

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

ROGER MASCARELLO GUARESE

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL APLICADA NO PROJETO DO CONJUNTO BASE DO
GUINDASTE ARTICULADO**

CAXIAS DO SUL

2019

ROGER MASCARELLO GUARESE

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL APLICADA NO PROJETO DO CONJUNTO BASE DO
GUINDASTE ARTICULADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

CAXIAS DO SUL

2019

ROGER MASCARELLO GUARESE

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL APLICADA NO PROJETO DO CONJUNTO BASE DO
GUINDASTE ARTICULADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico.

Aprovado em 22/11/2019

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. André Alaniz Cesario
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, Roque Guarese e Fatima Mascarello Guarese por todo o esforço necessário, que fez com que eu pudesse chegar até aqui.

Ao professor Alexandre Vieceli, por toda a dedicação em orientar meu trabalho, aos professores Albano Luiz Weber, André Alaniz Cesario e Adelair Colombo Lino pelas revisões, correções e melhorias propostas.

Gratifico a empresa ING Industria Nacional de Guindastes pelo suporte, ao Engenheiro Gabriel Rocha Ribeiro, por todo o auxílio e tempo dedicados na elaboração desse projeto, e aos meus colegas de engenharia, pela confiança em meu trabalho.

A todos meus familiares e amigos, que de uma certa forma contribuíram em minha jornada até aqui, meu muito obrigado.

"The right man in the wrong place can make all the difference in the world."

G-Man, Half-Life 2 (2004)

RESUMO

Com a retomada de crescimento que a economia brasileira vem vivenciando, novas portas para investimentos são abertas cotidianamente. Muitos desses investimentos são vistos em setores de energia, portos, aeroportos e em construções de infraestrutura em geral, onde a utilização de guindastes articulados é frequente e tende a ser gradativamente maior. Isto posto, o presente trabalho teve como objetivo obter uma estrutura otimizada da base do guindaste, conjunto esse que representa grande parte da massa do equipamento, tornando-o mais leve e competitivo no mercado. Para atingir esse objetivo, foram utilizados *softwares* para a modelagem dos componentes e a otimização topológica da estrutura, visando sempre respeitar as diretrizes impostas pela norma NBR 14768 (2015), que estabelece os requisitos mínimos para projeto, cálculos, inspeções e ensaios de guindastes articulados hidráulicos. Concluindo, a nova geometria obtida resultou em uma redução equivalente a 13,2% da massa total da base, e ainda uma redução média de 13,4% da tensão máxima observada na atual.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos. Otimização Estrutural. Otimização Topológica. Guindaste Articulado.

ABSTRACT

With the resumption of growth that the Brazilian economy has been experiencing, new doors for investments are opened daily. Many of these investments are seen in sectors like the energy industry, ports, airports and in infrastructure construction in general. where the use of knuckle boom cranes is frequent and tends to be increased. That said, the present work aimed to obtain an optimized structure of the crane base, which represents a large part of the mass of the equipment, making it lighter and more competitive in the market. To achieve this goal, software was used to model the components and topological optimization of the structure, always aiming to comply with the guidelines imposed by NBR 14768 (2015), which establishes the minimum design requirements, calculations, inspections and tests of knuckle boom cranes. To summarize, the new geometry obtained resulted in a reduction equivalent to 13.2% of the total base mass, as well as an average reduction of 13.4% of the maximum observed stress of the structure.

Keywords: Finite Element Method. Structural Optimization. Topological Optimization. Knuckle Boom Cranes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes Gerais do Guindaste Articulado	16
Figura 2 - Conjuntos principais do guindaste articulado	20
Figura 3 - Exemplos de Montagens	21
Figura 4 - Conjunto Base	22
Figura 5 - Coordenadas do guindaste	22
Figura 6 - Caminhos para a solução de problemas no cálculo estrutural	27
Figura 7 - Refino de malha.....	28
Figura 8 - Exemplos de geometria de elementos finitos	29
Figura 9 - Elemento de casca	30
Figura 10 - Generalidades na distribuição de cargas sobre um elemento tridimensional	31
Figura 11 - Distribuição de tensões ao longo do braço do guindaste.	33
Figura 12 - Deslocamentos da estrutura do guindaste	34
Figura 13 - Problema de Otimização Estrutural.....	35
Figura 14 - Tipos de otimização estrutural	36
Figura 15 - Otimização dimensional em Chapas.....	37
Figura 16 - Otimização dimensional viga "I"	37
Figura 17 - Otimização de forma de uma viga.....	38
Figura 18 - Otimização topológica em um componente genérico	38
Figura 19 - Diferentes soluções para um mesmo domínio	39
Figura 20 - Procedimentos da otimização topológica	40
Figura 21 - Resultados da otimização topológica aplicadas a coluna e braço principal	41
Figura 22 - Conjunto suporte e lança original.....	42
Figura 23 - Conjunto suporte e lança otimizados	42
Figura 24 - Fluxograma.....	43
Figura 25 - Cargas no guindaste ING 50.500.....	45
Figura 26 - Sistema de giro.....	46
Figura 27 - Diagrama de corpo livre do sistema de giro	47
Figura 28 - Força horizontal, vista superior do guindaste	48
Figura 29 - Distâncias relacionadas ao pino de articulação.....	49
Figura 30 - Conjunto base do guindaste	49
Figura 31 - Primeira distribuição de cargas.....	50
Figura 32 - Suportes fixos da base	51
Figura 33 - Discretização dos componentes na base.....	52
Figura 34 - Discretização da malha no domínio da base.....	53
Figura 35 - Regiões otimizáveis do domínio.....	54

Figura 36 - Resultados Carregamento 1	55
Figura 37 - Resultados Carregamento 2	56
Figura 38 - Resultados Carregamento 3	56
Figura 39 - Resultados da otimização topológica para cada carregamento	57
Figura 40 - Resultado da sobreposição e novo domínio	58
Figura 41 - Processo evolutivo.....	59
Figura 42 - Resultado do processo evolutivo	59
Figura 43 - Sistema suavizado.....	60
Figura 44 - Resultados modelo suavizado carregamento 1.....	61
Figura 45 - Resultados modelo suavizado carregamento 2.....	62
Figura 46 - Resultados modelos suavizado carregamento 3.....	62
Figura 47 - Montagem completa da estrutura.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de β_2 e $\phi_{2\ min}$	23
Tabela 2 - Valores de v_h	24
Tabela 3 - Combinações de cargas	25
Tabela 4 - Fatores de segurança	25
Tabela 5 - Dados calculados da base	48
Tabela 6 - Carregamentos aplicados na base do guindaste	51
Tabela 7 - Resultados	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
OT	Otimização Topológica

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Carga aplicada
G_f	Centro de massa da coluna e cilindro de elevação
G_b	Centro de massa do conjunto das lanças e cilindros de extensão
Y_b	Distância entre o centro de giro até o centro de massa das lanças
R	Distância entre o centro de giro do guindaste até a carga
ϕ_1	Fator dinâmico para o peso próprio do guindaste
ϕ_2	Fator dinâmico para a carga
ϕ_3	Efeito dinâmico da liberação de uma parte da carga
ϕ_2^{min}	Fator dinâmico para cálculo da carga
β_2	Fator de carga para cálculo de ϕ_2
v_h	Velocidade vertical
$v_h^{máx}$	Velocidade vertical máxima
F_h	Força horizontal
M	Momento de giro bruto
ϕ_{5h}	Efeitos causados pela aceleração e desaceleração do sistema de giro
f_y	Tensão de escoamento
S	Fator de segurança
σ_0	Tensão admissível
δ_5	Alongamento de ruptura
f_u	Resistência mínima a tração
f'_y	Limite de escoamento presumido calculado
r	Fator para cálculo de f'_y
$\{F\}$	Vetor que contém as forças nodais
$[K]$	Matriz de rigidez da estrutura
$\{U\}$	Vetor que contém os deslocamentos nodais
$\{c\}$	Vetor com campos de deslocamentos calculados
$[N]$	Matriz com as funções de interpolação
$Mb_{máx}$	Momento bruto máximo
P	Peso total do equipamento
V	Força cortante
F_{cil}	Força exercida pela haste do cilindro do sistema de giro
ϕ_{pe}	Diâmetro primitivo do eixo da coluna
P_{tc}	Pressão de trabalho do cilindro
ϕ_{cil}	Diâmetro interno da camisa do cilindro de giro

Q_{sh}	Vazão do sistema hidráulico do guindaste
\emptyset_{cel}	Diâmetro interno do cilindro de elevação
D_c	Distância entre o pino de articulação de giro do guindaste até a carga P
R_{cel}	Raio entre o pino de articulação e o mancal do cilindro de elevação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	17
1.3	OBJETIVO GERAL	17
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	GENERALIDADES EM SISTEMAS DE ELEVAÇÃO.....	19
2.2	GUINDASTE ARTICULADO HIDRÁULICO.....	19
2.3	CONJUNTO BASE E SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO	21
2.4	CÁLCULO ESTRUTURAL	22
2.4.1	Fatores dinâmicos	23
2.4.2	Combinações de cargas	24
2.4.3	Tensão admissível	25
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	26
2.5.1	Pré-processamento.....	27
2.5.1.1	Discretização	27
2.5.1.2	Tipos de Elementos.....	29
2.5.1.3	Análise Linear	31
2.5.2	Processamento	32
2.5.3	Pós-processamento.....	32
2.6	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	35
2.6.1	Métodos de otimização estrutural.....	36
2.6.1.1	Otimização Dimensional.....	36
2.6.1.2	Otimização de Forma.....	37
2.6.1.3	Otimização Topológica.....	38
2.6.2	Aplicações dos métodos de otimização estrutural em guindastes	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO COMPONENTE.....	44
3.2	ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	50
3.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DO CONJUNTO BASE	53
4	RESULTADOS	55
4.1	RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO ORIGINAL	55

4.2	RESULTADOS OBTIDOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	57
4.3	SUAVIZAÇÃO DOS RESULTADOS	60
4.4	RESULTADOS DAS ANÁLISES NA ESTRUTURA SUAVIZADA.....	61
4.5	COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A economia brasileira está se recuperando, mas ainda assim são necessários fortes investimentos, principalmente na infraestrutura do país (OCDE BRASIL, 2018). Com o aumento desses investimentos, as atividades no setor de obras na infraestrutura tendem a se intensificar, bem como o uso de equipamentos para a elevação de cargas e pessoas, que têm por objetivo reduzir o tempo das operações e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de grandes obras, contribuindo no desenvolvimento do país (NAKAMURA, 2014).

Além disso, com uma projeção positiva nos setores de energia, portos, aeroportos e rodovias (CRANE BRASIL, 2018), o uso de guindastes articulados tende a se tornar cada vez mais frequente. De acordo com a matéria publicada na Revista Manutenção e Tecnologia (2011), os aumentos da demanda desse produto, assim como a competição no mercado de guindastes, estão cada vez mais altos, exigindo equipamentos com capacidade de carga e alcance cada vez maior.

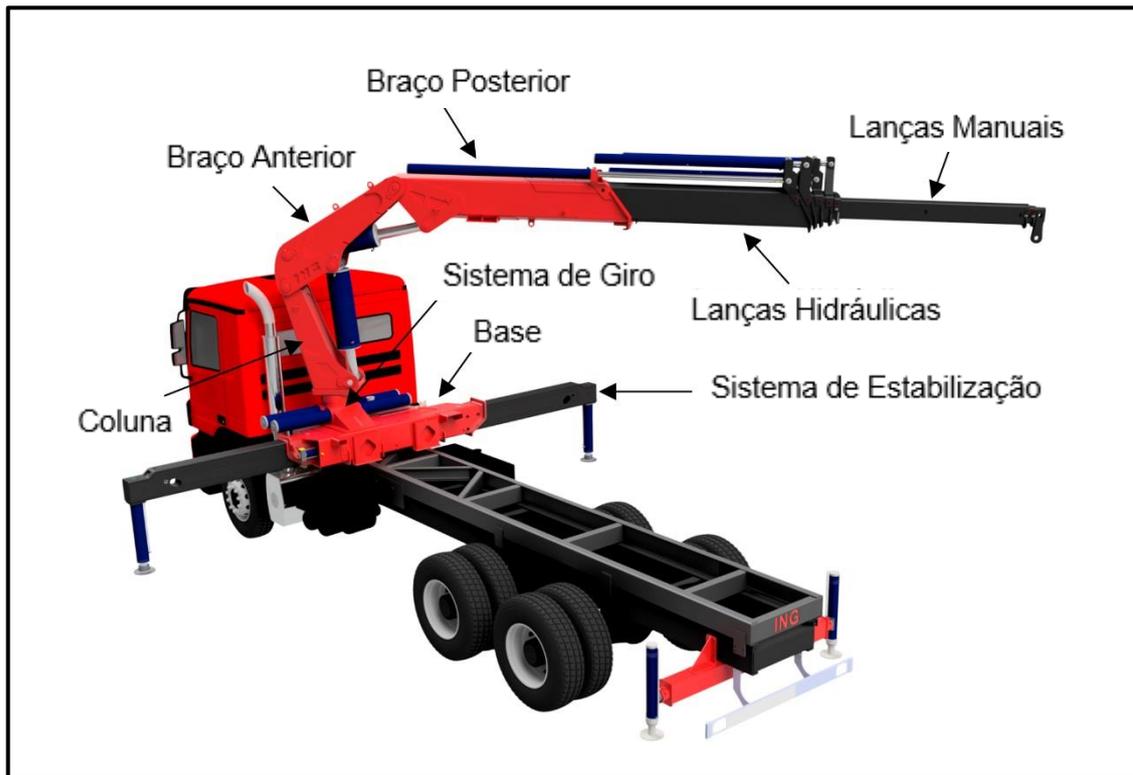
Por sua vez, a resolução do CONTRAN Nº 210:2006, que estabelece os limites de peso e dimensões para veículos terrestres transitarem, não permite, por consequência, que o caminhão no qual o guindaste foi implementado, tenha características que excedam aos limites especificados na norma. Tendo isso em vista, a busca de uma melhor relação entre peso próprio e capacidade de carga do equipamento tende a aumentar, fator esse, que também acaba por influenciar na eficiência da máquina, permitindo que ela trabalhe de maneira mais adequada (SOMACAL, 2018).

O guindaste articulado hidráulico veicular, ilustrado na Figura 1, é um equipamento instalado em caminhões. Segundo a norma ABNT NBR 14768:2015, ele é composto por vários conjuntos, cujos principais são:

- a) sistema de estabilização;
- b) base;
- c) sistema de giro;
- d) coluna;
- e) braço anterior;
- f) braço posterior;
- g) lanças hidráulicas;
- h) lanças manuais.

Os componentes desempenham funções específicas no guindaste, por exemplo: o sistema de estabilização deve garantir a estabilidade durante a operação do equipamento, a base é fixada no chassi e sobre chassi do caminhão, dando sustentação a coluna e aos braços, já o sistema de giro permite que a coluna do guindaste gire em torno do seu próprio eixo.

Figura 1 - Componentes Gerais do Guindaste Articulado



Fonte: O autor (2019).

Com o objetivo de buscar a melhor relação entre peso e capacidade do guindaste, a otimização topológica é uma técnica que facilita o aperfeiçoamento de estruturas, não sendo delimitado apenas pelo seu formato, mas também por sua topologia, com seus furos e ligações internas (STUMP, 2006). Ainda, de acordo com o autor, a função objetivo da otimização visa, em geral, diminuir a tensão máxima e reduzir o peso da estrutura.

Em síntese, o vigente trabalho propõe-se a reduzir a massa total do guindaste articulado hidráulico. Para tal fim, foi realizada a otimização da estrutura do conjunto base do guindaste, responsável por possuir grande parte da massa do equipamento.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

A ING Indústria Nacional de Guindastes Ltda., localiza-se no Bairro Nossa Senhora da Saúde, em Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. A empresa atua no setor metal mecânico, no ramo de Guindastes Hidráulicos Veiculares. A comercialização de seus produtos é realizada por seus representantes em todo o território nacional e também na América Latina.

O presente trabalho foi realizado no setor de engenharia da empresa, responsável pelos projetos, em conjunto com a Universidade de Caxias do Sul, que disponibilizou os *softwares* de engenharia para a realização da otimização.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Na indústria de guindastes, a redução de peso do equipamento traz vários benefícios. A atenuação do desgaste do veículo é um deles, devido a estrutura mais leve, além da diminuição no consumo de combustível do caminhão, gerando também menos emissão de gases poluentes no ambiente (PERO; DELOGU; PIERINI, 2017).

Outro aspecto importante na redução da massa do guindaste, é conseguir posicioná-lo mais próximo da cabine do caminhão, sem exceder o limite de carga do eixo dianteiro. Dessa forma, um maior espaço para a instalação de um implemento rodoviário é viabilizado, fator que pode influenciar diretamente na venda do equipamento, fazendo com que ele se torne mais atrativo ao cliente.

A otimização de estruturas tem como propósito atingir o melhor desempenho de um projeto estrutural (RAMOS, 2014). De acordo com Coutinho (2006), essa otimização melhora também os custos durante a operação, devido ao aumento desse desempenho, refletindo na performance dos componentes, além de reduzir a probabilidade e a gravidade de acidentes, graças as peças mais leves na linha de produção da fábrica.

Portanto, este trabalho tem por objetivo, o desenvolvimento de uma nova estrutura para o conjunto base do guindaste articulado, pois devido a sua massa e volume elevados, acaba proporcionando um cenário favorável para a otimização, e com isso, uma redução significativa na massa total do equipamento pode ser alcançada. Essa otimização será realizada a partir do projeto já existente da estrutura, utilizando-se do Método dos Elementos Finitos (MEF) e otimização topológica (OT) com o auxílio do *software* ANSYS®, levando em conta a norma ABNT NBR 14768:2015 e suas instruções de cálculo estrutural.

1.3 OBJETIVO GERAL

Remodelar o conjunto base de um guindaste articulado, utilizando otimização topológica.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de atingir o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- a) modelar os componentes do conjunto base do guindaste em *software* CAD;
- b) obter uma configuração com maior rigidez e menor massa utilizando o Método dos Elementos Finitos, em conjunto com a ferramenta de otimização topológica do *software* ANSYS®, considerando diferentes ângulos de giro do guindaste;

- c) modelar o resultado suavizado em chapas de aço;
- d) analisar as tensões e deslocamentos do novo modelo da estrutura, pelo Método dos Elementos Finitos.
- e) avaliar o resultado da otimização, estabelecendo se a estrutura está de acordo com os critérios de tensão máxima do material.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo refere-se à revisão bibliográfica, essencial para fundamentar os conceitos sobre guindastes articulados e otimização estrutural.

2.1 GENERALIDADES EM SISTEMAS DE ELEVAÇÃO

De acordo com Rudenko (1976), diferentemente de transportes que ocorrem em longos trajetos, como em rodovias ou linhas aéreas, sistemas de elevação movimentam a carga entre espaços relativamente curtos. Para o exercício de tal função, existem diversos modelos de máquinas, cada uma com suas características, podendo ser divididas em três grandes grupos:

- a) máquinas para elevação: maquinários que possuem mecanismos de elevação, com função de movimentar cargas. Nesse grupo, podem-se citar elevadores e guindastes;
- b) equipamento de transporte: pode ou não possuir mecanismos de elevação, indicado para movimentação de cargas em fluxo constante. Transportadores, máquinas de transferência, sistemas pneumáticos e hidráulicos são exemplos de equipamentos desse grupo;
- c) equipamento de superfície e elevado: pode também possuir ou não mecanismos de elevação, sua aplicação é indicada para a movimentação de cargas em lotes. Nessa categoria enquadram-se máquinas como: carros sem trilhos que movem cargas no chão, sistemas de vias elevadas, que deslocam carrinhos suportados por cabos e instalações que deslocam carros ferroviários, dentro da extensão da empresa.

Como descrito por Laudonio (2013), a escolha adequada do modelo de máquina depende basicamente de sua aplicação, portanto aspectos como alcance, tipos de cargas e ambientes de trabalho devem ser considerados. Outro ponto apontado pelo autor, diz respeito a complexidade do equipamento de elevação, exigindo uma qualificação por parte do operador, que deve possuir habilidade e experiência no manuseio de cargas elevadas.

2.2 GUINDASTE ARTICULADO HIDRÁULICO

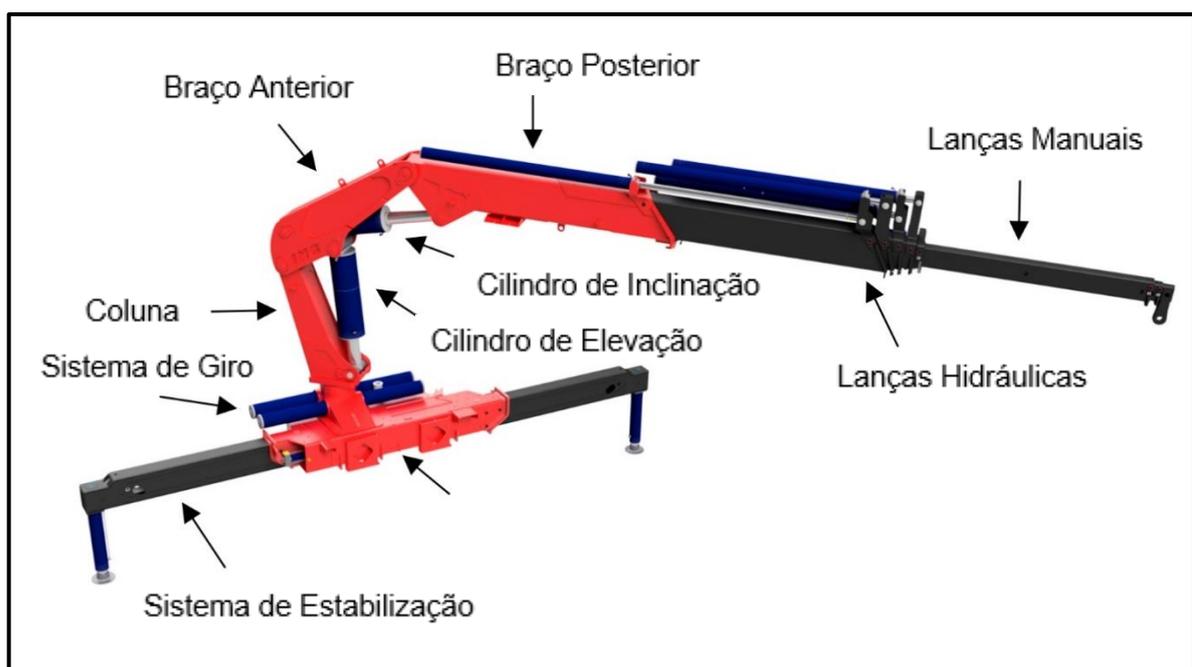
Por terem uma alta eficiência no manuseio e transporte de cargas, o uso de guindastes articulados tem se tornado cada vez mais popular entre as máquinas de elevação (CHEN et al., 2014). Composto por um conjunto de braços articulados hidráulicamente, que podem ser dobrados e recolhidos ocupando um pequeno espaço e, quando acionados,

permitir grandes alcances, tanto verticalmente como horizontalmente, o guindaste articulado permite grande flexibilidade, nas mais diversas condições de trabalho (LAUDONIO, 2013).

