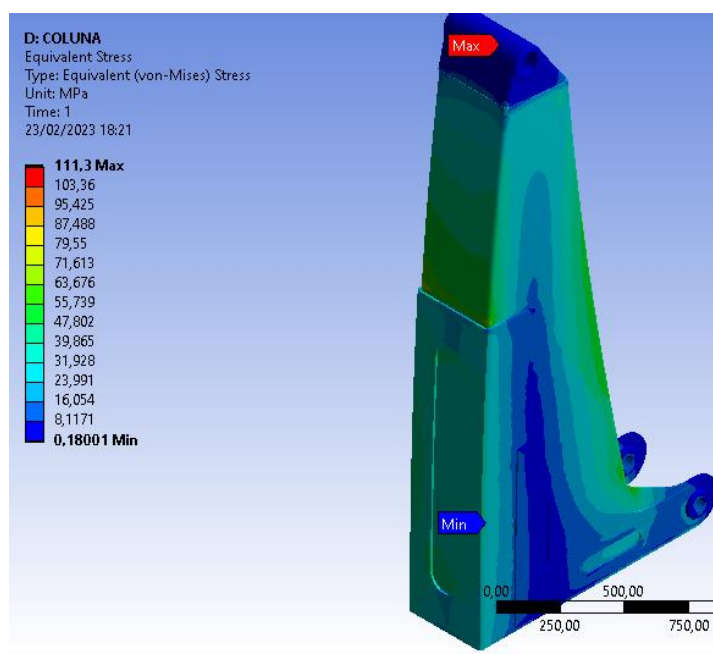
A coluna representada com as condições de contorno na Figura 29 é o componente que menos sofreu esforço, percebe-se que há uma tensão máxima de **111,3 Mpa** no topo do componente, muito abaixo da tensão admissível do material. Fica mais evidente na Figura 30.

Figura 28: Condições de contorno da Coluna



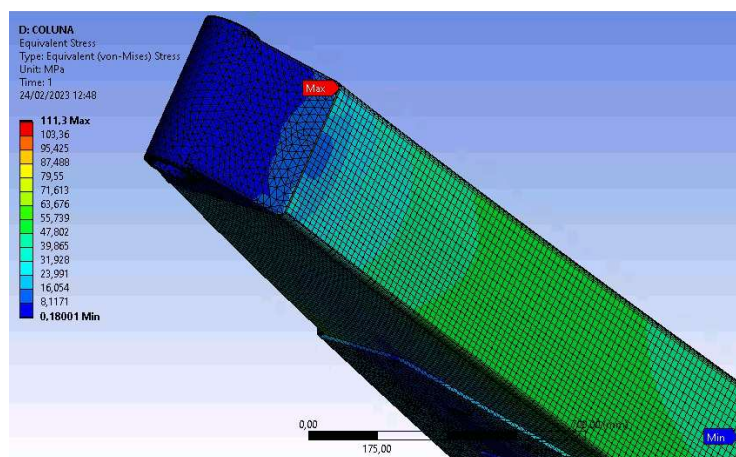
Fonte: Do autor.

Figura 29: Simulação pelo MEF da coluna



Fonte: Do autor.

Figura 30: Máxima tensão na coluna



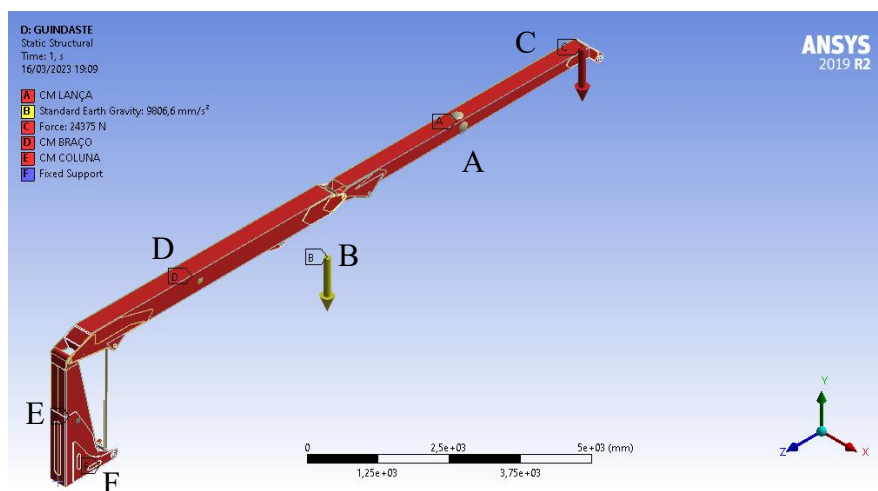
Fonte: Do autor.

