



Universidade Federal da Grande Dourados
Faculdade de Engenharia



João Paulo Gatto Schardong

PROJETO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA PONTE ROLANTE: UMA ABORDAGEM ANALÍTICA E COMPUTACIONAL

Dourados

2018

João Paulo Gatto Schardong

**PROJETO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA
PONTE ROLANTE: UMA ABORDAGEM
ANALÍTICA E COMPUTACIONAL**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Universidade Federal da Grande Dourados

Faculdade de Engenharia

Orientador: Rodrigo Borges Santos

Dourados

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S311p Schardong, João Paulo Gatto

Projeto da viga principal de uma ponte rolante: uma abordagem analítica e computacional / João Paulo Gatto Schardong -- Dourados: UFGD, 2018.

42f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Rodrigo Borges Santos

TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Grande Dourados
Inclui bibliografia

1. Ponte rolante. 2. Dimensionamento. 3. ABNT NBR 8400:1984. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

João Paulo Gatto Schardong

PROJETO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA PONTE ROLANTE: UMA ABORDAGEM ANALÍTICA E COMPUTACIONAL

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Dourados, 30 de Novembro de 2018:

Professor Dr. Rodrigo Borges Santos
Orientador/UFGD

**Professor Dr. Augusto Salomão
Bornschlegell**
UFGD

Professor Dr. Rafael Ferreira Gregolin
UFGD

Dourados

2018

Agradecimentos

Agradeço inicialmente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos ao longo do curso de Engenharia Mecânica.

Ao professor orientador Dr. Rodrigo Borges Santos pela amizade, conselhos, discussões, orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal da Grande Dourados, pelos conhecimentos e estrutura necessária para a conclusão do curso.

Agradeço a todos meus amigos e colegas, que proporcionaram momentos felizes ao longo desta jornada. Em especial, agradeço a minha namorada Maria Fernanda Costa de Melo, pela presença em todos os momentos, sejam eles felizes ou tristes, pelo incentivo e todo apoio para realizar este sonho.

O sucesso é uma consequência e não um objetivo.

Gustave Flaubert

Resumo

Pontes rolantes são equipamentos utilizados no transporte e elevação de cargas, geralmente com altas capacidades e elevados ciclos de trabalho. Trata-se de uma estrutura, normalmente instalada dentro de edificações, sendo possível movimentar cargas, materiais, e equipamentos nas direções longitudinal, transversal e vertical. Neste sentido, a proposta de trabalho é o dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante do tipo univiga com capacidade de movimentação de carga de 15 toneladas. O procedimento de cálculo estrutural é baseado na norma ABNT NBR 8400:1984 e ABNT NBR 8800:2008. A ABNT NBR 8400:1984 estabelece os critérios mínimos para o dimensionamento de equipamentos para transporte e elevação de carga, enquanto a ABNT NBR 8800:2008 define os requisitos mínimos para o projeto de estruturas de aço. Após o dimensionamento e seleção do perfil da viga, realiza-se uma análise dos esforços usando o método de elementos finitos via software SolidWorks. Nesta análise, verificou-se que os níveis de tensão e deflexão estrutural são valores dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos normativos.

Palavras-chave: Ponte Rolante. Dimensionamento. ABNT NBR 8400:1984.

Abstract

Overhead cranes are used to transport and lifting loads with high capacities and high working cycles. It is a structure, usually installed inside buildings, being able to move loads, materials, and equipment in the longitudinal, transverse and vertical directions. In this sense, the porposed work is the design of a single main bridge girder with load capacity of 15 tons. The structural calculation procedure is based on ABNT NBR 8400: 1984 and ABNT NBR 8800: 2008. ABNT NBR 8400: 1984 establishes the minimum criteria for the design of equipments for transportation and lifting, while ABNT NBR 8800: 2008 defines the minimum requirements for the design of steel structures. After the design of the girder and selection of beam size, a stress analysis is performed using the finite element method using SolidWorks software. In this analysis, it was verified that the stress level and structural deflection are in compliance with ABNT NBR 8400:1984 and ABNT NBR 8800:2008.

Keywords: Overhead Crane. Design. ABNT NBR 8400:1984.

Lista de figuras

Figura 1 – Transporte interno em usina hidrelétrica.	13
Figura 2 – Componentes da ponte rolante.	15
Figura 3 – Classificação quanto ao tipo de instalação.	16
Figura 4 – Diferença entre modelos de ponte rolante.	16
Figura 5 – Detalhe da estrutura da viga principal com perfil "caixão".	17
Figura 6 – Conjunto de cabeceira e rodas.	17
Figura 7 – Caminho de rolamento de um pórtico.	18
Figura 8 – Carro guincho.	18
Figura 9 – Talha elétrica.	19
Figura 10 – Metodologia para dimensionamento.	24
Figura 11 – Diagrama de corpo livre da ponte rolante.	25
Figura 12 – Perfil da viga caixão.	27
Figura 13 – Avaliação de critérios.	29
Figura 14 – Configuração da talha elétrica.	30
Figura 15 – Diagrama cisalhante e fletor.	31
Figura 16 – Diagrama cisalhante e fletor.	33
Figura 17 – Perfil final da viga principal.	34
Figura 18 – Condições de fixação e carregamento da viga.	35
Figura 19 – Malha gerada.	35
Figura 20 – Resultado computacional - tensão fletora.	36
Figura 21 – Resultado computacional - tensão cisalhante.	36
Figura 22 – Resultado computacional - deflexão.	36

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classe de utilização.	20
Tabela 2 – Estado de carga.	20
Tabela 3 – Classificação da estrutura dos equipamentos em grupos.	21
Tabela 4 – Coeficiente de majoração.	21
Tabela 5 – Tensão admissível.	21
Tabela 6 – Coeficiente dinâmico.	22
Tabela 7 – Deflexão máxima da viga.	23
Tabela 8 – Classificação da ponte rolante.	30
Tabela 9 – Coeficiente dinâmico.	31
Tabela 10 – Dimensões após primeiro processo iterativo.	32
Tabela 11 – Dimensões da viga principal.	33
Tabela 12 – Diferença entre valores obtidos pelo método analítico e simulação numérica.	36

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Pontes Rolantes	15
2.2	Componentes da Ponte Rolante	16
2.2.1	Viga Principal	17
2.2.2	Cabeceira	17
2.2.3	Trilho	18
2.2.4	Carro Guincho e Trolley	18
2.2.5	Talha Elétrica	19
2.3	Classificação da Estrutura	19
2.3.1	Classe de Utilização	20
2.3.2	Estado de Carga	20
2.3.3	Classificação em Grupos	21
2.3.4	Caso de Solicitação	21
2.4	Solicitações	22
2.4.1	Solicitação Estática	22
2.4.2	Solicitações Devidas ao Movimento Vertical	22
2.4.3	Solicitações Devidas ao Movimento Horizontal	23
2.4.4	Deflexão	23
2.5	Projeto de Máquinas	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	Método Analítico	24
3.2	Método Computacional	28
3.3	Critérios de Verificação	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Processo Analítico	31
4.2	Verificação Computacional	33
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO	41
--	----

1 INTRODUÇÃO

Em toda indústria, a organização racional dos processos e instalações de transporte são fundamentais para o sucesso da operação e resultam em maiores ganhos de produtividade. Nesse sentido, a competitividade por melhores preços, redução de custos e desperdícios é fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa. Para Rudenko (1976), com os meios de produção cada vez mais integrados e os processos entrelaçados, os sistemas de movimentação de cargas devem atuar de forma eficiente, pois são decisivos no cumprimento dos prazos de entrega ao cliente.

