

JESSÉ DE JESUS SILVA

**Desenvolvimento e análise do projeto de um guindaste giratório de parede utilizando
ferramentas CAD e CAE**

Jessé de Jesus Silva

**Desenvolvimento e análise do projeto de um guindaste giratório de parede utilizado
ferramentas CAD e CAE**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP
2019

S586d	Silva, Jessé de Jesus Desenvolvimento e análise do projeto de um guindaste giratório de parede utilizado ferramentas CAD E CAE / Jessé de Jesus Silva – Guaratinguetá, 2019. 61 f : il. Bibliografia: f. 53-55 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Guindastes, etc. 2. Projeto auxiliado por computador. 3. Peças de máquinas. I. Título. CDU 621.87
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

JESSÉ DE JESUS SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. VÍCTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO
UNESP-FEG



Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG

Dedico este trabalho, de modo especial, à
minha mãe e à minha avó, que me mantêm em
pé com carinho, amor e orações.

AGRADECIMENTOS

Ao querido Deus, a quem sou eternamente grato por Seu grandioso Amor, graça e misericórdia. A Ele toda honra, glória, louvor e adoração.

À minha maravilhosa mãe, que com o seu amor e cuidado sempre esteve ao meu lado me fortalecendo e ajudando com suas orações, conselhos e abraços; quem me ensinou a amar e a dar valor aos estudos; a quem devo muito de tudo o que eu tenho e sou.

À minha avó, *Juraci de Jesus Bernardo*, que sempre me ajudou muito, do modo que pôde, principalmente com seu amor e carinho, sendo para nós um exemplo de fé, conduta e sabedoria.

Ao meu pai, exemplo de caráter, responsabilidade e profissionalismo; por ser um simples e grande homem, que me inspira e me motiva a batalhar pela vida.

Ao *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, que desde 2014 tem me ajudado nas orientações, sempre com muito profissionalismo, seriedade e, em todo tempo, mostrando-se disposto a aconselhar e direcionar por bons caminhos, além de nos apaixonar pela engenharia mecânica.

Ao *Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi* que também tem mostrado constantemente grande disposição e vontade em ajudar, e sempre de maneira dedicada e prestativa.

Aos meus amigos e irmãos *André Batalha, Jediael Pereira, Leandro Leme, Marcelo Salgado e Matheus Pasin* pela ajuda essencial em momento oportuno (Pv. 17:17, Pv. 18:24). Serei eternamente grato a vocês.

Às minhas tias, *Paula, Dina e Elizana* pela ajuda e o carinho sempre presentes.

Aos amigos, que tive o grande privilégio de conhecer e que me ajudaram muito nessa caminhada até alcançar esse sonho, dentre eles: *Rubinho e família*; os professores e professoras *Marlene, Marly, Valda, Rúbia, Luíza, Luciene, Daniela, Fátima, Sandro, Cristiane, Emerson, Rosaura, Alex, Iracema, Anália, Helmo, Liliam, Olívia, Gabriel, Luciana, Daniele, Fabiana, Solange, Fernanda, Bibiane, José Ronaldo, Hilário e André Duarte*; aos amigos *Willy, Merily, Maria Eugênia, Dennis, Marlene, Mariana, Felipe Stefani, Celso, Dona Silvia, Daniele e família, Duda, João Paulo, Giulia, Velasco, Caio, Alexandre Pedro, João Vitor e família, Felipe (Phillips) e Lucas Nunes*. E, também, a todos os amigos que tive o privilégio de conhecer tanto no período integral como no noturno.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, ao lendário *Formiga*, aos da administração, do Departamento de Mecânica (em especial, à desenhista *Lúcia* e à secretária *Eliane*), aos professores, seguranças, técnicos, funcionários da limpeza, do polo e da biblioteca. Muito obrigado por cada ajuda e por cada momento!

Todos vocês, de alguma forma, fazem parte desse sonho. Muito obrigado!

“[...] seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, nível altíssimo ou mais baixo social, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Os guindastes e as máquinas de elevação são equipamentos de grande importância nas atividades industriais, na construção civil, nas operações portuárias e em diversos setores que necessitem de levantamentos de cargas elevadas de modo seguro, controlado e eficiente. O projeto desses equipamentos, por sua vez, requer o emprego de elementos de máquinas, mecanismos e estruturas que são vastamente utilizados na engenharia, tais como cabos de aço, engrenagens, polias, parafusos, perfis estruturais, etc. Nesse trabalho, foi construído um guindaste giratório de parede em ambiente virtual. Para essa construção, as normas ABNT foram utilizadas amplamente, principalmente a norma ABNT NBR 8400. O software utilizado para a modelagem tridimensional foi o *Autodesk Inventor*®. Para a análise do projeto, a estrutura principal do guindaste, constituída por perfis estruturais em L e em U, reforços estruturais e outras conexões, foi analisada separadamente. Foram realizadas simulações estáticas estruturais nesse subconjunto. Concomitantemente, considerou-se um modelo para essa estrutura, o qual foi analisado pelo Método dos Nós e pelo Método de Rigidez Direta, determinando-se por esses meios as tensões, deslocamentos e cargas de apoio. Para esses cálculos, o *software MATLAB*® foi utilizado. Os resultados analíticos e computacionais apresentaram uma aderência coerente. Após a verificação dos resultados, melhorias foram propostas ao projeto, de modo a proporcionar um funcionamento e uma segurança mais apropriados ao equipamento. Adicionalmente, foram discutidas as questões que fazem com que os resultados sejam sensivelmente diferentes. Esse trabalho procura apresentar uma aplicação do Método de Rigidez Direta e discutir as condições reais em que ele pode ser utilizado em equipamentos de levantamento de cargas, além de explorar, nesse mesmo contexto, as soluções numéricas computacionais obtidas através do método dos elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Guindastes. *Autodesk Inventor*. Elementos finitos. CAD. CAE.

ABSTRACT

Cranes and lifting machines are very important equipment in industrial activities, construction, port operations and in various sectors that need to lift high loads safely, controlled and efficiently. The design of such equipment, in turn, requires the use of machine elements, mechanisms and structures that are widely used in engineering, such as wire ropes, gears, pulleys, bolts, structural profiles, etc. In this work, a rotary wall crane was built in a virtual environment. For this construction, the ABNT standard was widely used, mainly the ABNT NBR 8400 standard. The software used for three-dimensional modeling was Autodesk Inventor®. For the design analysis, the main crane structure, consisting of L and U structural profiles, structural reinforcements and other connections, was analyzed separately. Structural static simulations were performed on this subset. At the same time, a model for this structure was considered, which was analyzed by the Method of Joints and the Direct Stiffness Method, determining by these means the stresses, displacements and support loads. For these calculations, the MATLAB® software was used. The analytical and computational results presented a coherent adherence. After verification of the results, improvements were proposed to the project to provide more proper operation and safety of the equipment. Additionally, the issues that make the results significantly different were discussed. This work aims to present an application of the Direct Stiffness Method and to discuss the real conditions under which it can be used in lifting equipment, and to explore, in this same context, the computational numerical solutions obtained through the finite element method.

KEYWORDS: Crane. Autodesk Inventor. Finite Element Analysis. CAD. CAE

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões ou bidimensional
3D	Três dimensões ou tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
CAM	Computer-aided Manufacturing
DCL	Diagrama de corpo livre
MEF	Método dos elementos finitos
MRD	Método de Rigidez Direta
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área de seção transversal de um elemento de treliça
E_e	Módulo de elasticidade de um elemento de treliça
F	Designação genérica de carga
$\mathbf{F}$	Matriz dos componentes das forças
$F_{\text{máx.}}$	Carga máxima
$\mathbf{k}$	Matriz de rigidez de um elemento de treliça
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez da treliça
l	Cosseno diretor do ângulo entre as coordenadas horizontais local e global
$\mathbf{L}$	Matriz de transformação
l_e	Comprimento de um elemento de treliça
m	Cosseno diretor do ângulo entre as coordenadas verticais local e global
p	Fração da carga máxima (ou da tensão máxima)
q	Designação genérica de deslocamento nodal
$\mathbf{q}$	Designação genérica do vetor deslocamento nodal
σ	Designação genérica de tensão
$\sigma_{\text{máx.}}$	Tensão máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	14
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1	MÁQUINAS DE ELEVAÇÃO	18
2.1.1	Breve histórico	18
2.1.2	Conceitos e classificações	20
2.2.3	Guindastes	21
2.2	NORMALIZAÇÃO	23
2.2.1	Definições	23
2.2.2	Classificação das estruturas dos equipamentos	24
2.2.2.1	Classe de utilização da estrutura dos equipamentos	24
2.2.2.2	Estado de carga	25
2.2.3	Classificação dos elementos da estrutura	25
2.2.4	Classificação das estruturas em grupos	26
2.3	TRELIÇAS	26
2.3.1	Análise de treliças pelo Método dos Nós	27
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	28
2.4.1	Análise de treliças pelo método dos elementos finitos	28
2.5	AUTODESK INVENTOR®	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS	33
3.2	MODELAGEM DO GUINDASTE	34
3.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	MÉTODO DOS NÓS	42
4.2	MÉTODO DE RIGIDEZ DIRETA	43
4.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	46
4.3.1	Análise da estrutura principal	46
4.3.2	Análise dos elementos da estrutura	48

5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS	53
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	56
	ANEXO A – Guindaste giratório de parede original – Provenza (1976)	57
	ANEXO B – Sarilho para 250 kg – Provenza (1976)	58
	APÊNDICE A – Guindaste giratório de parede construído	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os equipamentos de levantamento e movimentação de cargas são essenciais em diversos setores da economia. A construção civil, as atividades portuárias, a siderurgia e diversos segmentos industriais são beneficiados pelas máquinas de elevação. A grande maioria das empresas industriais modernas, inclusive, tem esses equipamentos como parte relevante de seu maquinário (RUDENKO, 1976).

O projeto de tais equipamentos envolve o conhecimento e a utilização de uma ampla gama de elementos de máquinas e, também, de variadas metodologias de projeto mecânico. Por isso, a concepção e análise desses mecanismos são um ambiente rico para a aplicação de diversas técnicas e funcionalidades atuais presentes na engenharia.

Dentre essas ferramentas, destacam-se os recursos computacionais, que tem revolucionado a engenharia desde a segunda metade do século XX. A possibilidade de processar um grande volume de informação proporcionou aos engenheiros e cientistas a capacidade de realizar uma quantidade considerável de cálculos numéricos e algébricos, armazenar e manusear dados, gerar gráficos, imagens e representações muito proveitosas para a engenharia, bem como para toda a produção científica e tecnológica (CHANDRUPATLA, 2014).

Nesse contexto, surgiram uma variedade de *softwares* que auxiliam na execução de determinadas tarefas, de modo a agilizar, organizar e facilitar a sua realização. E, com eles, é possível lidar com uma maior complexidade nos projetos e conferir maior profundidade em suas análises, uma vez que a capacidade de processamento dos computadores contribui notadamente para isso.

Duas das vertentes principais desses *softwares* são os de *Computer-aided Design* (CAD) e os de *Computer-aided Engineering* (CAE), que consistem, respectivamente, em programas voltados para o auxílio ao desenho e à análise em engenharia. Estes últimos, por sua vez, utilizam o método dos elementos finitos como recurso principal para o cálculo de tensões, deformações, deslocamentos, forças, coeficientes de segurança e diversas outras grandezas. Tais programas ainda podem ser utilizados em múltiplas áreas, além da estrutural, como a mecânica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo, acústica, astronomia, dentre outras (NORTON, 2013).

O método dos elementos finitos, utilizado por esses *softwares*, consiste em um método

numérico de resolução de equações diferenciais que descrevem uma extensiva variedade de fenômenos. Desde que uma grandeza possa ser associada a um sistema contínuo, esse pode ser representado por uma junção de elementos geométricos discretos, os quais são associados às equações que os descrevem. A solução geral desse sistema de equações fornece uma solução aproximada do modelo real definido. Essa solução pode ser analisada, aprimorada e servir de base para novas soluções do mesmo modelo, até que os resultados convirjam para a confiabilidade desejada (BATHE, 1996).

Uma plataforma CAD e CAE amplamente utilizada no mercado é o *software Autodesk Inventor®*, o qual é voltado, principalmente, à modelagem tridimensional. Porém, ele também possui ambientes dedicados à simulação numérica de peças e montagens, empregando o método dos elementos finitos. E, além disso, contém variadas ferramentas de cálculos de elementos de máquinas, geradores de geometrias padronizadas, desenhos técnicos bidimensionais (2D), vistas explodidas, renderizações, animações e outros (WAGUESPACK, 2013).

1.2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O presente trabalho teve por objetivo inicial realizar a modelagem tridimensional (3D) de um guindaste giratório de parede de carga nominal 2000 kgf, proposto por Provenza (1996). O *software* utilizado foi o *Autodesk Inventor®* (versão 2019). Intenta-se, também, realizar as devidas adaptações de projeto, de acordo com normas atuais, principalmente com as vigentes pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Realizaram-se mudanças que acompanham a atualização das metodologias de projeto mecânico e, adicionalmente, executaram-se simulações de elementos finitos, de modo a analisar o projeto em termos de resistência, deformações e confiabilidade, para então propor melhorias.

A principal motivação desse trabalho vem da importância que as ferramentas computacionais têm desempenhado na engenharia atual, principalmente por meio das tecnologias CAD, CAE e *Computer-aided Manufacturing* (CAM). Essa evolução recente provoca a necessidade de que seja gerada literatura a respeito, principalmente quando se atrela esses as funções desses aplicativos à análise por elementos finitos, outro ramo em intenso desenvolvimento atualmente.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há, na literatura, diversos tipos de trabalhos sobre análises de equipamentos de levantamento de cargas com ferramentas de elementos finitos e, neles, se destaca a importância de se fazer análises com mais embasamento e fundamentação por esse método e, inclusive, de realizar comparações analíticas e até experimentais.

Gerdemeli, Kurt e Tasdemir (2012) analisaram o projeto de um guindaste do tipo JIB, isto é, guindastes que possuem um braço horizontal ou próximo dessa orientação. Esse projeto foi fundamentado das normas DIN. Eles realizaram esse estudo dividindo o guindaste em cinco partes, analisando-as separadamente. Paralelamente, cálculos analíticos foram realizados, encontrando as tensões atuantes e os deslocamentos. Comparando-se os resultados analíticos e numéricos, obtiveram-se erros de, no máximo, 3,6%. Exceto no pedestal cilíndrico, cujo modelo analítico precisou reconsiderar umas de suas simplificações.

Delić, Čolić e Mešić (2017) analisaram a deflexão e a tensão máxima de flexão da viga principal de uma ponte rolante. A análise foi feita comparando-se os resultados do modelo analítico e das simulações numéricas. Os resultados numéricos apresentaram um desvio considerável dos analíticos por causa de diferentes fatores da simulação. Porém, as análises serviram de base para a construção desse guindaste em um laboratório, considerando-se as devidas correções.

Adamiec-Wójcik, Drag e Wojciech (2018) aplicaram o método dos elementos finitos rígidos, que é uma variação do método dos elementos finitos, para estudar a lança de um guindaste treliçado. Ao comparar esse modelo com o de um programa comercial, os resultados tiveram diferenças percentuais de até 2,14%.

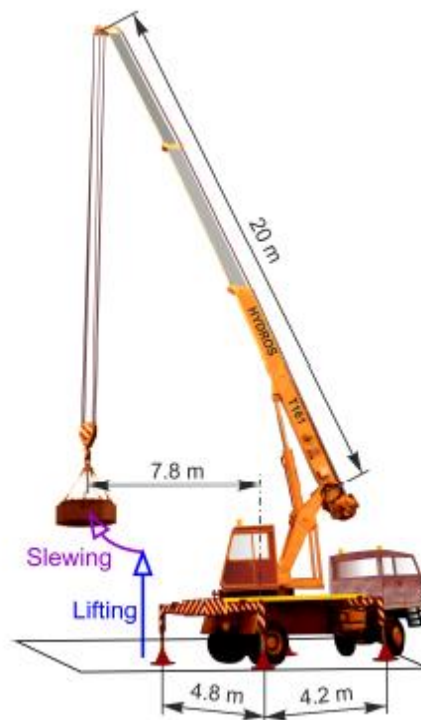
Uma análise de falha foi feita por Yao, Qiu e Zhou (2015) em seções transversais de uma lança de um guindaste telescópico. Utilizou-se uma abordagem não linear para os modelos numéricos e realizou-se investigação experimental. Detectou-se uma falha por flambagem elástica na seção da lança. O modelo utilizado pode ser utilizado para a análise de falhas desse tipo em guindastes com lanças e, também, em outras estruturas de paredes finas, com seções irregulares e carregamentos complexos.