Como define a norma ABNT NBR 14768:2015, um guindaste articulado é uma estrutura que contempla uma coluna que gira sobre uma base. A coluna, por sua vez, sustenta um conjunto de lanças acopladas, como exibido na Figura 2. A norma divide e caracteriza, entre outros, os seguintes conjuntos do equipamento:

- a) sistema de estabilização: Conjunto de estabilizadores extensíveis acoplados na base do guindaste, com acionamento manual ou hidráulico, que busca garantir a estabilidade operacional do equipamento;
- b) base: Conjunto fixado no chassi e sobre chassi do veículo, responsável pela sustentação do equipamento;
- c) sistema de giro: Sistema responsável pela rotação do guindaste em torno de seu eixo;
- d) coluna: Conjunto equipado sobre a base, responsável pela sustentação dos braços;
- e) braço anterior: Conjunto fixado entre a coluna e o braço posterior;
- f) braço posterior: Conjunto fixado no braço anterior e responsável por alojar as lanças telescópicas;
- g) lanças hidráulicas: Lanças destinadas a movimentar a carga horizontalmente e verticalmente, acionadas hidraulicamente;
- h) lanças manuais: Lanças acionadas manualmente;

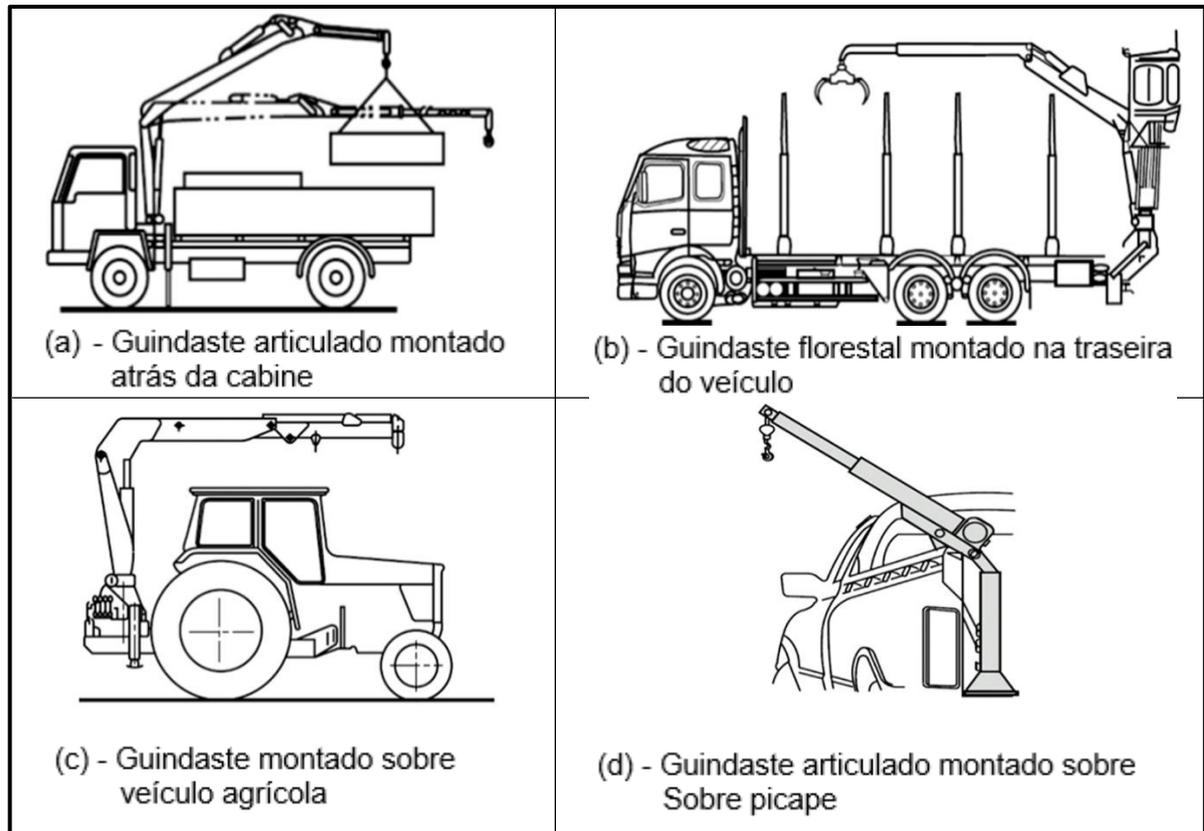
Figura 2 - Conjuntos principais do guindaste articulado



Fonte: Adaptado de Indústria Nacional de Guindastes (2019).

Esse equipamento é instalado, na maioria das vezes, sobre veículos, incluindo reboques e semirreboques, com a função de carregar e descarregar volumes (NBR 14768:2015). Na Figura 3, pode-se observar alguns exemplos dessas montagens.

Figura 3 - Exemplos de Montagens



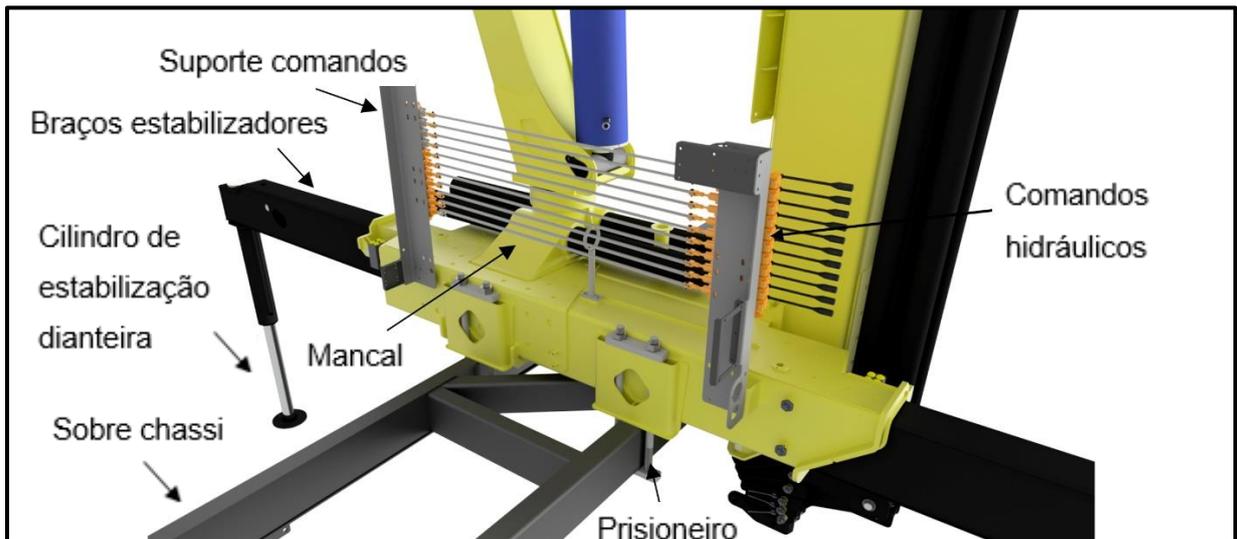
Fonte: Adaptado de EN 12999 (2006).

2.3 CONJUNTO BASE E SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO

A base do guindaste articulado é um dos principais conjuntos que compõem o equipamento (Figura 4), ela é fixada no chassi e sobre chassi do veículo, por intermédio dos prisioneiros, e proporciona sustentação à coluna pelo mancal. Além disso, os comandos hidráulicos também são fixados na base, por uma chapa que serve como suporte, local onde a máquina é operada manualmente.

Do mesmo modo, esse conjunto também é responsável por comportar os braços de estabilização. Durante a operação do equipamento, esses braços extensíveis devem ser acionados hidráulicamente, estendendo-os horizontalmente. Em seguida, os cilindros estabilizadores atuam até encostar no solo, evitando o risco de tombamento do conjunto em determinadas condições, proporcionando a estabilidade operacional (ABNT NBR 14768:2015).

Figura 4 - Conjunto Base



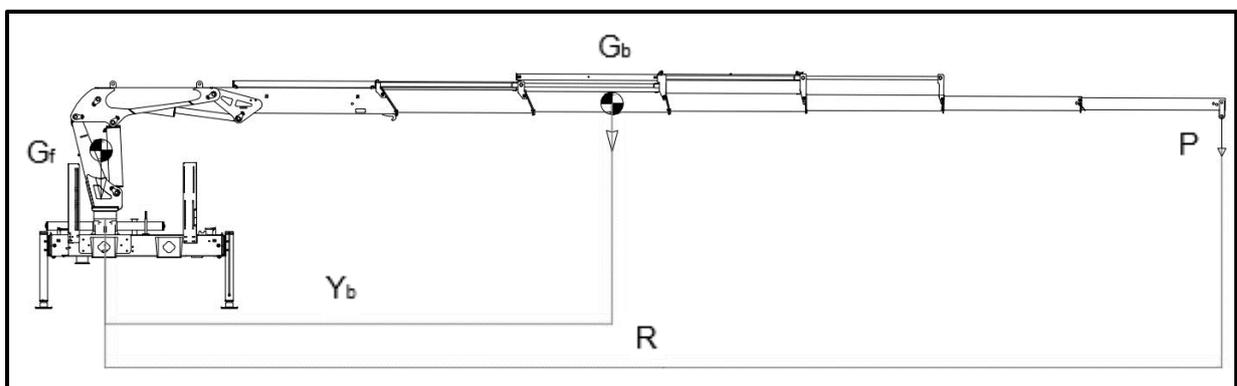
Fonte: Adaptado de Indústria Nacional de Guindastes (2019).

2.4 CÁLCULO ESTRUTURAL

A força e o momento aplicados em um ponto específico da estrutura são decorrentes da disposição das forças que agem sobre o sistema (HIBBELER, 2009). No guindaste articulado, a força e o momento aplicados no mancal da coluna, são provenientes da carga aplicada na lança, da massa do conjunto de lanças e a massa da coluna.

A Figura 5, demonstra como são denotadas as coordenadas dos centros de massa de cada conjunto do guindaste, e a aplicação da carga P , na ponta da lança, estipulada pelo gráfico de carga do equipamento. G_f é o centro de massa da coluna e cilindro de elevação do equipamento; G_b é o centro de massa do conjunto das lanças e cilindros de extensão; Y_b é a distância entre o centro de giro até o centro de massa das lanças G_b , e R é a distância entre o centro de giro do guindaste até a carga P .

Figura 5 - Coordenadas do guindaste



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14768:2015.

Segundo a norma ABNT NBR 14768:2015, os seguintes carregamentos devem ser considerados no cálculo estrutural do guindaste:

- a) cargas mortas: forças que atuam no guindaste devido as massas dos componentes do equipamento, agindo de maneira permanente na estrutura durante a operação;
- b) cargas brutas: é a soma da carga que é suspensa (carga útil), mais as massas dos acessórios de elevação (ganchos e cabos);
- c) forças dinâmicas: causada pelas acelerações do sistema de giro;
- d) forças centrífugas: forças que atuam no giro do guindaste, sem levar em conta os efeitos do içamento e da gravidade sobre a carga bruta, e o efeito da liberação repentina de uma parte da carga.

2.4.1 Fatores dinâmicos

Como descritos pela norma ABNT NBR 14768:2015, os fatores dinâmicos são efeitos causados pelas vibrações, provocadas pelo içamento das cargas e pela gravidade, tendo relação com o peso próprio do equipamento (ϕ_1) e com a carga bruta (ϕ_2), durante o manuseio da máquina. O fator ϕ_1 , utilizado para a massa do guindaste, não deve exceder o valor de ϕ_2 , e deve ser maior ou igual a 1,1. Em geral, utiliza-se $\phi_1 = 1,1$.

O fator ϕ_2 , referente a carga bruta, é calculado pela Equação 1.

$$\phi_2 = \phi_{2\text{ mín}} + \beta_2 v_h \quad (1)$$

Os valores de $\phi_{2\text{ mín}}$ e β_2 são descritos na Tabela 1. Nessa tabela, HC1 refere-se à classe de guindastes montados sobre veículos, já HC2 se refere à guindastes montados sobre bases fixas.

Tabela 1 - Valores de β_2 e $\phi_{2\text{ mín}}$.

Classe de içamento	β_2	$\phi_{2\text{ mín}}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10

Fonte: ABNT NBR 14768:2015

Na Equação 1, v_h representa o valor da velocidade vertical (expressa em metros por segundo), associado com os acessórios de içamento. A Tabela 2 evidencia os valores

utilizados para v_h , sendo $v_{h\ máx}$ a velocidade vertical máxima. Já A e B representam condições de elevação e abaixamento de cargas, ao mesmo tempo em que o guindaste gira, sem e com efeitos do vento, respectivamente. Para C, considera-se quando picos dinâmicos simultâneos ocorrem, eventos causados por elevar ou baixar as cargas (ABNT NBR 14768:2015).

Tabela 2 - Valores de v_h

Combinações de cargas	Tipo de movimento		
	Içamento com velocidade constante	Içamento com velocidade crescente	Içamento com controle de velocidade automático
A e B	$v_h = v_{h\ máx}$	$v_h = 0,5v_{h\ máx}$	$v_h = 0$
C	-	$v_h = v_{h\ máx}$	$v_h = 0,5v_{h\ máx}$

Fonte: ABNT NBR 14768:2015

A força horizontal (F_h) é expressa em Newtons (N), e é resultante dos fatores dinâmicos, sendo calculada pela Equação 2. Nessa equação, M representa o momento de giro bruto, expresso em Newton metro (Nm) e R , expresso em metros (m), é a distância do centro de giro do guindaste até a carga, conforme mostrado anteriormente na Figura 5. Caso essa distância seja menor que a metade do alcance hidráulico máximo, será usado o valor da metade do alcance hidráulico máximo como (ABNT NBR 14768:2015).

$$F_h = \frac{M}{R} \quad (2)$$

Outro fator dinâmico que deve ser adicionado a F_h , são os efeitos causados pela aceleração e desaceleração do sistema de giro (ϕ_{5h}). Esse fator pode assumir o valor de 1,05 quando a aplicação do guindaste for de uso com gancho, e 1,30 quando a operação for com garras ou cestos (ABNT NBR 14768:2015).

2.4.2 Combinações de cargas

Com o objetivo de determinar as tensões que o guindaste irá ser submetido, as cargas devem ser combinadas, conforme a Tabela 3. Nessa tabela, A2 e B2 levam em consideração o uso de acessórios de elevação. A condição C3 diz respeito ao guindaste em condições de teste, o fator ϕ_3 refere-se ao efeito dinâmico da liberação de uma parte da carga durante a operação com acessórios, como garras ou ganchos, e C1 diz respeito a picos dinâmicos causados por elevar ou baixar cargas.

Tabela 3 - Combinações de cargas

Categorias de cargas	Cargas		Combinação de cargas A		Combinação de cargas B		Combinação de cargas C	
			A1	A2	B1	B2	C1	C3
Regular	Gravidade, aceleração das unidades de elevação	Massas do guindaste deslocadas	ϕ_1	ϕ_1	ϕ_1	ϕ_1	ϕ_1	1,0
		Massa da carga bruta	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_2	ϕ_3	-	-
	Aceleração das unidades de giro	Massa da carga bruta	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	-	-

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14768:2015.

2.4.3 Tensão admissível

Como caracteriza a norma ABNT NBR 14768:2015, as tensões admissíveis são obtidas pela Equação 3.

$$\sigma_0 = \frac{f_y}{S} \quad (3)$$

Nessa equação, f_y refere-se a tensão de escoamento do material, já S é o fator de segurança. A Tabela 4, indica o fator de segurança recomendado para aços não ligados com tensão de escoamento de até 355 MPa, levando em conta a combinação de carga da qual o equipamento estará submetido.

Tabela 4 - Fatores de segurança

Combinação de carga	A	B	C
S	1,5	1,33	1,25

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14768:2015.

Para as condições em que a tensão do material seja superior à tensão de escoamento de 355 MPa, as seguintes condições se aplicam:

$$a) \quad 510 < f_u \leq 590 \text{ e } \delta_5 \times f_u \geq 10800$$

$$b) \quad 590 < f_u \text{ e } \delta_5 \times f_u \geq 9800$$

Caso uma dessas duas situações forem atendidas, deve-se usar a Equação 4,

$$f'_y = 0,8 \cdot f_u \quad (4)$$

onde, δ_5 refere-se ao alongamento de ruptura do material, f_u é a resistência mínima a tração do material e f'_y é o limite de escoamento presumido calculado. Já para os casos em que essas condições não sejam válidas, o fator “ r ” obtido pela Equação 5, deve adicionado em f'_y , pela Equação 6,

$$r = \frac{26000 - f_u \cdot (6 + \delta_5)}{9600} \quad (5)$$

$$f'_y = \frac{f_u}{r} \quad (6)$$

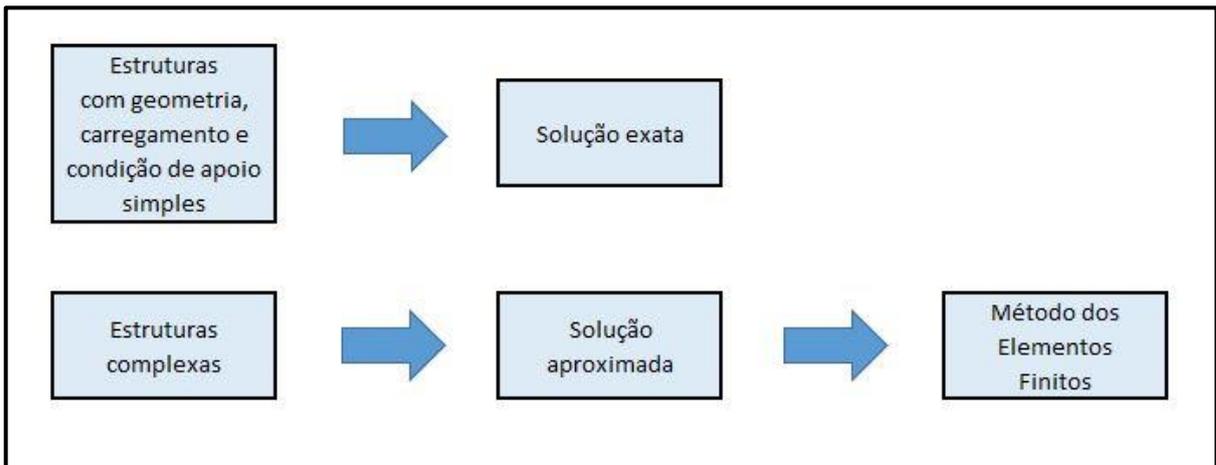
sendo que r deve ser maior ou igual a 1,28 e menor ou igual a 1,44.

2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos tem a finalidade de definir o estado de tensão de uma geometria, submetida a esforços anteriores (AZEVEDO, 2003). Para Alves Filho (2007), esse método pode ser aplicado em diversos casos, quando se deseja obter o resultado de deslocamentos, deformações e tensões, independente da forma da estrutura, sendo usado como um método alternativo aos da metodologia clássica, com resultados suficientemente precisos para a engenharia.

Os métodos clássicos são procedimentos analíticos que permitem a obtenção da resposta exata, entretanto, são poucos os casos em que se pode aplicar essas soluções (ALVES FILHO, 2007). A Figura 6 representa, esquematicamente, as duas vias das quais pode-se seguir, a fim de solucionar problemas relacionados a cálculos estruturais.

Figura 6 - Caminhos para a solução de problemas no cálculo estrutural



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2007).

Para Ribeiro (2015), o Método dos Elementos Finitos é intensamente usado nas mais variadas indústrias, como a de guindastes. O autor ainda afirma que essa ferramenta, pode ser utilizada nesse seguimento com o objetivo de auxiliar tanto na análise da estabilidade da estrutura do equipamento, como na aproximação de valores relacionados a deslocamentos, deformações e tensões provenientes dos carregamentos nos quais o guindaste é submetido.

2.5.1 Pré-processamento

É durante o pré-processamento que será definida a análise mais apropriada ao problema. Aqui cabe ao analista determinar os tipos de elementos que serão utilizados para a geração da malha, as cargas que serão aplicadas no sistema, os materiais que serão empregados e também as restrições necessárias, estabelecendo as condições de contorno do conjunto (ALVES FILHO, 2007).

Como caracteriza Hearn (1997), dentre os principais tipos de análises que podem ser definidas nessa etapa, pode-se citar a linear elástica, a análise dinâmica, e a não linear. O autor ainda descreve que além de todas essas definições citadas anteriormente, o analista deve também estabelecer nesta etapa os tipos de resultados pretendidos com a análise.

2.5.1.1 Discretização

Durante a discretização, o sistema é fracionado em regiões com geometria simplificada, as quais são conectadas entre si por pontos discretos, também chamados de nós do modelo (ALVES FILHO, 2007). Para Silva et al. (2001), essa divisão facilita a escolha das funções de interpolação, que representam as variáveis ao longo de todo o domínio do

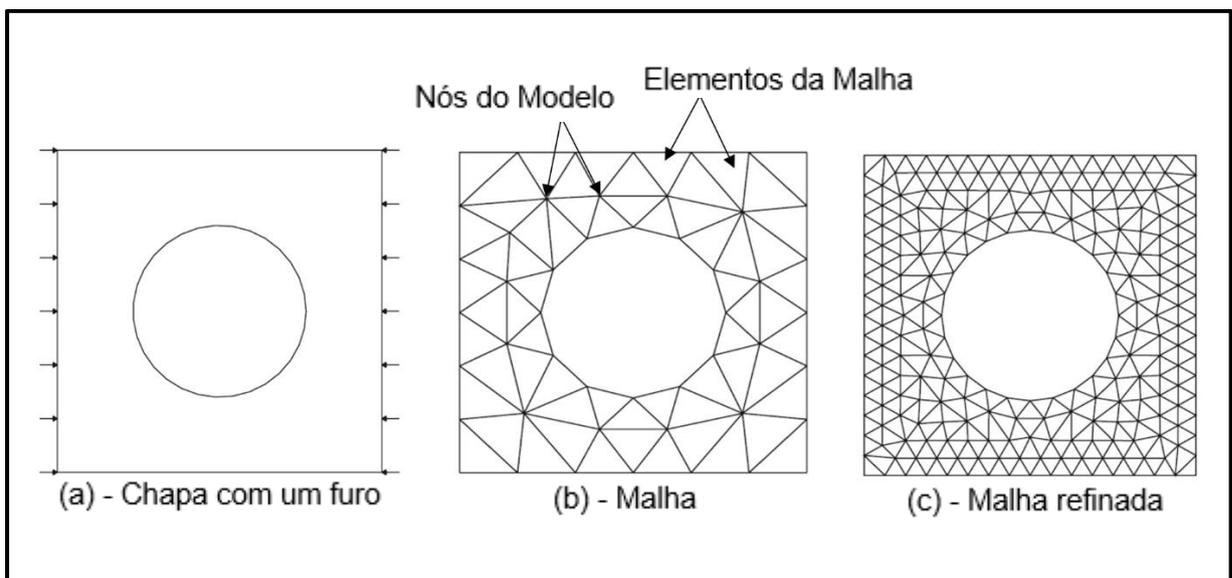
problema, levando em conta as condições de contorno, geometria e comportamento do material. Ainda de acordo com Silva et al. (2001), essas variáveis são combinadas por funções, e o comportamento de cada região pode ser determinado, desse modo, todas as soluções podem ser agregadas em um sistema global.

De acordo com Souza (2003), a precisão das soluções obtidas em uma análise de elementos finitos está relacionada com a quantidade, tamanho e tipo dos elementos que compõem a malha, formada pela junção dos nós do modelo. O autor ainda alega que, apesar de se tratar de um método com solução aproximada, quanto menor o tamanho dos elementos (tendendo a zero), e maior for a quantidade deles (tendendo ao infinito), o resultado aproxima-se de uma solução exata. Entretanto, segundo Marchi e Silva (2002), erros de truncamento, de iteração, de arredondamento e de programação podem comprometer os resultados da análise.

Existe um ponto ideal de refinamento da malha, obtido por um estudo de convergência, onde o resultado de uma análise anterior, com uma determinada quantidade de elementos, é comparado ao de outra análise, com a distribuição de elementos mais densa. Esse processo é repetido até que os resultados do modelo se tornem convergentes, permitindo a obtenção de uma malha com densidade de nós suficiente para um resultado adequado. (SORIANO; LIMA, 2002).

A Figura 7 demonstra um componente que passou por um processo de refino de malha. Em (a), pode-se observar a representação de uma chapa com um furo no meio, que será submetida a análise, já em (b), a representação do modelo discretizado com elementos triangulares, e por fim (c), demonstrando a peça com a malha refinada.