As atividades industriais de transformação e produção, dependem de mecanismos de transporte de cargas tanto dentro do processo produtivo como fora, na entrada de matéria prima e escoamento dos bens produzidos. Sabe-se que uma das maiores perdas em um processo produtivo é ocasionada pela movimentação de carga, podendo ser materiais, matéria-prima, peças, componentes ou demais equipamentos (SORDI, 2016).

Para a movimentação de cargas existe uma gama de equipamentos para tal fim, dependendo do tipo de aplicação. Segundo Sena e Costa (2015) essas máquinas são encontradas em indústrias, como siderurgias, mineração, área portuária, área de estocagem e construção civil. Porém, a máquina que mais se destaca, sendo amplamente utilizada na movimentação e elevação de cargas são as pontes rolantes. Sordi (2016) diz que a principal característica deste equipamento é sua versatilidade e robustez operando em lugares e situações críticas (por exemplo chão de fábrica com muitos corredores ou transporte de geradores elétricos e turbinas em barragens de usinas hidrelétricas), as quais outros equipamentos, como empilhadeiras, encontrariam dificuldades. Além disso, esse destaque é devido a disposição da máquina no processo estar em um plano acima da área de circulação de materiais e pessoas (TAMASAUSKAS, 2000).

De acordo com Soares (2011), a ponte rolante tem a vantagem de conseguir uma ampla cobertura, grande capacidade de carga e elevados números de ciclos. Trata-se de uma estrutura, normalmente instalada dentro de edificações e utilizada para movimentar cargas na direção longitudinal, transversal e vertical.

Estes mecanismos de transporte serão sempre que possível escolhidos e dimensionados conforme as necessidades e restrições físicas. O projeto e dimensionamento de pontes rolantes possuem uma normatização específica e consolidada, a qual a indústria nacional já reconhece os elevados níveis de exigência de tecnologia e segurança empregados. Silva (2017) comenta que um erro em seu dimensionamento pode acarretar na queda da carga ou da estrutura da ponte, o que poderia ocasionar um acidente envolvendo trabalhadores que estão no local, além do gasto gerado pela destruição dos bens materiais envolvidos.

Portanto, a melhor opção é dimensionar a da ponte rolante com os parâmetros e restrições do local de instalação, para que assim funcione corretamente e com os requisitos de segurança. A Figura 1 apresenta o deslocamento de uma turbina, sua carga é tão elevada que requer o uso de uma ponte rolante do tipo biviga.

Figura 1 – Transporte interno em usina hidrelétrica.



Fonte: Adaptado de Andy SA (2015, p. 1).

A norma brasileira que rege sobre o dimensionamento de pontes rolantes é a ABNT NBR 8400:1984, a qual é similar com as normas de entidades internacionais reconhecidas mundialmente, como a norte-americana *Crane Manufacturers Association of America* (CMAA) e a francesa *Fédération Européenne de La Manutention* (FEM). Além disso, outra norma empregada no dimensionamento de pontes rolantes é a ABNT NBR 8800:2008, a qual diz respeito sobre o projeto de estruturas em aço.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é dimensionar a viga principal de uma ponte rolante do tipo univiga para movimentação de cargas de até 15 toneladas. Portanto, a análise concentra-se na parte estrutural da ponte rolante. Para os cálculos das tensões atuantes na viga, serão utilizadas as equações abordadas em tópicos de resistência dos materiais. O projeto dos demais componentes como carro, talha, quadro de comando e conjunto de cabos de aço não serão desenvolvidos nesse trabalho.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para atender o principal objetivo deste trabalho, os seguintes objetivos específicos são requeridos:

- a. Revisão bibliográfica do tema abordado abrangendo os conceitos de movimentação de carga e os principais componentes e elementos de uma ponte rolante;
- b. Abordar, dominar e adequar o projeto a norma ABNT NBR 8400:1984 e ANBT NBR 8800:2008;
- c. Definir quais são os esforços mais relevantes para o dimensionamento da estrutura para que a ponte rolante apresente um maior nível de segurança;
- d. Avaliar a partir de técnicas de elementos finitos (através de *software* CAE SolidWorks) a estrutura obtida analiticamente.

1.2 Justificativa

No dia a dia é muito comum vermos o uso de empilhadeiras para movimentação de cargas de forma geral. Porém, de acordo com as normas vigentes sobre ergonomia (NR 17), transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais (NR 11) e segurança no trabalho em máquinas e equipamentos (NR 12) a utilização de empilhadeiras não são indicadas para a movimentação das cargas elevadas que estão sendo deslocadas em ambientes com muitas restrições físicas. Logo, a utilização de equipamentos não adequados ao trabalho exigido aumenta a exposição dos funcionários a acidentes de trabalho. Ainda, sabe-se que as atividades inerentes a um processo produtivo estão vinculadas ao transporte de cargas. Quando se objetiva uma redução de custos, um dos fatores importantes é a diminuição das distâncias percorridas tanto pela matéria-prima quanto pelo produto final processado, ou seja, se faz necessário o uso de uma máquina de transporte e elevação que opere de forma eficiente para o serviço designado. Portanto, é justificável o investimento na construção e instalação de uma ponte rolante.

Por outro lado, a saber que o mercado de trabalho atual exige conhecimentos ferramentas computacionais para cálculos estruturais, o projeto enriquece o aperfeiçoamento pessoal no desenvolvimento de projetos mecânicos, visto que aborda os conceitos teóricos adquiridos na área de resistência dos materiais e também o uso do métodos dos elementos finitos via *software* CAE SolidWorks.