7.5 Modelo Global – GUINDASTE

Para o Modelo Global, as condições de contorno consideradas e representadas na Figura 31 são: a massa no centro de gravidade da lança (A), do braço (D) e da coluna (E), além das representações das fixações em F, da ação da força gravitacional em no espaço, mas que é representado pelo vetor amarelo (B) e da carga determinada em norma no ponto C. Foram projetadas barras com pinos que simulam os cilindros hidráulicos de elevação e inclinação, mas que não apresentam deformação.

A força exercida nos olhais de fixação dos pinos poderá ser analisada e, assim, determinar se essas áreas de contato estão sofrendo tensão.

Figura 31: Condições de contorno do modelo global



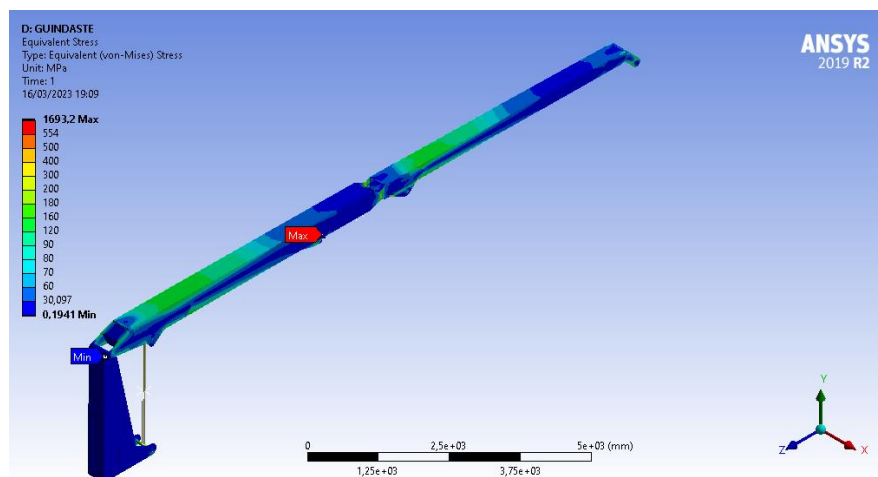
Fonte: Do autor.

As regiões de tensão identificadas no modelo mostram uma transição suave entre elas, estes resultados podem ser vistos na Figura 32. Assim, é possível observar que as regiões

de tensão estão bem distribuídas ao longo do equipamento pela representação do gradiente de cores.

As chapas de reforço se tornam realmente úteis e fundamentais para manter essa transição suave. Observa-se que nelas se encontra uma baixa tensão e que a tensão vai reduzindo significativamente entre o perfil e o reforço. No entanto, percebe-se que existe uma região que apresenta uma elevada tensão na ordem de **1693,2 Mpa**.

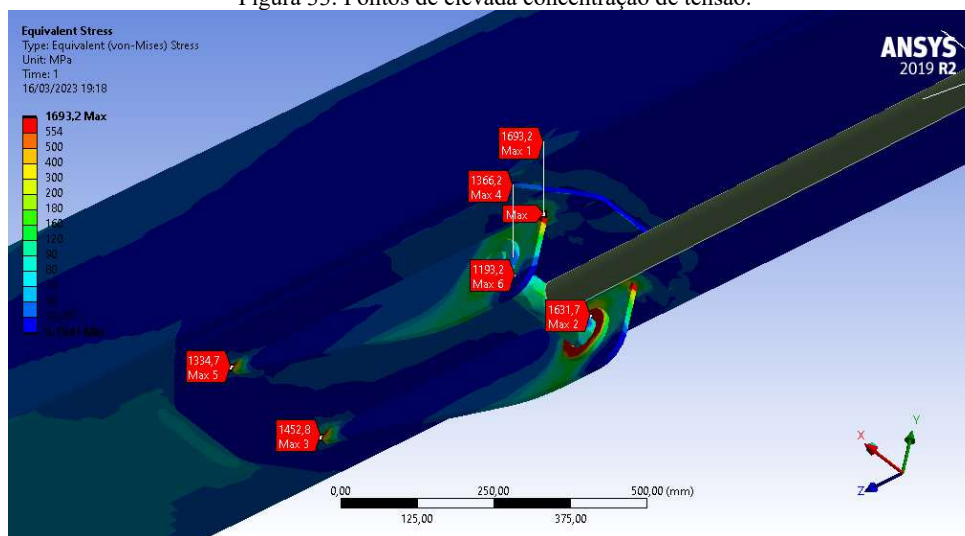
Figura 32: Distribuição de tensão do modelo global.