Figura 7 - Refino de malha

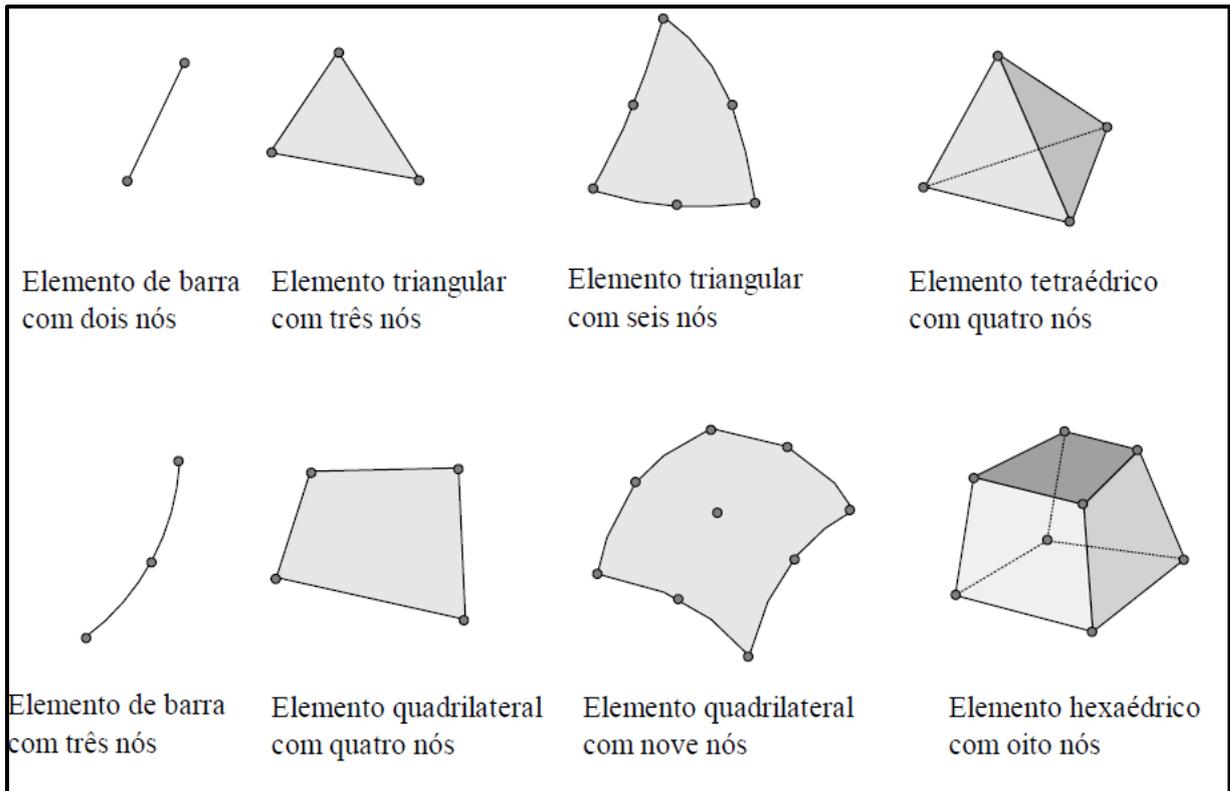


Fonte: Adaptado de Fish e Belytschko (2007).

2.5.1.2 Tipos de Elementos

Dependendo da aplicação, existem diversas geometrias para elementos finitos, podendo ser classificados em elementos lineares, elementos de superfície e elementos sólidos (BUDYNAS; NISBETT, 2011). A Figura 8 representa alguns destes elementos.

Figura 8 - Exemplos de geometria de elementos finitos



Fonte: Souza (2003).

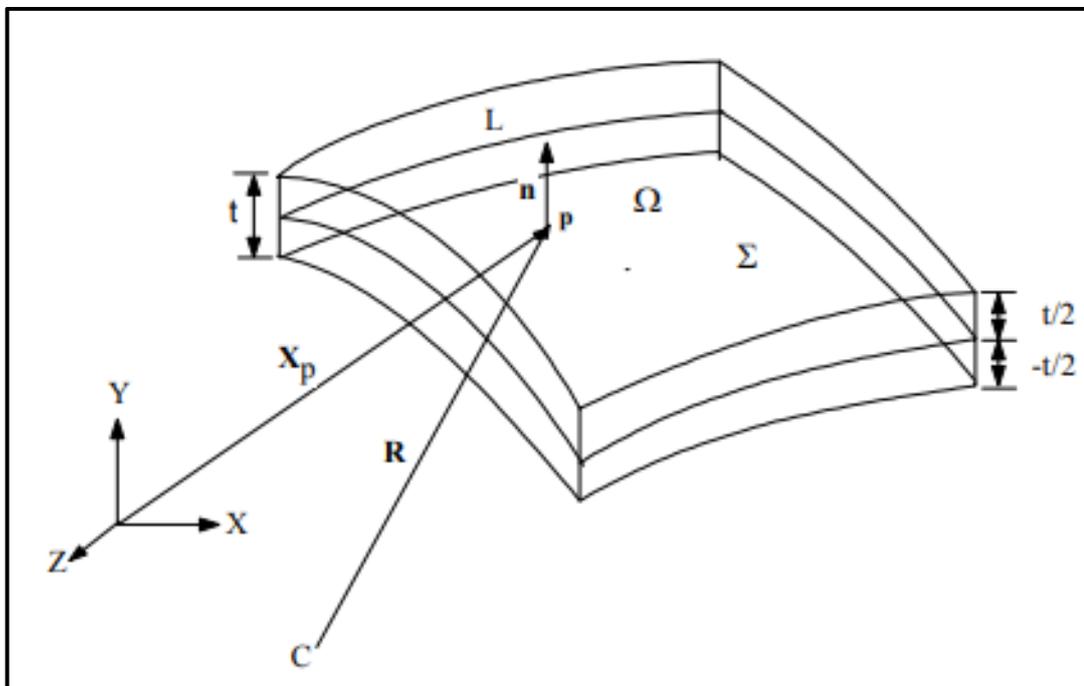
Budynas e Nisbett (2011) alegam que elementos de superfície triangulares e quadrilaterais são utilizados basicamente para chapas finas, com o objetivo de obter o resultado da tensão ou da deformação plana, sendo os elementos quadriláteros preferíveis para a utilização sempre que possível. Conforme os autores, os elementos sólidos como o tetraédrico e o hexaédrico são utilizados para chapas grossas sólidas, enquanto elementos de barra com dois nós podem ser usados para geometrias unidimensionais.

Para Belytschko, Liu e Moran (2000), uma grande capacidade computacional é requerida na discretização de problemas que envolvem situações complexas, como a análise de veículos automotivos, aviões ou embarcações, principalmente quando se utilizam elementos sólidos. De acordo com os autores, a utilização de elementos como vigas, em que o deslocamento é definido por uma função, com apenas uma variável independente, e

elementos de cascas, que possuem duas variáveis independentes, tendem a aumentar a eficácia no pré-processamento da análise de elementos finitos.

Os elementos de cascas são utilizados para modelar estruturas e componentes, cuja as espessuras sejam muito menores comparadas com as demais dimensões, como é o caso de vigas e colunas com grandes comprimentos, chassis, carrocerias e fuselagens de aviões (FISH; BELYTCHKO, 2007). Na Figura 9 pode-se observar a representação de um elemento de casca, onde Σ representa a superfície, R o raio de curvatura, C o centro de curvatura de um ponto P , t é a espessura do elemento, n é um vetor normal a superfície, Ω é o volume da casca e L é o comprimento da casca.

Figura 9 - Elemento de casca



Fonte: Garcia (2003).

Segundo Garcia (2003), este modelo é capaz de descrever de forma adequada os resultados de tensões e deslocamentos, para isso, as relações representadas pelas equações 7 e 8 devem ser satisfeitas.

$$\frac{t}{R} \gg 1 \quad (7)$$

$$\frac{t}{L} \gg 1 \quad (8)$$

Essas equações salientam que, a espessura da chapa deve ser muito menor em relação ao raio de curvatura e comprimento da peça.

2.5.1.3 Análise Linear

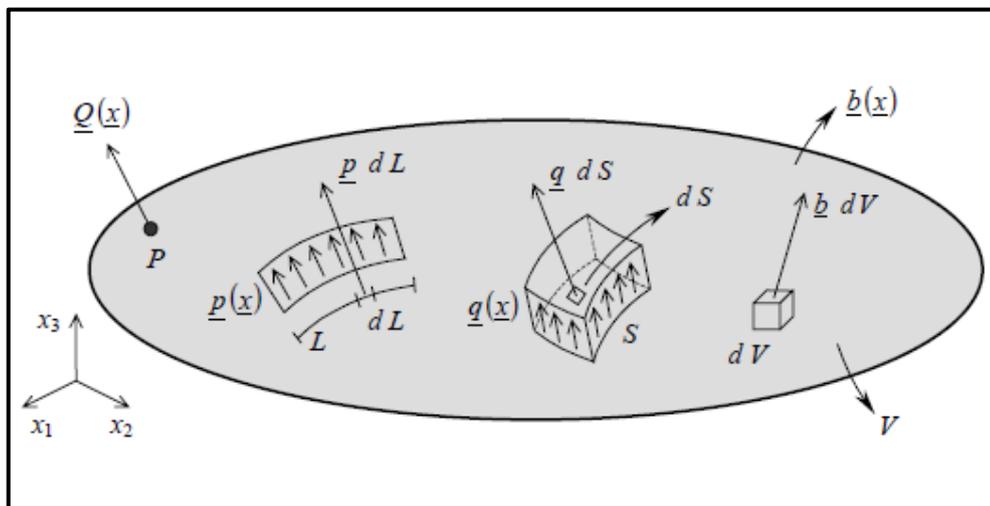
Na análise linear, todo o modelo matemático é fundamentado pelo conceito de elementos elásticos. Esse conceito, como descrito por Alves Filho (2007), refere-se à proporcionalidade entre as relações de forças e deslocamentos aplicadas no sistema. A Equação (7) representa a relação linear geral, que associa as diversas forças externas e deslocamentos nodais encontradas em estruturas reais, de maneira matricial.

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (9)$$

Nessa equação $\{F\}$ representa uma matriz coluna, que contém todas as cargas nodais, já $[K]$, representa a matriz de rigidez da estrutura, responsável por relacionar as forças e deslocamentos dos nós, e por fim $\{U\}$, que é também uma matriz coluna, com todos os deslocamentos nodais da estrutura. É a partir disso, que as deformações nos elementos são obtidas, podendo-se estabelecer as forças internas ou tensões da estrutura analisada. (ALVES FILHO, 2007).

De uma maneira geral, pode-se representar um corpo tridimensional submetido as mais variadas cargas, como mostrado na Figura 10. Nessa figura, $\mathbf{Q}(x)$ representa uma força genérica, no ponto P, já $\mathbf{q}(x)$ representa uma força distribuída numa superfície S; para $\mathbf{p}(x)$, tem-se uma carga distribuída ao longo de uma linha L, e por fim $\mathbf{b}(x)$, que é uma carga que atua em um volume V (AZEVEDO, 2003). Quaisquer forças ou momentos são definidas a partir de coordenadas de um plano cartesiano.

Figura 10 - Generalidades na distribuição de cargas sobre um elemento tridimensional



Fonte: Azevedo (2003).

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), em uma simulação, é necessário que as condições de contorno do problema sejam analisadas com cuidado. Com uma abordagem de restrições não adequadas, é possível que os resultados da simulação gerem valores de tensões ou deformações diferentes ao que se esperaria na realidade. Dessa forma, recomenda-se o teste de diferentes abordagens em relação as restrições do modelo e, em casos mais complexos, analisar diferentes condições, estabelecendo limites de comportamento a partir delas.

2.5.2 Processamento

Durante o processamento são formadas as matrizes com as características dos elementos e, a partir delas, as equações da estrutura. Conseqüentemente, as soluções das equações de equilíbrio do sistema, e os resultados das tensões e deslocamentos da análise são geradas pelos *softwares* CAE, que são responsáveis por todo o processamento (HEARN, 1997).

Segundo Lee (2014), após ser definida a geometria, as propriedades do material, as condições de contorno do problema e a malha do componente de análise, são estabelecidas as condições de equilíbrio, como foi mostrado anteriormente na Equação (9). Em seguida, a matriz $[K]$ é construída de acordo com as propriedades e geometria do material, a matriz $\{F\}$ e $\{U\}$ são calculadas de acordo com os carregamentos e as condições de suporte da estrutura, sendo que para $\{U\}$ e $\{F\}$, o número total de incógnitas deve ser igual ao número total de graus de liberdade da estrutura. Com a solução da equação de equilíbrio, os deslocamentos nodais $\{U\}$ de cada elemento podem ser calculados. Em seguida, os campos de deslocamentos $\{c\}$ são calculados utilizando métodos de interpolação, conforme a Equação 10, na qual $[N]$ representa as funções de interpolação, chamadas de funções de forma.

$$\{c\} = [N].\{U\} \quad (10)$$

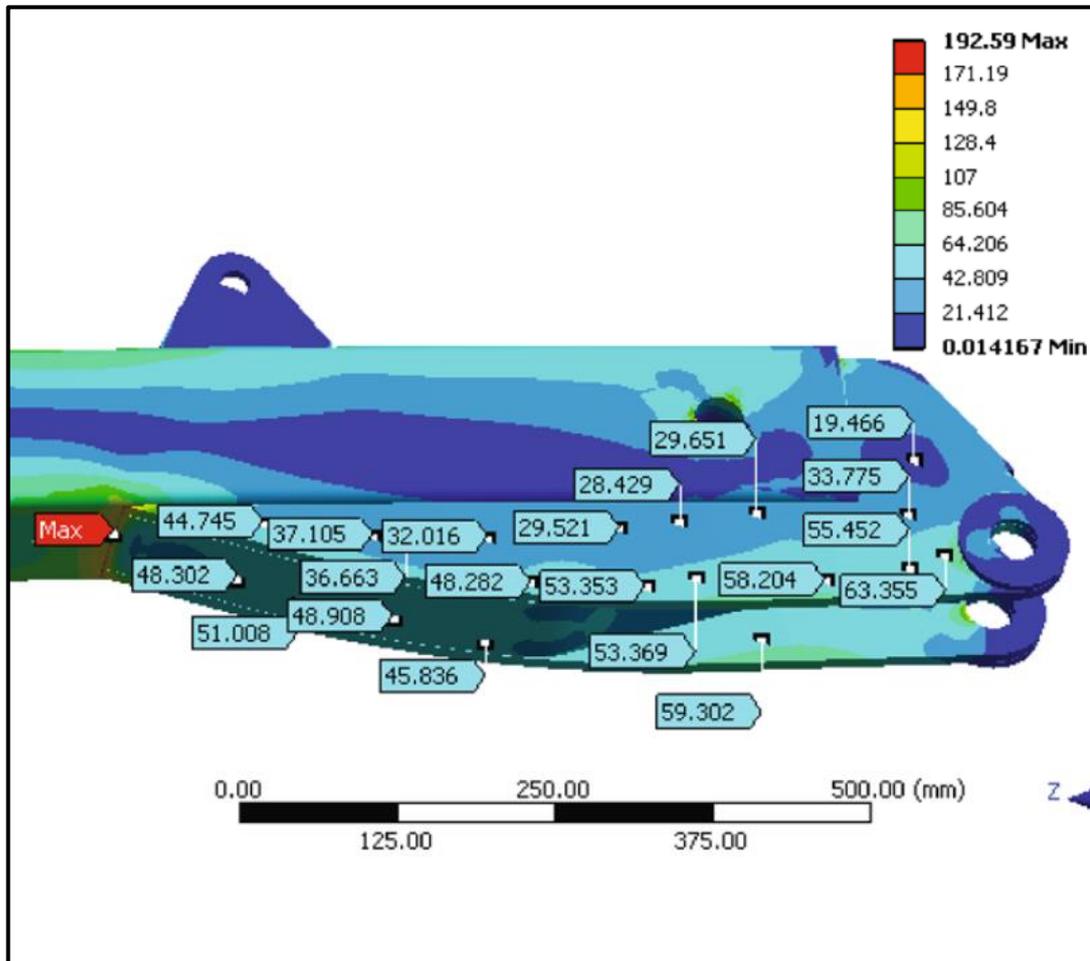
Por fim, os campos de deslocamento são calculados de acordo com as relações de tensões e deslocamento, e os campos de tensão de acordo com as relações tensão-deformação (Lei de Hooke) (LEE, 2014).

2.5.3 Pós-processamento

É nessa etapa em que o analista deve interpretar e validar os resultados de tensões e deformações provenientes do processamento. A Figura 11, exemplifica os resultados da

distribuição de tensões equivalentes de von Mises obtidas do *software*, ao longo do braço anterior de um guindaste.

Figura 11 - Distribuição de tensões ao longo do braço do guindaste.

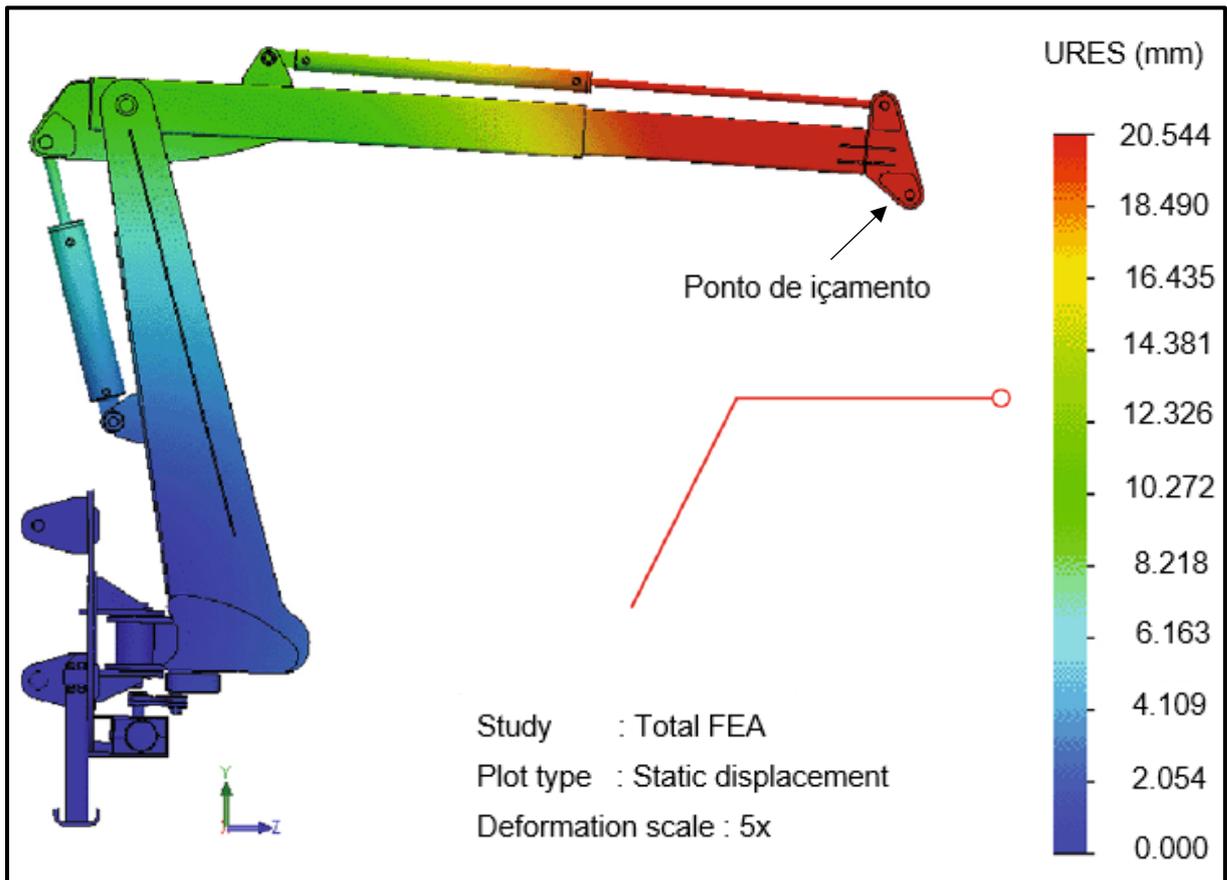


Fonte: Adaptado de Celik, Rennie e Akinci (2016).

Como mostrado na Figura 11, a tensão equivalente máxima foi de cerca 193 MPa, em um ponto onde o momento provocado pela força é máximo, não excedendo a tensão de falha do material, que para este caso é de 270 MPa (CELIK; RENNIE; AKINCI, 2016). Para os autores, embora exista um valor de tensão relativamente alto nesse ponto, as tensões nas demais regiões da estrutura se mostraram bem abaixo da tensão admissível do material. Portanto, um estudo de otimização da estrutural poderia ser realizado para esse componente, a fim de reduzir sua massa, respeitando as tensões máximas.

É também no pós-processamento que se podem obter os resultados de deslocamentos da estrutura, causados pelas condições de contorno do problema, de maneira similar ao mostrado na Figura 12. Nessa figura pode-se observar um deslocamento máximo de 20,544 mm no ponto de içamento da carga. Segundo Celik, Rennie e Akinci (2016), esse deslocamento é aceitável para o projeto, e não interfere na operação do guindaste.

Figura 12 - Deslocamentos da estrutura do guindaste



Fonte: Adaptado de Celik, Rennie e Akinci (2016).

De acordo com Hearn (1997), apesar dos resultados possuírem algumas casas decimais de precisão, o analista deve estar ciente de que esses resultados são aproximados, e que existem muitas fontes de possíveis erros que podem ocorrer. Devido a isso, os seguintes cuidados devem ser tomados:

- Se assegurar de que nenhuma mensagem de erro seja fornecida pelo *software*;
- Examinar visualmente a geometria deformada, para garantir que o modelo tenha se comportado de maneira esperada;
- Checar se as condições de equilíbrio foram satisfeitas;
- Checar a suavidade das linhas de tensão, pois irregularidades podem indicar uma malha inadequada;
- Checar se as direções das linhas de tensões estão em concordância com as condições de contorno.

Em suma, todos os resultados obtidos no pós-processamento devem ser analisados com prudência, cálculos manuais simplificados podem e devem ser usados para comparação. Além disso, quando possível, a análise deve ser repetida, com a finalidade de assegurar os resultados obtidos anteriormente (HEARN, 1997).

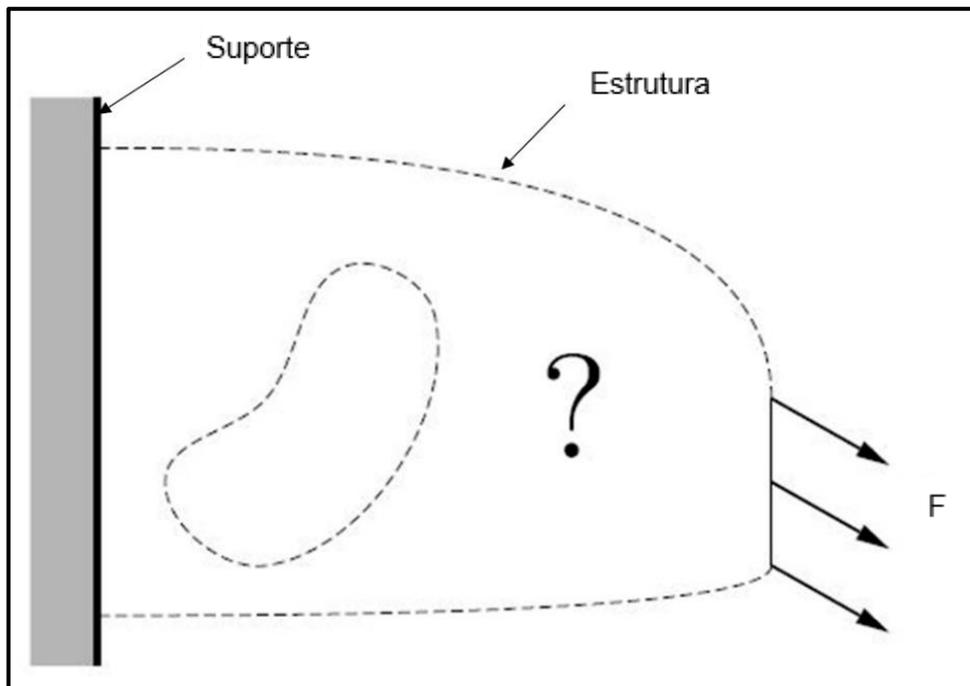
2.6 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

A eficiência no uso de materiais é muito importante em vários setores da indústria, como por exemplo na aeroespacial e automotiva, que se utilizam dos recursos provenientes da otimização, no projeto de estruturas e de componentes. O impacto da otimização estrutural no desempenho dessas estruturas é cada vez maior, e vem sendo crescentemente observado, principalmente na última década, sustentado pelos avanços na área de computação e no sucesso do método na distribuição de material, gerando estruturas otimizadas (BENDSOE; SIGMUND, 2003).

Para Christensen e Klarbring (2009), a ideia básica da otimização, na área da mecânica, consiste na melhor disposição possível de componentes dentro de uma montagem. Para os autores, existem duas ideias principais de otimização: a primeira pode ser a busca pela estrutura mais leve, e a segunda, pela busca da estrutura mais rígida. Em ambos os casos, é necessário que haja restrições, com valores de tensões e deslocamentos máximos, bem como uma geometria bem definida, com a finalidade de se obter as soluções ótimas.

De uma maneira geral, pode-se representar o problema de otimização estrutural conforme a Figura 13. Essa figura representa esquematicamente a busca da melhor configuração estrutural, que transmita o carregamento F até o suporte.