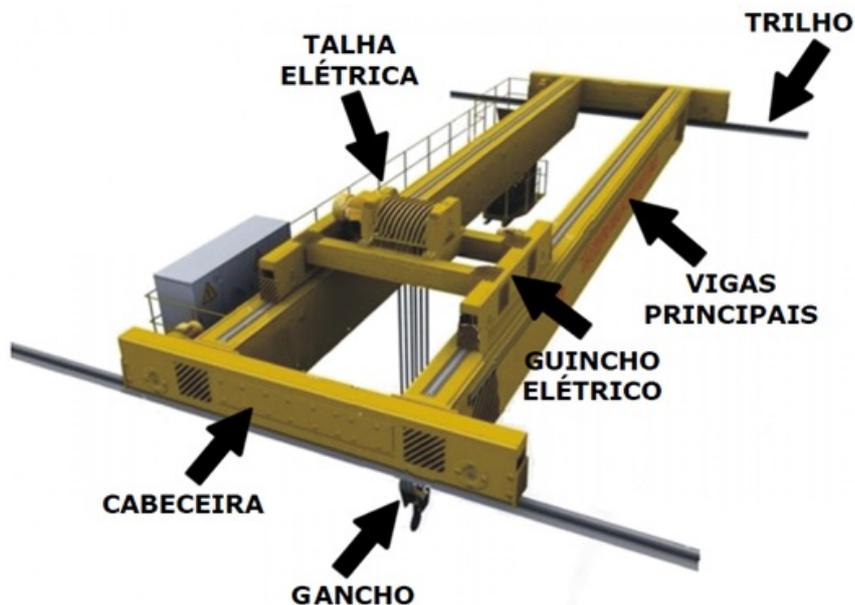
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema em estudo. Inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre pontes rolantes e seus principais componentes. Em sequência, avaliam-se os conceitos abordados e classificações existentes de acordo com a normativa brasileira.

2.1 Pontes Rolantes

Pontes rolantes são equipamentos utilizados para içar objetos através de um guancho que é acoplado em uma estrutura móvel chamado de carro guincho (ou trolley), o que lhe garante a capacidade de movimentação horizontal. Os principais componentes da ponte rolante são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Componentes da ponte rolante.

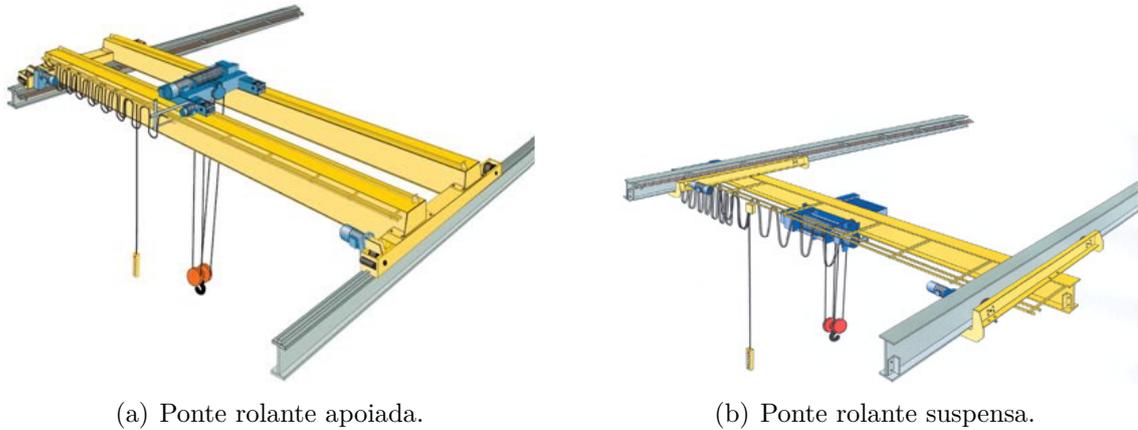


Fonte: Adaptado de SGO Equipamentos de Elevacao de Cargas (2018).

O tipo de ponte rolante depende de qual será a sua aplicação, pois ela pode ter variações no seu trilho e na quantidade de vigas principais. Quanto a variação do tipo de trilho, a ponte rolante pode ser suspensa ou apoiada. A ponte suspensa tem seu trilho fixado ao teto do edifício e a viga principal se desloca por baixo do trilho, ou seja, ela translada sobre a aba inferior de uma viga, como pode ser vista na Figura 3. Já a ponte rolante apoiada tem o seu deslocamento sobre trilhos que estão fixados nas colunas do

prédio. Esse modelo de ponte rolante é o que apresenta um maior uso por ser muito versátil.

Figura 3 – Classificação quanto ao tipo de instalação.



(a) Ponte rolante apoiada.

(b) Ponte rolante suspensa.

Fonte: Adaptado de Technical Translation Dictionary (2008).

Existem diversas formas de construção de pontes rolantes, porém se resumem a dois modelos que são mais utilizados, o modelo univiga e o modelo biviga. O modelo univiga apresenta somente uma viga principal, enquanto a ponte rolante biviga possui duas vigas principais. Esse último modelo apresenta uma estrutura muito mais robusta em comparação com uma ponte univiga. Essa robustez é necessária pois o modelo de ponte biviga é usado para elevar cargas com um peso elevado. A diferença entre esses dois modelos pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Diferença entre modelos de ponte rolante.



(a) Ponte rolante univiga.

(b) Ponte rolante biviga.

Fonte: Adaptado de ABUS Crane Systems (2018).

2.2 Componentes da Ponte Rolante

A estrutura da ponte rolante é composta por vários componentes onde cada um desempenha uma função única. Os principais componentes são: viga principal, cabeceira, trilho, carro guincho, trolley e talha elétrica.

2.2.1 Viga Principal

É considerado o elemento mais importante no dimensionamento de uma ponte rolante. A viga principal é a estrutura onde se concentra a maior solicitação de carga, pois é nela que o carro trolley ou talha elétrica se desloca. O perfil estrutural utilizado na construção da viga principal varia de acordo com sua capacidade. Usualmente é construída com o perfil tipo "I", porém situação onde a solicitação é maior utiliza-se o perfil tipo "caixão", confeccionado a partir de chapas soldadas que formam uma caixa. A Figura 5 mostra uma viga principal com perfil do tipo "caixão".

Figura 5 – Detalhe da estrutura da viga principal com perfil "caixão".



Fonte: Adaptado de Accent Sales and Service (2015).

2.2.2 Cabeceira

Segundo Silva (2017), as cabeceiras são encontradas nas extremidades da viga principal e possuem como função fazer o movimento de translação da viga. Elas são formadas por um conjunto de rodas, caixas de engrenagem e motores elétricos que permitem a ponte ter o movimento sobre os trilhos. Em detalhe, a Figura 6 apresenta os itens citados presentes na cabeceira.

Figura 6 – Conjunto de cabeceira e rodas.



Fonte: Adaptado de Moviservi (2018).

2.2.3 Trilho

O trilho é a base por onde a ponte rolante irá se deslocar. As cabeceiras estão em contato direto com o trilho. Esse caminho possui diversas formas construtivas podendo ser fabricado de vigas, ou concreto e trilho. No caso de pontes rolantes apoiadas, o trilho fica apoiado nos pilares. Tratando-se de pórticos, o caminho de rolamento é feito diretamente no chão, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Caminho de rolamento de um pórtico.