Meng, Li, Tan (2013) investigaram uma viga de seção variável de um guindaste pelo método dos elementos finitos. Eles encontraram as frequências naturais e as tensões máximas de von Mises na viga e os resultados das simulações foram compatíveis com os analíticos.

Com os resultados, pode-se mapear os pontos em que se pode realizar estudos experimentais nesse tipo de componente e foi proposta uma rotina de inspeção para melhorar a segurança da viga. Complementarmente, sugeriu-se um conjunto de melhorias no projeto e na manufatura das junções da viga (flange and web connections) e, também, reforços nas soldas e junções da viga.

Trąbka (2016) analisou a trajetória da lança de um guindaste telescópico. Esse autor realizou sete tipos de modelos, considerando algumas simplificações, que consistiam em supor que alguns dos componentes seriam flexíveis, com o intuito de otimizar a simulação, sem perdas significativas de precisão. Através de um método quantitativo, avaliou-se qual configuração mais se adequaria à realidade. Foi salientada a importância de se escolher componentes apropriados para a atribuição da flexibilidade, pois assim, se obteria um modelo computacionalmente mais eficiente.

Figura 1 – Guindaste analisado por Trąbka, com sua lança em posição de levantamento.



Fonte: Trąbka (2016)

Koo, Chang e Kang (2018) determinaram as frequências naturais de uma lança telescópica de um guindaste e utilizaram o método de Rayleigh-Ritz para comparar com as simulações numéricas. Foi possível encontrar soluções precisas e, inclusive, os gráficos com as geometrias da lança nas frequências naturais que foram semelhantes às encontradas no

software de elementos finitos.

Yue e Qin (2013) desenvolveram um algoritmo capaz de fazer uma avaliação paramétrica de uma viga de tipo L. Vinte configurações de parâmetros foram geradas e analisadas. As análises foram realizadas por programas de elementos finitos e por ferramentas de programação. Com a otimização, o desempenho da viga sob tensão melhorou consideravelmente.

Uma análise foi realizada por Liu, Xing e Liu (2014), nela foram utilizados algoritmos que otimizariam a carga máxima suportada e o peso do guindaste através da resistência da viga principal de uma ponte rolante de viga dupla. Com essas otimizações o peso do guindaste diminuiu 16% e, ainda, o trabalho proveu um suporte técnico e teórico para se realizar esse tipo de otimização para guindastes em geral.

Portanto, a literatura fornece diferentes tipos de análises de guindastes e de equipamentos de levantamento e com variados propósitos. Há análises que visam a otimizações, estudos de falhas, desenvolvimento de algoritmos e modelos para melhores formulações de problemas desse tipo. Esse trabalho pretende acrescentar a esse conteúdo uma análise pelo Método de Rigidez Direta, através de uma delimitação da estrutura principal do guindaste. Com isso, objetiva-se encontrar um modelo a ser simulado com auxílio do método dos elementos finitos e, com os resultados, propor melhorias, para que esses modelos possam ser feitos com maior precisão. Assim, amplia-se o conhecimento sobre a análise estrutural desses equipamentos e apresenta-se um modo seguro, prático e eficiente de se otimizar e explorar os seus projetos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1, é apresentado um panorama geral dos assuntos tratados no trabalho, bem como os seus objetivos e justificativas.

O capítulo 2 expõe a fundamentação teórica sobre as máquinas de elevação, dos métodos utilizados no reprojeto e das normas em que o trabalho se baseou.

No capítulo 3, a metodologia do trabalho é descrita, mostrando a construção do guindaste em ambiente virtual, as ferramentas usadas nas verificações, simulações e cálculos e expondo como foi feita a adequação do projeto às normas empregadas.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos nas simulações numéricas, nos métodos analíticos e das operações realizadas com o programa *MATLAB*®, bem como

análises e discussões do projeto, visando à sua melhoria, adequação e mostrando as devidas adaptações.

As conclusões e considerações finais do trabalho são apresentadas no capítulo 5 e os desenhos, vistas e renderizações do projeto foram apresentadas nos Apêndices e Anexos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MÁQUINAS DE ELEVAÇÃO

2.1.1 Breve histórico

A origem das máquinas de elevação remonta às eras da humanidade nas quais se tem alguma construção que impressiona pelo seu tamanho, peso e complexidades artística e arquitetônica. Há, entre historiadores e arqueólogos, discussões sobre o modo como componentes tão robustos foram transportados de maneira a construir tais obras. Monumentos como o *Stonehenge*, as pirâmides de Gizé e os Colossos de Mênnon (datadas de, aproximadamente, 2500 a.C.) são obras icônicas das civilizações primitivas europeia e egípcia que estão nesse conjunto (ARMATO, 2015).

Há no *Stonehenge* pedras de, aproximadamente, 50 toneladas; estima-se que na maior das pirâmides de Gizé tenham 2,3 milhões de rochas, pesando entre 2 e 30 toneladas, tendo um total de 5,75 milhões de toneladas em sua construção; e cada um dos Colossos de Mênnon pesa em torno de 700 toneladas (ARMATO, 2015; ROSSNAGEL; HIGGINS; MACDONALD, 1988).

Figura 2 – (a) *Stonehenge*; (b) Pirâmides de Gizé; (c) Colossos de Mênnon



Fontes: (a) Greaney (2019); (b) Mandal (2018) e (c) Mark (2017)

Esses números elevados sugerem que tais civilizações utilizavam equipamentos de levantamento e transporte de peso, ainda que primitivos. Instrumentos como alavancas, rampas, rolos, cordas rústicas, prumos e níveis auxiliavam os trabalhadores a transportar as cargas e posicioná-las em seus devidos lugares (ROSSNAGEL; HIGGINS; MACDONALD, 1988).

O advento da polia pelos mesopotâmios por volta de 1500 a.C. para o içamento de água deu prosseguimento à história das máquinas de elevação. Entre 287 e 212 a.C., relata-se que Arquimedes de Siracusa desenvolveu um sistema de polias compostas capaz de levantar um barco de guerra inteiro. E essa foi, decerto, uma descoberta que proporcionou um grande avanço nos sistemas de levantamento. Entretanto, a lentidão e as perdas por atrito das associações de polias levaram os romanos a desenvolverem sarilhos e cabrestantes (ARMANTO, 2015).

Consequentemente, as engrenagens usadas foram aperfeiçoadas e um equipamento de grande importância foi desenvolvido: o guindaste de roda dentada. A propulsão desse mecanismo era feita por um homem que andava movimentando uma roda, acionando engrenagens, eixos e polias. Essa foi a principal máquina utilizada até o século XVII na construção de portos, catedrais e grandes construções.

A hidráulica e a fluidodinâmica foi uma área fundamental para a história dos guindastes e equipamentos afins. O conhecimento dessa área, já utilizado por gregos, romanos, chineses e egípcios na irrigação, somou-se aos estudos de Blaise Pascal de hidrodinâmica e hidrostática no século XV e deram origem aos guindastes hidráulicos (ARMANTO, 2015).

Mas foi após a Revolução Industrial, com o avanço da siderurgia e dos motores, que a parte estrutural de madeira nos equipamentos deu lugar a componentes de aço e houve uma grande evolução dos guindastes. Em 1834, surgia juntamente com o cabo de aço, o primeiro guindaste de ferro fundido; e em 1851, os guindastes passam a ser movidos a vapor. E, ainda hoje, com o progresso dos motores, sistemas eletrônicos e de controle, com o avanço na área estrutural e de projeto mecânico, os guindastes continuam a se desenvolver, chegando a ter modelos com cerca de 250 m de altura e capacidade de 20 mil toneladas (ARMANTO, 2015; GUINNESS WORLD RECORDS, 2019).

2.1.2 Conceitos e classificações

Os equipamentos de levantamento e transporte de carga são máquinas destinadas à movimentação de pesos em diferentes ambientes. Atualmente, fábricas, obras de construção civil, complexos portuários, indústrias siderúrgicas, plataformas marítimas e minas contêm essas máquinas, as quais podem exercer funções importantes em suas atividades.

Segundo Rudenko (1976), diferentemente dos equipamentos de transporte, as máquinas de elevação são caracterizadas por deslocar cargas por distâncias relativamente curtas, e são responsáveis por mover produtos acabados ou semiacabados, matéria-prima, refugos, materiais auxiliares e outros.

A operação dessas máquinas, no entanto, não consiste apenas em deslocar cargas, mas também no devido preparo para o içamento, na determinação de locais específicos de descarga e na delimitação das condições de segurança. É necessário que se tenha uma superfície adequada e estável, contra a qual o equipamento exercerá esforço para a operação. Também, um mecanismo de levantamento eficiente, capaz de fazer levantamentos seguros e controlados; pontos de fixação na carga, que permitam que ela seja manuseada sem deformações ou tensões excessivas; acessórios de içamento de qualidade apropriada e técnica de levantamento corretas (ANDERSON, 2013).

Há diferentes maneiras de se classificar um equipamento de elevação. Pode-se distingui-los pelos locais e departamentos em que eles operam nas empresas (departamentais, interdepartamentais e interoperacionais), o tipo de operação que executam (equipamentos de elevação, transportador, de superfície e elevados) (RUDENKO, 1976).

Conforme Rudenko (1976, p. 5), as seguintes definições podem ser feitas quanto ao tipo de operação efetuada por essas máquinas:

Equipamento de elevação é o grupo de máquinas com mecanismo de elevação destinado a mover cargas, principalmente em lotes.

Equipamento transportador é o grupo de máquinas que pode não ter mecanismo de elevação, movendo cargas num fluxo contínuo.

Equipamento de superfície e elevados é um grupo de máquinas que também pode não ser provido de mecanismo de elevação e que usualmente manuseia cargas em lotes.

Outro fator importante a se mencionar é o tipo de carga à qual essas máquinas se destinam, podendo ser unitárias ou a granel; sendo a carga unitária um componente único, como uma máquina ou uma parte dela, elementos de estruturas metálicas, materiais de construção e etc; e a carga a granel, constituída de um grande número ou de pedaços

homogêneos (são exemplos areia, carvão, minérios e etc) (RUDENKO, 1976).

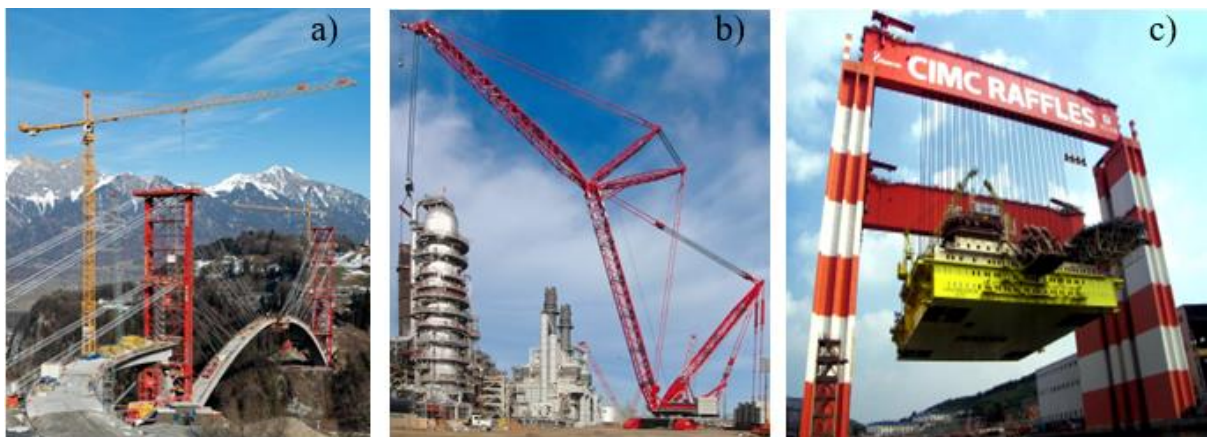
Há uma relativa dificuldade na classificação desses aparelhos, justamente por haver uma vastidão de aplicações e finalidades para as quais eles se destinam, porém, uma definição mais precisa pode ser apresentada pela literatura, como: “*Máquinas de elevação* constituem o grupo de aparelhos de ação periódica, projetado como mecanismo próprio de elevação ou para elevação e movimentação de cargas ou, ainda, como mecanismos independentes de guindastes ou elevadores.” (RUDENKO, 1976, p. 9).

2.1.3 Guindastes

Os guindastes constituem uma classe importante dos equipamentos de elevação e são responsáveis por auxiliar em atividades cruciais na economia. A importância dessas máquinas atualmente tão grande que há, inclusive, estimativas econômicas de acordo com o número de guindastes presentes nas construções das cidades (MISNER, 2014; WOOD, 2017).

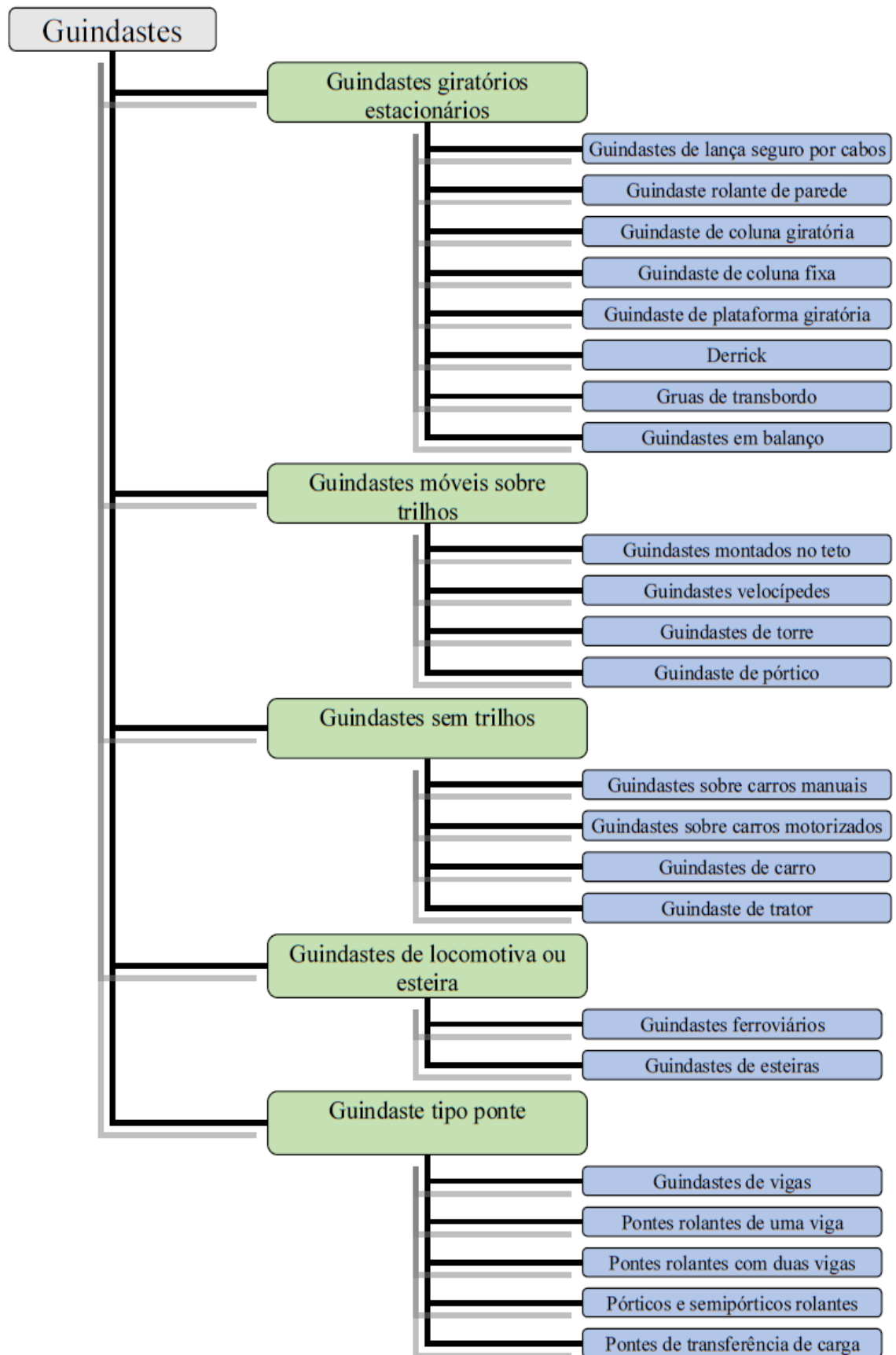
Eles podem ser definidos como equipamentos que “combinam mecanismo de elevação separados por uma estrutura para, apenas, levantar ou elevar e mover cargas, que podem estar livremente suspensas ou presas por eles” (RUDENKO, 1976, p.9). Há, ainda, diversas subdivisões que tangem a classificação dos guindastes, as quais podem ser vistas no Organograma 1. As categorias que dividem a classe dos guindastes podem ser descritas pelo modo de locomoção do equipamento e pelos mecanismos utilizados para o soerguimento. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – (a) Guindaste de torre, (b) guindaste de lagarta e (c) guindaste pórtico



Fonte: Liebherr (2019a, 2019b) e CIMC RAFFLES (2010)

Organograma 1 – Principais tipos de guindastes



Fonte: Adaptado de Rudenko (1976)

2.2 NORMALIZAÇÃO

Os equipamentos de levantamento e movimentação de cargas devem ser adequados a normas vigentes no território em que o projeto for executado e registrado. No Brasil, a norma utilizada para o cálculo desses equipamentos é a ABNT NBR 8400, que estabelece diretrizes para a avaliação quantitativa dos parâmetros referentes à estrutura e aos componentes dessas máquinas (ABNT, 1984). O enfoque dessa norma está na determinação de:

- a) Solicitações e combinações de solicitações a serem consideradas;
- b) condições de resistência dos diversos componentes do equipamento em relação às solicitações consideradas;
- c) condições de estabilidade a serem observadas (ABNT, 1984, p. 1).