Figura 13 - Problema de Otimização Estrutural



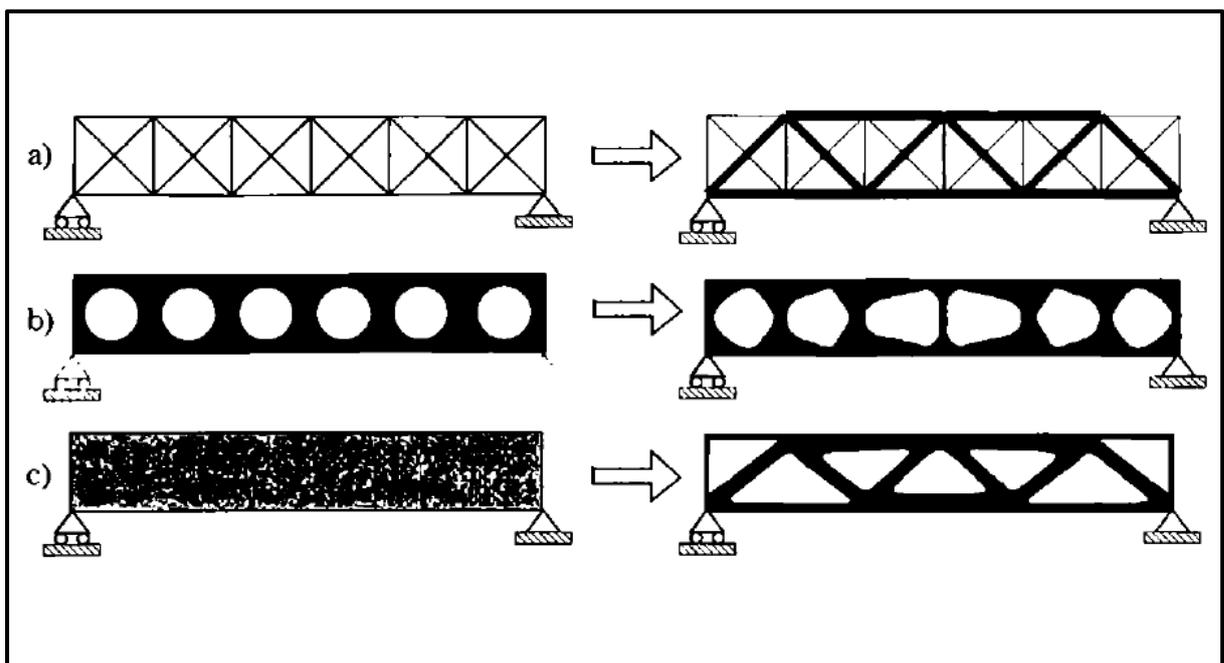
Fonte: Adaptado de Christensen e Klarbring (2009).

De acordo com Arora (2012), é um desafio para os engenheiros e projetistas desenvolverem um projeto que seja eficiente e economicamente viável ao mesmo tempo, sem comprometer sua integridade estrutural. Segundo o autor, praticamente qualquer projeto em que premissas ou parâmetros precisam ser pré-definidos, para atender restrições, podem ser concebidos como problemas otimizáveis, onde o desempenho obtido de análises anteriores é otimizado, no mesmo tempo em que os requerimentos do projeto são atendidos.

2.6.1 Métodos de otimização estrutural

Conforme Bendsoe e Sigmund (2003) descrevem, existem três diferentes ramos da otimização estrutural, como mostrado na a Figura 14. Nessa figura, pode-se observar em a) a otimização dimensional, em b) a otimização de forma e em c) a otimização topológica.

Figura 14 - Tipos de otimização estrutural

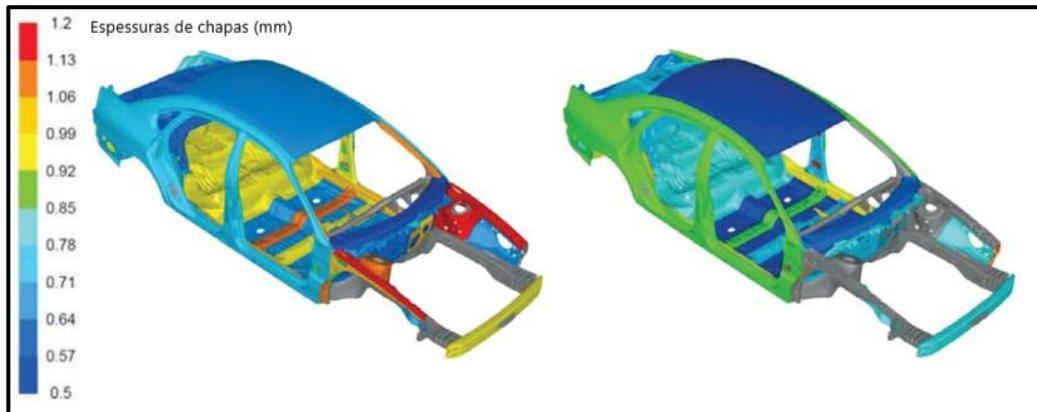


Fonte: Bendsoe e Sigmund (2003).

2.6.1.1 Otimização Dimensional

Para Christensen e Klarbring (2009), a otimização dimensional é formulada pela otimização da seção transversal de membros de uma treliça, ou pela distribuição de espessura ao longo de uma chapa, como pode ser observado na Figura 15, que mostra o resultado de uma otimização dimensional em uma estrutura de um carro, com as diferentes espessuras sendo representadas ao longo de toda a carroceria.

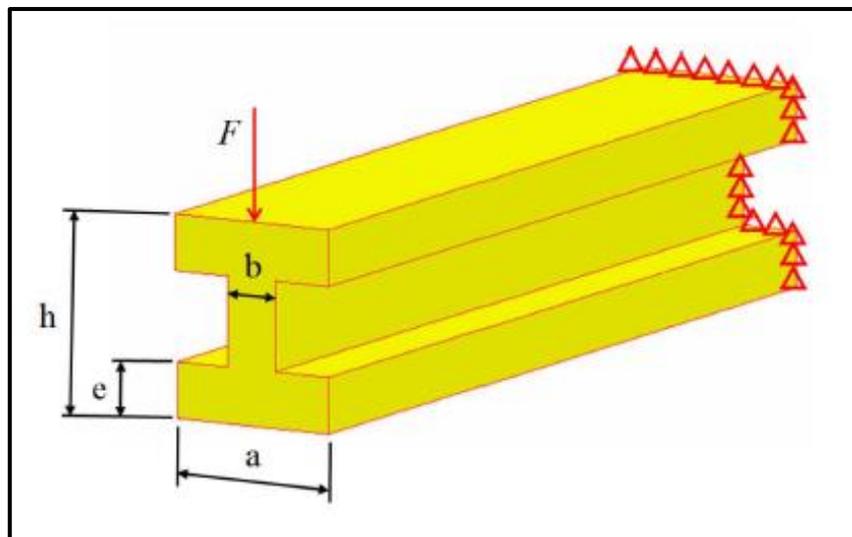
Figura 15 - Otimização dimensional em Chapas



Fonte: Adaptado de Fe-design (2014).

Segundo Perini (2008), outro exemplo seria a otimização de uma viga com perfil "I", que possui uma forma pré-definida, conforme a Figura 16, onde "a", "b", "h" e "e" representam as dimensões da seção, que podem ser alteradas por meio da otimização, com o objetivo de diminuir seu volume, levando em consideração uma força F e as restrições de deslocamentos.

Figura 16 - Otimização dimensional viga "I"



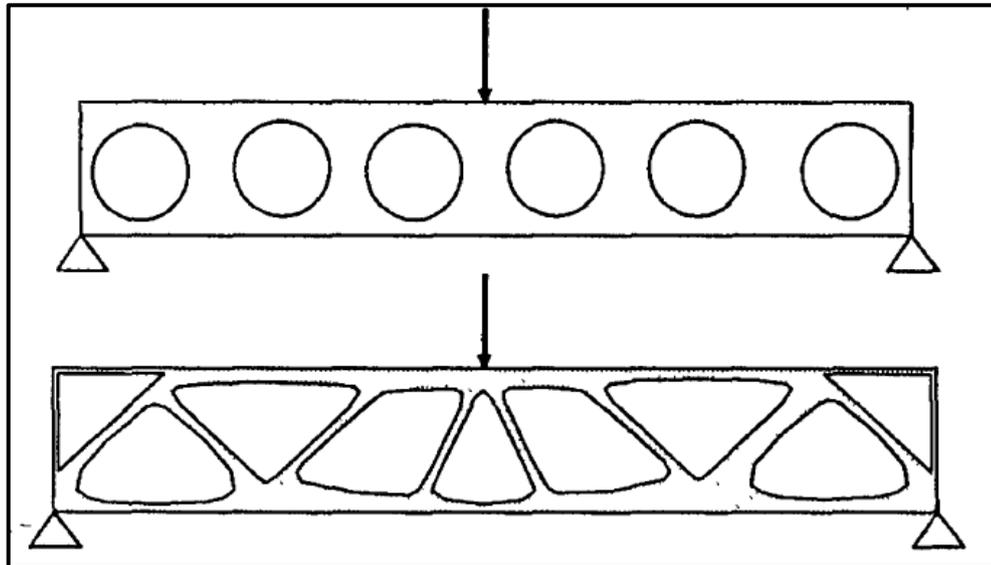
Fonte: Perini (2008).

2.6.1.2 Otimização de Forma

De acordo com Suzuki e Kikuchi (1991), a maioria dos problemas de otimização de forma, estão restritas ao caso em que a geometria do domínio inicial do projeto deve ser mantida. Em muitos casos, furos são introduzidos na estrutura para reduzir sua massa, sem violar as restrições de forma do componente. A Figura 17 mostra um exemplo de otimização

de forma aplicada a um projeto de viga para um avião de transporte civil, com sua geometria inicial e final, após a otimização (HAFTKA; GURDAL, 1992).

Figura 17 - Otimização de forma de uma viga



Fonte: Haftka e Gurdal (1992).

2.6.1.3 Otimização Topológica

A otimização topológica tem como principal objetivo a determinação do melhor arranjo possível de material, ao longo de uma estrutura mecânica. Para isso, as únicas variáveis conhecidas são as cargas aplicadas no sistema, as condições de suporte da estrutura, o volume do componente e algumas restrições, como a posição de alguns furos ou áreas sólidas (BENDSOE; SIGMUND, 2003). Para Almeida, Simonetti e Neves (2017), esse tipo de otimização se diferencia da otimização dimensional e de forma, principalmente pela variação do domínio inicial do projeto, ou seja, esse método pode alterar o leiaute da estrutura inicial. A Figura 18 mostra as características desse método, em um componente que foi otimizado.

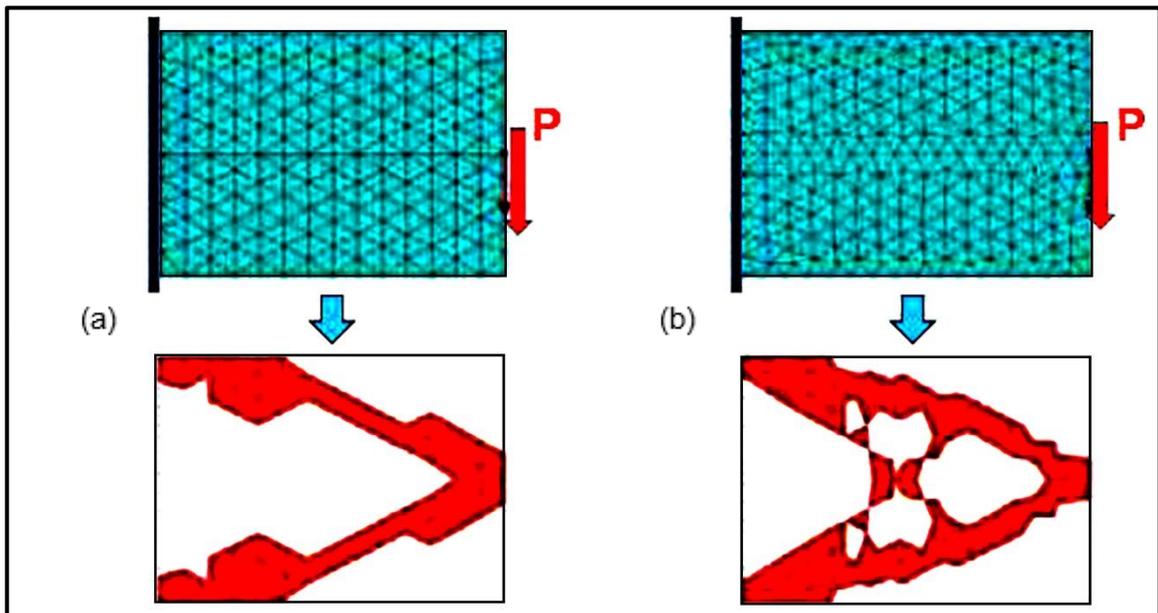
Figura 18 - Otimização topológica em um componente genérico



Fonte: Adaptado de Vetturazzi (2017).

De acordo com Coutinho (2006), quanto mais refinada for malha no processo de discretização, maior será a complexidade das geometrias obtidas, surgindo o problema da dependência da malha. Para o autor, isso resulta em soluções finais distintas, como observado na Figura 19, onde em (a) tem-se uma geometria mais simples, obtida de uma malha mais grosseira, já em (b), devido a uma malha mais refinada, pode-se observar uma solução diferente, mesmo se tratando do mesmo problema, onde P representa a carga que a estrutura foi submetida.

Figura 19 - Diferentes soluções para um mesmo domínio



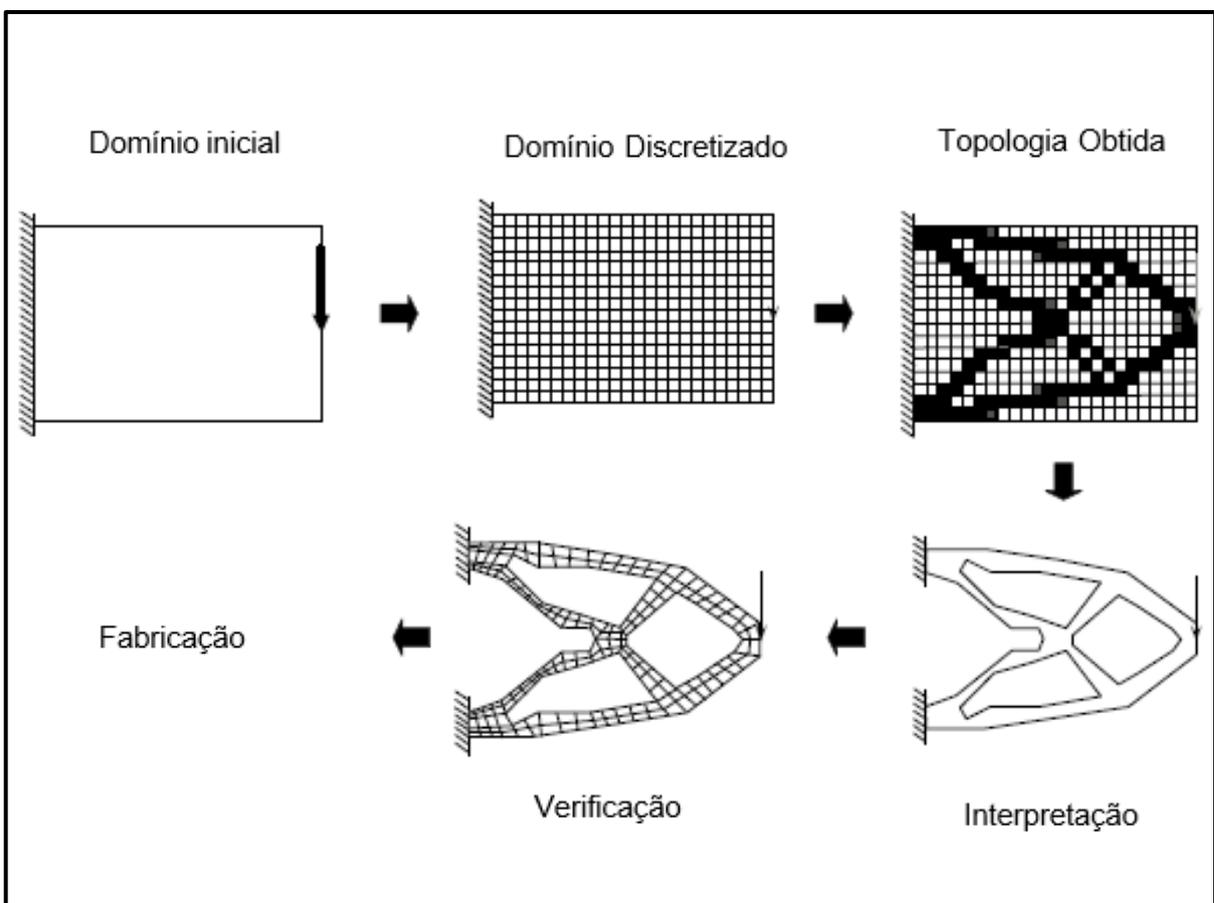
Fonte: Adaptado de Coutinho (2006).

Segundo Silva (2009), existe um método a ser seguido na otimização topológica. Esse método consiste em várias etapas, conforme mostrado de maneira esquemática na Figura 20, sendo elas:

- a) Definição do domínio inicial: Delimitar o domínio da estrutura, por intermédio das condições de contorno do problema, é neste domínio em que todos os pontos relacionados as restrições e cargas devem estar contidos;
- b) Discretização do domínio: Os elementos contidos no domínio inicial são discretizados em elementos finitos;
- c) Otimização da topologia: Após o domínio ser discretizado, os dados obtidos são entregues ao *software* que por meio de um processo iterativo, é responsável por distribuir o material de uma maneira que atenda os objetivos da otimização pré-definidos;

- d) Interpretação dos resultados e suavização: Nessa etapa, deve-se interpretar os resultados obtidos anteriormente. Para isso, a partir da topologia obtida, deve-se remodelar a estrutura;
- e) Análise e verificação: Após a remodelagem da estrutura, é interessante fazer uma análise de elementos finitos, para garantir que a mesma atenda aos requisitos como tensões e deslocamentos máximos;
- f) Fabricação: Consiste na etapa final, onde as estruturas são fabricadas com as mais variadas técnicas de fabricação.

Figura 20 - Procedimentos da otimização topológica



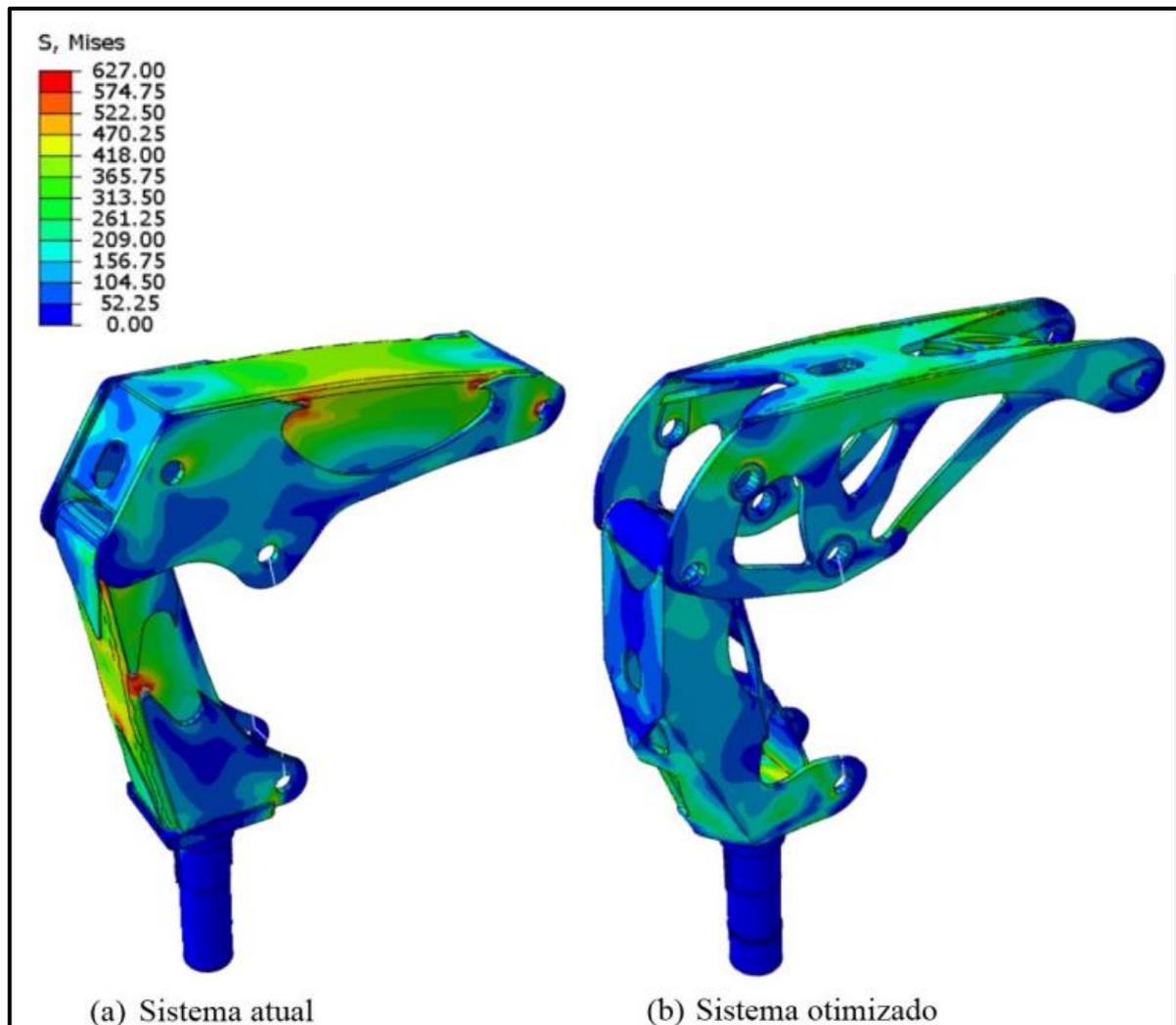
Fonte: Adaptado de Silva (2009).

2.6.2 Aplicações dos métodos de otimização estrutural em guindastes

Como mostrado no trabalho de Somacal (2018), os resultados da otimização topológica aplicados ao sistema de coluna e braço principal de um guindaste, cujo os objetivos eram obter uma configuração com menor massa e maior rigidez da estrutura, se mostraram satisfatórios, atendendo as normas correspondentes ao produto. De acordo com o autor, o sistema que antes possuía 667 kg, uma tensão máxima de 629 MPa e 25 mm de

deslocamento, passou a ter 637 kg, 370 MPa e 17 mm respectivamente. A Figura 21 demonstra em (a) o conjunto antes de ser otimizado, e em (b), a geometria otimizada já suavizada, expressando a distribuição da tensão média de von Mises em ambos os modelos.

Figura 21 - Resultados da otimização topológica aplicadas a coluna e braço principal

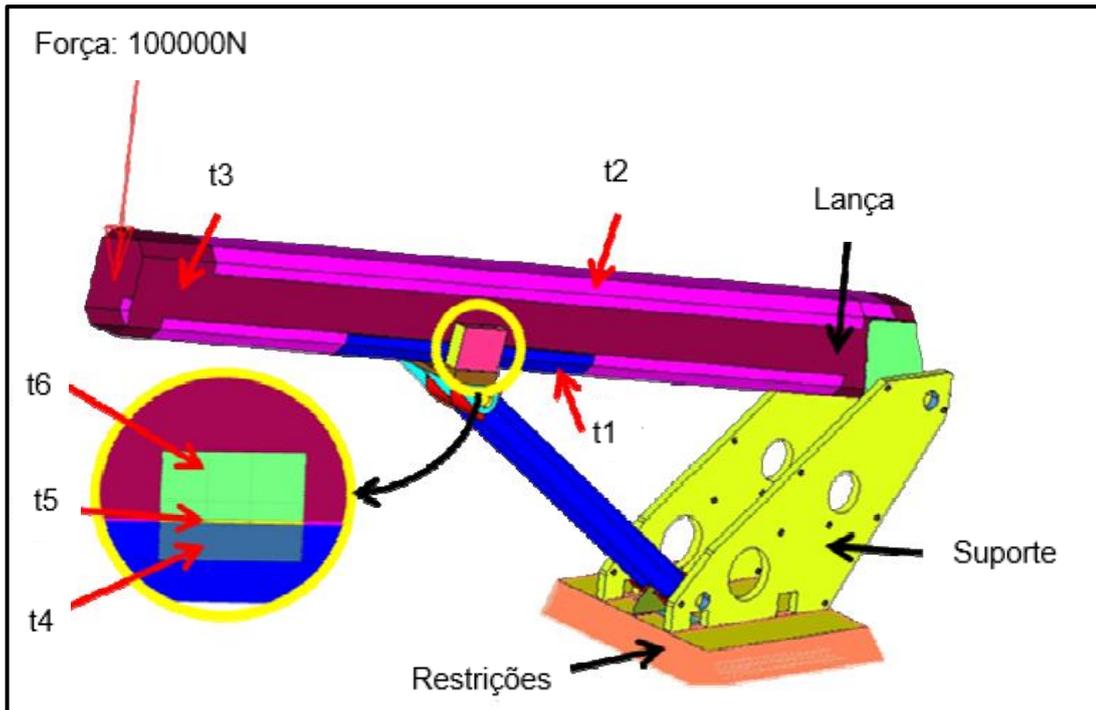


Fonte: Adaptado de Somacal (2018).