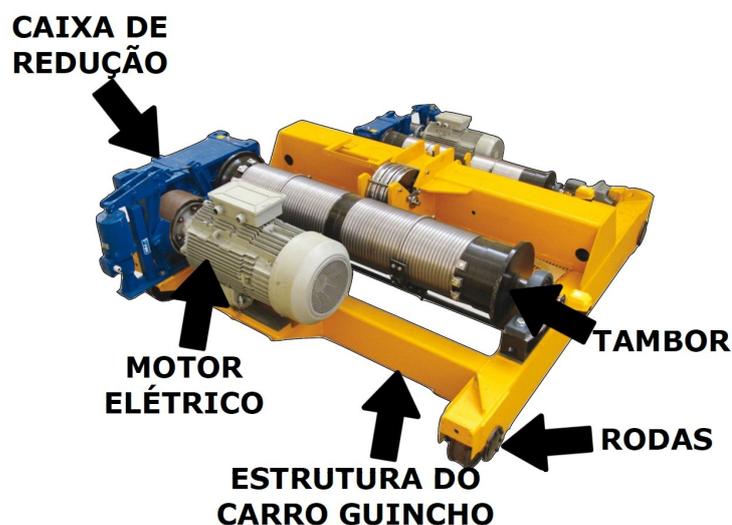


Fonte: Adaptado de VentoWAG (2014).

2.2.4 Carro Guincho e Trolley

Conforme Silva (2017), o carro guincho realiza o seu deslocamento sobre as vigas principais da ponte rolante e nele é fixado o sistema que faz a elevação da carga (talha). Ele é composto por rodas, caixas de engrenagem e os motores elétricos. Se for o caso da ponte rolante ser univiga, o carro guincho é substituído por um trolley. O carro guincho é responsável pelo deslocamento transversal da carga. Um modelo é visto na Figura 8.

Figura 8 – Carro guincho.



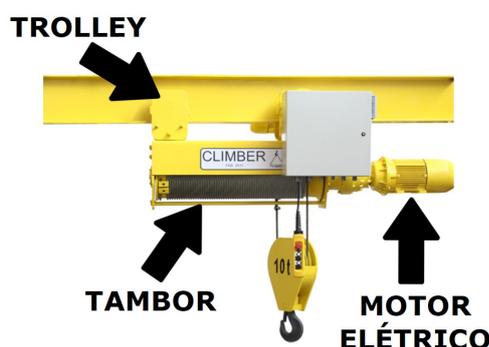
Fonte: Adaptado de Moviservi (2018).

O trolley tem função muito semelhante à de carro guincho, e é aplicado em pontes rolantes univigas. Apresenta um motor elétrico e uma caixa de engrenagens que são responsáveis pelo seu movimento. De acordo com Sordi (2016), este componente se movimenta sobre a viga principal de forma a ser responsável pelo movimento transversal da carga içada.

2.2.5 Talha Elétrica

Silva (2017) comenta que a talha é responsável por fazer a elevação da carga. Para isso, normalmente usa um motor elétrico no eixo do tambor para enrolamento de um cabo de aço. A talha pode ser montada em um carro guincho que se desloca sobre as vigas principais ou ela pode ser montada diretamente sobre a viga principal usando um trolley. É constituído basicamente por uma estrutura de fixação, um motor elétrico com sistema de freio e um tambor para recolher o cabo de aço, que podem ser vistos na Figura 9. Usualmente utiliza-se um gancho na extremidade do cabo de aço para facilitar a fixação da carga.

Figura 9 – Talha elétrica.



Fonte: Adaptado de CLIMBER (2017).

2.3 Classificação da Estrutura

Os critérios usados para a realização dos cálculos de dimensionamento da ponte rolante são baseados na norma ABNT NBR 8400:1984, que é usada para fazer o dimensionamento dos equipamentos de elevação e transporte de carga independentemente da complexidade do equipamento.

Ainda, a norma traz algumas definições para o projeto de estruturas de içamento, tais como: carga útil, carga de serviço, carga permanente sobre um elemento, serviço intermitente, serviço intensivo, turno, translação, direção e orientação.

Para a classificação da estrutura, é necessário determinar sua classe de utilização e seu estado de carga, para que assim, enquadrar a ponte rolante em um grupo. As próximas

sub-seções irão abordar a forma de classificar a estrutura.

2.3.1 Classe de Utilização

A classe de utilização caracteriza a frequência com que o equipamento é utilizado. Convencionou-se classificar em função da utilização do movimento de levantamento ou seja, uma estimativa da quantidade de ciclos que o equipamento pode realizar durante sua vida útil. A Tabela 1 define as quatro classes de utilização apresentadas na norma.

Tabela 1 – Classe de utilização.

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

Fonte: Adaptado de ABNT (1984, p. 6).

Vale a pena ressaltar que, segundo a norma vigente um ciclo de levantamento é iniciado no instante em que a carga é içada e termina no momento em que o equipamento está em condições de realizar outro içamento.

2.3.2 Estado de Carga

Como descrito em norma, o estado de carga caracteriza em que proporção o equipamento levanta a carga máxima, ou somente uma carga reduzida ao longo de sua vida útil. Os quatro estados de carga convencionados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Estado de carga.

Estado de carga	Definição	Fração mínima da carga máxima
0 (muito leve)	Equipamentos levantando excepcionalmente a carga nominal e comumente cargas muito reduzidas	$P=0$
1 (leve)	Equipamentos que raramente levantam a carga nominal e comumente cargas de ordem 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: Adaptado de ABNT (1984, p. 6).

2.3.3 Classificação em Grupos

Definida a classe de utilização e o estado de carga da estrutura, define-se então o grupo da classificação de utilização da estrutura. A Tabela 3 define quais as relações de classe de utilização e estado de carga definem o grupo de utilização.

Tabela 3 – Classificação da estrutura dos equipamentos em grupos.

Estado de cargas	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento			
	A $6,3 \cdot 10^4$	B $2,0 \cdot 10^5$	C $6,3 \cdot 10^5$	D $2,0 \cdot 10^6$
0 (muito leve)	1	2	3	4
1 (leve)	2	3	4	5
2 (médio)	3	4	5	6
3 (pesado)	4	5	6	6

Fonte: Adaptado de ABNT (1984, p. 8).

2.3.4 Caso de Solicitação

São previstos três casos de solicitações:

- a. Caso I - serviço normal sem vento;
- b. Caso II - serviço normal com vento limite de serviço;
- c. Caso III - solicitações excepcionais.

Para cada grupo de equipamento leva-se em conta um coeficiente de majoração que deve ser aplicado no cálculo da estrutura. Este valor é obtido a partir da Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficiente de majoração.

Grupos	1	2	3	4	5	6
M_x	1	1	1	1,06	1,12	1,20

Fonte: Adaptado de ABNT (1984, p. 15).

Além disso, o caso de solicitação define qual será a tensão admissível à tração (ou compressão) simples a qual a estrutura é submetida. O coeficiente de segurança varia conforme o caso de solicitação conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Tensão admissível.

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

Fonte: Adaptado de ABNT (1984, p. 16).

Definido a tensão admissível à tração calcula-se a tensão cisalhante admissível pela Equação 2.1.

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

2.4 Solicitações

De acordo com a ABNT NBR 8400:1984, o cálculo da estrutura do equipamento é efetuado determinando as tensões atuantes durante seu funcionamento, buscando um correto dimensionamento a partir dos pontos críticos obtidos. As tensões atuantes são geradas a partir de solicitações estáticas, solicitações devidas ao movimento vertical e solicitações devidas ao movimento horizontal.