2.2.1 Definições

Existem algumas definições adotadas por essa norma que, também, podem ser úteis na compreensão dos parâmetros e atividades desses equipamentos. Dentre elas, tem-se:

- a) *Carga útil*: “Carga que é sustentada pelo gancho ou outro elemento de içamento (eletroímã, caçamba, etc.).” (ABNT, 1984, p. 2).
- b) *Carga de serviço*: “Carga útil acrescida da carga dos acessórios de içamento (moitão, gancho, caçamba, etc.).” (ABNT, 1984, p. 2).
- c) *Carga permanente sobre um elemento*: “Soma das cargas das partes mecânica, estruturais e elétricas fixadas ao elemento, devidas ao peso próprio de cada parte.” (ABNT, 1984, p. 2).
- d) *Serviço intermitente*: “Serviço em que o equipamento deve efetuar deslocamentos da carga com numerosos períodos de parada durante as horas de trabalho.” (ABNT, 1984, p. 2).
- e) *Serviço intensivo*: “Serviços em que o equipamento é quase permanentemente utilizado durante as horas de trabalho, sendo os períodos de repouso muito curtos [...]” (ABNT, 1984, p. 2).
- f) *Turno*: “Período de 8 h de trabalho.” (ABNT, 1984, p. 2).
- g) *Translação*: “Deslocamento horizontal de todo o equipamento.” (ABNT, 1984, p. 2).
- h) *Direção*: “Deslocamento horizontal do carro do equipamento.” (ABNT, 1984, p. 2).
- i) *Orientação*: “Deslocamento angular horizontal da lança do equipamento” (ABNT, 1984, p. 2).

2.2.2 Classificação das estruturas dos equipamentos

A estrutura dos equipamentos de levantamento e transporte de carga são classificadas de acordo com algumas categorias que dizem respeito à natureza e à intensidade de suas operações. Com essa classificação, determinam-se as solicitações que serão consideradas no projeto. Para essa distinção, dois fatores são ponderados: a classe de utilização e o estado de carga (ABNT, 1984).

2.2.2.1 Classe de utilização da estrutura dos equipamentos

A classe de utilização dos equipamentos caracteriza a frequência com que eles são utilizados. Isso é feito devido ao fato desses equipamentos realizarem diferentes tipos de movimentos durante as suas operações e, conseqüentemente, os ciclos de manobra podem oferecer uma determinada complexidade para o cálculo de esforços individuais ao longo da estrutura. Tendo isso em vista, define-se um ciclo de levantamento como o movimento que “[...] é iniciado no instante em que a carga é içada e termina no momento em que o equipamento está em condições de iniciar o levantamento seguinte.” (ABNT, 1984, p. 6).

O número de ciclos de levantamento, por sua vez, é utilizado para definir as variações de tensões nos elementos da estrutura ou nos elementos não giratórios do equipamento com relação à fadiga. Esse número não pode ser considerado como uma garantia da vida da máquina (ABNT, 1984). A Tabela 1 apresenta o número convencional de ciclos de levantamento de acordo com as suas respectivas classes de utilização.

Tabela 1 – Classes de utilização dos equipamentos

Classe de utilização	Frequência de utilização do movimento de levantamento	Número convencional de ciclos de levantamento
A	Utilização ocasional não regular, seguida de longos períodos de repouso	$6,3 \times 10^4$
B	Utilização em serviço intermitente	$2,0 \times 10^5$
C	Utilização regular em serviço intensivo	$6,3 \times 10^5$
D	Utilização em serviço intensivo severo, efetuado, por exemplo, em turno	$2,0 \times 10^6$

Fonte: ABNT (1984)

2.2.2.2 Estado de carga

O estado de carga é caracterizado pela proporção da carga máxima com que o equipamento opera na maioria das vezes ao longo da sua vida útil. Para essa distinção, é definida uma fração “p” da carga máxima ($F/F_{\text{máx.}}$), que poderá ser igualada ou excedida no decorrer da vida útil do equipamento e essa grandeza caracteriza o grau de severidade do serviço executado pela máquina (ABNT, 1984). A Tabela 2 apresenta os estados de carga para as frações mínimas correspondentes da carga máxima com que o equipamento opera usualmente.

2.2.3 Classificação dos elementos da estrutura

O cálculo das tensões presentes nos elementos da estrutura do equipamento segue método análogo ao da caracterização da estrutura em si. Primeiramente, é definida a classe de utilização do equipamento de modo idêntico ao utilizado na estrutura e seguindo a Tabela 1.

O estado de tensões, por sua vez, é definido pela fração “p” da tensão máxima ($\sigma/\sigma_{\text{máx.}}$) a que o elemento é submetido. Os intervalos correspondentes a essas frações também podem ser vistos na Tabela 2. Essa definição complementar para as tensões se faz necessária devido ao fato de que nem todos os elementos da estrutura de um equipamento de levantamento e movimentação de cargas está submetido à mesma tensão, devido às diferentes áreas e configurações das cargas.

Tabela 2 – Estados de carga do equipamento ou dos seus elementos

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

Fonte: ABNT (1984)

2.2.4 Classificação das estruturas em grupos

Para o dimensionamento da estrutura, são aplicados determinados coeficientes e parâmetros que auxiliam no projeto do equipamento. Para a delineação dessas variáveis, os mecanismos e os elementos da estrutura são classificados em grupos que sugerem o grau de severidade a que esse componente está submetido. A Tabela 3 mostra a correlação entre as classes de utilização dos equipamentos e o estado de carga em que se encontra o conjunto ou subconjunto analisado (ABNT, 1984).

Tabela 3 – Classificação da estrutura (ou dos seus elementos) em grupos

Estado de cargas (ou estado de tensões para um elemento)	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento (ou de tensões para um elemento)			
	A	B	C	D
	$6,3 \times 10^4$	$2,0 \times 10^5$	$6,3 \times 10^5$	$2,0 \times 10^6$
0 (muito leve) P = 0	1	2	3	4
1 (leve) P = 1/3	2	3	4	5
2 (médio) P = 2/3	3	4	5	6
3 (pesado) P = 1	4	5	6	6

Fonte: ABNT (1984)

2.3 TRELIÇAS

As treliças são estruturas de grande importância na engenharia e, também, de vasta aplicação. Isso se dá devido à possibilidade de sustentação de cargas elevadas ao longo de uma grande extensão, portando, entretanto, um baixo peso. Elas são de emprego recorrente em equipamentos de levantamento por terem essas características e por apresentarem uma grande diversidade de configurações que permitem amplas maneiras de utilização e atendem a diferentes necessidades.

Segundo Beer, Johnston Junior e Eisenberg (2006, p. 286):

[...] Treliças consistem exclusivamente em elementos retos unidos em nós, localizados nas extremidades de cada elemento. Os elementos de uma treliça são, portanto, *elementos sujeitos a duas forças*, ou seja, elementos em que cada um, atuam duas forças iguais e opostas, direcionadas ao longo do elemento.

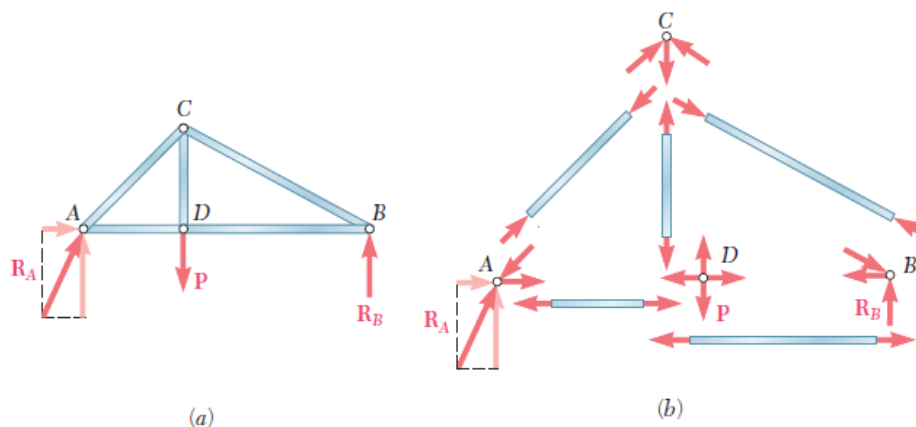
Na maioria dos casos, as treliças reais são formadas pela junção de duas treliças de forma a criar uma estrutura espacial. Porém, para casos simétricos, pode-se considerar a estrutura como bidimensional e fazer as devidas adaptações (BEER; JOHNSTON JUNIOR; EISENBERG, 2006).

Nessas estruturas, assume-se que as cargas devam ser aplicadas diretamente nos nós e não nos elementos e, embora as uniões sejam feitas por meio de conexões aparafusadas e soldas, considera-se usualmente que os elementos sejam unidos por pinos de modo ideal (BEER; JOHNSTON JUNIOR; EISENBERG, 2006).

2.3.1 Análise de treliças pelo Método dos Nós

Um dos métodos utilizados para determinar as cargas internas e externas de uma treliça é o método nós. Ele consiste em realizar um diagrama de corpo livre (DCL) de cada junção da treliça (que podem ser consideradas como pinos simplifiadamente) e analisar as cargas que incidem sobre eles. Assim, cada um dos pontos são analisados individualmente de modo a conhecer a intensidade, direção e sentido das forças que neles atuam. Esse processo é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – (a) Diagrama de corpo livre de uma treliça, (b) DCL de cada nó da treliça



Fonte: Beer *et al.* (2009)

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos teve suas origens na década de 1940, na análise estrutural de aeronaves, e o seu desenvolvimento foi intensificado nas próximas duas décadas por matemáticos aplicados, físicos e engenheiros. Mas foi o desenvolvimento computacional que impulsionou o seu progresso e acrescentou a ele complexidade e aplicabilidade. Essa evolução proporcionou a criação de diversos programas, aplicativos e recursos para o processamento de dados que revolucionaram as aplicações desse método (BATHE, 1996; CHANDRUPATLA, 2014).

Hoje, há uma variedade de *softwares* comerciais que fornecem soluções por elementos finitos e que, inclusive, podem ser integrados a plataformas CAD. Com isso, componentes cujos cálculos analíticos seriam complexos, podem ser analisados com o auxílio desses recursos com mais facilidade. Porém, essas soluções podem conter erros e a formulação desses problemas pode ser complexa, o que requer do projetista conhecimento teórico e fundamental das grandezas e dos fenômenos analisados (NORTON, 2013). E esse conhecimento envolve desde a compreensão da teoria básica, às técnicas de modelagem e aos aspectos computacionais (CHANDRUPATLA, 2014).

O método dos elementos finitos consiste em um conjunto de procedimentos numéricos destinados à resolução de equações diferenciais que modelam um sistema contínuo através de um modelo discreto (BATHE, 1996). Ele é utilizado em áreas como análise estrutural, mecânica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo, astronomia, acústica e outros (NORTON, 2013). E, hoje, é vastamente utilizado para a resolução de problemas de engenharia por meio dos recursos computacionais. Devido à possibilidade de simulação e da realização de cálculos complexos, a utilização desse método nos setores industriais possibilita a economia de recursos para a construção de protótipos, a otimização do tempo de projeto, redução do número dos ensaios e testes, resultando na diminuição dos custos ao longo da cadeia de produção.

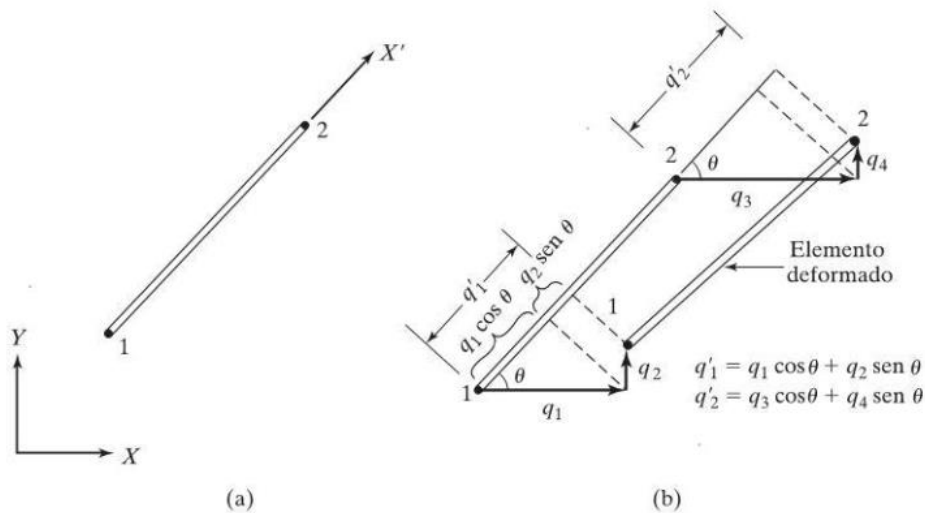
2.4.1 Análise de treliças pelo método dos elementos finitos

Para determinadas estruturas mecânicas, em que se pode realizar simplificações, há métodos específicos de formulação. No caso das treliças e outras estruturas bidimensionais, o método de rigidez direta pode ser aplicado. Ele consiste em considerar que cada elemento possui uma determinada elasticidade (linear) e que pode ser localizado em um sistema de

coordenadas local e global. Com isso, pode-se calcular as forças presentes, os deslocamentos, tensões e deflexões dos nós em treliças estaticamente determinadas e indeterminadas de modo menos dispendioso que o analítico (CHANDRUPATLA, 2014).

Para se considerar a localização dos elementos, adotam-se dois tipos de sistemas de coordenadas para a formulação de um problema: um local e um global, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Elemento de treliça 2D em sistemas de coordenadas (a) local e (b) global



Fonte: Chandrupatla (2013)

Na Figura 5, o sistema de coordenadas global é representado pelos eixos X e Y, e todas as grandezas representadas pelo símbolo (') dizem respeito ao sistema de coordenadas local. Considerando um elemento de duas forças, com as extremidades indicadas por 1 e 2, o eixo X' é o seu eixo de coordenadas local e é orientado de 1 para 2. Os deslocamentos nodais no sistema de coordenadas global são q_1 , q_2 , q_3 e q_4 ; e, no local, q'_1 e q'_2 .