Outro trabalho que se utilizou dos métodos de otimização estrutural aplicados em guindastes foi o de Kim, Hong e Jang (2011), nesse trabalho, as técnicas de otimização de forma e topológica foram utilizadas. Para as lanças, a otimização de forma foi utilizada, onde a seção transversal da lança foi otimizada de maneira variável ao longo de seu comprimento, já para o suporte da lança, foi utilizado o método da otimização topológica. O objetivo inicial do trabalho era a minimização da massa do conjunto, objetivo esse que foi atingindo, com uma redução de 19% da massa nas lanças e 17% no suporte, sem prejudicar a rigidez do sistema (KIM; HONG; JANG, 2011).

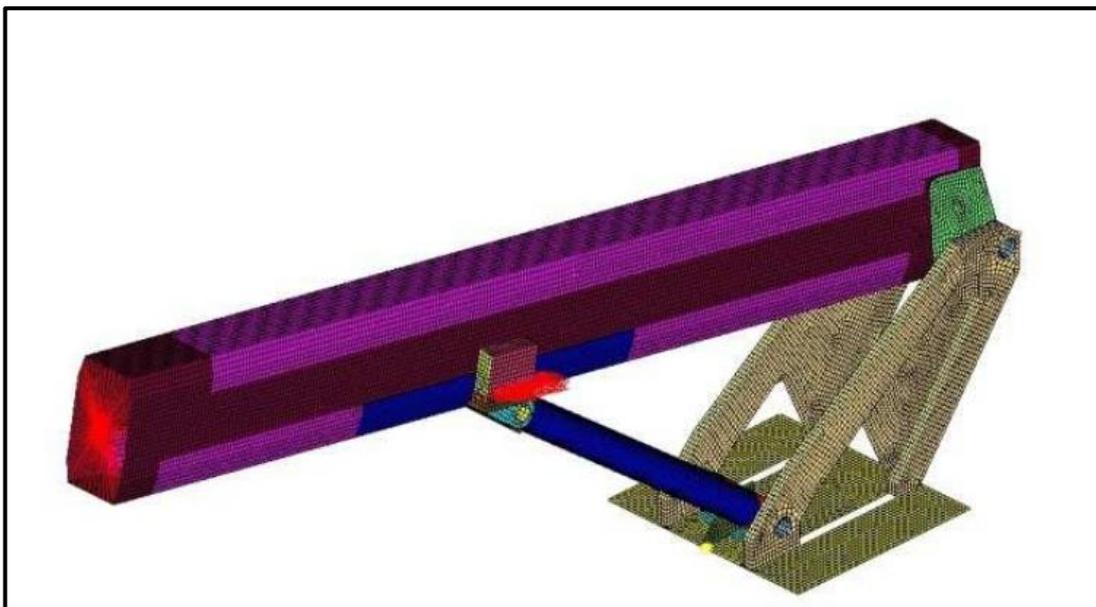
A Figura 22 mostra o conjunto original, onde foram aplicadas as condições de contorno do problema, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 e t_6 representas as diferentes espessuras ao longo da lança, ao passo que a Figura 23 mostra a geometria final, após ser realizados ambos os métodos de otimização estrutural no suporte e lança do conjunto. Nesse modelo as espessuras da lança foram reduzidas, bem como a massa do suporte.

Figura 22 - Conjunto suporte e lança original



Fonte: Adaptado de Kim, Hong e Jang (2011).

Figura 23 - Conjunto suporte e lança otimizados

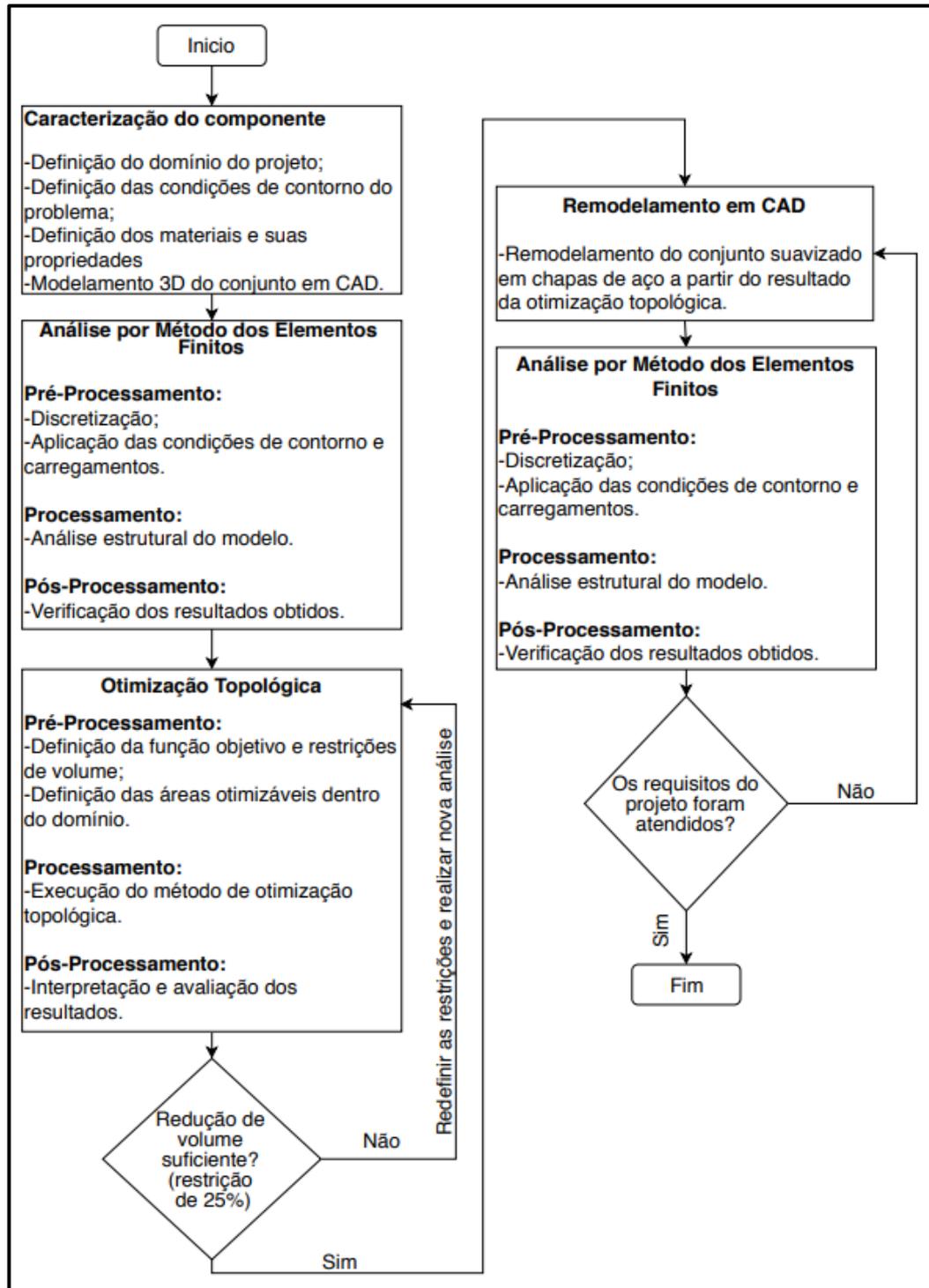


Fonte: Adaptado de Kim, Hong e Jang (2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia seguida, a fim de se obterem os resultados da otimização topológica do conjunto base do guindaste articulado. A Figura 24 ilustra o fluxograma das atividades realizadas.

Figura 24 - Fluxograma



Fonte: O autor (2019).

A primeira etapa consiste na definição do domínio inicial da base do guindaste, determinando-se os carregamentos atuantes sobre o sistema, as condições de contorno e as propriedades dos materiais utilizados. Também foi realizado o modelamento em CAD do conjunto, com o auxílio do *software* Inventor®, finalizando assim a caracterização do componente.

A segunda etapa resume-se na aplicação do Método dos Elementos Finitos, que foi realizada com o auxílio do *software* ANSYS®. No pré-processamento, a discretização dos componentes foi efetuada, e as condições de contorno foram aplicadas na estrutura, definindo-se as restrições de movimento e a disposição dos carregamentos ao longo do conjunto. Após o processamento, os resultados foram verificados antes da continuidade do estudo.

Posteriormente à segunda etapa, foi realizado o processo iterativo de otimização topológica, também auxiliado pelo *software* ANSYS®. Nesse estágio, a função objetivo foi definida, assim como as regiões em que a otimização ocorreu, restringindo a estrutura.

Tendo a estrutura otimizada do estágio anterior como base, uma reestruturação da base do guindaste articulado foi realizada, a fim de suavizar os resultados da otimização em chapas de metal, com a redistribuição da massa. A nova estrutura foi remodelada de tal maneira que atenda requisitos de processos de fabricação, a fim de torná-la manufaturável.

Por fim, a estrutura vigente foi submetida a uma nova análise pelo Método de Elementos Finitos, que ocorreu da mesma forma que a apresentada na segunda etapa, com a verificação dos resultados. A partir dessa análise, foi realizada a validação dos resultados, verificando se os objetivos foram atingidos, comparando-se a nova estrutura com a original. Também foram verificadas as condições normativas e critérios de tensões admissíveis dos materiais, para ter certeza de que esses parâmetros foram cumpridos, de acordo com a norma NBR 14768.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO COMPONENTE

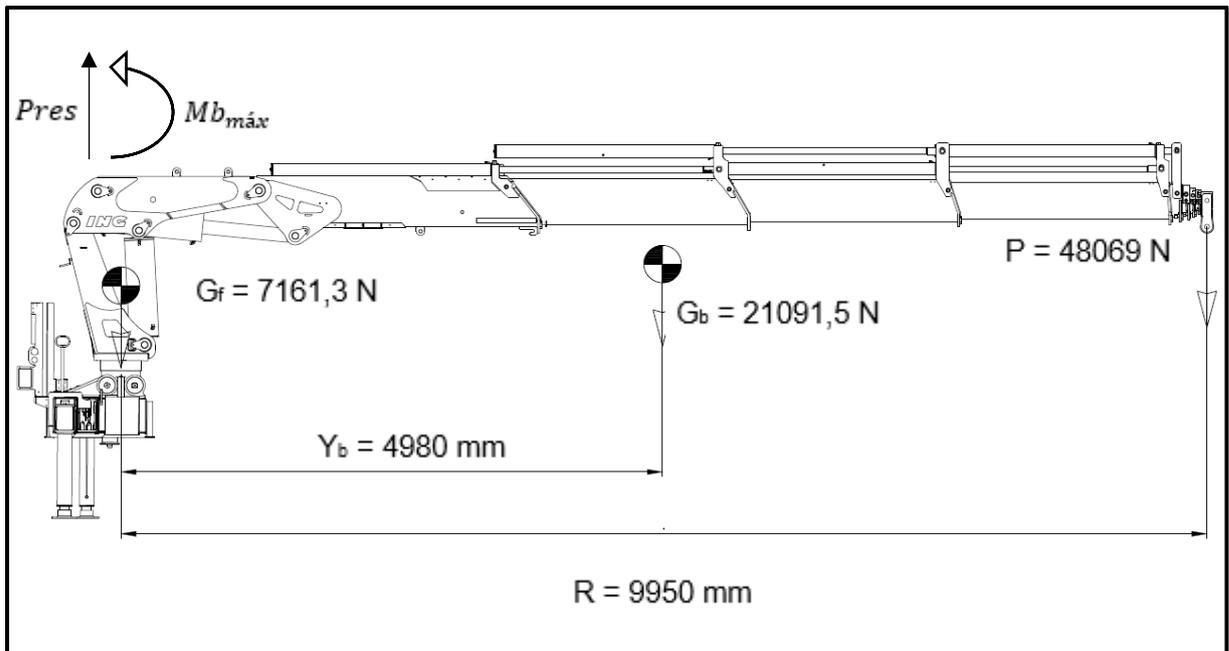
O conjunto base do guindaste articulado é formado por chapas metálicas, essas chapas são cortadas em máquinas laser de alta precisão e dobradas com dobradeiras CNC. Em seguida, elas são unidas por um processo de soldagem manual, onde gabaritos são utilizados para facilitar sua montagem.

O único componente da base que atualmente não é fabricado por chapas, é o mancal, o qual consiste de uma peça fabricada com aço SAE 1025 pelo processo de fundição. O mancal é responsável pela sustentação da coluna, por onde o eixo do guindaste é inserido, e também por comportar o sistema de giro do equipamento.

Todos os componentes da base, com exceção do mancal, são fabricados com chapas de metal de alta resistência EN 10149-2 S700MC, que possuem uma tensão de escoamento mínima de 700 MPa, resistência mínima a tração de 750 MPa e alongamento 12%, para todas as espessuras utilizadas no conjunto. A tensão admissível para o projeto foi calculada de acordo com o estipulado pela norma NBR 14768 Anexo B, utilizando a Equação (4), onde se obteve um valor 600 MPa para o limite de escoamento presumido.

Em conformidade com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 14768:2015, a pior condição de carregamento foi atribuída ao equipamento, com o objetivo de se obter o maior valor de momento bruto máximo ($Mb_{m\acute{a}x}$) que atua sobre a coluna. A Figura 25 ilustra a situação de carregamento mais crítica para o modelo de guindaste ING 50.500, utilizado como base para a realização desse trabalho.

Figura 25 - Cargas no guindaste ING 50.500.



Fonte: O autor (2019).

O momento bruto máximo ($Mb_{m\acute{a}x}$) do guindaste é obtido quando a carga máxima da terceira lança hidráulica desse modelo de equipamento é içada em posição perpendicular ao eixo. O valor desse momento, leva em consideração as cargas provenientes do peso próprio do equipamento e aos seus centroides, conforme já descrito na Figura 5 da seção 2.4.

A Equação 11 permite o cálculo do valor de $Mb_{m\acute{a}x}$,

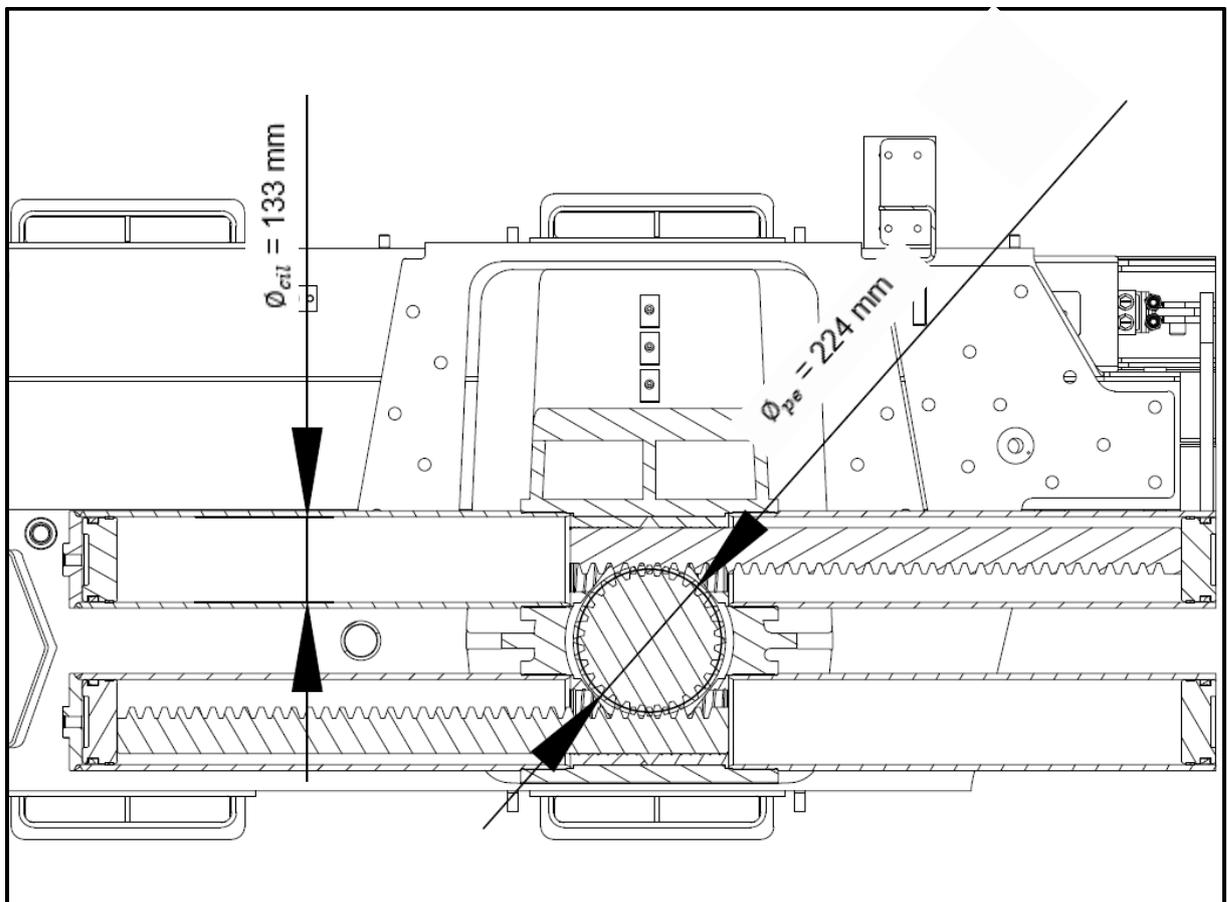
$$Mb_{m\acute{a}x} = (P \cdot R) + (G_b \cdot Y_b) \quad (11)$$

enquanto a Equação 12, permite calcular a reação total na base causado pela carga e peso total do equipamento ($Pres$).

$$Pres = P + G_b + G_f \quad (12)$$

O sistema de giro do guindaste é responsável por girar a coluna em torno do próprio eixo. O momento causado na base por esse movimento pode ser equacionado com o auxílio da Figura 26, que mostra uma vista superior em corte desse sistema.

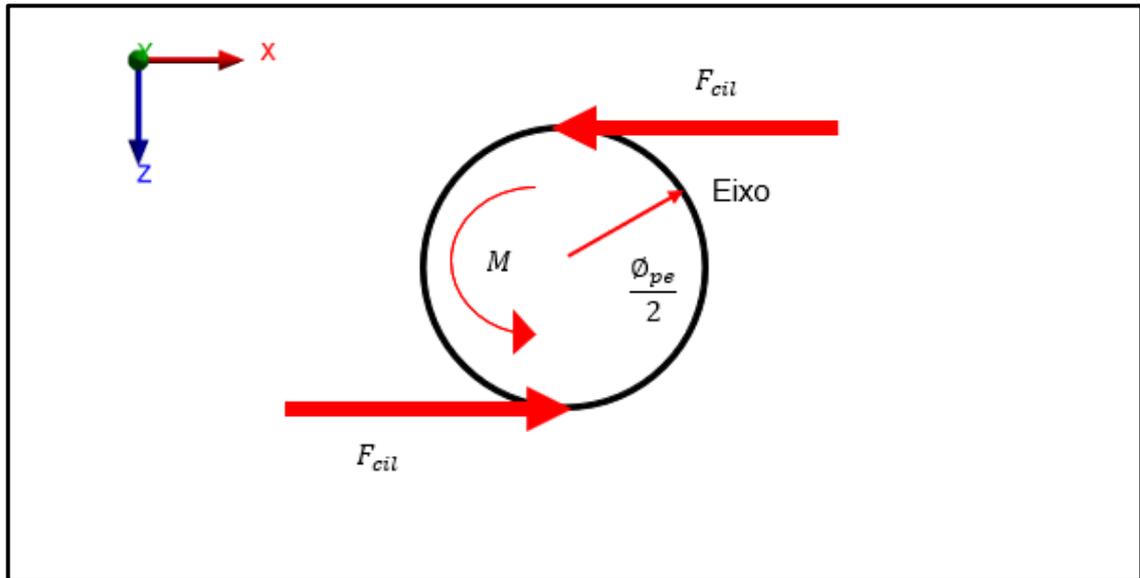
Figura 26 - Sistema de giro



Fonte: O autor (2019).

A Figura 27 demonstra esse mesmo sistema através de um diagrama de corpo livre. Pode-se observar que nesse conjunto, duas forças atuam perpendicularmente em sentidos opostos ao longo do eixo x. Tais forças são geradas por dois cilindros hidráulicos (F_{cil}), que fazem o eixo do guindaste girar por um sistema de pinhão e cremalheira, resultando no momento de giro bruto do guindaste (M).

Figura 27 - Diagrama de corpo livre do sistema de giro



Fonte: O autor (2019).

O momento de giro bruto (M), causado pelo sistema de giro pode ser calculado multiplicando-se a força exercida pela haste do cilindro (F_{cil}) pelo diâmetro primitivo do eixo da coluna (ϕ_{pe}), como demonstrado na Equação 13.

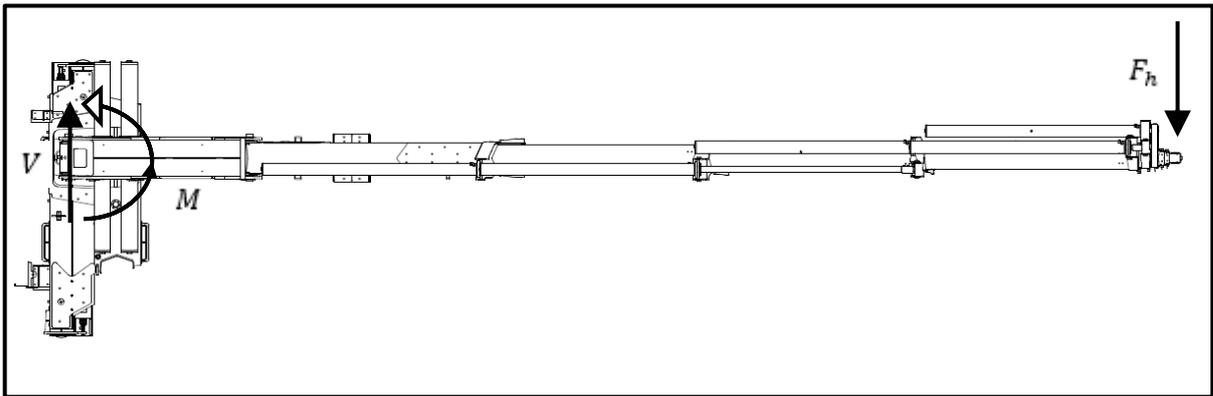
$$M = 2F_{cil} \cdot \frac{\phi_{pe}}{2} = F_{cil} \cdot \phi_{pe} \quad (13)$$

A força exercida pela haste do cilindro do sistema de giro (F_{cil}), pode ser calculada por meio da Equação 14. Nessa equação, P_{tc} remete à pressão de trabalho do cilindro, que para esse sistema é de 20 MPa, já ϕ_{cil} refere-se ao diâmetro interno da camisa do cilindro de giro, correspondendo a 133 mm.

$$F_{cil} = P_{tc} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{cil}^2}{4} \quad (14)$$

O momento exercido pelo sistema de giro, ocasiona uma força horizontal F_h , conforme representado pela Figura 28. Essa força horizontal acaba resultando em uma força cortante (V) no conjunto base do guindaste. Ela pode ser calculada utilizando-se a Equação 2, sendo resultado de uma das forças dinâmicas.

Figura 28 - Força horizontal, vista superior do guindaste



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 5 mostra os valores obtidos das Equações 2, 11, 12, 13 e 14, representando as características obtidas para o modelo de guindaste analisado.

Tabela 5 - Dados calculados da base

$Mb_{máx}$	$Pres$	M	F_{cil}	F_h e V
583,32 kNm	76,32 kN	62,24 kNm	277,86 kN	6,25 kN

Fonte: O autor (2019).