2.4.1 Solicitação Estática

São classificadas como solicitações estáticas as solicitações devidas aos pesos próprios dos elementos, denominado aqui de *SG* e também a solicitação devida à carga de serviço *SL*. Neste grupo, também estão os elementos móveis, que influenciam de forma significativa quando considerada a posição mais desfavorável da estrutura.

2.4.2 Solicitações Devidas ao Movimento Vertical

As solicitações verticais são provenientes ao início do levantamento da carga e de choques verticais sobre o caminho de rolamento. Os esforços verticais estão diretamente ligados a velocidade usada para se fazer o içamento da carga. Para fazer o dimensionamento do equipamento deve ter-se o conhecimento do coeficiente dinâmico (Ψ), esse coeficiente é obtido na Tabela 6. Para efeitos de cálculos, este coeficiente amplifica a carga içada, dessa forma, atua como um coeficiente de segurança adicional.

Tabela 6 – Coeficiente dinâmico.

Equipamento	Coeficiente dinâmico Ψ	Faixa de velocidade de elevação da carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < v_L \leq 0,25$
	$1+0,6 \cdot v_L$	$0,25 < v_L \leq 1$
	1,6	$v_L \geq 1$
Guindaste com lança	1,15	$0 < v_L \leq 0,5$
	$1+0,3 \cdot v_L$	$0,5 < v_L \leq 1$
	1,3	v_L

Fonte: Adaptado de ABNT (1984, p. 10).

2.4.3 Solicitações Devidas ao Movimento Horizontal

Conforme a ABNT NBR 8400:1984, as solicitações horizontais são causadas pelos efeitos de inércia devidos às acelerações ou desacelerações dos movimentos de deslocamento da carga, efeitos de força centrífugas e efeitos de choque.

Os efeitos de acelerações ou desacelerações leva em consideração a acelerações imprimidas nos elementos móveis no momento da partida e no momento da frenagem. Equipamentos modernos possuem controle de acelerações, e portanto, suavizam o início e fim do movimento, logo, pode-se desconsiderar o efeito de aceleração e desaceleração para este trabalho, bem como os efeitos de choque. Além disso, por se tratar de uma ponte rolante, a carga içada não rotaciona, com isso o efeito de força centrífuga é nulo.

2.4.4 Deflexão

A deflexão máxima da viga principal da ponte rolante é determinada pela ABNT NBR 8800:2008 seção C. Esta norma possui critérios rigorosos quem devem ser aplicados em estruturas de aço. Para o caso de pontes rolantes, a flecha máxima permitida é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Deflexão máxima da viga.

Descrição	δ [m]
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	L/600
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto ponte siderúrgicas	L/800
Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual o superior a 200 kN	L/1000

Fonte: Adaptado de ABNT (2008, p. 117).

2.5 Projeto de Máquinas

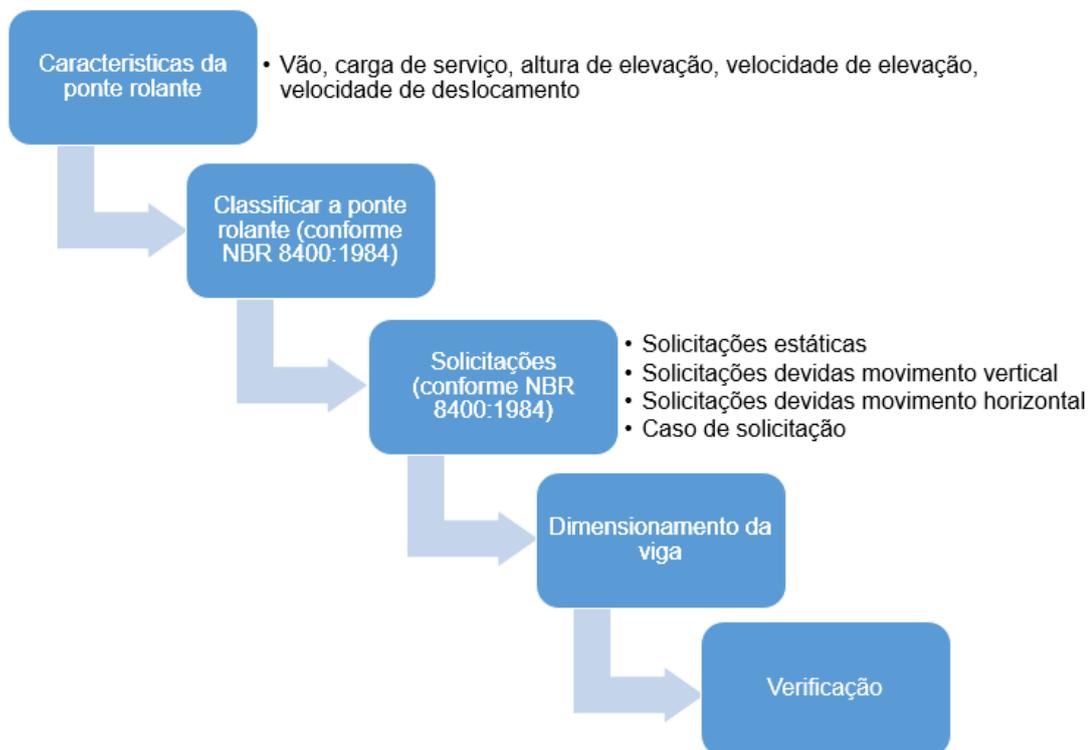
Um projeto de máquina sempre surge para satisfazer uma demanda, seja ela industrial, comercial ou de lazer. Para Tamasauskas (2000), este projeto surge da habilidade de uma pessoa ou de um grupo que transforma a ideia em um projeto físico.

Segundo Budynas (2016) projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema, ou seja, o resultado da criação de algo física deve ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável. Para isso o projetista/engenheiro deve explorar ao máximo sua a criatividade e conhecimento técnico para que o projeto seja desenvolvido visando atender as necessidades o qual foi proposto.

3 METODOLOGIA

De acordo com Tamasauskas (2000), a previsão de operação do equipamento é um dos aspectos mais complexos e importantes para o dimensionamento da estrutura. Tal importância é devido ao relacionamento direto destas informações com os coeficientes de segurança da ponte rolante. A sequência de ideias para o dimensionamento da ponte rolante é apresentado no fluxograma da Figura 10.

Figura 10 – Metodologia para dimensionamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Método Analítico

O primeiro passo a ser feito é definir quais são as características da ponte rolante, pois estes são os dados de entrada para o projeto e seu porte. Se algum ponto nesta etapa não fica claro, o projeto inteiro é comprometido.