Fonte: Do autor.

Essa região, representada na Figura 33, se encontra o componente responsável pelas ligações do cilindro entre o braço e lança, esta região apresentou de tensão que ultrapassa a admissível. Neste caso aplicar o princípio de Saint-Venant seria muito arriscado, assim, posteriormente, será necessário modificar o suporte dos cilindros, para eliminar esse problema.

Figura 33: Pontos de elevada concentração de tensão.



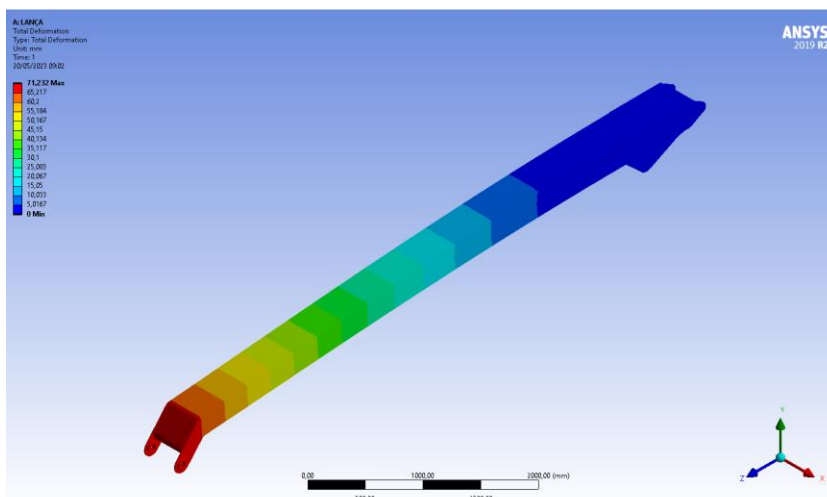
Fonte: Do autor.

7.6 Deslocamento vertical

A norma NBR 8400 não especifica como deve ser tratado o deslocamento sofrido por máquinas de elevação de carga, porém é importante considerar esse fator. Porque, um deslocamento elevado pode causar na peça um comportamento elástico de recuo muito forte, abalando toda a estrutura na liberação da carga içada, causando danos críticos ao equipamento e arriscando a segurança do operador ou quaisquer pessoas próximas ao equipamento.

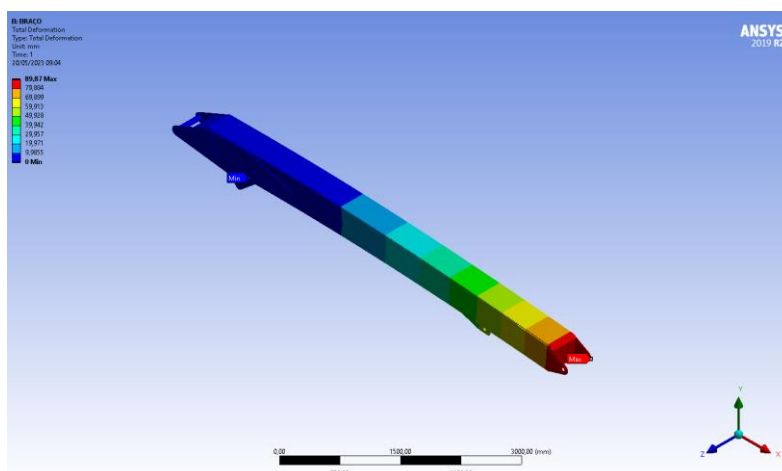
As Figura 34 e Figura 35 mostram o deslocamento vertical da lança e do braço gerando assim um movimento total de 154,1 mm, como o equipamento é de grandes proporções e considerando que a deformação do material é algo normal devido à grande massa de carga içada, pode-se considerar que esse é um fenômeno normal e que deve ser considerado para um estudo mais aprofundado do comportamento do equipamento.

Figura 34: Deslocamento vertical da lança.