Além da força horizontal (F_h), outros fatores dinâmicos devem ser considerados nos cálculos (conforme apresentado na seção 2.4.1). Na maior parte dos casos, a operação de içamento de cargas se dá pelo uso do gancho, portanto, para esse trabalho, o fator normativo ϕ_1 utilizado foi de 1,1 e para fator ϕ_{5h} , o valor adotado foi de 1,05.

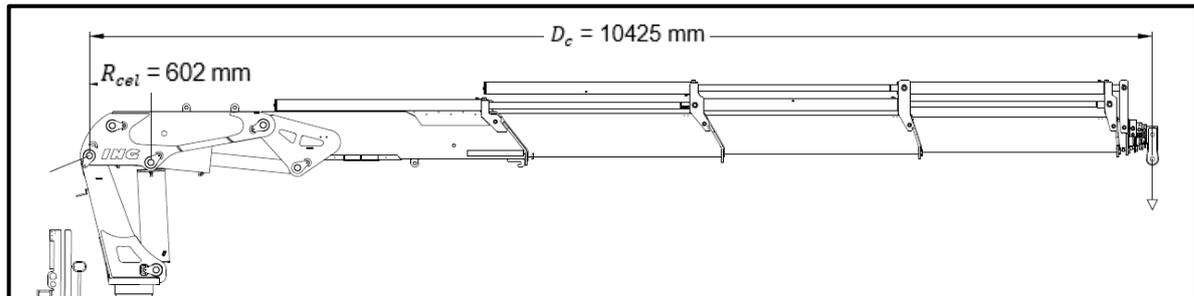
Já o valor do fator dinâmico ϕ_2 , pode ser obtido pela Equação 1. A fim de simplificar o problema, foi considerado que o guindaste será montado sobre uma base fixa, desse modo, $\phi_{2\min}$ e β_2 assumem os valores de 1,1 e 0,34 respectivamente, conforme a Tabela 1. O valor da velocidade de içamento (v_h), considerando que sua velocidade seja crescente, pode ser calculado com o auxílio da Equação 15.

$$v_h = \frac{4 \cdot Q_{sh}}{\phi_{cel}^2 \cdot \pi} \cdot \frac{D_c}{R_{cel}} \cdot 0,5 \quad (15)$$

Nessa Equação, Q_{sh} representa a vazão do sistema hidráulico do guindaste, ϕ_{cel} se refere ao diâmetro interno do cilindro de elevação, D_c é a distância entre o pino de articulação de giro do guindaste até a carga P, R_{cel} se trata do raio entre o pino de articulação e o mancal do cilindro de elevação do equipamento e por fim, o termo multiplicador 0,5, que é considerado

devido a velocidade crescente de içamento, relacionada ao acionamento do sistema hidráulico do guindaste. A Figura 29 mostra as variáveis D_c e R_{cel} utilizadas no cálculo de v_h .

Figura 29 - Distâncias relacionadas ao pino de articulação



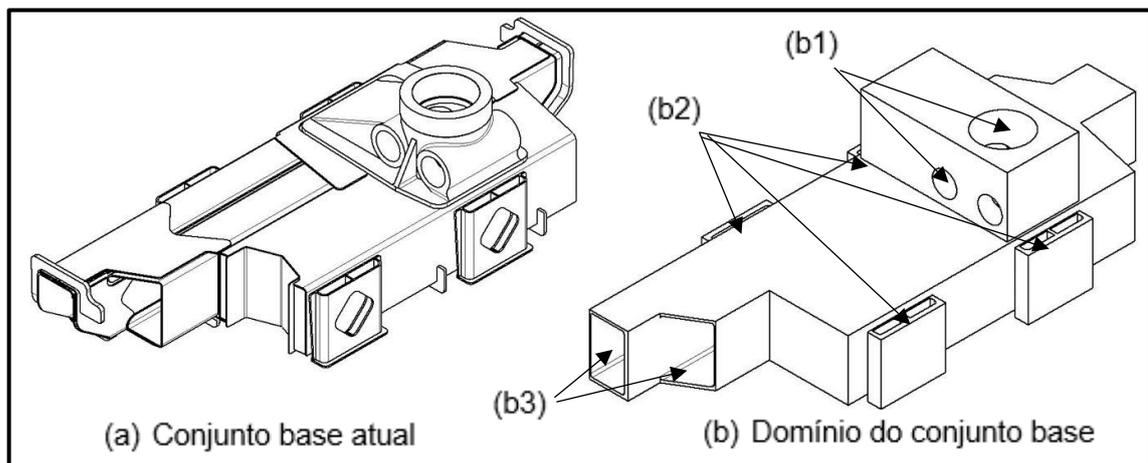
Fonte: O autor (2019).

O valor de \emptyset_{cel} é de 120,4 mm e a vazão do sistema hidráulico do equipamento é de 60 l/min. Portanto, aplicando esses valores na Equação 15, obtém-se a velocidade v_h , que equivale a 0,76 m/s, e com esse valor, pode-se utilizar a Equação 1 e obter o valor de ϕ_2 , que é de 1,35.

Após as definições dos dados iniciais, o domínio do conjunto base do guindaste foi modelado. Esse domínio tem a finalidade de simplificar a estrutura, para a posterior análise topológica, onde apenas as características mais importantes, em relação ao modelo atual, foram mantidas.

A Figura 30 faz uma comparação entre o conjunto base atual (a) e o domínio do conjunto base (b), com as indicações das principais regiões mantidas. Na figura observam-se os diâmetros e posições dos furos no mancal (b1), as posições dos suportes por onde a base é fixada (b2) e o tamanho interno dos túneis (b3), que alojam o sistema de estabilização da base.

Figura 30 - Conjunto base do guindaste



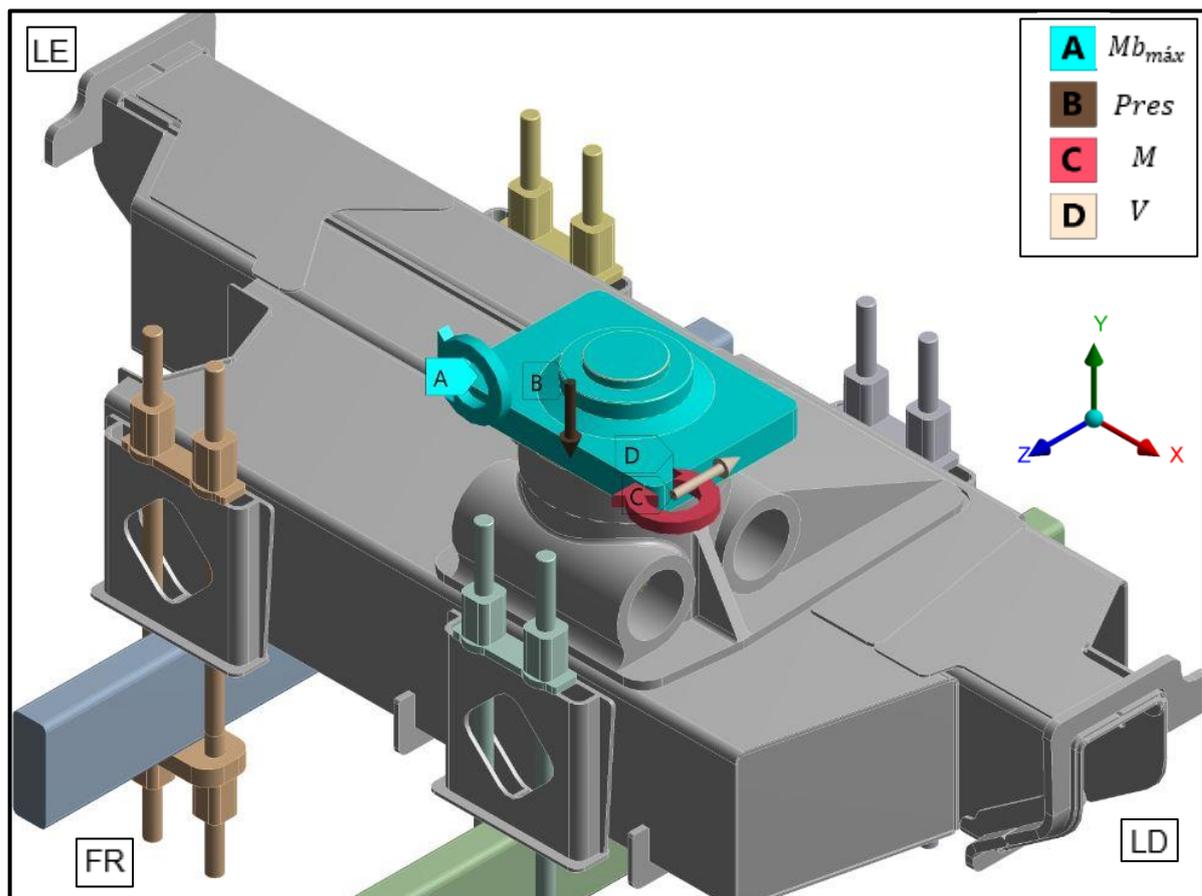
Fonte: O autor (2019).

3.2 ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O conjunto atual da base do guindaste, representado pela Figura 29a, foi submetido a uma sequência de três análises pelo Método dos Elementos Finitos, sendo que cada uma delas foi responsável por simular diferentes posições de içamento de carga. As cargas foram distribuídas sobre o eixo da coluna e no mancal da base.

Conforme mostrado na Figura 31, o valor de momento $Mb_{m\acute{a}x}$ foi inserido no eixo +Z, e o momento de giro M foi disposto no eixo -Y, simulando um içamento de carga pelo lado esquerdo da base (LE) e uma rotação da coluna do lado direito para o esquerdo, simulando assim o primeiro carregamento. A carga $Pres$ atua em -Y, e o valor da força cortante V no eixo negativo de -Z, completando assim a primeira distribuição de carga. Ainda na Figura, LD representa o lado direito da base, e FR a região frontal.

Figura 31 - Primeira distribuição de cargas



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 6 retrata os diferentes carregamentos aplicados sobre a estrutura, todos realizados de forma similar aos apresentados na Figura 31. Nessa Tabela, o Carregamento 1 simula um içamento de carga pelo lado esquerdo, conforme descrito anteriormente. Já o

Carregamento 2, representa a distribuição de cargas a fim de simular um içamento pelo lado direito (LD), e por fim, o Carregamento 3, representando a posição frontal (FR).

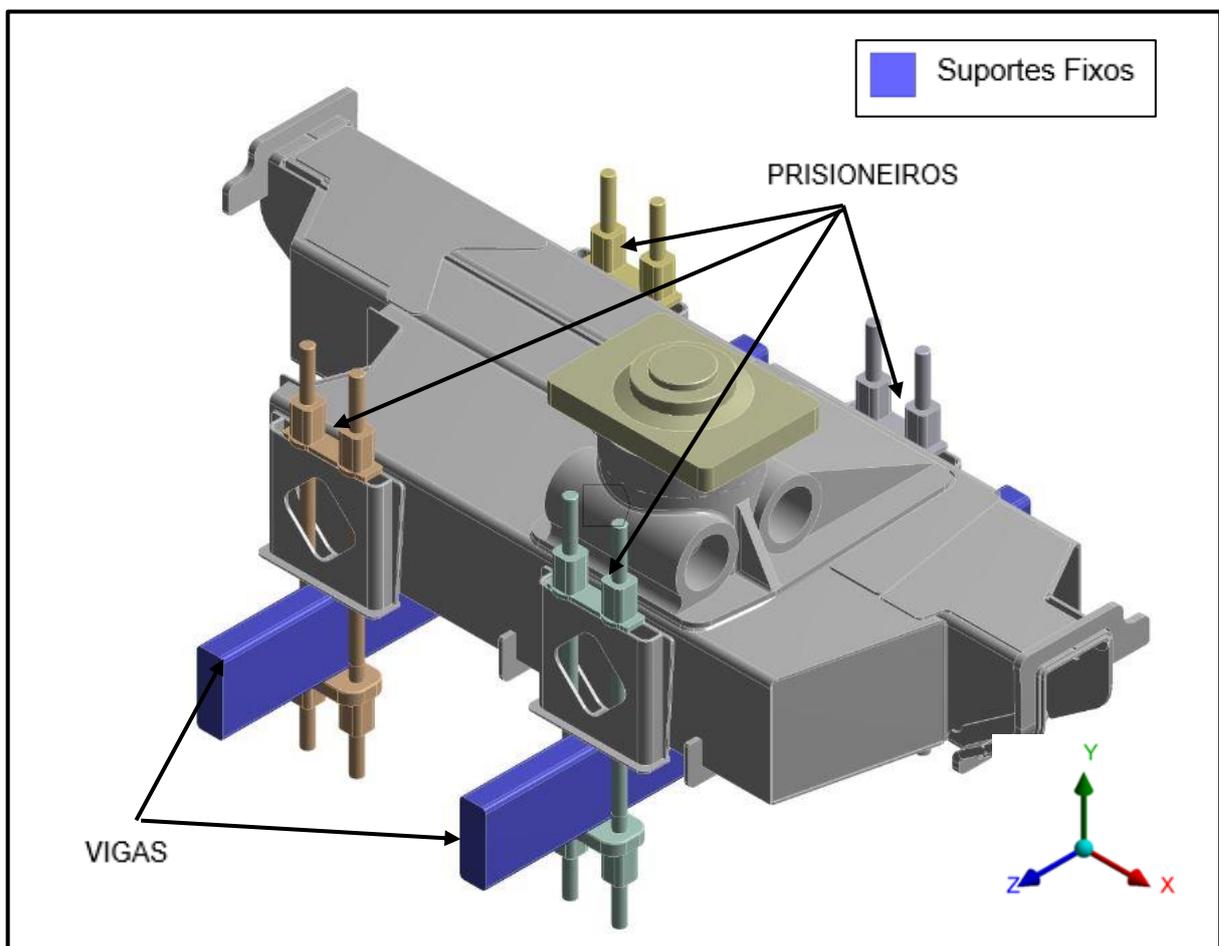
Tabela 6 - Carregamentos aplicados na base do guindaste

Carregamento	$Mb_{máx}$	$Pres$	M	V
1	+Z	-Y	-Y	-Z
2	-Z	-Y	+Y	+Z
3	+X	-Y	+Y	+X

Fonte: O autor (2019).

As restrições de movimento da base foram aplicadas por intermédio dos componentes de fixação, restringindo o movimento das vigas, por onde a base é sustentada e fixada pelos prisioneiros. Esses itens não fazem parte da análise de tensões e deslocamentos, portanto não serão otimizados. A Figura 32 ilustra esses componentes, com os movimentos das vigas restringidos nos três eixos.

Figura 32 - Suportes fixos da base



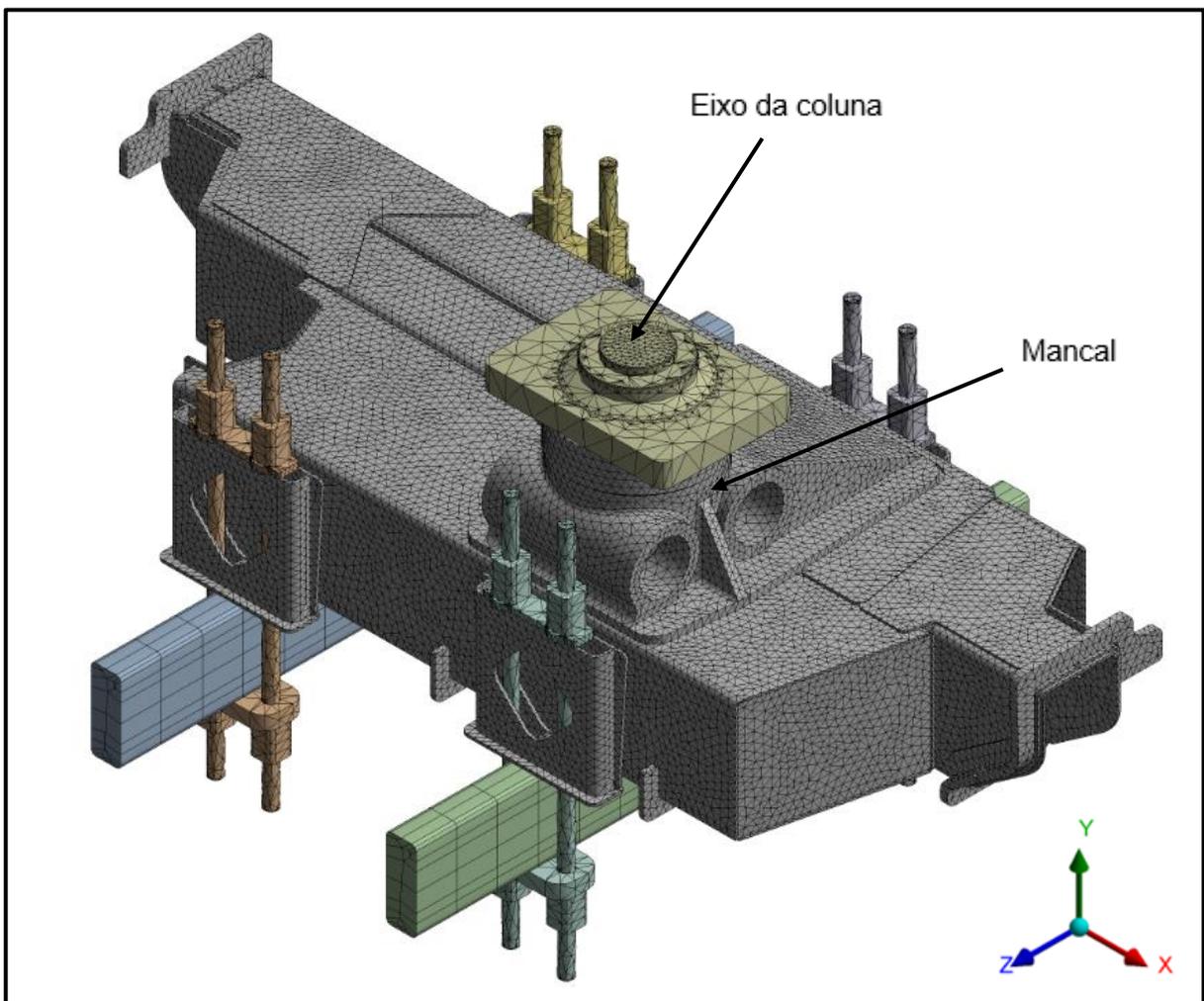
Fonte: O autor (2019).

As vigas possuem uma largura externa de 880 mm, valor esse baseado no suporte fixo da bancada de testes da empresa. Além disso, caminhões que possuem um PBT (peso bruto total) homologado de 23000 kg, que são os veículos indicados para o uso desse equipamento, em geral, possuem em média essa largura de chassi.

A Figura 33 apresenta o resultado da discretização dos componentes da base. A malha foi otimizada em toda a região da base, os componentes de fixação, como os prisioneiros e as vigas de sustentação, possuem uma malha mais grosseira, por não serem objetivos da análise. O tipo de elemento utilizado para discretizar a base foi o tetraedro de 10 nós (TET 10).

Além dos componentes de fixação, o eixo da coluna do guindaste também possui uma malha mais grosseira, já que ele será tratado como um objeto não deformável. Seu papel foi transmitir as reações sofridas devidos aos carregamentos, para o mancal e o restante da base.

Figura 33 - Discretização dos componentes na base

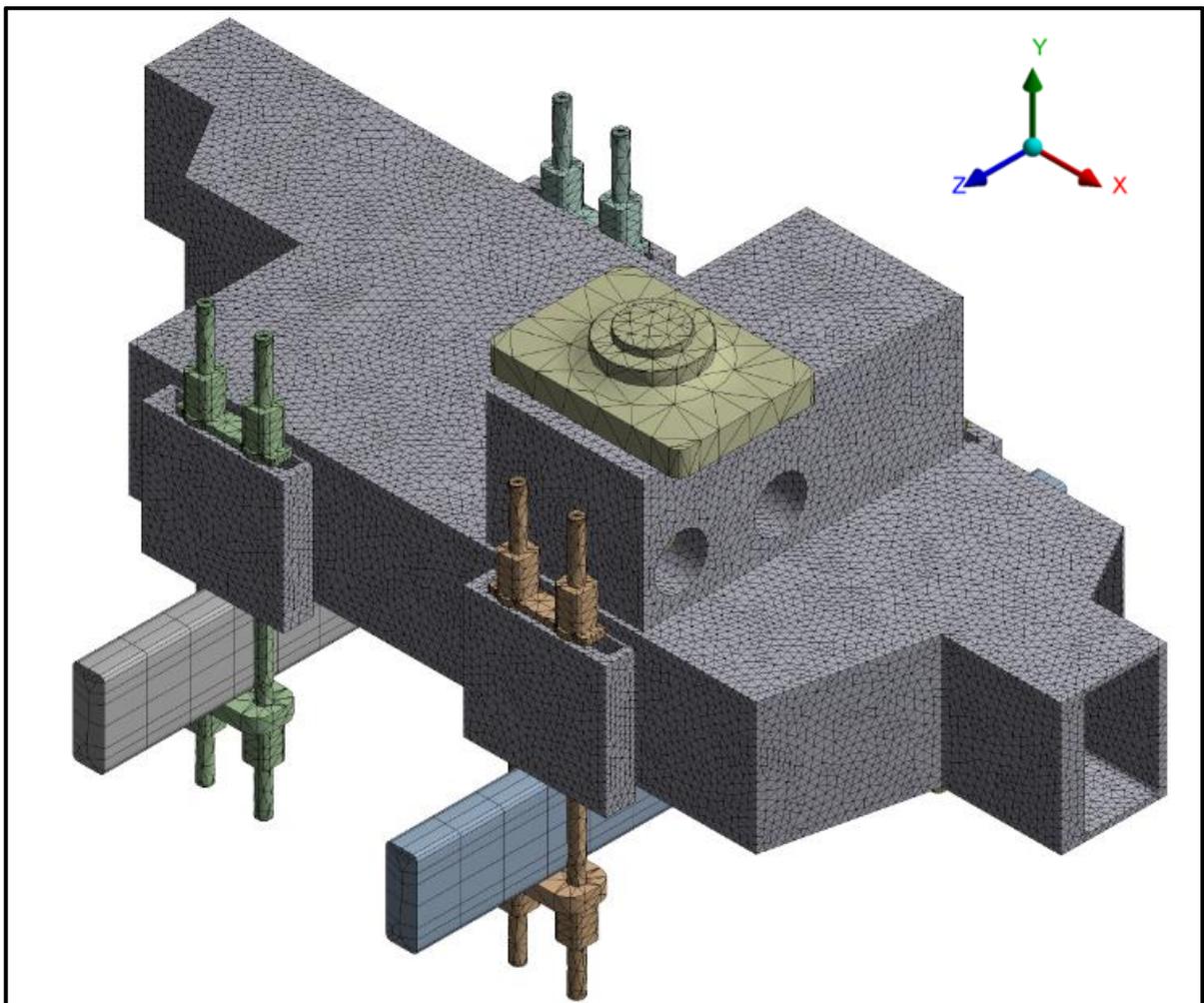


Fonte: O autor (2019).

3.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DO CONJUNTO BASE

Com o objetivo de obter uma menor massa para o conjunto base do guindaste, e também uma melhor distribuição de material ao longo da estrutura, o domínio inicial do conjunto foi submetido a otimização topológica. A Figura 34 mostra o conjunto discretizado em elementos de malha, sendo essa a primeira etapa do pré processamento da otimização.