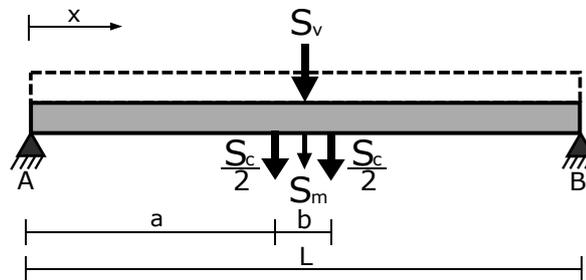
Em seguida, classifica-se a ponte rolante de acordo com a norma vigente. Este também é um passo fundamental, visto que aqui são definidas suas classes e grupos (que causam impactos diretos nos fatores de segurança da estrutura).

Definida as características da ponte rolante e sua classificação, inicia-se o dimensio-

onamento da viga principal, que é baseado na metodologia de resistência dos materiais apresentada em Hibbeler (2009). Constrói-se o diagrama de corpo livre da estrutura, como mostra na Figura 11. Neste diagrama contém todas as solicitações presentes na estrutura: peso próprio da viga S_v , peso dos equipamentos de içamento S_m e carga de içamento S_c , estas as quais são penalizadas pelo coeficiente de majoração e coeficiente dinâmico obtidos a partir da Tabela 4 e 6, respectivamente.

O diagrama de corpo livre também envolve o comprimento da viga L e a distância do trolley até o apoio A, representada pela cota a . A cota b é a dimensão entre as rodas do trolley. Por existir essa distância, que é significativa, a carga içada é distribuída nestes dois pontos, por este motivo, a carga içada S_c é dividida em duas partes.

Figura 11 – Diagrama de corpo livre da ponte rolante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo das reações de apoio são dadas pela Equação 3.1.

$$\begin{aligned} R_A &= S_c + S_m + S_v - R_B \\ R_B &= \frac{S_c}{2 \cdot L} \cdot (2 \cdot a + b) + \frac{S_v}{2} + \frac{S_m}{L} \cdot \left(a + \frac{b}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Hibbeler (2009) diz que por conta dos carregamentos aplicados, as vigas desenvolvem uma força de cisalhamento interna (força cortante) e momento fletor que, em geral, variam de ponto para ponto ao longo do eixo da viga. Para projetar uma viga corretamente, em primeiro lugar, é necessário determinar a força de cisalhamento e o momento máximos que agem na viga. Para este caso, as equações que regem o comportamento da força cisalhante

ao longo da viga foram obtidas a partir do método das seções.

$$\begin{aligned}
 & \bullet 0 < x < a \\
 & V(x) = R_A - M_v \cdot x \cdot g \cdot CM \\
 & \bullet a < x < a + b/2 \\
 & V(x) = R_A - M_v \cdot x \cdot g \cdot CM - \frac{S_c}{2} \\
 & \bullet a + b/2 < x < b \\
 & V(x) = R_A - M_v \cdot x \cdot g \cdot CM - \frac{S_c}{2} - S_m \\
 & \bullet b < x < L \\
 & V(x) = R_A - M_v \cdot x \cdot g \cdot CM - S_c - S_m
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Da mesma forma, as equações de momento fletor são definidas pela Equação 3.3.

$$\begin{aligned}
 & \bullet 0 < x < a \\
 & M(x) = R_A \cdot x - \frac{M_v \cdot x^2 \cdot g \cdot CM}{2} \\
 & \bullet a < x < a + b/2 \\
 & M(x) = R_A \cdot x - \frac{M_v \cdot x^2 \cdot g \cdot CM}{2} - \frac{S_c}{2} \cdot (x - a) \\
 & \bullet a + b/2 < x < b \\
 & M(x) = R_A \cdot x - \frac{M_v \cdot x^2 \cdot g \cdot CM}{2} - \frac{S_c}{2} \cdot (x - a) - S_m \cdot \left(x - a - \frac{b}{2}\right) \\
 & \bullet b < x < L \\
 & M(x) = R_A \cdot x - \frac{M_v \cdot x^2 \cdot g \cdot CM}{2} - \frac{S_c}{2} \cdot (2 \cdot x - 2 \cdot a - b) - S_m \cdot \left(x - a - \frac{b}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

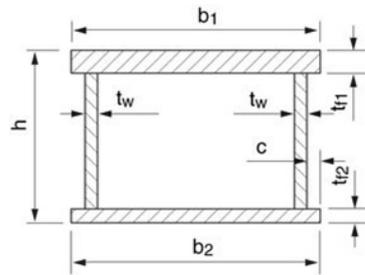
Para determinar as tensões máximas, variou-se a posição da carga içada ao longo da viga até encontrar as posições críticas. O momento máximo atuante na estrutura foi quando a talha elétrica foi posicionada exatamente no centro da viga (visto que a distância da carga em relação ao apoio é a máxima). Já para o cálculo da força cisalhante máxima, a carga içada está o mais próximo possível do apoio (ou seja, a igual a zero). Definido os valores máximos de cisalhamento e flexão, calcula-se as tensões máximas a partir da Equação 3.4, sendo V a força cisalhante, Q o momento estático de área, M o momento fletor, I o momento de inércia da seção transversal, t a espessura da região central da

seção e c a distância do eixo neutro ao ponto mais externo da seção.

$$\begin{aligned}\tau_{max} &= \frac{V_{max} \cdot Q}{I \cdot t} \\ \sigma_{max} &= \frac{M_{max} \cdot c}{I}\end{aligned}\quad (3.4)$$

Para o presente projeto, definiu-se que a viga principal será do tipo "caixão". Suas dimensões são de acordo com a Figura 12. Este tipo de estrutura é utilizado para altas cargas de içamento, onde a viga do tipo "I" seria muito grande, e conseqüentemente muito pesada.

Figura 12 – Perfil da viga caixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos critérios de tensão, avaliou-se o critério de deflexão da viga (deslocamento vertical dos pontos), de forma também, a adequar a viga para norma vigente. O cálculo da deflexão foi feito a partir do método da superposição. Este método demonstra que as deflexões de uma viga são causada por uma série de cargas separadas, que ao fim podem ser sobrepostas (por exemplo, se ν_1 for a deflexão para uma carga e ν_2 for a deflexão para outra, a deflexão total para ambas as cargas agindo em conjunto será a soma algébrica $\nu_1 + \nu_2$).

As equações de deflexões são facilmente encontradas em manuais de engenharia, e para este projeto utilizou-se a tabulação disponível na literatura de Hibbeler (2009). Logo a equação de deflexão causada pela solicitação dos equipamentos de içamento e motores é dada na Equação 3.5.

$$\delta_m = -\frac{M_m \cdot g \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.5)$$

Da mesma forma, para o peso da própria viga têm-se a Equação 3.6:

$$\delta_v = -\frac{5 \cdot M_v \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3.6)$$

E por fim, têm-se a deflexão causada pela carga de serviço. Esta é separada em duas componentes conforme apresentado na Figura 11. As deflexões causada por essas cargas são calculadas a partir da Equação 3.7.

$$\begin{aligned}\delta_{c1} &= -\frac{S_c \cdot a}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (L - a) \cdot (L^2 - (L - a)^2 - a^2) \\ \delta_{c2} &= -\frac{S_c \cdot (a + b)}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (L - b - a) \cdot (L^2 - (L - b - a)^2 - (a + b)^2)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Pelo método da superposição, a deflexão total da viga é regida pela Equação 3.8.

$$\delta_{max} = \delta_{c1} + \delta_{c2} + \delta_m + \delta_v \quad (3.8)$$

3.2 Método Computacional

O método dos elementos finitos é uma ferramenta que tornou possível conseguir respostas para problemas complexos que, caso fossem resolvidos de maneira analíticas demandariam muito tempo e esforço, porém quando se faz uma análise usando o método de elementos finitos o trabalho é reduzido. O método de elementos finitos deve considerar o problema como um todo levando em consideração cada esforço mecânico que está ocorrendo, é necessário fazer isso para ver qual a melhor condição de contorno para usar e com isso poupar tempo durante o processo de análise e obter resultados precisos (SOBUE, 2005).