Fonte: Do autor.

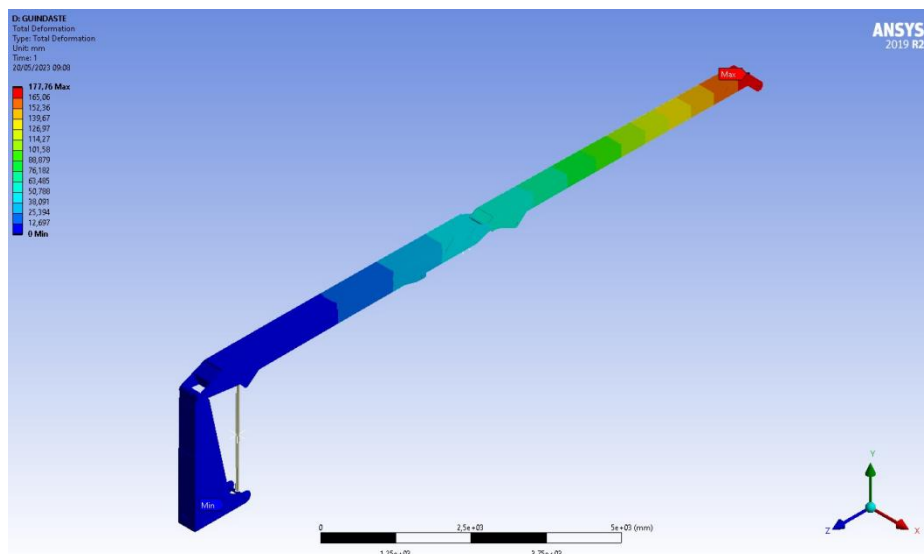
Figura 35: Deslocamento vertical do braço.



Fonte: Do autor.

A simulação completa do guindaste, Figura 36, mostra um deslocamento de 177,76 mm na vertical, que contém uma diferença de 23,66mm. Esses dados são importantes para diferenciar a influência da deformação para modelos locais e globais de análise.

Figura 36: Deslocamento vertical do guindaste.



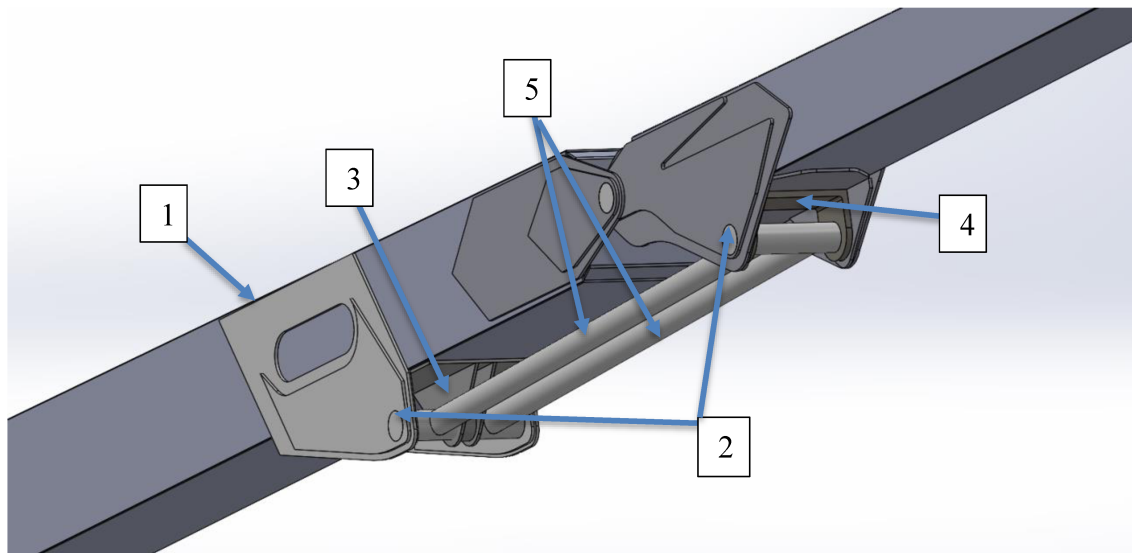
Fonte: Do autor

7.7 Alteração de projeto – GUINDASTE

A geometria do sistema de suporte dos cilindros do braço e da lança, foram os componentes que mais sofreram tensões elevadas no guindaste. As tensões verificadas na simulação do MEF apresentaram vários pontos críticos nos quais foram realizadas melhorias de projeto, a fim de que o equipamento esteja de acordo com as especificações de segurança estabelecidas neste trabalho. As tensões foram elevadas e ultrapassaram o limite de **566,66 Mpa**.