Figura 34 - Discretização da malha no domínio da base

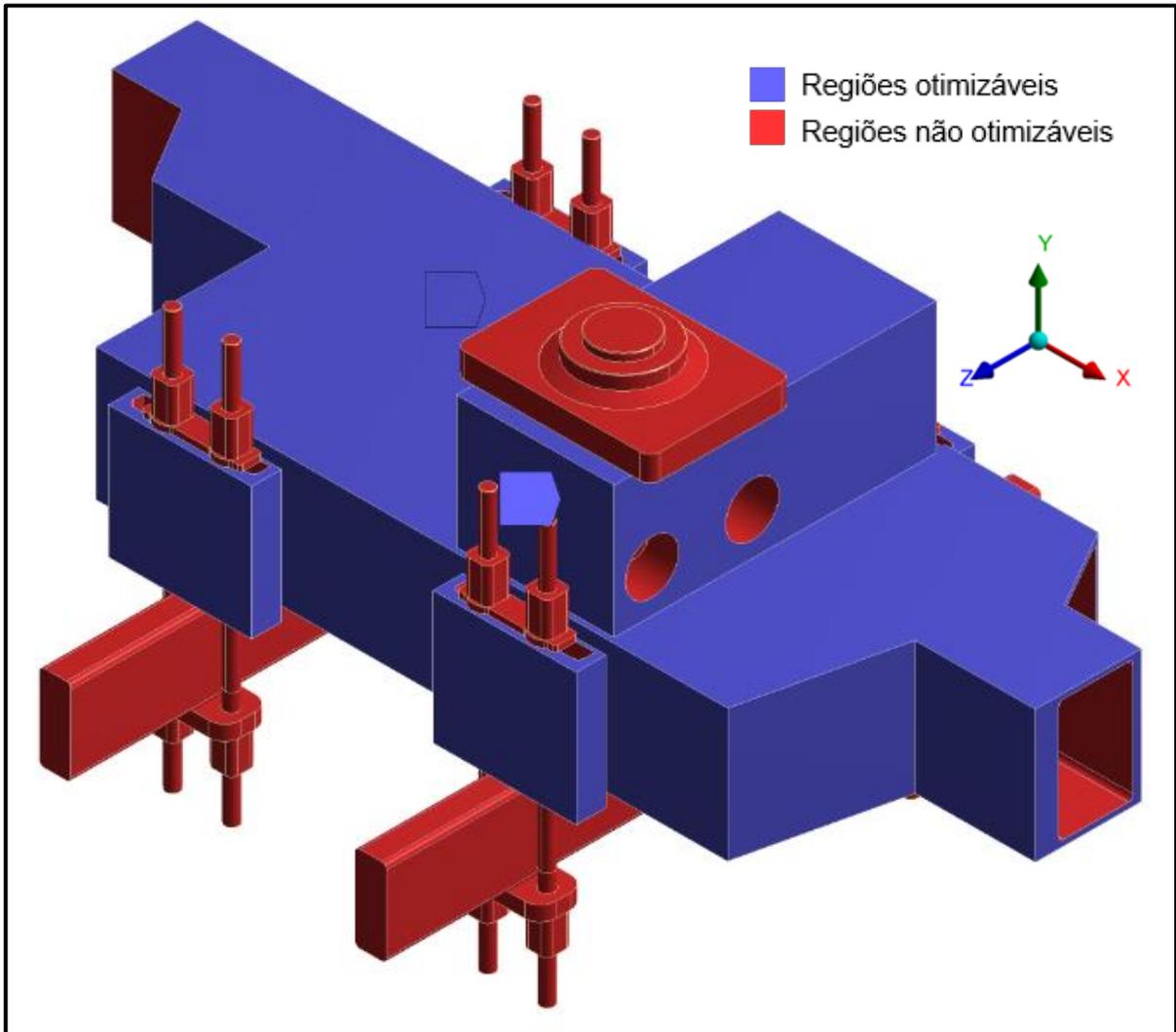


Fonte: O autor (2019).

Essa discretização ocorreu de maneira parecida com a realizada na base original, onde observa-se um refinamento da malha ao longo da base, exceto nos pontos de fixação do conjunto e no eixo da coluna. Para os carregamentos, as mesmas condições foram impostas a estrutura, de acordo com a Tabela 6.

As regiões que não sofreram alterações durante a otimização, de acordo com a Figura 30 (b), podem ser observadas agora nos componentes destacados da Figura 35.

Figura 35 - Regiões otimizáveis do domínio



Fonte: O autor (2019).

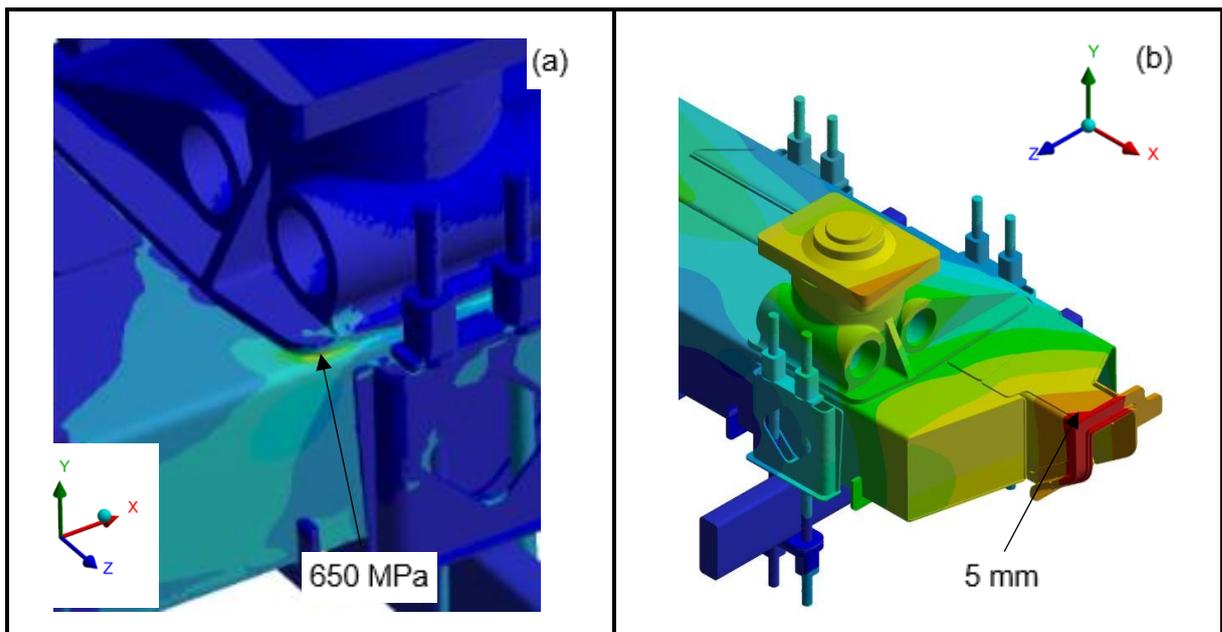
4 RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados obtidos pelas análises realizadas no capítulo anterior, são expostos e comparados, com o objetivo de verificar se a nova estrutura está de acordo com o objetivo proposto.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO ORIGINAL

O modelo original foi submetido a três carregamentos, descritos pela Tabela 6. Cada um desses carregamentos corresponde a uma combinação de carga, simulando diferentes posições de içamento de carga. A Figura 36 ilustra os resultados obtidos na estrutura, correspondendo ao carregamento 1.

Figura 36 - Resultados Carregamento 1

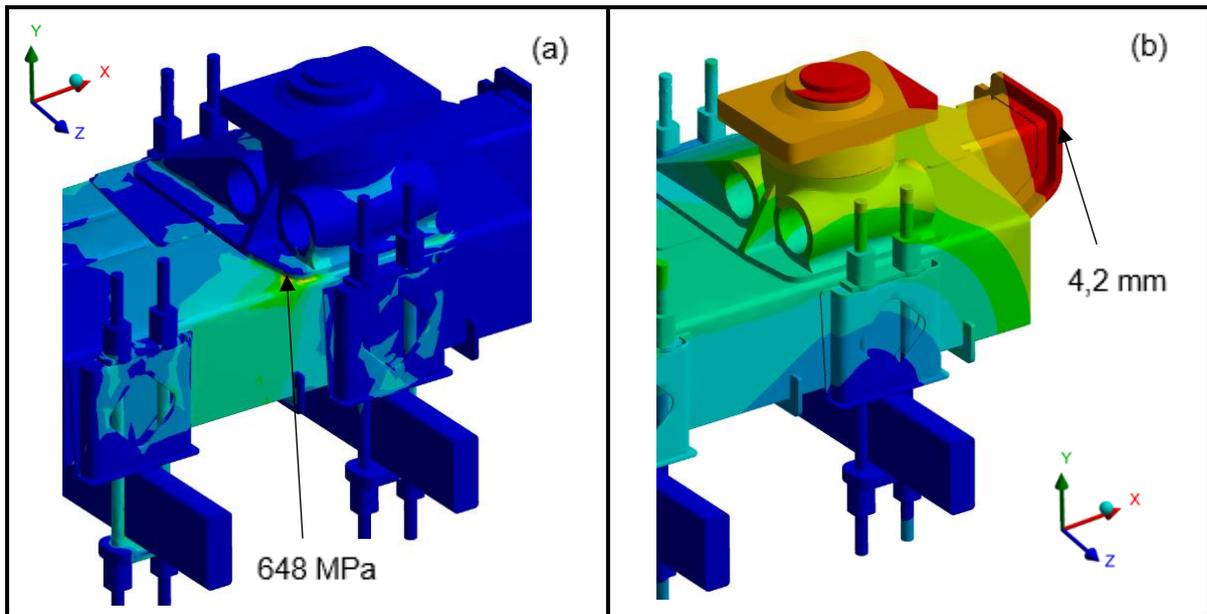


Fonte: O autor (2019).

Como pode-se observar na Figura 36 (a), a tensão máxima de von Mises obtida foi de 650 MPa, ocorrendo exatamente na interface entre o mancal e a região frontal da estrutura da base, concentrando a tensão nesse ponto. Já em (b), observa-se a posição do deslocamento máximo de 5 mm na direção do eixo positivo de Y, resultante do carregamento 1, que simula um carregamento pelo lado esquerdo.

De modo similar, os resultados obtidos pelo carregamento 2, que simula um içamento pelo lado direito, foram similares ao do carregamento 1. A Figura 37 ilustra esses resultados.

Figura 37 - Resultados Carregamento 2

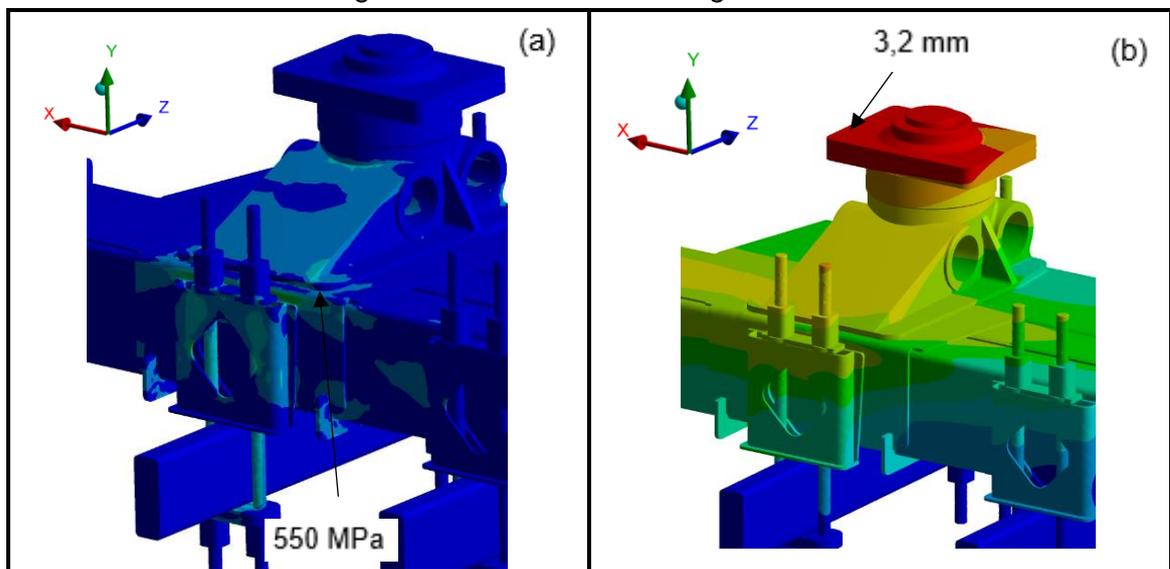


Fonte: O autor (2019).

A tensão máxima obtida foi de 648 MPa, muito similar ao resultado anterior. Além disso, conforme descrito anteriormente, essa região corresponde a um ponto de concentração de tensão comum para os carregamentos 1 e 2. O valor do deslocamento máximo é de 4,2 mm, dessa vez, ele ocorre no sentido negativo de Y.

Por fim, os resultados do carregamento 3 podem ser observados na Figura 38. A tensão máxima observada para esse carregamento, foi de 550 MPa, localizado na parte de trás da base, na região em que o mancal é soldado no conjunto, e o deslocamento máximo foi de 3,2 mm.

Figura 38 - Resultados Carregamento 3

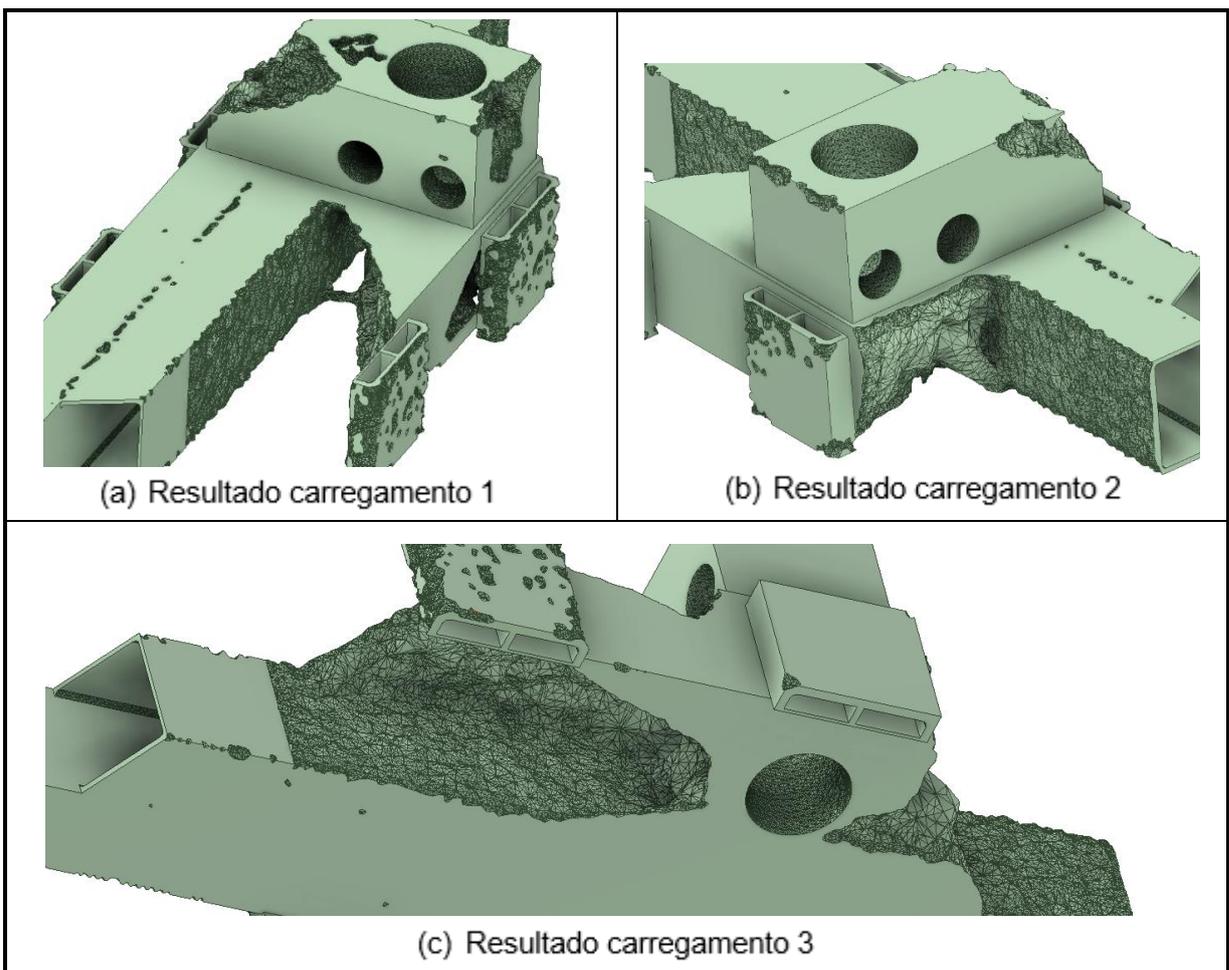


Fonte: O autor (2019).

4.2 RESULTADOS OBTIDOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

O domínio inicial do conjunto base foi submetido a uma série de análises por otimização topológica, definindo-se como restrição de volume o valor de 25% em cada análise. Primeiramente, o sistema passou por três análises distintas, uma para cada carregamento. A Figura 39 demonstra os resultados para cada uma das combinações de cargas.

Figura 39 - Resultados da otimização topológica para cada carregamento



Fonte: O autor (2019).

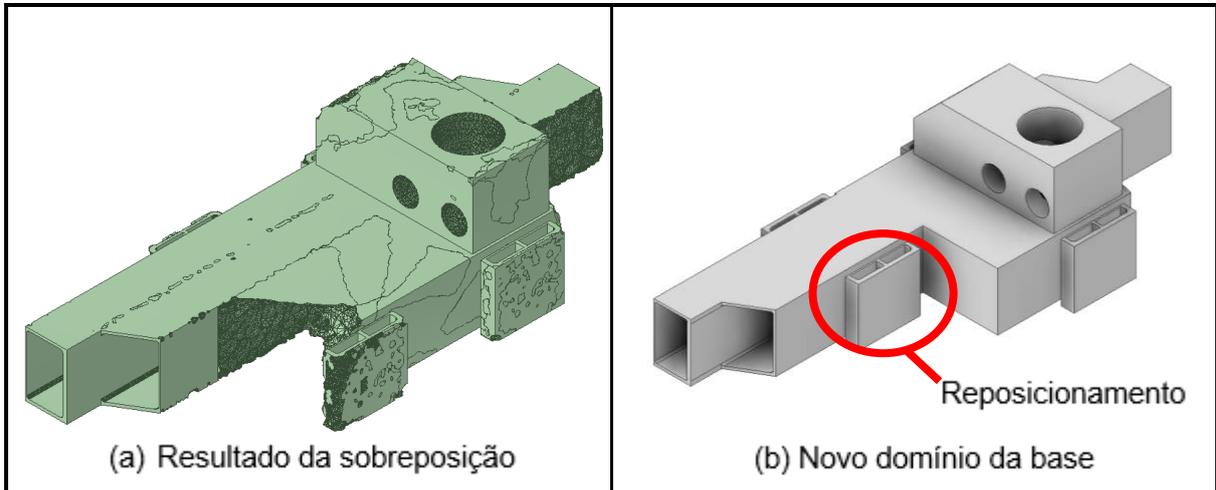
Em todos os três resultados, pode-se observar que as regiões excluídas da otimização foram mantidas, pois essas regiões são importantes para a montagem de componentes que posteriormente devem fazer parte do conjunto. Para cada carregamento houve uma região em que a remoção de material se intensificou mais. A Figura 38 (a), que corresponde ao carregamento 1, demonstrou uma remoção de material maior no lado esquerdo da estrutura, já em (b), uma otimização do lado direito foi mais evidente. Em (c), que simula o carregamento frontal, a região inferior da base foi a que teve a maior extração de massa.

Comparando-se os resultados obtidos da análise topológica com os resultados das análises de tensões na estrutura original, pode-se observar que a remoção de material foi menor nas regiões em que as tensões foram mais elevadas. Sendo assim os resultados observados são coerentes com os fluxos de tensões observados para cada um dos três carregamentos.

A fim de se obter um resultado simultâneo para todos os carregamentos, inicialmente optou-se em sobrepor as três estruturas otimizadas. O método da sobreposição acabou gerando um resultado não satisfatório, devido ao seu volume elevado, o que pode acabar gerando um superdimensionamento da estrutura durante a suavização.

Dessa forma, a partir do modelo gerado pela sobreposição, um novo domínio foi modelado. Observou-se uma tendência de remoção de material no lado esquerdo da base, fazendo com que a posição do suporte dos prisioneiros da estrutura fosse reposicionado para as novas análises, com o objetivo de se obter resultados mais otimizados. A Figura 40 explicita o modelo que resultou da sobreposição em (a), já em (b), o novo domínio, com a indicação do reposicionamento do suporte, que foi submetido posteriormente a uma sequência de novas análises de otimização, porém dessa vez, por um processo evolutivo.

Figura 40 - Resultado da sobreposição e novo domínio

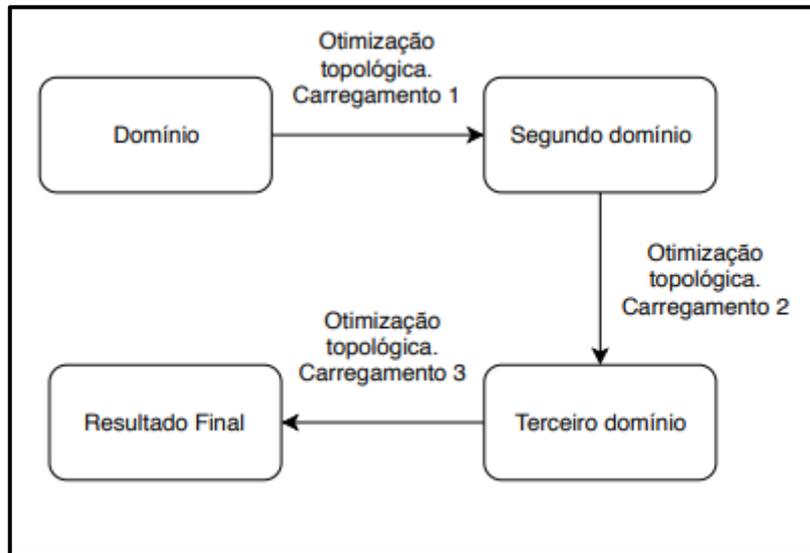


Fonte: O autor (2019).

O processo evolutivo para este caso, consiste no processo de otimização topológica baseada na estrutura obtida de um resultado anterior. O novo domínio da base, representado pela Figura 39 (b), foi submetido a uma nova otimização topológica, considerando as combinações de cargas do carregamento 1. O resultado dessa otimização foi remodelado em um novo domínio, do qual foi submetido a mais um processo de otimização, agora com base no carregamento 2. Por fim, esse resultado serviu de base para a geração do último domínio submetido a análise final, considerando o carregamento 3.

A Figura 41 demonstra de maneira esquemática o processo evolutivo descrito anteriormente.

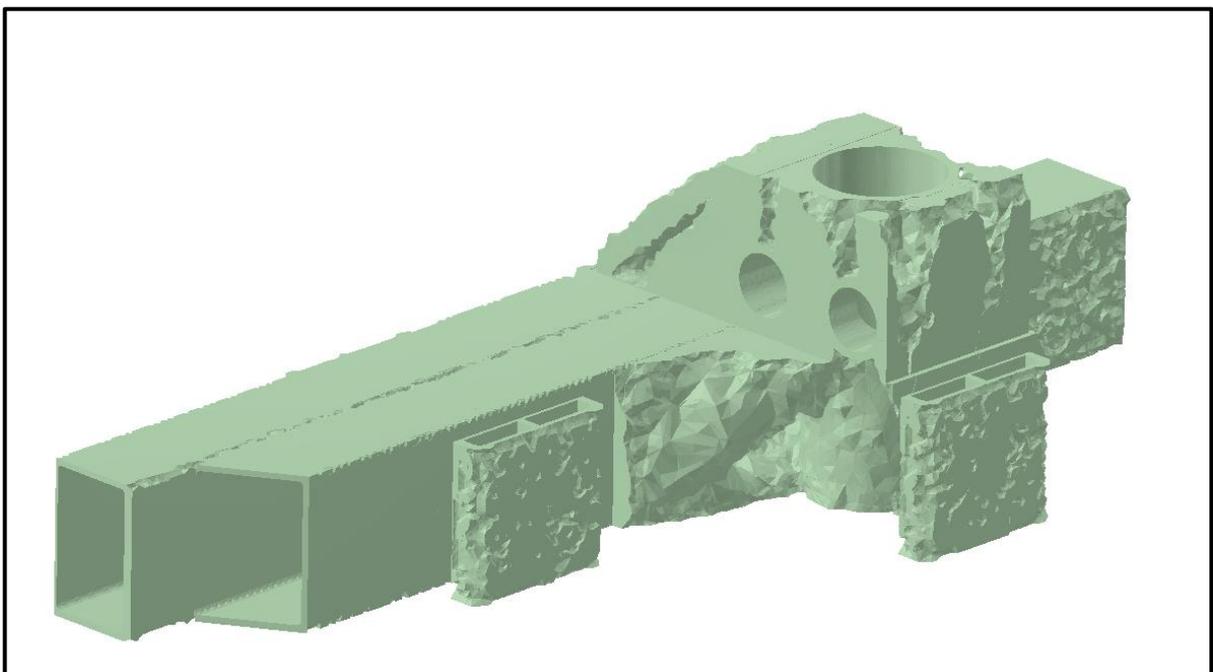
Figura 41 - Processo evolutivo



Fonte: O autor (2019).