Para Smith (2005) o método de análise numérica baseada em elementos finitos é muito usado para solucionar problemas tanto na área de mecânica dos sólidos, como também da mecânica dos fluidos. A partir dessa metodologia permite-se analisar problemas como, por exemplo, o escoamento de um fluido ou os esforços presentes em uma estrutura complexa. Esse método é uma ferramenta muito potente para o desenvolvimento de projetos, pois possibilita prever falhas ainda na fase de projeto do equipamento e assim, permite a correção das mesmas em tempo.

Qualquer estrutura pode ser dividida em um determinado número de componentes individuais, os quais são denominados de elementos. Para realizar a análise desses elementos e assim determinar a rigidez da estrutura é aplicado o conceito de rigidez equivalente, onde a rigidez de toda a estrutura depende diretamente da rigidez de cada um dos elementos que foram criados. Esse é o conceito básico do método de elementos finitos.

Para conseguir aplicar esse método é imprescindível conhecer as características mecânicas do material que será usado, conhecer o comportamento do equipamento, saber as características dos elementos finitos que serão usados para fazer a análise e conhecer as condições de contorno (cargas e vínculos da estrutura). Sabendo essas condições pode ser criado um modelo com a geometria desejada, com o modelo no software que irá fazer a análise são especificadas as características necessárias e gerada à malha no modelo.

Neste projeto, utilizou-se o software CAE SolidWorks 2018 para gerar a malha e executar o método de elementos finitos.

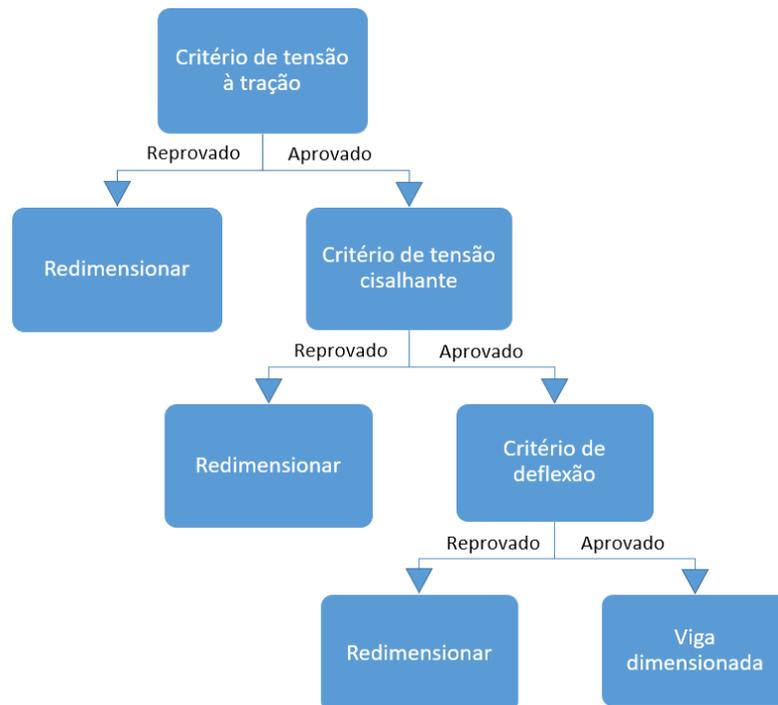
3.3 Critérios de Verificação

A etapa de verificação garante com que a estrutura obtida analiticamente suportará as cargas solicitadas e que também a ponte rolante se adeque a norma vigente. Os critérios empregados estão apresentados na Equação 3.9.

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &\leq \sigma_a \\ \tau_{max} &\leq \tau_a \\ \delta &\leq \delta_{max}\end{aligned}\tag{3.9}$$

A sequência de verificação dos critérios seguirá conforme Figura 13. Esta ordem buscou facilitar a rotina de cálculos elaborados para o projeto.

Figura 13 – Avaliação de critérios.



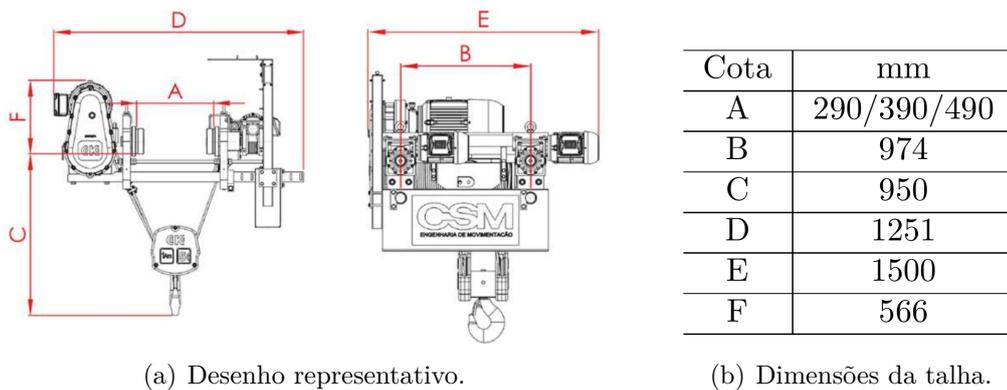
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

Para o presente trabalho, adotou-se um vão de trabalho de 15 metros e uma altura de elevação de 5 metros, dimensões quais são suficientes para a idealização do projeto. Ainda foi definida a carga de serviço como 15 toneladas, representada como S_c .

Selecionou-se a talha elétrica modelo CK 15t A3/8 V 4/30 para atender o serviço de içamento de carga. Os detalhes da talha estão na Figura 14. A talha elétrica possui uma velocidade de elevação de 0,5 metros por segundo, velocidade de translação de 0,09 metros por segundo e sua massa é de aproximadamente 960 kg (representada por S_m na Figura 11).

Figura 14 – Configuração da talha elétrica.



(a) Desenho representativo.

(b) Dimensões da talha.

Fonte: Adaptado de CSM (2017, p. 1).

Para este projeto, idealizou-se que a ponte rolante será utilizada regularmente em serviço intermitente e comumente cargas compreendidas entre 1/3 e 2/3 da carga nominal, portanto seu grupo é 4. A Tabela 8 resume a classificação da ponte rolante.