O vetor deslocamento no sistema de coordenadas local é dado por:

$$\mathbf{q}' = [q'_1, q'_2]^T \quad (1)$$

E, no sistema de coordenadas global, o vetor deslocamento, $\mathbf{q}$, é expresso por:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T \quad (2)$$

Os valores dos deslocamentos nas coordenadas locais podem ser escritos como:

$$q'_1 = q_1 \cos \theta + q_2 \sin \theta \quad (3)$$

$$q'_2 = q_3 \cos \theta + q_4 \sin \theta \quad (4)$$

Sendo $l = \cos \theta$ e $m = \sin \theta$, os cossenos diretores dos ângulos que o eixo X' forma com os eixos X e Y, respectivamente, e sendo **L** a matriz de transformação dada por:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & m \end{bmatrix} \quad (5)$$

O vetor deslocamento nodal no sistema de coordenadas local pode ser expresso na forma matricial por:

$$\mathbf{q}' = \mathbf{L} \mathbf{q} \quad (6)$$

Os valores de l e m podem ser determinados pelas equações (7) e (8), considerando-se que um elemento, como na Figura 5, tenha seus nós 1 e 2 localizados nas coordenadas (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , respectivamente.

$$l = \frac{(x_2 - x_1)}{l_e} \quad (7)$$

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{l_e} \quad (8)$$

Com l_e sendo o comprimento do elemento analisado, que pode ser calculado como:

$$l_e = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

Como o elemento de treliça pode ser considerado um elemento unidimensional no

sistema de coordenadas local, a equação (10) pode ser usada para determinar a matriz de rigidez $\mathbf{k}$ do elemento no sistema de coordenadas local.

$$\mathbf{k} = \frac{E_a A_a}{l_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pode-se correlacionar as equações da energia de deformação nas coordenadas local e global para se obter a matriz de rigidez do elemento nas coordenadas globais a partir da equação (11):

$$\mathbf{k} = \frac{E_e A_e}{l_e} \begin{bmatrix} l^2 & lm & -l^2 & -lm \\ lm & m^2 & -lm & -m^2 \\ -l^2 & -lm & l^2 & lm \\ -lm & -m^2 & lm & m^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A tensão do elemento pode também ser expressa com esse método em função dos deslocamentos nodais, por meio da equação (12):

$$\sigma = \frac{E_e}{l_e} [l \quad m \quad -l \quad -m] \mathbf{q} \quad (12)$$

Adicionalmente, essas equações podem ser correlacionadas através da equação (13), em que se pode encontrar a matriz $\mathbf{F}$, que corresponde às componentes das forças aplicadas nos nós da treliça considerada.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (13)$$

É válido mencionar que os deslocamentos nodais, assim como as forças aplicadas nos nós são nomeados como se segue: o deslocamento horizontal i é chamado q_{2i-1} e o deslocamento vertical, por sua vez, é chamado de q_{2i} . As forças nesse sistema também seguem esse padrão.

2.5 AUTODESK INVENTOR®

O *Autodesk Inventor*® é um *software* de modelagem tridimensional paramétrico que agrega, também, diversos recursos auxiliares de engenharia. Ele é conhecido no mercado por apresentar uma interface e uma dinâmica de execução que procuram ser simples e intuitivas. Fundado em 1999, esse *software* teve como diferenciais as características de melhor interação com o usuário e de oferecer recursos de edição de geometria (adaptatividade) que tornava a execução de montagens consideravelmente mais rápida (ENGLISH, 2017; WAGUESPACK, 2013).

O programa conta com um grande número de recursos de projeto, de visualização de peças e montagens através de desenhos, animações e renderizações; ambientes de simulação que podem ser integrados com outros programas como o *Autodesk Nastran In-CAD*®; bibliotecas de componentes padronizados correspondentes a várias normas e outros recursos.

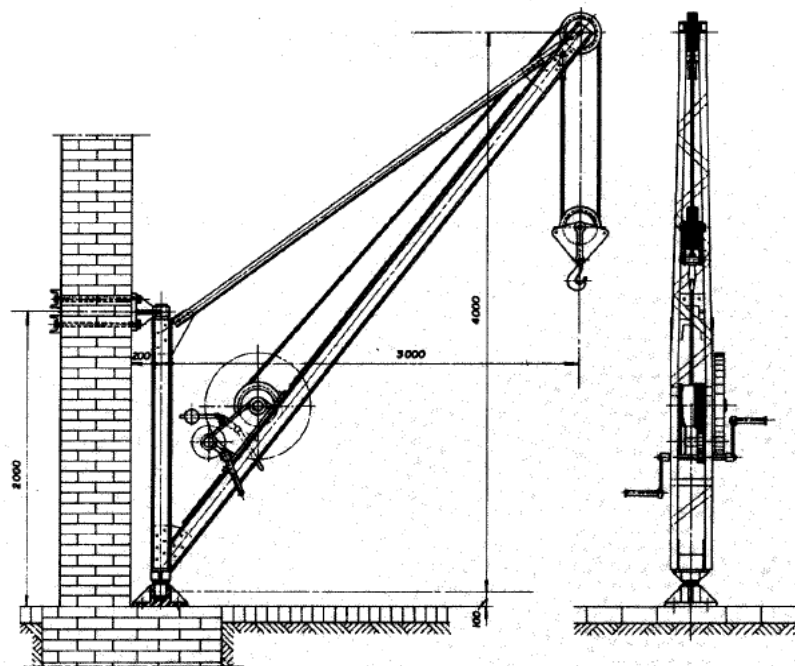
O cerne do *Autodesk Inventor*® é a modelagem através de parâmetros. A construção se inicia com um esboço bidimensional (ou tridimensional) cujos parâmetros dimensionais servirão de base para definir todo o desenho, após acionar os comandos 3D e executar as montagens. É importante que sejam indicadas as restrições e dimensões adequadas para o desenho para que os sólidos gerados sejam estáveis computacionalmente. Isso contribui consideravelmente para a posterior utilização de peças e montagens em ambientes de simulação, manufatura aditiva e em outras plataformas em que esses arquivos serão processados. Outro fator importante para a utilização desse programa é o desempenho computacional. É necessário que as configurações do computador ou plataforma utilizada sejam compatíveis com o programa. E, para o caso de montagens grandes, ou execução de outras funções que exijam um processamento elevado, é necessário que se usem técnicas adequadas para tal e, inclusive, há recursos complementares que auxiliam nesse tipo de tarefa (WAGUESPACK, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS

O guindaste giratório de parede analisado no presente trabalho tem o seu projeto original apresentado por Provenza (1976). O desenho de conjunto desse equipamento é apresentado na Figura 6 e a representação completa presente nessa literatura encontra-se no Anexo A.

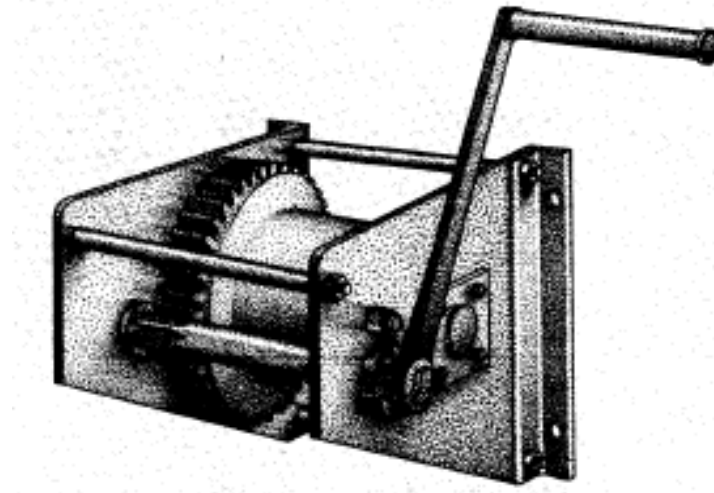
Figura 6 – Desenho de conjunto do guindaste giratório de parede



Fonte: Provenza (1976)

É válido ressaltar que o desenho completo, apesar da sua qualidade e exposição de grande parte das dimensões e geometrias, algumas delas não estão presentes; o que impeliu que algumas adaptações fossem realizadas para a construção do guindaste em ambiente virtual. Uma outra adaptação que se mostrou conveniente foi o emprego de um sarilho diferente, também proposto por Provenza (1976), representado na Figura 7 e no Anexo B por meio de seus desenhos de conjunto e de detalhes.

Figura 7 – Desenho técnico tridimensional do sarilho



Fonte: (PROVENZA, 1976)

No caso desse último equipamento, foi necessária a sua adaptação para que fosse montado adequadamente nas vigas diagonais inferiores. Por isso, todos os seus distanciadores, eixos e o tambor tiveram as suas dimensões longitudinais alteradas.

De modo geral, as adaptações foram feitas seguindo as normas ABNT e os métodos apresentados pela literatura e, também, pelos componentes presentes nas bibliotecas presentes no programa utilizado.

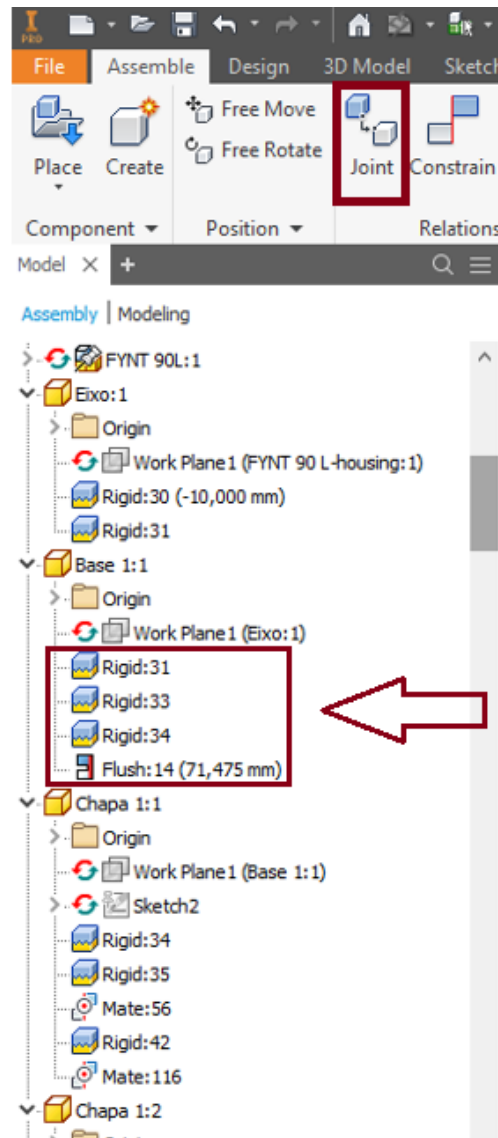
3.2 MODELAGEM DO GUINDASTE

A construção do guindaste giratório de parede foi realizada através do software *Autodesk Inventor® 2019*. A ausência de alguns parâmetros no desenho apresentado (Anexo A), fez com que diferentes estratégias fossem adotadas para essa modelagem. Dentre elas estão a criação de peças dentro do próprio ambiente de montagem, importação de peças da biblioteca do programa, modelagem de peças separadamente para posterior montagem no equipamento, criação de submontagens para posterior junção e adaptação ao equipamento principal, e importação de modelos disponibilizados pelos fabricantes, dentre outras.

Além disso, uma técnica que se mostrou bastante útil durante a criação do modelo foi a utilização do comando “*Joint*” para realizar praticamente todas as junções entre as peças, ao invés do comando “*Constraint*”. Essa escolha se deu devido a diversos erros registrados pelo programa durante a montagem utilizando este último comando. Quando se fez uso do comando “*Joint*”, a montagem foi realizada com mais estabilidade e sem erros de execução

do programa. E, ainda, esse comando tornou a modelagem mais sucinta computacionalmente, pois ele possibilita a restrição dos 6 graus de liberdade de uma junção com apenas um comando (o que para o comando “*Constraint*” seriam três comando a cada junção, aumentando muito a complexidade e o desempenho computacional do conjunto).

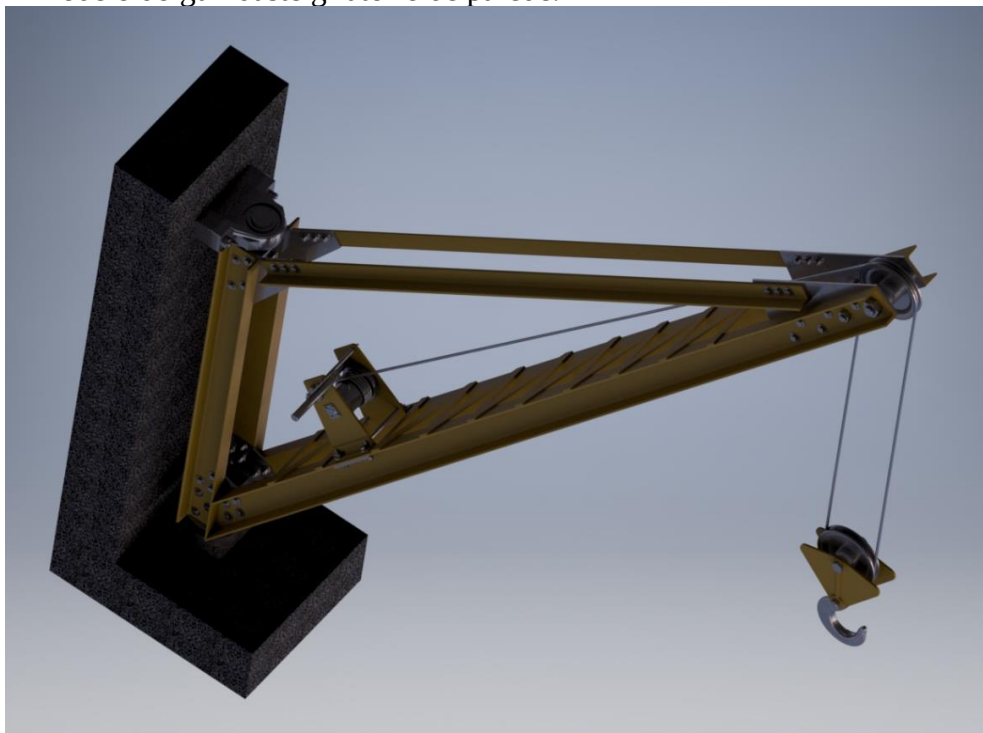
Figura 8 – Montagem feita utilizando o comando “*Joint*”.



Fonte: O Autor

Depois da construção de todas as peças e da realização da montagem, o guindaste giratório de parede foi finalizado, como mostra a Figura 8.

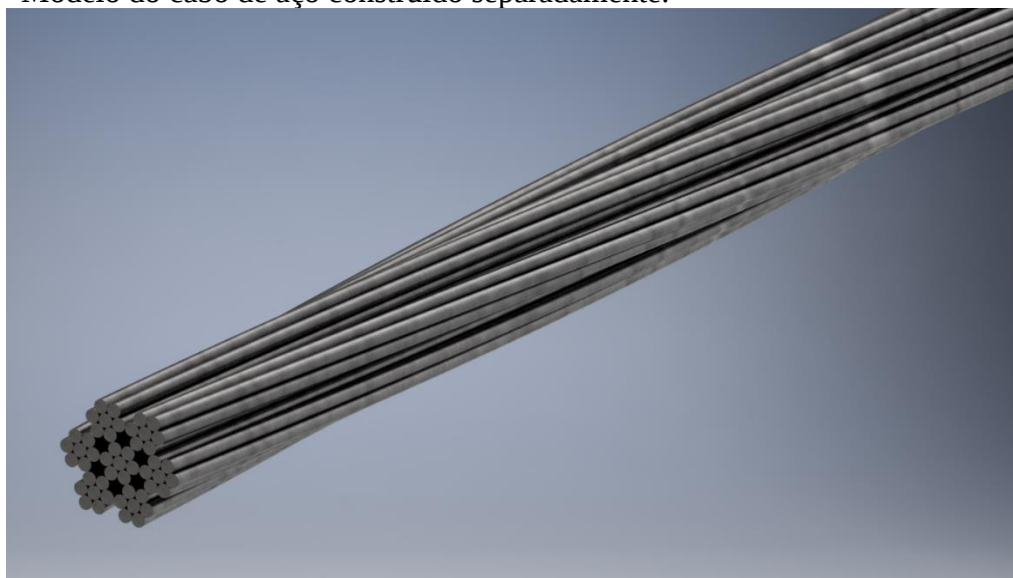
Figura 9 – Modelo do guindaste giratório de parede.



Fonte: O Autor

Foi realizado, também, um modelo do cabo de aço empregado no equipamento, isso porque o modelo utilizado no guindaste foi de seção circular simples, pois o computador utilizado não processou o cabo de aço proposto dentro do ambiente de montagem, o que fez com que ele precisasse ser modelado separadamente.

Figura 10 – Modelo do cabo de aço construído separadamente.