Para sanar este problema foram feitas alterações que podem ser visualizadas na Figura 37. Entre elas estão: criação de chapas de reforço lateral no braço (1); aumento do diâmetro do pino dos cilindros e eliminação do olhal de aço AISI 1020, tanto para o braço quanto para a lança (2); criação de um suporte central no braço para o pino (3); uma peça usinada na lança de aço AISI 1020 (4); e colocar dois cilindros, em vez de apenas um (5).

Figura 37: Projeto 3D do guindaste atualizado



Fonte: Do autor.

A primeira alteração, as chapas laterais no braço, foram construídas com o intuito de minimizar a distribuição de tensão no suporte. Logo, foi construído chapas de reforço para fixação dos cilindros. Isso, possibilitou a redução do esforço na parte inferior do braço com a chapa inferior, porque se verificou que esse tipo de suporte distribui muito bem a tensão ao longo das laterais dos membros da máquina, assim, diminuindo a concentração de tensão nas áreas críticas anteriormente verificadas.

A segunda alteração faz com que a área de contato entre o pino e as chapas aumente, proporcionando uma maior área de contato entre as chapas de reforço lateral e a superfície do cilindro. Porém, a eliminação dos olhais diminui a área de contato ao longo do comprimento do cilindro, mas esse detalhe é eliminado já que o Strenx 700 tem limite de resistência a tração maior que o aço AISI 1020.

A terceira alteração, o suporte central de fixação dos pinos dos cilindros se mostrou mais efetivo, já houve diminuição do comprimento do pino para cada cilindro, o que gerou menor esforço para cada pino.

A quarta alteração, o componente usinado foi projetado para verificar se uma estrutura usinada de material mais acessível no mercado, teria efeito positivo na diminuição das tensões.

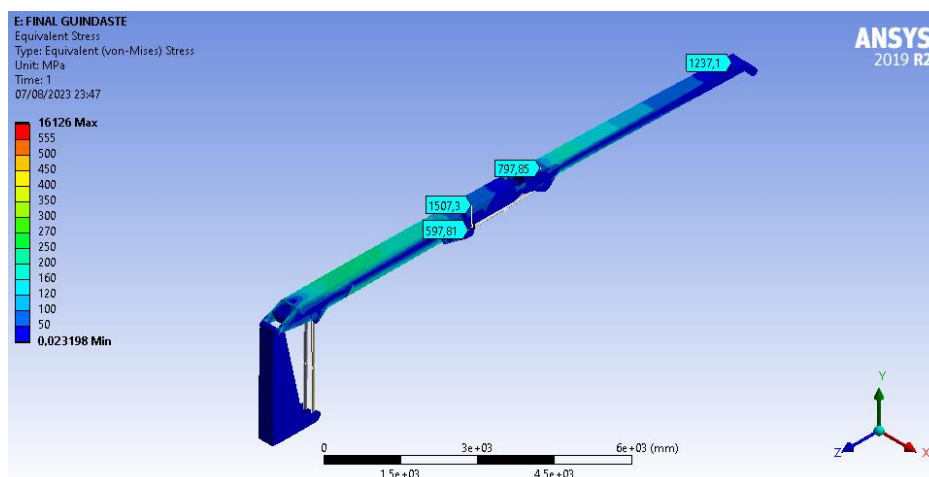
E, a quinta alteração, já que houve um aumento significativo no comprimento do pino do braço, foi necessário colocar dois cilindros para aliviar a tensão no centro do pino.

As melhorias das propostas evidenciadas acima foram analisadas pelo Método de Elementos Finitos. Para este projeto, optou-se por verificar os efeitos das modificações apenas no modelo global.

As condições de contorno foram mantidas iguais para que não houvesse discrepâncias com o modelo principal e não desvencilhasse da norma e para que ambos pudessem ser analisados e comparados.