O resultado final do processo evolutivo, pode ser observado na Figura 42. Conforme dito anteriormente, a otimização se intensificou mais em diferentes regiões para cada carregamento e, com base nisso, os novos domínios foram modelados e os resultados de cada uma dessas regiões incorporados em um resultado final.

Figura 42 - Resultado do processo evolutivo



Fonte: O autor (2019).

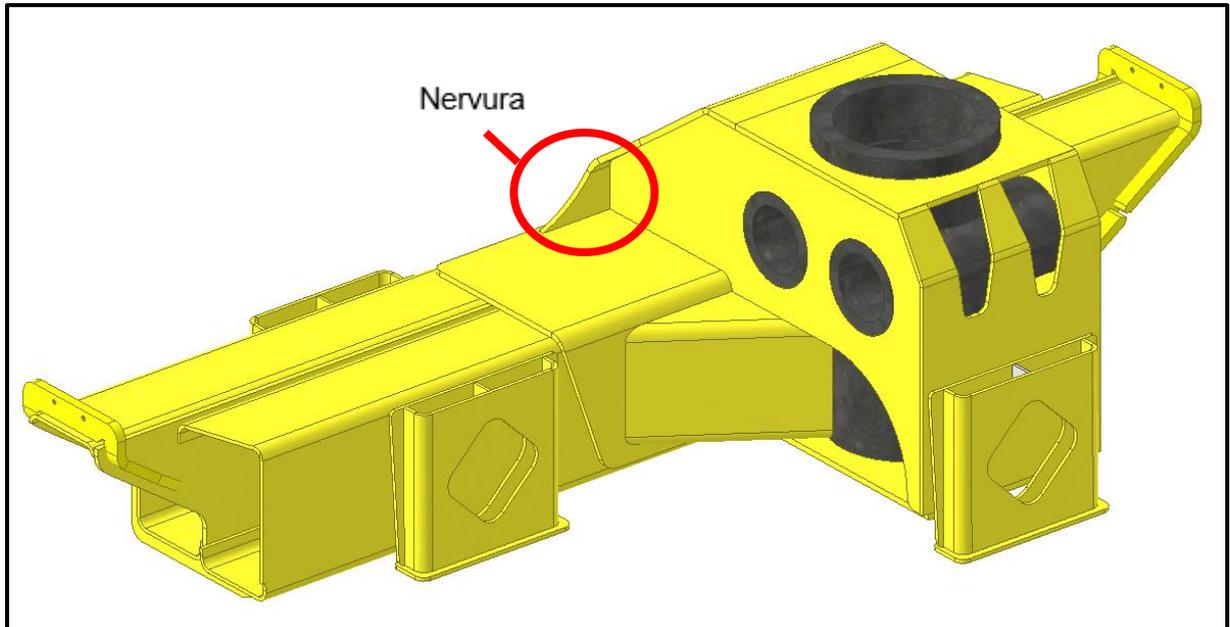
4.3 SUAUIZÃO DOS RESULTADOS

A partir do resultado obtido com a Otimização Topológica, um remodelamento do conjunto base do guindaste foi realizado. Essa estrutura foi modelada basicamente com chapas de aço dobradas, de tal modo que se assemelhe com a distribuição de material obtida da otimização. O mancal fundido da coluna foi removido, sendo substituídos por tubos, por onde o eixo da coluna e o sistema de giro são posicionados. Esses tubos são sustentados por chapas, responsáveis por uni-los ao restante do conjunto.

A Figura 43 mostra o resultado da suavização. A nova estrutura possui uma massa de 720 kg. Os reforços utilizados e espessuras seguem padrões já utilizados por equipamentos semelhantes no mercado, porém com disposições diferenciadas na estrutura, e com a existência de regiões vazadas, proporcionando redução de massa, se comparado ao modelo original.

A região indicada nessa figura, mostra que nervuras foram adicionadas, tendo a finalidade de suavizar as tensões provocadas principalmente pelos carregamentos laterais 1 e 2, observados durante as análises realizadas até o momento.

Figura 43 - Sistema suavizado



Fonte: O autor (2019).

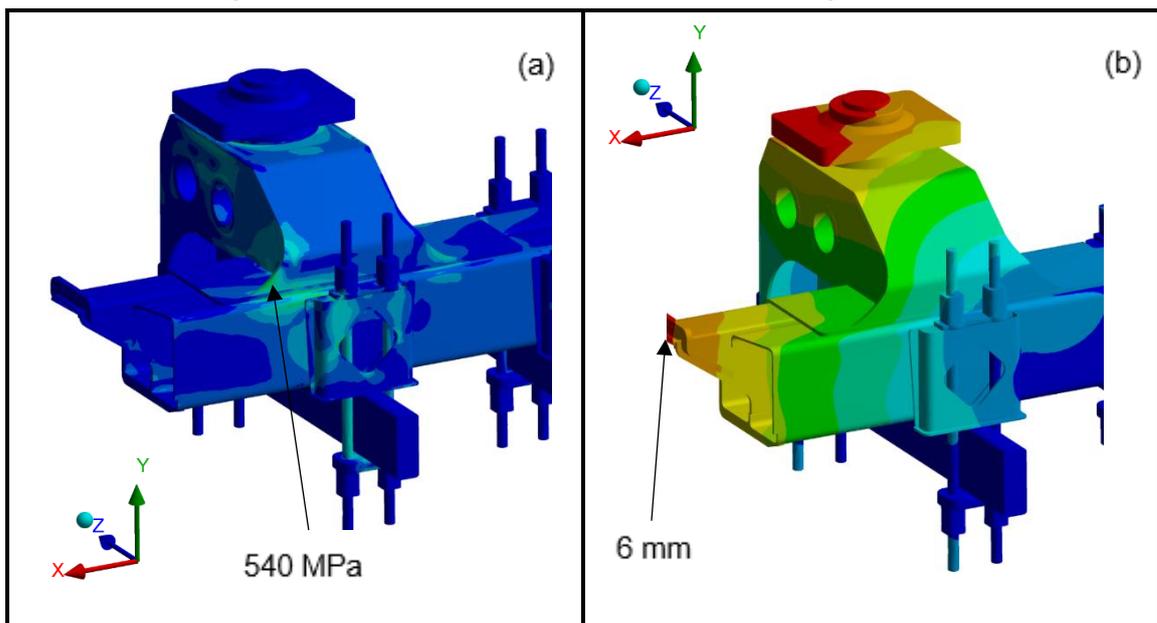
Os tubos possuem uma parede com a mesma espessura do mancal fundido original desse equipamento. Além disso, reforços nas extremidades das caixas, que alojam os braços estabilizadores, foram mantidos na estrutura, conforme o modelo original.

4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES NA ESTRUTURA SUAVIZADA

O modelo suavizado passou pelas mesmas análises submetidas ao modelo original, descritas na seção 4.1. Em geral, tensões máximas mais baixas foram observadas, em posições distintas do modelo original, devido às alterações feitas na estrutura. Já para os deslocamentos, valores ligeiramente mais altos foram obtidos, ocorrendo em regiões semelhantes do modelo original.

A Figura 44 mostra os resultados obtidos no modelo, aplicando-se o carregamento 1. Nesse caso, o valor máximo observado foi de 540 MPa na região crítica indicada em (a). Diferentemente do resultado obtido da estrutura original, os locais com tensões mais altas ficaram na parte de trás da estrutura, provavelmente pelo deslocamento da posição do prisioneiro, conforme Figura 40 (b). Já para o deslocamento, observa-se um valor semelhante ao obtido com o modelo anterior, sendo de 6 mm na direção positiva do eixo Y.

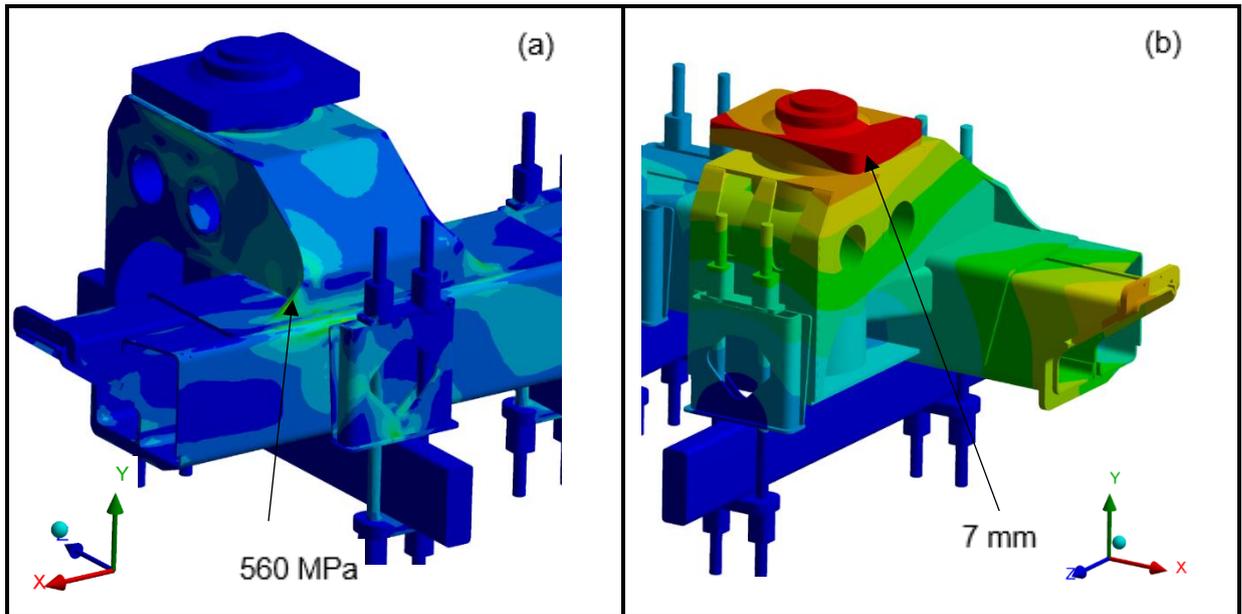
Figura 44 - Resultados modelo suavizado carregamento 1



Fonte: O autor (2019).

O valor obtido para a tensão máxima no carregamento 2, foi de 560 MPa, conforme a Figura 45. Esse valor também resultou abaixo do obtido da base original, e ocorre na mesma região da análise anterior. Nesse caso, o deslocamento máximo obtido foi de 7 mm, ocorrendo no sentido negativo do eixo Y.

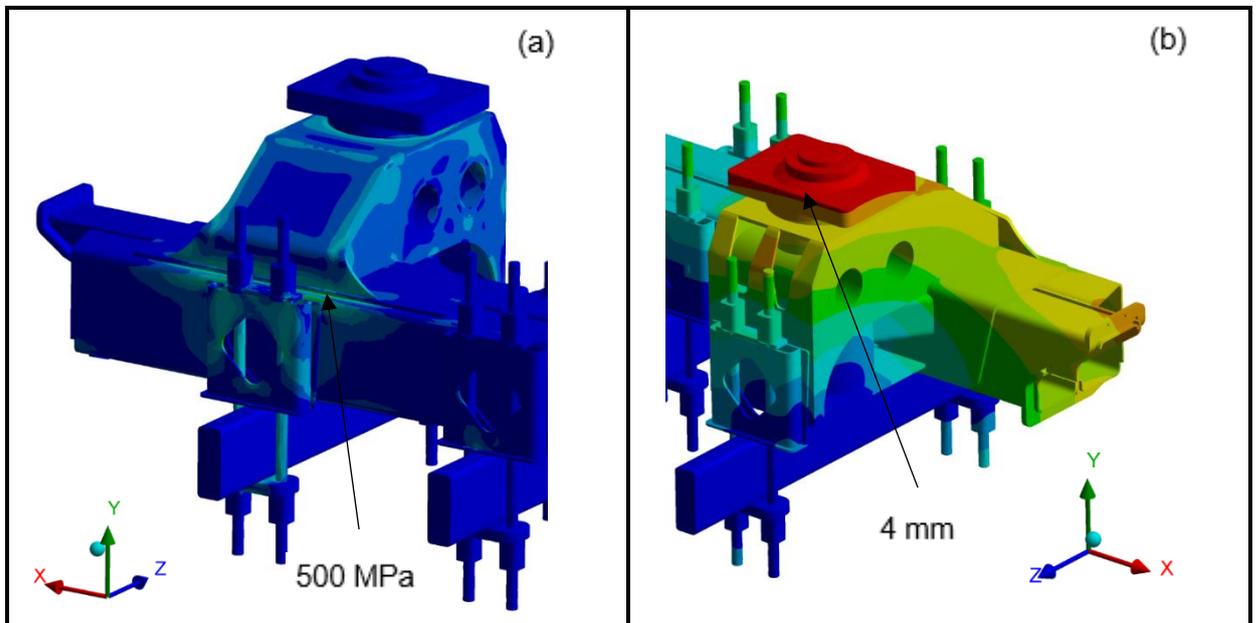
Figura 45 - Resultados modelo suavizado carregamento 2



Fonte: O autor (2019).

Por fim, a estrutura suavizada foi sujeita ao carregamento 3, que simula um içamento frontal, de acordo com a Figura 46. Nesse caso, a tensão máxima observada foi de 500 MPa, com deslocamento máximo de 4 mm, ocorrendo na direção -Y.

Figura 46 - Resultados modelos suavizado carregamento 3



Fonte: O autor (2019).

4.5 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 7 faz um comparativo reunindo todos os resultados obtidos anteriormente, fazendo a distinção entre a base original e a base otimizada, com todas as 3 combinações de carregamentos. Nessa tabela, o símbolo (-), representa a diminuição percentual entre os valores analisados, já (+) simboliza o aumento.

Tabela 7 - Resultados

	Base Original		Base Otimizada		Diferença Percentual	
	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão (%)	Deslocamento (%)
Carregamento 1	650	5	540	6	(-) 20,4	(+) 16,7
Carregamento 2	648	4,2	560	7	(-) 15,7	(+) 40,0
Carregamento 3	550	3,2	500	4	(-) 10,0	(+) 20,0
Massa Total	830 kg		720 kg		(-) 13,2%	

Fonte: O autor (2019).

Pode-se observar uma redução na tensão máxima para todos os carregamentos, em média, com valores em torno de 15,4% menores, porém, os resultados obtidos para o deslocamento se mostraram superiores na base otimizada. De acordo com a norma NBR 14768 Anexo B, os valores de tensões obtidos na base otimizada estão abaixo do valor máximo presumido calculado pela Equação 4, que é de 600 MPa.

Esses valores, ocorrem apenas em pequenas regiões específicas da estrutura. De maneira geral, as tensões se distribuíram de maneira mais homogênea ao longo dos componentes, com valores menores se comparados ao sistema original. A redução de massa obtida foi expressiva, totalizando 110 kg (13,2%) removidos da massa total da base.

Os efeitos de fadiga, ocasionados pelos carregamentos alternados, não foram considerados no projeto. Ainda, apenas três tipos de içamento foram examinados, um pelo lado esquerdo, outro pelo lado direito, e um frontal em relação a base. Levando em conta que o equipamento possui um giro de 360 graus, diversas posições de içamento podem ocorrer, cada uma delas gerando diferentes resultados de distribuição de tensão, ao longo de toda

estrutura. Essas três posições foram escolhidas para caracterizarem as regiões mais utilizadas no içamento de cargas por guindastes veiculares.

Com o auxílio de Figura 47, pode-se observar a montagem final do equipamento, com a base otimizada.

Figura 47 - Montagem completa da estrutura



Fonte: O autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Com a intenção de obter uma melhor distribuição de massa ao longo do conjunto base do guindaste articulado, e reduzir sua massa total, análises envolvendo o Método de Elementos Finitos e Otimização Topológica foram realizadas nesse trabalho. Diferentes condições de carregamentos foram impostas na estrutura em análise, respeitando as diretrizes indicadas pela norma NBR 14768.

Com o auxílio dos *softwares* ANSYS® e Inventor®, foi possível obter um melhor dimensionamento da estrutura, com resultados que podem servir de base para o desenvolvimento de novos produtos, mais competitivos no mercado. Diminuição de custos durante o processo de fabricação, redução de matéria prima, uma estrutura leve e com grande capacidade de carga são alguns diferenciais que podem fazer com que esse equipamento se torne mais atraente ao cliente.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi observada a dificuldade em se otimizar uma estrutura que pode sofrer várias condições diferentes de carregamentos durante sua utilização na prática. A fim de facilitar o problema e tornar a solução possível, as combinações de cargas calculadas pela norma, foram aplicadas na estrutura, de modo a simular três condições de içamento de cargas diferentes. Inicialmente, os resultados obtidos da otimização foram sobrepostos para gerar a estrutura final, o que acabou acarretando em uma estrutura pouco otimizada. Somente com o processo evolutivo, um resultado mais satisfatório foi obtido, que serviu como base para o modelamento da nova estrutura.

Observando-se a distribuição de massa obtida pela estrutura otimizada, e utilizando-se de experiência e conceitos observados e vivenciados no ambiente de trabalho da empresa, a nova estrutura do conjunto base foi modelada. Tendo uma massa original de 830 kg, a base do guindaste passa a ter 720 kg, uma redução equivalente a 13,2%. Diferentes resultados para as tensões máximas foram obtidos em cada um dos três carregamentos, em média, observou-se uma diminuição de aproximadamente 13,4% na tensão máxima da estrutura otimizada. Entretanto, os deslocamentos máximos foram ligeiramente superiores com o sistema otimizado, principalmente no carregamento 2, onde o aumento foi de aproximadamente 3 mm, porém, devido as dimensões do equipamento, isso não acaba sendo um valor significativo.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos para o trabalho foram atingidos, onde foi possível o desenvolvimento do novo conjunto base do guindaste articulado, possuindo uma menor massa e menores valores de tensões máximas, comparados ao do modelo original.

Com a finalidade de complementar os resultados desse trabalho, novos estudos podem ser realizados sobre esse conjunto, como por exemplo:

- a) Analisar a estrutura com um estudo experimental de extensiometria, para validação do modelo proposto;
- b) Realizar testes relacionados a fadiga em *software*, e também em ensaios experimentais;
- c) Avaliar a redução de custo com a estrutura otimizada.
- d) Realizar otimização dimensional posteriormente a análise topológica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Valério Silva; SIMONETTI, Hélio Luiz; NEVES, Francisco Assis. Optimal topology selection for 2D structures with stress constraints via Smooth Evolutionary Structural Optimization. **Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería**, [s.l.], v. 30, p.69-79, 2017.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2007.
- ARORA, Jasbir S.. **Introduction to optimum design**. 3. ed. London: Elsevier, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14768**: Guindaste articulado hidráulico - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- AZEVEDO, Álvaro F. M.. **Método dos Elementos Finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258 p.
- BELYTSCHKO, Ted; LIU, Wing Kam; MORAN, Brian. **Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures**. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- BENDSOE, Martin P.; SIGMUND, Ole. **Topology Optimization: Theory, Methods and Applications**. Alemanha: Springer, 2003. 393 p.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. São Paulo: Amgh Editora Ltda, 2011. 1073 p.
- CELIK, H. Kursat; RENNIE, Allan E. W.; AKINCI, Ibrahim. Design and structural optimisation of a tractor mounted telescopic boom crane. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.909-924, 18 maio 2016. Springer Nature.
- CHRISTENSEN, Peter W.; KLARBRING, Anders. **An Introduction to Structural Optimization**. 153. ed. Waterloo: Springer, 2009.
- CHEN, Zhi Wei et al. Structural Optimization of the Telescopic Boom of a Certain Type of Truck-Mounted Crane. **Applied Mechanics And Materials**, [s.l.], v. 548-549, p.383-388, abr. 2014. Trans Tech Publications.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **RESOLUÇÃO CONTRAN N° 210:2006**: Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Brasília, 2006. 7 p.
- COUTINHO, Karilany Dantas. **Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

CRANE BRASIL (Brasil) (Ed.). PROJETOS E PROJEÇÕES PARA 2018: : Empresas e fabricantes do setor de elevação e transporte de cargas pesadas e especiais fazem balanço. **Crane Brasil Hd**, São Paulo, v. 57, p.10-15, jan. 2018. Disponível em: <<http://cranebrasil.com.br/wp-content/uploads/2018/03/CraneBrasil-HD57-perspectivas.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2019.

FE-DESIGN. **SIMULIA Tosca Structure Documentation 8.1**. Karlsruhe: Fe-design GmbH, 2014

FISH, Jacob; BELYTCHKO, Ted. **A First Course in Finite Elements**. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 344 p.

GARCIA, Oscar Alfredo. **Elementos Finitos Generalizados na Análise Estática de Placas e Cascas**. 2003. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

HAFTKA, Raphael T.; GURDAL, Zafer. **Elements of Structural Optmization**. 3. ed. Blacksburg: Kluwer, 1992.

HEARN, Edwin John. **Mechanics of Materials 2: An Intruduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids And Structural Materials**. 3. ed. United Kingdom: Butterworth Heinemann, 1997.

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

INDÚSTRIA NACIONAL DE GUINDASTES. **Manual de Operação e Manutenção**. Caxias do Sul, 2010.

KIM, Young-chul; HONG, Jung-kie; JANG, Gang-won. Lightweight Crane Design by Using Topology and Shape Optimization. **Transactions Of The Korean Society Of Mechanical Engineers A**, [s.l.], v. 35, n. 7, p.821-826, 1 jul. 2011. The Korean Society of Mechanical Engineers.

LAUDONIO, Fábio. Versatilidade do equipamento o torna ideal para vários setores. **Engenharia Civil: Notícias, inovações e tecnologia**, São Paulo, v. 8, p.16-19, maio 2013.

LEE, Huei-huang. **Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15**. Taiwan: Sdc Publications, 2014. 602 p.

MARCHI, Carlos Henrique; SILVA, António Fábio Carvalho da. UNIDIMENSIONAL NUMERICAL SOLUTION ERROR ESTIMATION FOR CONVERGENT APPARENT ORDER. **Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals**, [s.l.], v. 42, n. 2, p.167-188, 15 ago. 2002.

NAKAMURA, Juliana. Mecanização do canteiro. **Construção Mercado: Negócios de Incorporação e Construção**, São Paulo, v. 151, p.50-53, fev. 2014. Mensal. PINI.

OCDE BRASIL (Brasil). Organização Para A Cooperação e Desenvolvimento Económico (Org.). **Relatórios Econômicos OCDE BRASIL 2018**. Brasília, 2018. 42 slides, color. Disponível em: <<https://www.oecd.org/brazil/economic-survey-brazil.htm>>. Acesso em: 08 mar. 2019.

PERINI, Gustavo. **Estudo de caso: aplicação de otimização topológica no desenvolvimento de um protótipo de cubo de roda**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

PERO, Francesco del; DELOGU, Massimo; PIERINI, Marco. The effect of lightweighting in automotive LCA perspective: Estimation of mass-induced fuel consumption reduction for gasoline turbocharged vehicles. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 154, p.566-577, jun. 2017. Elsevier BV.

RAMOS, Davi Leão. **OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ESTRUTURAS COM MULTIRRESOLUÇÃO**. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

REVISTA MANUTENÇÃO E TECNOLOGIA. São Paulo: Sobratema, v. 144, mar. 2011.

RIBEIRO, Gabriel Rocha. **Verificação da Influência da Rigidez Torcional do Sobrechassi na Estabilidade Operacional do Guindaste Articulado Montado Sobre Caminhão**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

RUDENKO, N. **Máquinas de elevação e transporte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1976. 217 p. Tradução de: João Plaza.

SILVA, José Guilherme Santos, et al. **Análise Estrutural de Chassi de Veículos Pesados com base no Emprego do Programa Ansys**. Universidade do estado do rio de janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SOMACAL, Pedro Boito. **Otimização estrutural do sistema coluna e braço principal de um guindaste articulado**. 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

SORIANO, Humberto Lima; LIMA, Silvio de Souza. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Edusp, 2002.

SOUZA, Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

STUMP, Fernando Viegas. **Otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas tradicionais e estruturas com gradação funci**. 2006. 243 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SUZUKI, Katsuyuki; KIKUCHI, Noboru. A homogenization method for shape and topology optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, [s.l.], v. 93, n. 3, p.291-318, dez. 1991. Elsevier BV.

VETTURAZZI, Rafael. **Otimização topológica: como reduzir custos com matéria-prima e superar a crise**. 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/otimizacao-topologica-como-reduzir-custos-com-materia-prima-e-superar-a-crise/>>. Acesso em: 21 maio 2019.

ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT. **EN 12999**: Cranes - Loader Cranes. Vienna: Austrian Standards Institute, 2006.