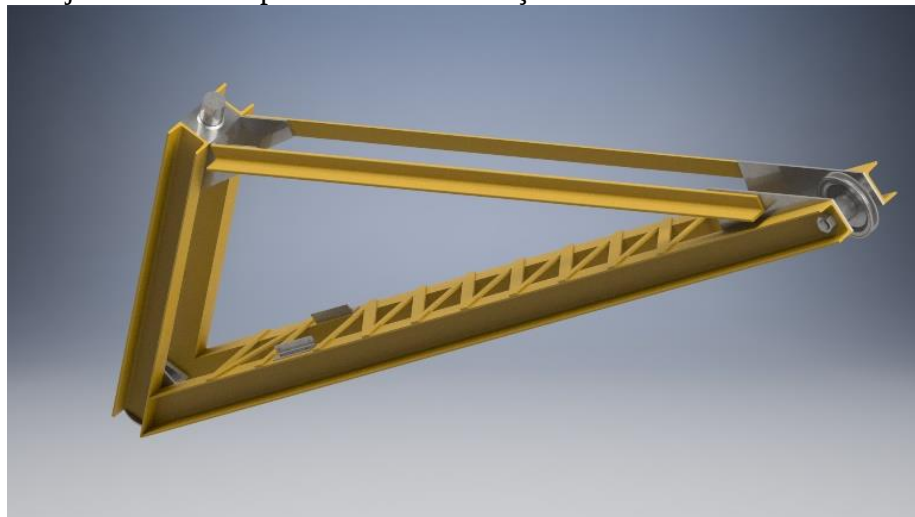


Fonte: O Autor

3.3 SIMULAÇÕES

Foram conduzidas simulações computacionais por elementos finitos na estrutura principal do guindaste. Primeiramente, um modelo da estrutura principal do guindaste foi construído separadamente para se realizar as simulações. Além das peças externas à estrutura, foram retirados furos, parafusos, porcas, arruelas e outros componentes que poderiam concentrar tensão e dar maior complexidade à malha de elementos finitos, diminuindo o número de elementos, nós e contatos. Com isso, o modelo foi composto apenas por um subconjunto, consistindo nas vigas em L e em U, os reforços estruturais que as unem, as bases rotativas inferior e superior, as chapas e a polia juntamente com o seu eixo. Desse modo um componente mais simplificado pode ser obtido, contribuindo para otimizar a simulação.

Figura 11 – Subconjunto utilizado para fazer as simulações estruturais estáticas.

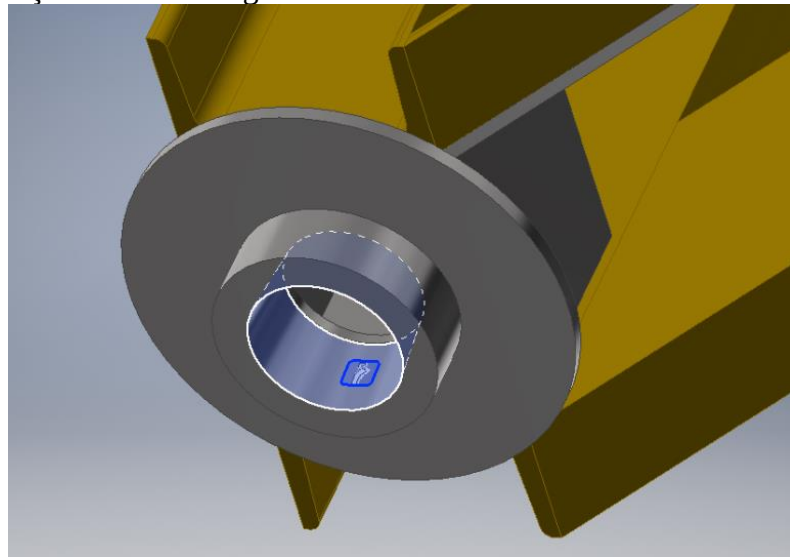


Fonte: O Autor

A simulação foi conduzida assumindo que a restrição na base rotativa inferior é fixa (Figura 12). Essa restrição impõe que não haja movimento e nem rotação em relação a nenhuma coordenada. Também, foi designada uma restrição do tipo pinada na base rotativa superior, não havendo fixação apenas da coordenada vertical da sua base (Figura 13).

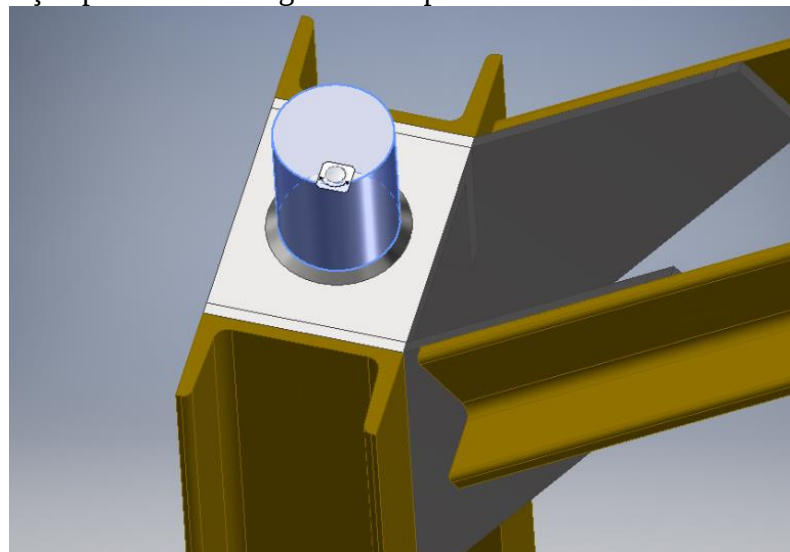
Definidas as restrições, foi gerada uma malha de elementos finitos do tipo mista de elementos sólidos com 109.861 nós e 51.902 elementos. Também foram gerados 85 contatos do tipo “colados” (contatos com nenhuma separação, escorregamento ou amortecimento) para propósitos de simplificação. A Figura 14 mostra a malha de elementos finitos gerada.

Figura 12 – Restrição fixa na base giratória inferior.



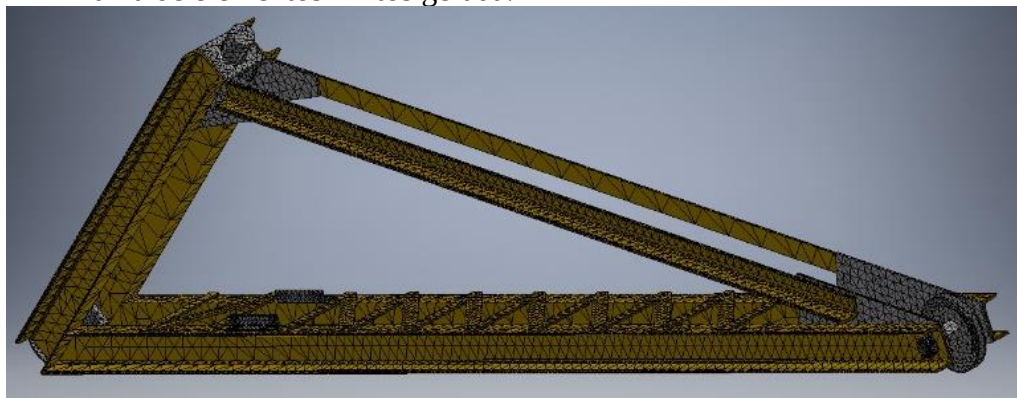
Fonte: O Autor

Figura 13 – Restrição pinada na base giratória superior.



Fonte: O Autor

Figura 14 – Malha de elementos finitos gerada.



Fonte: O Autor

Uma força de módulo 19620 N (aproximadamente, 2000 kgf, que é a carga nominal do equipamento) foi aplicada na superfície da polia em que há o contato com o cabo de aço, o canal. A direção dessa força foi vertical e o seu sentido, orientado para baixo (sentido “-Z” do modelo), considerando que o peso da carga nominal fosse aplicado por inteiro nessa área (Figura 15). Sabe-se, no entanto, que, no funcionamento real do equipamento, essa força é distribuída de outra maneira através do cabo de aço, porém, esse modelo foi utilizado para efeitos de simplificação e para que a estrutura pudesse ser analisada separadamente. Além disso, essa modelagem é mais adequada às considerações do método analítico utilizado.

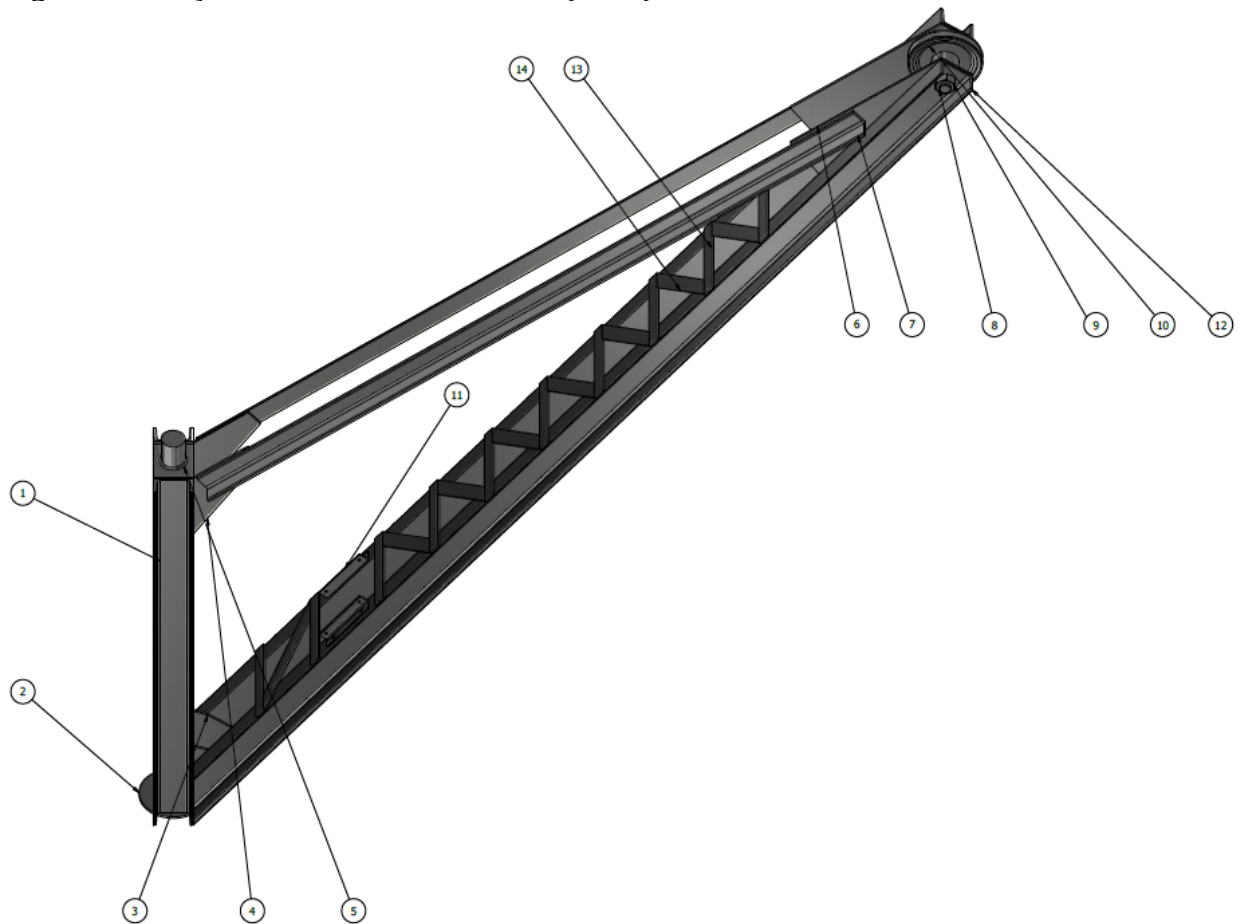
Figura 15 – Aplicação da força correspondente à carga nominal.



Fonte: O Autor

As áreas das seções transversais das vigas principais, em U e em L, dessa estrutura foram obtidas através do *software* e medem, respectivamente, 3091,754 mm² e 1784,186 mm². Os materiais atribuídos, as peças que constituem a estrutura, a massa de cada uma delas são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Figura 16 – Peças constituintes da estrutura principal.



Fonte: O Autor

Tabela 4 – Lista de peças do modelo da estrutura principal – massa, material e normas.

LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QUANTIDADE	DENOMINAÇÃO	MATERIAL
1	2	Cantoneira: AISC - MC 6 x 16,3	Aço Estrutural
2	1	Base 1	Aço Estrutural
3	2	Chapa 1	Aço Estrutural
4	2	Chapa 2	Aço Estrutural
5	1	Base 2	Aço Estrutural
6	2	Chapa 3	Aço Estrutural
7	2	Cantoneira: AISC - L 3 x 3 x 1/2	Aço Estrutural
8	1	Eixo	Aço Estrutural
9	1	Porca: BS 3692 - M45	Aço Estrutural
10	1	Polia	Aço Estrutural
11	2	Cantoneira	Aço Estrutural
12	1	Viga diagonal	Aço Estrutural
13	10	Chapa 5	Aço Estrutural
14	8	Chapa 6	Aço Estrutural

Fonte: O Autor

Tabela 5 – Propriedades físicas da liga do aço estrutural empregado

Comportamento	Isotrópico
Coeficiente de Poisson	0,3
Densidade	7722,69 kg/m ³
Módulo de Young	204,98 GPa
Módulo de Cisalhamento	79,98 GPa
Tensão de escoamento	250,00 MPa
Tensão última à tração	400,03 MPa

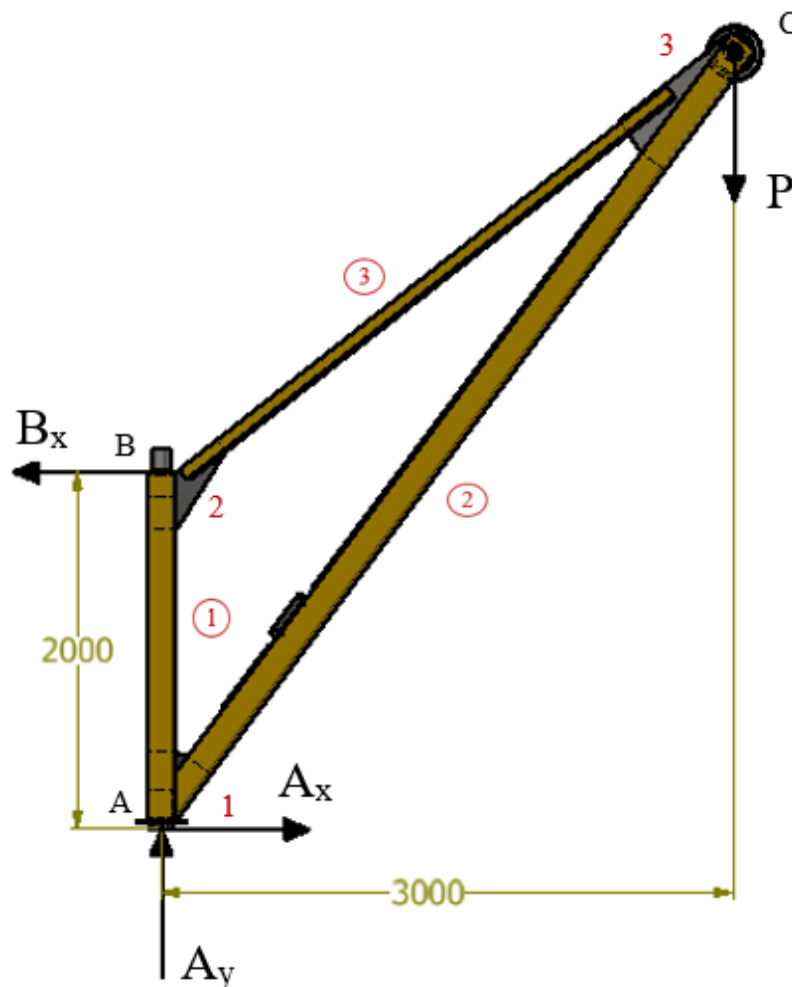
Fonte: O Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MÉTODO DOS NÓS

O primeiro modelo utilizado foi baseado em uma análise da condição estática do guindaste, suportando a carga nominal de 19620 N (2000 kgf). Foi considerada a estrutura como uma treliça com forças de reação vertical e horizontal (A_x e A_y) na base giratória inferior, ponto A, e uma reação horizontal (B_x) na base giratória superior, ponto B. Foram delimitadas apenas três reações para que o sistema fosse estaticamente determinado. O ponto de aplicação da carga, P, é representado pelo ponto C da treliça. Os pontos, cargas e dimensões (em mm) são representados na Figura 17.