No modelo global do guindaste, apresentado na Figura 38, é possível avaliar os valores de tensão nas geometrias alteradas. Nesta figura se constatou que as tensões ainda se mantiveram acima do limite de resistência, mas a distribuição ao longo do equipamento diminuiu drasticamente, principalmente nos olhais de içamento

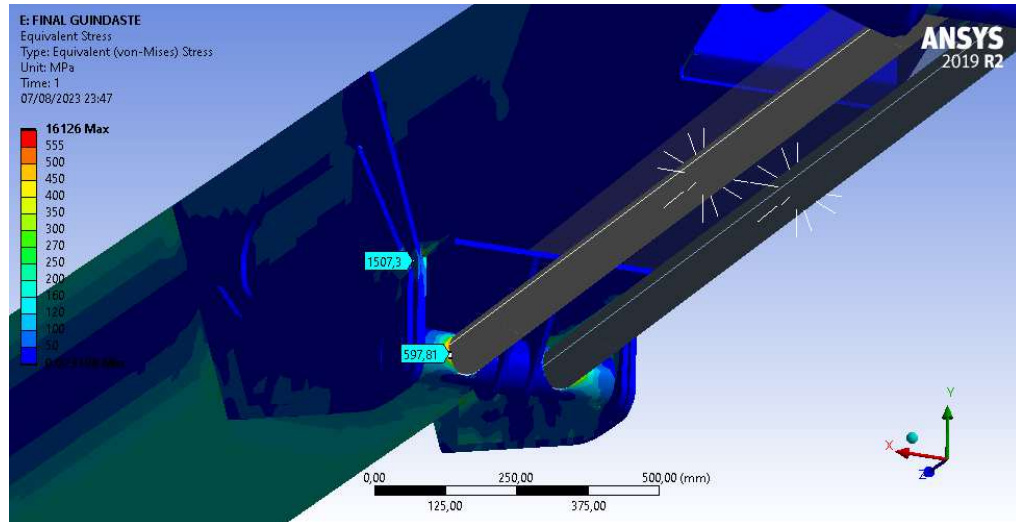
Figura 38: MEF do guindaste atualizado.



Fonte: Do autor.

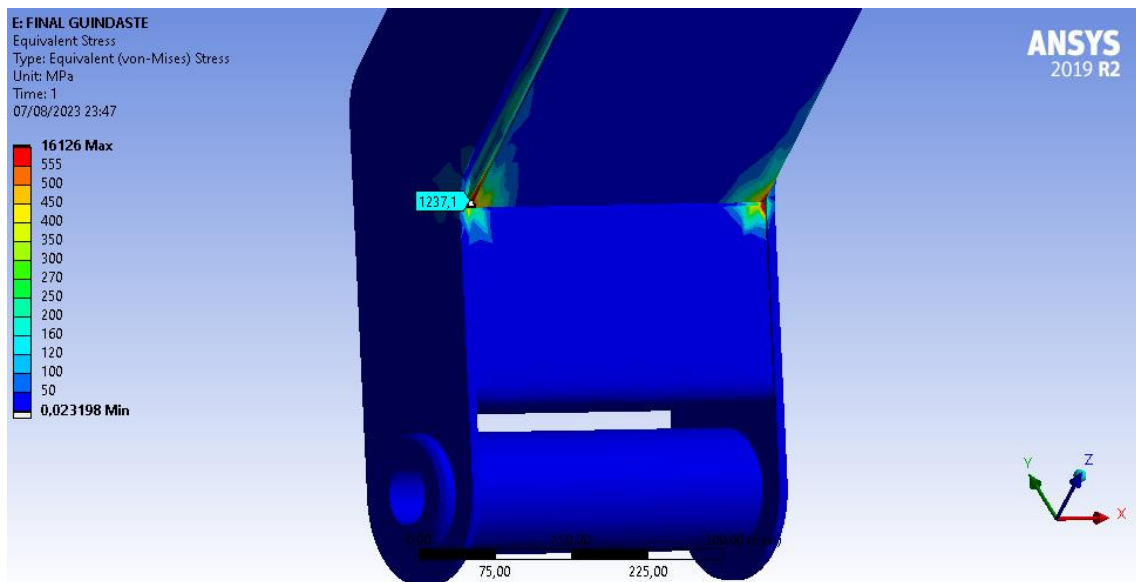
Na Figura 39, pode-se perceber que os locais que eram sujeitos a uma tensão crítica tomando uma grande área de atuação, se tornaram pontuais em áreas que seriam preenchidas por solda, por exemplo: no encontro do perfil 6m de comprimento do braço e os suportes, nesta área a tensão foi reduzida. O outro caso é a borda de ligação entre a haste do cilindro e o pino, que também é preenchida com solda e que apresenta uma tensão pontual. O mesmo princípio pode ser aplicado aos pontos do suporte de içamento da carga, Figura 40, que apresentam concentração de tensão e ultrapassa o limite admissível.