Figura 17 – Modelo da estrutura considerada treliçada.



Fonte: O Autor

Respeitando-se a condição estática da estrutura e realizando-se os somatórios de forças nas direções vertical e horizontal e de momentos em relação a um dos pontos, obtém-se as forças mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Forças e tensões encontradas no modelo analítico.

Forças de reação na estrutura	A_x	29.430,00 N
	A_y	19.620,00 N
	B_x	29.430,00 N
Forças nos elementos da treliça	F_{ab}	19.619,85 N
	F_{ac}	-49.049,88 N
	F_{bc}	35.370,25 N
Tensões nos elementos da treliça	σ_{ab}	3,17 MPa
	σ_{ac}	-7,93 MPa
	σ_{bc}	9,91 MPa

Fonte: O Autor

4.2 MÉTODO DE RIGIDEZ DIRETA

O Método de Rigidez Direta foi utilizado assumindo, da mesma maneira que no Método dos Nós, que a estrutura pode ser considerada como treliçada. Na Figura 17, os números em vermelho nas extremidades dos elementos representam os nós do modelo e os números circulados, os elementos. Da geometria do equipamento, as coordenadas dos nós são dadas na Tabela 7:

Tabela 7 - Coordenadas dos nós da estrutura considerada treliçada.

Nó	x [mm]	y [mm]
1	0	0
2	3000	4000
3	0	2000

Fonte: O Autor

Para correlacionar as coordenadas locais e globais, construiu-se a tabela de conectividade da treliça.

Tabela 8 - Tabela de conectividade dos elementos

Elemento	1	2
①	1	3
②	1	2
③	3	2

Fonte: O Autor

Os valores dos cossenos diretores de cada um dos elementos, dados pelas Equações 7 e 8, respectivamente, juntamente com seus comprimentos, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Comprimentos e cossenos diretores dos elementos.

Elemento	le [mm]	l	m
①	2000	0	1
②	5000	0,6	0,8
③	3605,55	0,83	0,55

Fonte: O Autor

$$\mathbf{k}^1 = 10^5 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6,1835 & 0 & -6,1835 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6,1835 & 0 & 6,1835 \end{bmatrix} \text{ N/mm} \quad (14)$$

$$\mathbf{k}^2 = 10^5 \begin{bmatrix} 0,8904 & 1,1872 & -0,8904 & -1,1872 \\ 1,1872 & 1,5830 & -1,1872 & -1,5830 \\ -0,8904 & -1,1872 & 0,8904 & 1,1872 \\ -1,1872 & -1,5830 & 1,1872 & 1,5830 \end{bmatrix} \text{ N/mm} \quad (15)$$

$$\mathbf{k}^3 = 10^5 \begin{bmatrix} 1,3658 & 0,9036 & -1,3658 & -0,9036 \\ 0,9036 & 0,5988 & -0,9036 & -0,5988 \\ -1,3658 & -0,9036 & 1,3658 & 0,9036 \\ -0,9036 & -0,5988 & 0,9036 & 0,5988 \end{bmatrix} \text{ N/mm} \quad (16)$$

Com esses dados e com as propriedades dos materiais e da geometria dos elementos, pode-se obter a matriz de rigidez dos três elementos através da equação (11). Os cálculos foram realizados com o auxílio do software MATLAB.

A matriz de rigidez estrutural é calculada a partir da matriz de rigidez dos elementos, somando os membros que estão associados aos mesmos graus de liberdade. Essa matriz é dada pela equação (17).

$$\mathbf{K} = 10^5 \begin{bmatrix} 0,4452 & 0,5936 & -0,4452 & -0,5936 & 0 & 0 \\ 0,5936 & 3,8833 & -0,5936 & -0,7915 & 0 & -3,0918 \\ -0,4452 & -0,5936 & 1,6285 & 1,3765 & -1,1833 & -0,7829 \\ -0,5936 & -0,7915 & 1,3765 & 1,3103 & -0,7827 & -0,5188 \\ 0 & 0 & -1,8833 & -0,7829 & 1,1833 & 0,7829 \\ 0 & -3,0918 & -0,7829 & -0,5188 & 0,7829 & 3,6106 \end{bmatrix} \text{ N/mm} \quad (17)$$

Pode-se utilizar a equação (13) para calcular os deslocamentos. Para isso, será utilizado o Método da Eliminação para suprimir as linhas e colunas 1, 2, 5 e 6, pois os deslocamentos correspondentes a esses graus de liberdade são nulos, pela restrição adotada previamente no modelo. Com isso, aplicando os valores encontrados na equação (13), obtém-se a equação (18):

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{Bmatrix} \text{ mm} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,7847 \\ -0,8334 \\ 0 \\ 0,0310 \end{Bmatrix} \text{ mm} \quad (18)$$

Aplicando-se os valores encontrados na equação (12), respeitando-se as devidas correspondências entre os graus de liberdade, obtém-se as seguintes tensões nos elementos:

Tabela 10. Tensões nos elementos obtidas pelo Método de Rigidez Direta.

$\sigma_{ab} = \sigma_1$	3,1000 MPa
$\sigma_{ac} = \sigma_2$	-7,8360 MPa
$\sigma_{bc} = \sigma_3$	9,7561 MPa

Fonte: O Autor

De modo análogo, as forças de reação nos apoios podem ser calculadas utilizando o Método da Eliminação. Desta vez, serão suprimidas as linhas e colunas correspondentes aos graus de liberdade 3, 4, 6, pois não há restrições de apoios nesses graus de liberdade. Utilizando a equação (13) com essas considerações, obtém-se os seguintes valores para as reações de apoio.

Tabela 11. Forças de reação nos apoios obtidos pelo Método de Rigidez Direta.

$A_x = R_1$	29.072 N
$A_y = R_2$	19.599 N
$B_x = R_5$	-29.067 N

Fonte: O Autor

4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.3.1 Análise da estrutura principal

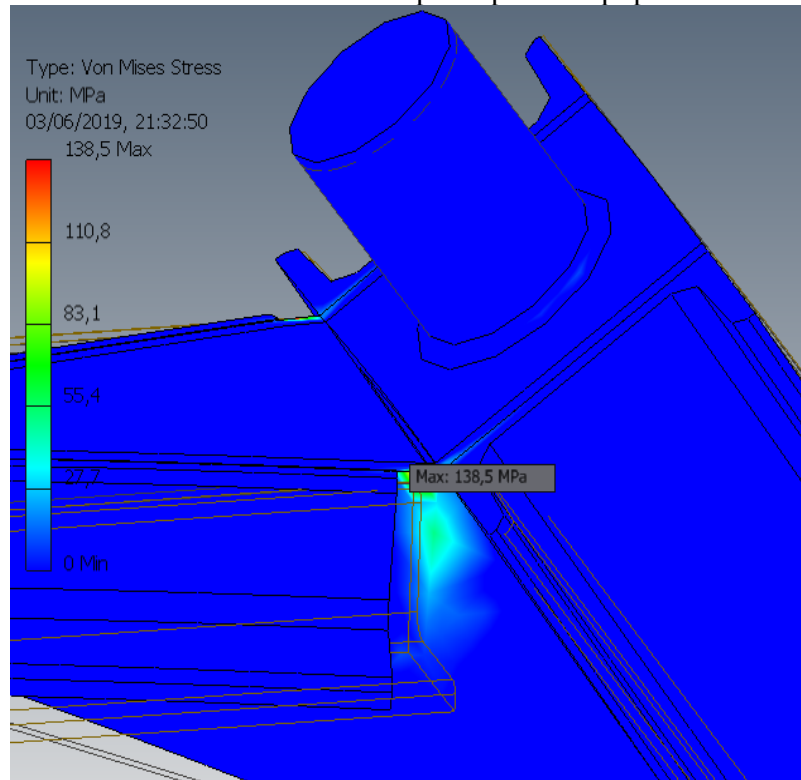
Através do modelo proposto para as simulações numéricas, foram obtidas algumas grandezas referentes ao comportamento estático da estrutura sob a aplicação da carga nominal do guindaste. Foi obtida a tensão de von Mises máxima de 138.5 MPa, o que ainda é menor que tensão de escoamento máxima do material da placa metálica em que essa tensão ocorreu (250 MPa). Esse valor, porém, representa a tensão em um ponto de alta concentração de tensão, devido à extremidade pontiaguda da placa (Figura 18). Outro fator que pode fazer com que esse pico de tensão ocorra é o fato de que os contatos (do tipo “*Bounded*”, ou “Colados”) foram configurados para que a estrutura se comporte como um só corpo, em termos práticos. Isso é ligeiramente diferente do comportamento da estrutura real, em que há determinados graus de deslocamento nos contatos, além de amortecimentos. Isso, de um modo geral, faz com que se eleve a tensão máxima nesse ponto, ou nessa região.

Isso pode ser atenuado com uma geometria de arredondamento (que pode ser realizado em um modelo real através de um procedimento de usinagem relativamente simples). De modo geral, as tensões apresentaram um valor bem abaixo do escoamento do material, como será visto posteriormente, indicando a viabilidade da estrutura para a condição estática.

É importante ressaltar que uma delineação mais completa da viabilidade de todo o projeto deveria conter uma análise do comportamento dinâmico da estrutura, incluindo análise

de fadiga em diversos componentes. Entretanto, como os métodos analíticos utilizados dizem respeito ao comportamento estático da estrutura, apenas esse tipo de simulação foi realizada, com o intuito de verificar a aderência desses métodos entre si.

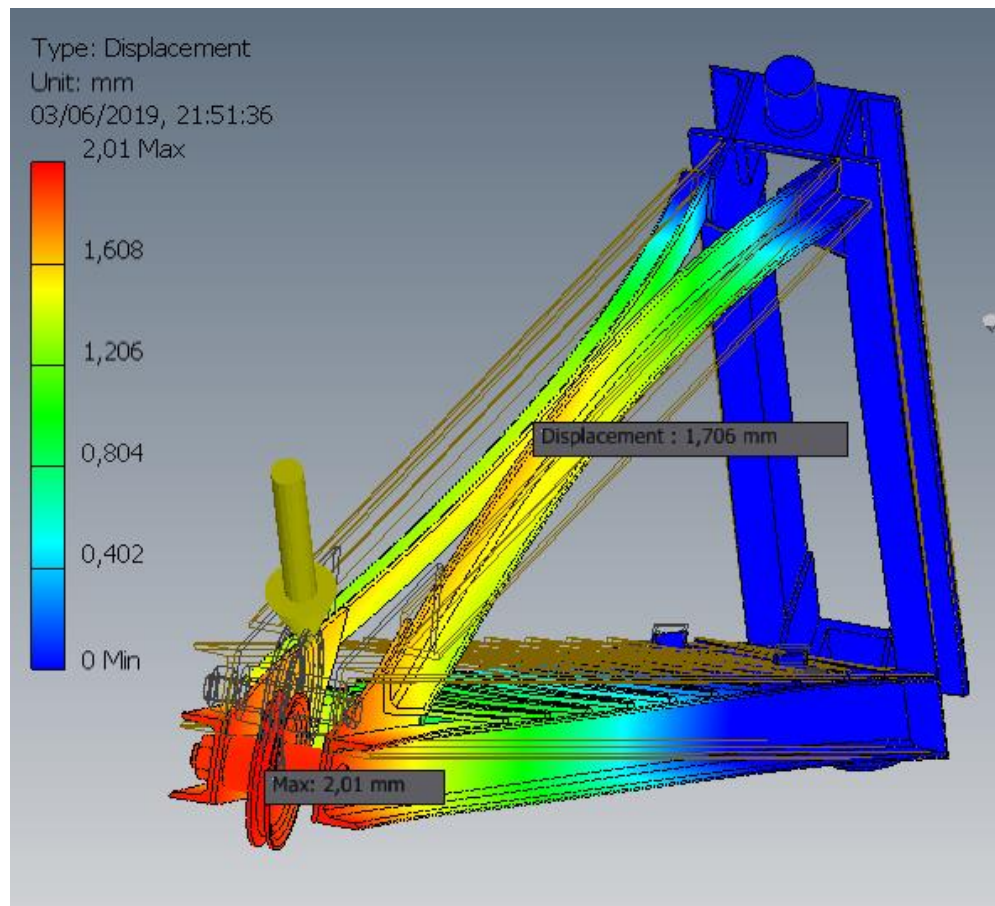
Figura 18 – Tensão máxima obtida na estrutura principal do equipamento.



Fonte: O Autor

Outra grandeza analisada foi o deslocamento dos pontos da estrutura. O valor máximo de 2,01 mm foi encontrado na região da polia, onde foi aplicada a carga máxima. Isso é esperado, devido ao próprio ponto de aplicação da força e à geometria do guindaste. Porém, em alguns pontos das vigas em L, na parte superior do equipamento, os deslocamentos foram próximos ao valor máximo, indicando uma possível criticidade, para situações mais severas, como a de carregamento dinâmico, ou para carregamentos maiores, caso a carga nominal seja aumentada em projetos posteriores.

Figura 19 – Deslocamentos na estrutura do guindaste.



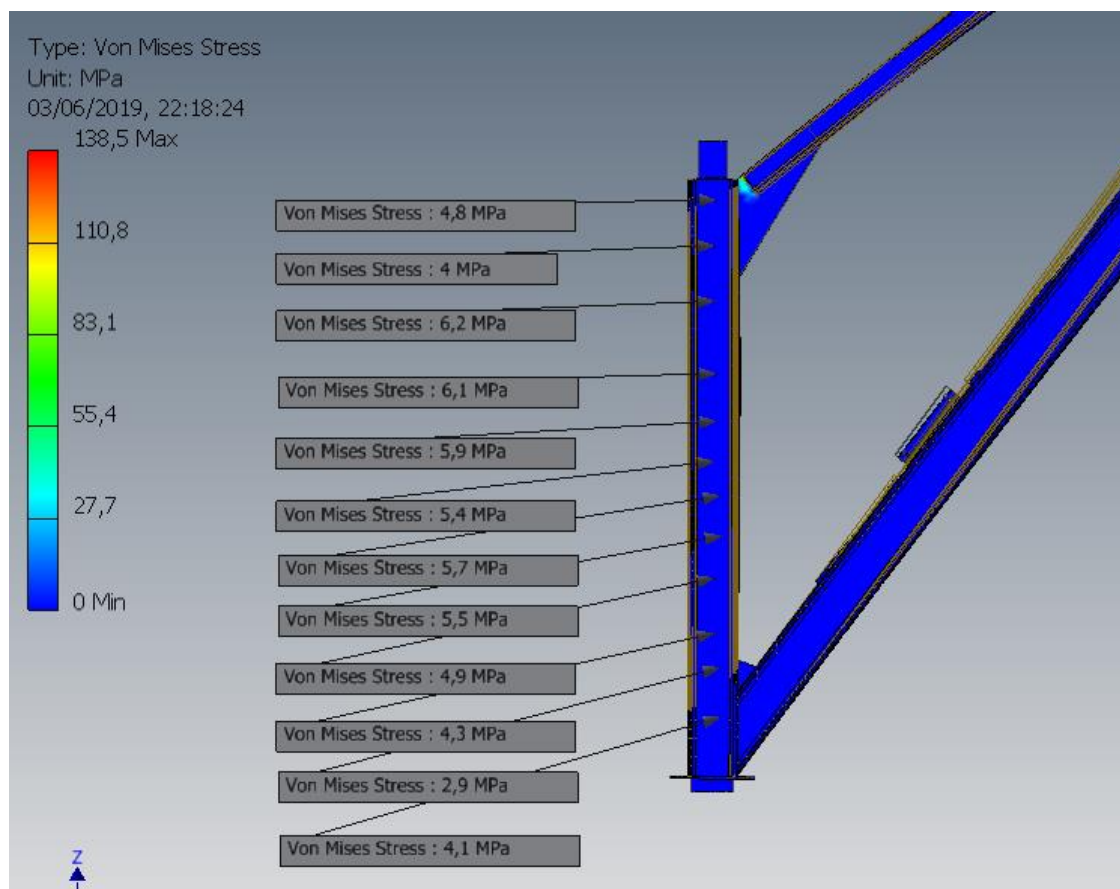
Fonte: O Autor

4.3.2 Análise dos Elementos da Estrutura Principal

Para a análise dos elementos da treliça, foram tomados valores de tensões ao longo dos elementos estruturais para que o resultado não fosse comparado apenas com uma medida de tensão isoladamente. Foram tomadas 10, 20 e 15 medidas pontuais nos elementos 1, 2 e 3, respectivamente. O número de medidas foi diferente para que as tensões fossem avaliadas em toda a extensão lateral do elemento.

No elemento 1, as tensões de von Mises apresentaram uma média de 4,73 MPa, o que se mostrou razoavelmente próximo do valor obtido pelo Método dos Nós (3,17 MPa), porém as tensões aumentaram na parte superior da viga, devido à força que a viga superior e os suportes fizeram nessa região (Figura 16).

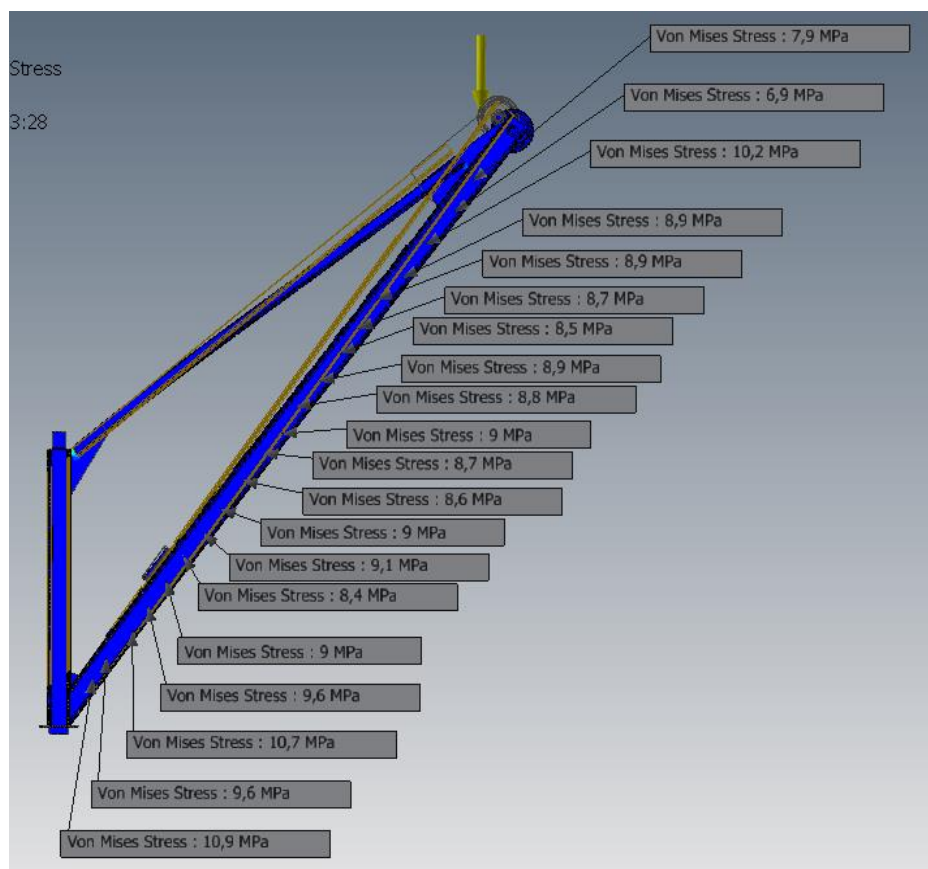
Figura 20. Medidas das 10 tensões pontuais tomadas no elemento 1.



Fonte: O Autor

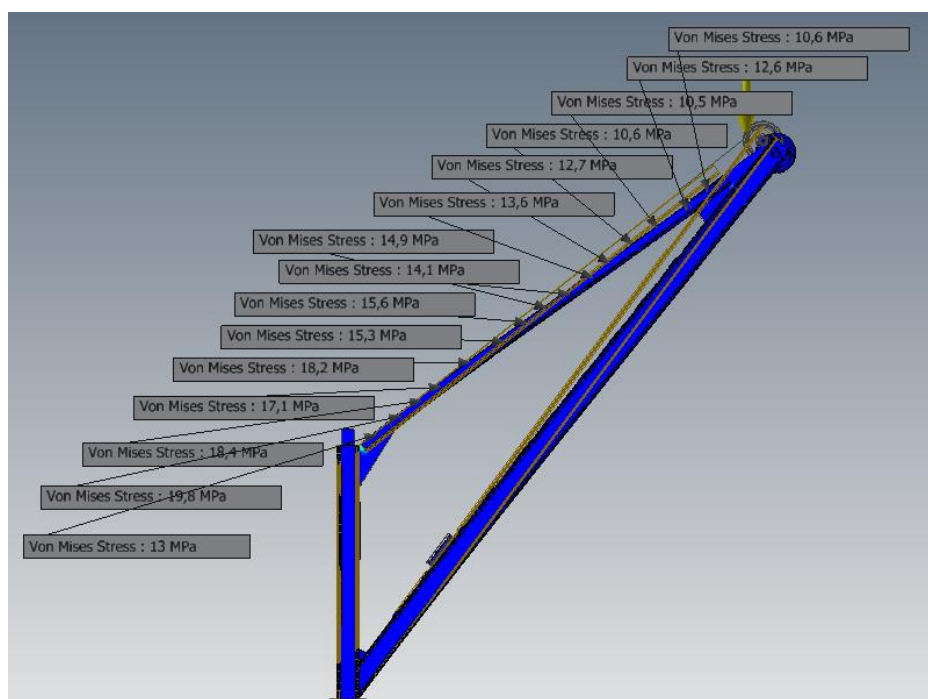
A viga diagonal inferior também apresentou comportamento similar, tendo forças maiores na região próximas ao ponto de aplicação de carga, como pode ser visto na Figura 17, bem como na viga em L. Neste último caso, as tensões diferiram ainda mais.

Figura 21 – Medidas das 20 tensões pontuais tomadas no elemento 2.



Fonte: O Autor

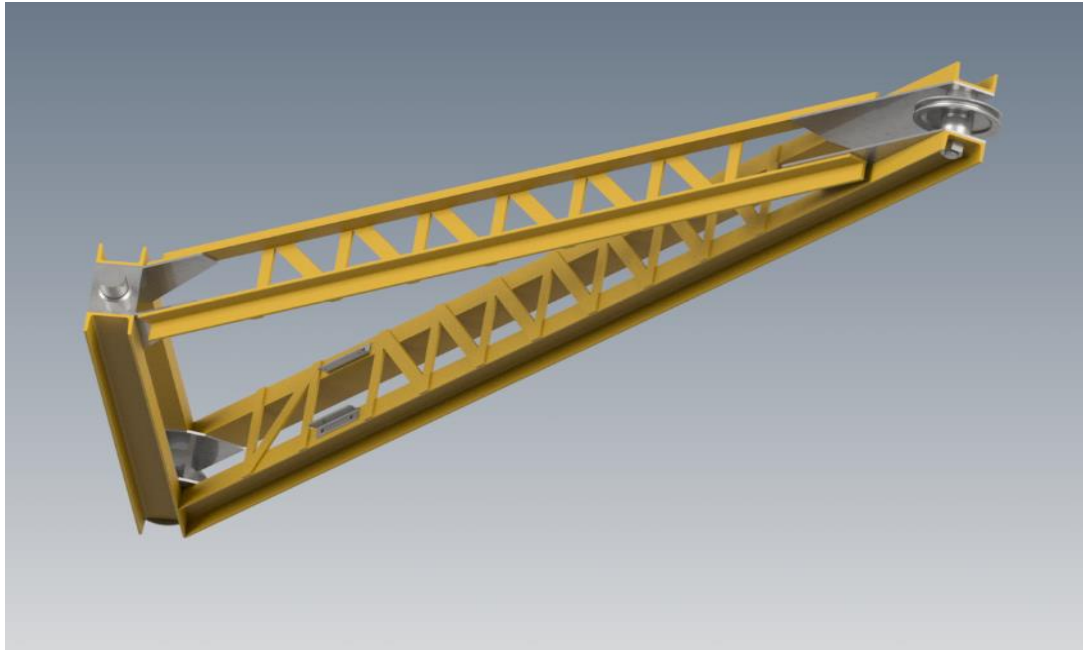
Figura 22 – Medidas das 15 tensões pontuais tomadas no elemento 3.



Fonte: O Autor

Esses resultados fizeram com que uma alteração fosse proposta ao projeto, que seria a colocação de reforços estruturais também nas vigas em L, os quais seriam soldados em sua parte inferior. O resultado da alteração é mostrado na Figura 16.

Figura 23 – Estrutura principal do guindaste após a alteração proposta.



Fonte: O Autor

O procedimento anterior foi realizado novamente e os resultados foram melhorados consideravelmente, como pode ser mostrado na Tabela 12, com a apresentação dos resultados dos métodos aplicados até então. Isso ocorreu porque a colocação desses reforços abaixo das vigas em L faz com que a estrutura tenha um comportamento mais próximo ao bidimensional, ocorrendo menos deformações laterais. Além disso, esses reforços diminuem o risco de deslocamentos maiores na extensão das vigas e tornam as suas variações de tensão mais brandas.

Tabela 12 – Tensões de Von Mises encontradas pelos diferentes métodos.

Elementos	Tensões de Von Mises [MPa]			
	Método dos Nós	MRD	MEF 1	MEF 2
1	3,17	3,10	4,73	3,13
2	7,93	7,84	9,02	8,27
3	9,91	9,76	14,47	12,36

Fonte: O Autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho, foi construído um guindaste giratório de parede com o auxílio do *software Autodesk Inventor®*. A modelagem contou com determinadas estratégias para lidar com uma montagem com um número relativamente elevado de peças. Foi necessário o uso do comando “*Joint*” para a junção da maior parte das peças, para evitar erros no funcionamento do programa. E a construção do cabo de aço precisou ser feita separadamente também por limitações computacionais.

Para a realização das análises, foi feita uma simulação estrutural estática em um subconjunto que representa uma delimitação da estrutura principal do guindaste. Foi feito um levantamento das tensões para cada elemento estrutural dos seus pontos de tensão. Verificou-se uma determinada concentração de tensão principalmente nas partes mais próximas ao carregamento e aos concentradores de tensão. Porém, em termos médios, as tensões se aproximaram aos valores obtidos pelo Método de Rigidez Direto e pelo Método dos Nós.

O Método dos Nós proveu um resultado bem próximo ao Método de Rigidez Direta. Porém esses valores não se aproximaram tanto ao caso do guindaste sem o acréscimo de reforços estruturais nas vigas diagonais superiores. Essa mudança foi necessária para que o equipamento apresentasse, com um todo, um comportamento próximo ao da estrutura bidimensional, cujo modelo é utilizado nos dois métodos. Com isso, os resultados numéricos se aproximaram mais dos que foram obtidos pelos métodos em questão. Isso mostrou a eficiência dos valores obtidos pelas simulações numéricas, quando os reforços estruturais foram acrescentados ao guindaste, constituindo, assim, uma proposta de melhoria no projeto.

Propõe-se para trabalhos posteriores os seguintes tópicos:

- A verificação das condições cinemáticas do guindaste, por meio de simulações dinâmicas e modais, visando também a verificar as condições de estabilidade da estrutura;
- A simulação dos elementos de máquinas individualmente, como os rolamentos, o cabo de aço, eixos e engrenagens, para verificar – nas condições de operação – a vida e as condições de operação e segurança dessas peças;
- Uma proposição de uma forma de simular o cabo de aço, de maneira que seu comportamento sob tensão fosse respeitado, configurando-se todos os seus contatos e a transferência de tensão ao longo do seu arranjo helicoidal;
- Cálculo dos seus elementos de máquinas básicos, como eixos, chavetas, parafusos, etc.

REFERÊNCIAS

- ADAMIEC-WÓJCIK, I.; DRAĞ, Ł.; WOJCIECH, S. Application of the rigid finite element method to static analysis of lattice-boom cranes. **International Journal of Applied Mechanics And Engineering**, Poland, p. 803-811. jun. 2018.
- ANDERSON, J. K. **Rigging engineering basics**. 2.ed. Woodland: Iti Bookstore, 2013.
- ANON, A. New thinking in mobile crane design. **Cargo Systems International**. Surrey, p. 81-87, jun. 1978.
- ARMATO, Peter. **History of the crane**: how we got to hydraulic cranes: the history behind cranes, 2015. Disponível em: <http://hbrown.com/cranes-rigging-blog/hydraulic-cranes/history-crane-got-hydraulic-cranes/>. Acesso em: 19 fev. 2019.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite element procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- BEER, Ferdinand P. *et al.* **Vector mechanics for engineers**: statics and dynamics. 9.ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JUNIOR, E. Russel; EISENBERG, Elliot R. **Mecânica vetorial para engenheiros**: estática. 7.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2006.
- CIMC RAFFLES (org.). **Taisun**: world record breaking "Taisun" crane-20000T. 2010. Disponível em: http://www.cimc-raffles.com/en/enterprise/raffles/ability/production/taisun/201009/t20100917_7972.shtml. Acesso em: 22 fev. 2019.
- CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELENGUDU, Ashok D. **Elementos finitos**. 4.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- DELIĆ, M.; ČOLIĆ, M.; MELIĆ, E. Analytical calculation and FEM analysis main girder double girder bridge crane. **Technology, Education, Management, Informatics Journal**, Sarajevo, p. 48-52. fev. 2017.
- GERDEMELI, I.; KURT, S.; TASDEMIR, B. Design and analysis with finite element method of jib crane. **Scientific Proceedings IX International Congress "machines, Technologies, Materials"**, Varna, p. 103-106, set. 2012.
- GREANEY, Susan. **History of Stonehenge**. Disponível em: <https://www.english-heritage.org.uk/visit/places/stonehenge/history-and-stories/history/>. Acesso em: 19 fev. 2019.
- GUINNESS WORLD RECORDS (org.). **Heaviest weight lifted by a crane**. Disponível em: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/heaviest-weight-lifted-by-a-crane>. Acesso em: 19 fev. 2019.
- KOO, B.; CHANG, S.; KANG, S. Natural mode analysis of a telescopic boom system with multiple sections using the Rayleigh-Ritz method. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, Seoul, p. 1677-1684, jan. 2018.

LIEBHERR. **LR 13000**: crawler crane. Disponível em: <https://www.liebherr.com/en/deu/products/mobile-and-crawler-cranes/crawler-cranes/lr-crawler-cranes/details/lr13000.html>. Acesso em: 22 fev. 2019.

LIEBHERR. **Tower cranes**. Disponível em: <https://www.liebherr.com/shared/media/construction-machinery/tower-cranes/brochures/tower-cranes/tower-cranes-en.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2019.

LIU, P.; XING, L.; LIU, Y. Strength analysis and optimal design for main girder of double-trolley overhead traveling crane using finite element method. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, Ohio, p. 76-86, fev. 2014.

MANDAL, Dattatreya. **10 incredible things you should know about the great pyramid of Giza**, 2018. Disponível em: <https://www.realmofhistory.com/2018/10/15/facts-great-pyramid-of-giza/>. Acesso em: 19 fev. 2019.

MARK, Joshua J. **Colossi of memnon**. 2017. Ancient History Encyclopedia. Disponível em: https://www.ancient.eu/Colossi_of_Memnon/. Acesso em: 19 fev. 2019.

MENG, D.; LI, G.; TAN, D. Finite element analysis on crane girder with variable cross sections based on Ansys. **Sensors & Transducers Journal**. Hubei, p. 85-88, maio 2013.

MISNER, Ivan. **A flock of cranes!** 2014. Disponível em: <https://ivanmisner.com/cranes-horizon-signal-economic-growth/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

NORTON, Roberto L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de máquinas**. 47. ed. São Paulo: Editora F. Provenza, 1996.

ROSSNAGEL, W. E.; HIGGINS, Lindley R.; MACDONALD, Joseph A. **Handbook of rigging for construction and industrial operations**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

RUDENKO, N. **Máquinas de elevação e transporte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976.

SKF. **Unidades flangeadas de rolamentos de rolos, para eixos métricos: FYNT 90 L**. Disponível em: <http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/bearing-units/roller-bearing-units/metric/flanged/index.html?designation=FYNT%2090%20L>. Acesso em: 10 dez. 2018.

TRĄBKA, A. Influence of flexibilities of cranes structural components on load trajectory. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Seoul, p. 1-14. jan. 2016.