Figura 39: Análise de tensão no braço.



Fonte: Do autor.

Figura 40: Análise de tensão da extremidade da lança.



Fonte: Do autor.

8 CONCLUSÃO

O modelo criado, para análise utilizando o método dos elementos finitos, condiz em sua modelagem 3D com as características de guindastes de grandes proporções para içamento de carga.

O modelo apresenta, através das análises dos elementos finitos e com a utilização da norma NBR 8400, é importante como mecanismos de estudo para a verificação e aplicação em outros modelos de guindastes, além disso servindo como ferramentas importantes para o desenvolvimento de novos produtos.

Os critérios de esforços sofridos pela máquina, como determinante para validar as condições que o equipamento foi submetido se mostram realmente uteis a fim de assegurar a segurança de operação do equipamento.

Os componentes do guindaste apresentaram tensão de von Mises acima do limite estipulado em norma e para este projeto, com tensões muito elevadas em região com pontos de singularidade de Saint-Venant. Os pontos de tensões verificados foram observados nas geometrias que continham cantos vivos, cantos arredondados e junção entre chapas, esses pontos apresentaram tensões muito acima do estabelecido em norma.

Verifica-se, que os modelos globais e local apresentam similaridade de resultados na simulação numérica, porém o modelo global, por apresentar outros componentes associados como os cilindros e pinos de fixação, proporciona o resultado mais condizentes com a realidade, já que apresentam esforços e pontos de fixação inexistentes no modelo local.

De modo geral, o estudo do equipamento através do MEF apresentou pontos de tensão acima dos valores estabelecidos em norma e muitas das vezes até do limite de escoamento do material, mas que não chegaram a causar falhas de integridade estrutural.

Foi proposto uma melhoria de projeto, que diminuiu consideravelmente a quantidade de regiões críticas, mas não sanou a inexistência de tensão críticas no guindaste como um todo. Porém, estas melhorias foram satisfatórias para diminuir consideravelmente a magnitude das tensões localizadas. Isto demonstra que estas melhorias podem ser implementadas em equipamentos semelhantes.

O MEF se mostra uma ferramenta de considerável importância, a fim de avaliar e validar as análises estruturais de equipamentos mecânicos, permitem implementar vários tipos de elementos naturais que afetam o equipamento em seu modelo físico, dando cada vez mais exatidão nos resultados obtidos.

Assim, mesmo os modelos de elementos finitos serem de grande ajuda para validar projetos como o mostrado neste trabalho, isso não elimina a necessidade de fazer ensaios físicos dos equipamentos para validar o equipamento o suficiente, a fim de ser comercialmente viável sua produção.

9 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8400 Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10520 Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14768: Guindaste articulado hidráulico – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2012.

EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPAISCHE NORM EN 10149-2: Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. September, 2013.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 660 p.

BEER, F.P, JOHNSTON, Jr. **Resistência dos materiais**. 3. Ed. São Paulo: Pearson 2006. 1255 p.

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R e BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica** 7ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2002.

MEDINA, Jorge. **Procedimento para avaliação da integridade estrutural em máquinas de levantamento e movimentação de materiais**. Rio de Janeiro, pg. 1-171, setembro, 2003.

SOUZA, Remo. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Belém, pg. 1-40, maio, 2003.

MUNARO, Leônidas. **Análise de tensões em guindaste articulado utilizando método de elementos finitos com base na norma ABNT NBR 14768**. Caxias do Sul, pg. 1-66, 28, novembro, 2014.

MASCARELLO, Roger. **Otimização estrutural aplicado no projeto do conjunto base do guindaste articulado**. Caxias do Sul, pg. 1-71, 22, novembro, 2019.

CRANE BRASIL. Projetos e projeções para 2018. Manuseio, Movimentação e Transporte de Carga, São Paulo, v. 57, n. VII, p.10-15, fev. 2018. Disponível em: <<http://cranebrasil.com.br/projetos-e-projecoes-para-2018/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

SSAB. **Aços estrutural de alta resistência**. Disponível em: <https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/strenx/strenx-for-lifting/forestry-cranes>. Acesso em 21 de novembro de 2022.