WAGUESPACK, Curtis. **Mastering autodesk inventor 2014 and autodesk inventor lt 2014**. Indianapolis: John Wiley & Sons, 2013.

WOOD, Zoe. **Crane spotters predict leaner times for UK builders**, 2017. Disponível em: <https://www.theguardian.com/business/2017/aug/07/uk-construction-industry-facing-slowest->

growth-six-years. Acesso em: 21 fev. 2019.

YAO, Jia; QIU, Xiaoming; ZHOU, Zhenping. Buckling failure analysis of all-terrain crane telescopic boom section. **Engineering Failure Analysis**, Changchun, p. 105-117. jul. 2015.

YUE, L.; QIN, F. Research of the L-type gantry crane's system based on bp network and genetic algorithm. **Sensors & Transducers Journal**, Hubei, p. 30-35, mar. 2013.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4309:** Equipamento de movimentação de carga - Cabos de aço - cuidados, manutenção, instalação, inspeção e descarte. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400:** Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10980:** Roldana - dimensões e materiais. Rio de Janeiro, 1989.

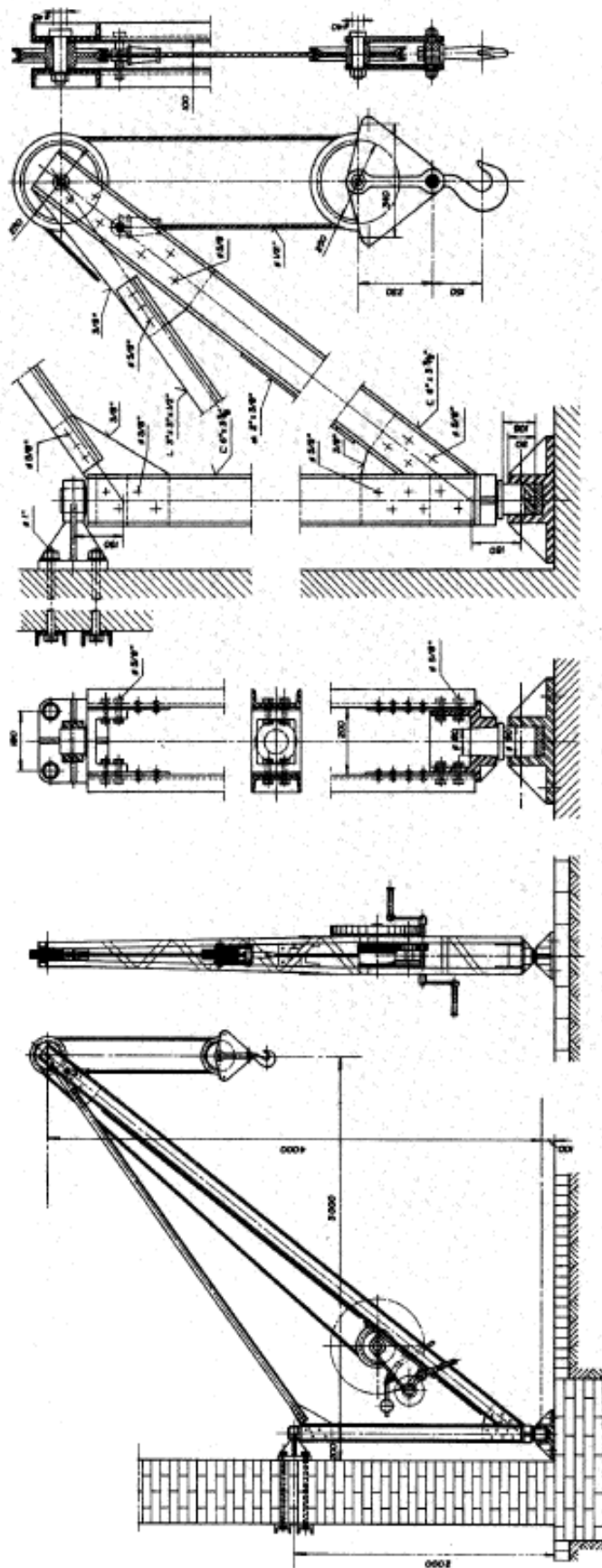
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11900-5:** Terminal para cabo de aço - Parte 5: Soquete. Rio de Janeiro, 2015.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 11 abr. 2019.

PROVENZA, Francesco. Projetista de máquinas. 71.ed. São Paulo: Editora F. Provenza, 1972.

SKF. **Manuais de rolamento de rolos, para eixos métricos:** SYNT 90 F. 2018. Disponível em: <http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/bearing-units/roller-bearing-units/metric/plummer-block/index.html?designation=SYNT%2090%20F>. Acesso em: 10 dez. 2018.

ANEXO A – Guindaste giratório de parede apresentado por Provenza (1976)

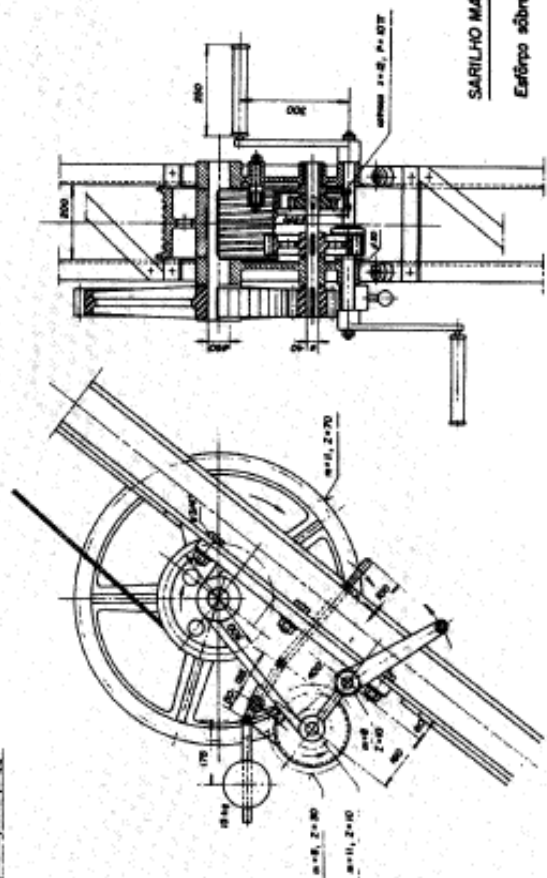


GUINDASTE GIRATÓRIO DE PAREDE

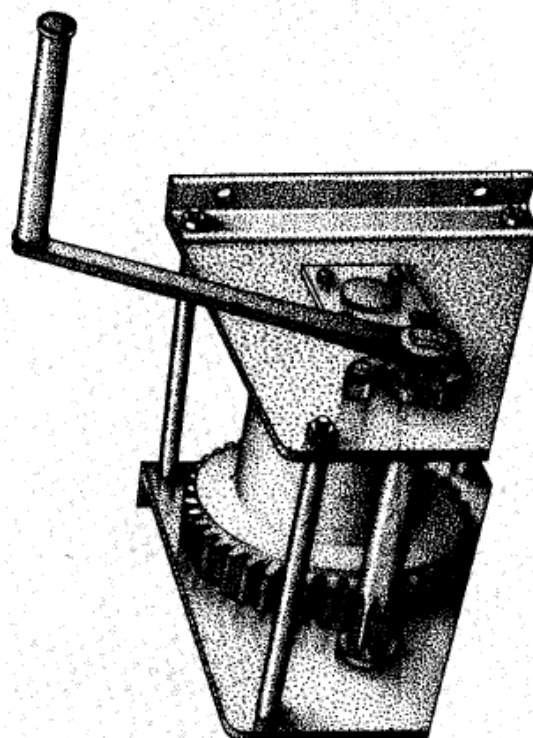
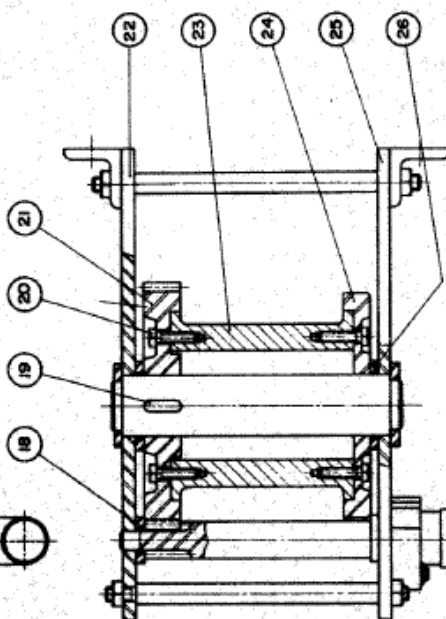
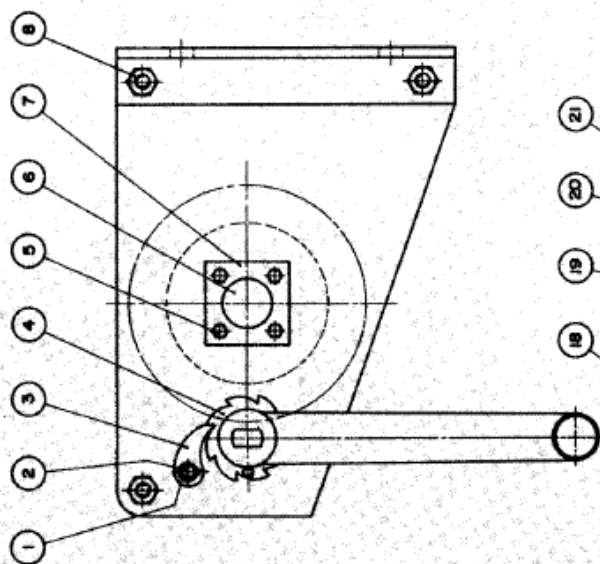
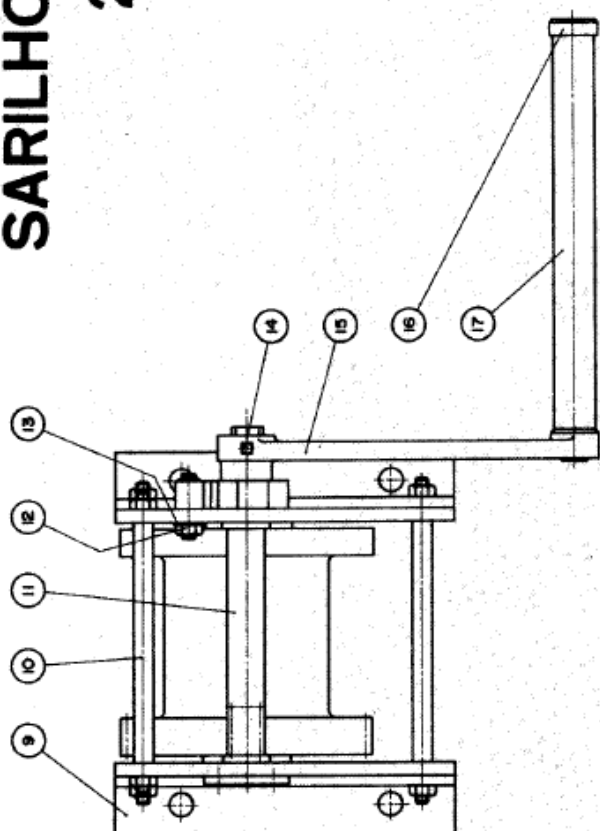
CARGA : 2 ton LANCE : 3 m

SARILHO MANUAL DE 1000 kg

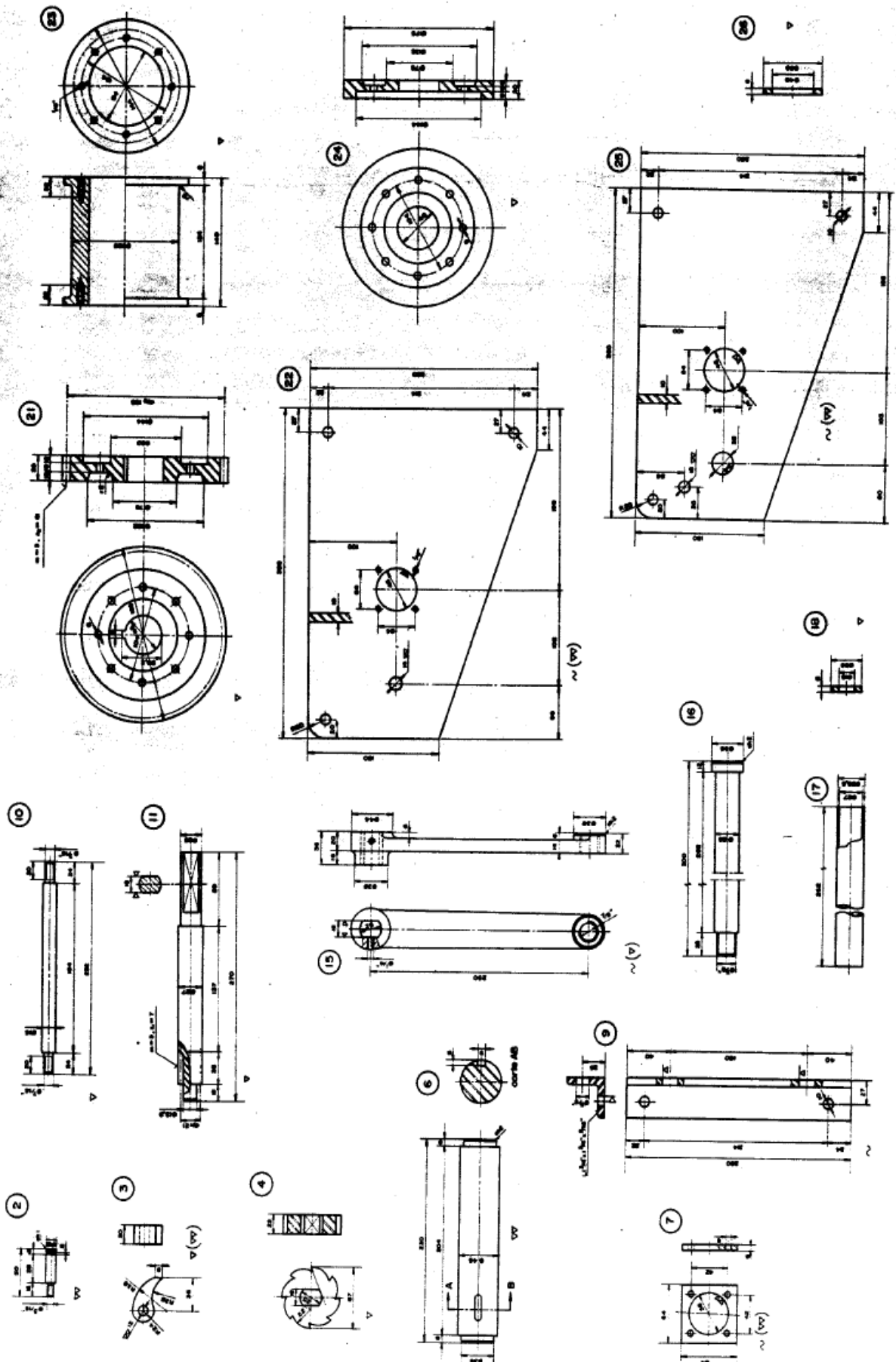
Esfôrço sobre cada manivela : 15 kg



ANEXO B – Sarilho para 250 kg (não adaptado) - Provenza (1976)

SARILHO PARA
250 KG

MATERIALS		MATERIALS	
1	Base	1	Base
2	Frame	2	Frame
3	Handle	3	Handle
4	Pinion	4	Pinion
5	Pinion	5	Pinion
6	Pinion	6	Pinion
7	Pinion	7	Pinion
8	Pinion	8	Pinion
9	Pinion	9	Pinion
10	Pinion	10	Pinion
11	Pinion	11	Pinion
12	Pinion	12	Pinion
13	Pinion	13	Pinion
14	Pinion	14	Pinion
15	Pinion	15	Pinion
16	Pinion	16	Pinion
17	Pinion	17	Pinion
18	Pinion	18	Pinion
19	Pinion	19	Pinion
20	Pinion	20	Pinion
21	Pinion	21	Pinion
22	Pinion	22	Pinion
23	Pinion	23	Pinion
24	Pinion	24	Pinion
25	Pinion	25	Pinion
26	Pinion	26	Pinion



APÊNDICE A – Guindaste giratório de parede construído com o Autodesk Inventor®

Figura A1 – Guindaste modelado



Fonte: O Autor