Tabela 8 – Classificação da ponte rolante.

Referência	Descrição	Classificação
Tabela 1	Classe de Utilização	B
Tabela 2	Estado de Carga	2
Tabela 3	Classificação em Grupo	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Definido seu grupo, o coeficiente de majoração é definido a partir da Tabela 4, que para este caso é 1,06. Além disso, o catálogo da talha elétrica nos fornece a velocidade elevação necessária para o cálculo do coeficiente dinâmico, apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficiente dinâmico.

Referência	Descrição	Classificação
Tabela 6	Coeficiente Dinâmico	1,36

Fonte: Elaborado pelo autor.

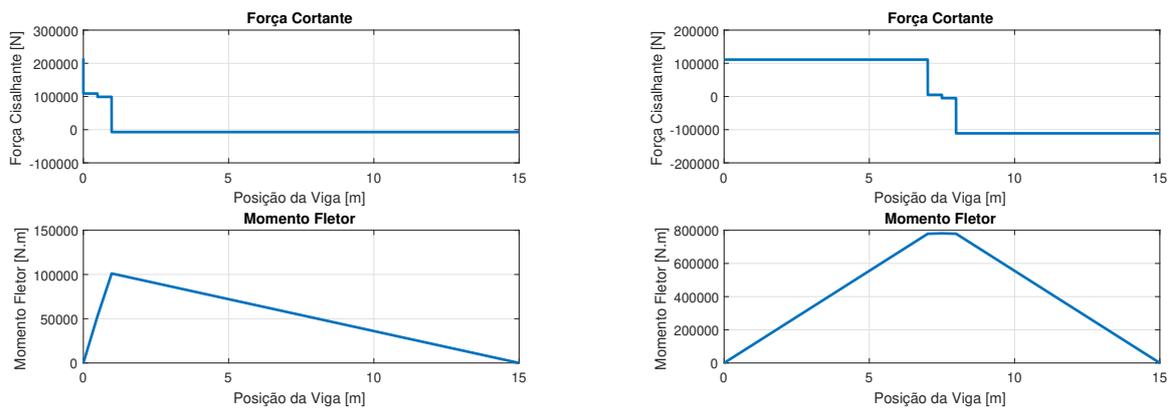
A ponte rolante será instalada em um local sem vento, ou seja, encaixa-se no caso de solicitação I. A viga principal da ponte rolante será construída em aço ASTM A572 grau 50. Este material tem como tensão de escoamento 345 MPa, módulo de elasticidade de 190 GPa e é facilmente encontrado em comércios. Logo, utilizando a Tabela 5, Equação 2.1 e Tabela 7, respectivamente temos:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= 230 \text{ MPa} \\ \tau_a &= 133 \text{ MPa} \\ \delta_{max} &= 0,0187 \text{ m}\end{aligned}\tag{4.1}$$

4.1 Processo Analítico

No primeira tentativa de dimensionamento, não se conhece o perfil utilizado da viga, logo sua massa é considerada zero. Depois de calculada as reações de apoio, obtêm-se as forças cisalhantes e momentos fletores que atuam ao longo da viga principal. Estes valores são fundamentais para determinar as tensões principais da estrutura. A Figura 15 refere-se aos diagramas obtidos para as posições críticas da viga principal da ponte rolante.

Figura 15 – Diagrama cisalhante e fletor.



(a) Talha elétrica no início da viga.

(b) Talha elétrica no centro da viga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Hibbeler (2009), o primeiro passo para a escolha da viga é feita a partir do módulo de resistência à flexão da viga S_{req} , que é uma relação entre o momento

de inércia da secção transversal I e a distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado do eixo neutro c . Além disso, o módulo de resistência à flexão pode ser calculado em termos de momento fletor máximo e tensão admissível do material. Para este caso, têm-se que:

$$\begin{aligned} S_{req} &= \frac{I}{c} = \frac{M_{max}}{\sigma_a} \\ &= 0,0032 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Nesta primeira etapa, encontrou-se as dimensões iniciais da viga a partir de auxílio da ferramenta computacional FTool para o cálculo do momento de inércia. Esta ferramenta agilizou o processo de cálculo do módulo de resistência a flexão, pois o *software* realiza este processo de forma automática. As dimensões obtidas são apresentadas na Tabela 10. Buscou-se utilizar espessuras de chapas encontradas no mercado nacional e, além disso, determinou-se que a cota b_1 fosse de 400 milímetros (para evitar interferência com a abertura da talha elétrica).

Tabela 10 – Dimensões após primeiro processo iterativo.

Cota	b_1	b_2	h	t_{f1}	t_{f2}	t_w	c
Dimensão (m)	0,4	0,4	0,254	0,0762	0,0762	0,0254	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das Equações 3.4 e 3.8, determinou-se as tensões atuantes na viga e a deflexão máxima da viga, apresentados na Equação 4.3. Ao verificar os critérios da Equações 3.9, somente o critério de tensão cisalhante é aprovado, logo, a viga deve ser redimensionada.

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= 236 \text{ MPa} \\ \tau_{max} &= 27,5 \text{ MPa} \\ \delta &= 0,2030 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.3)$$

O redimensionamento da viga é feito a partir da metodologia apresentada com auxílio do Microsoft Excel e Octave. Buscou-se minimizar a quantidade de material empregado na estrutura da viga, visto que é diretamente ligada ao custo do equipamento e seu peso.

Após o processo de iteração, obteve-se as seguintes dimensões:

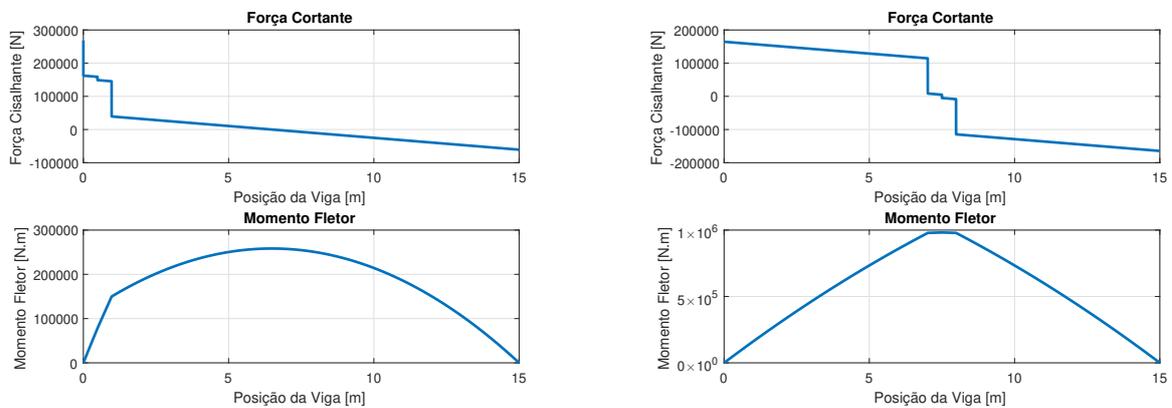
Tabela 11 – Dimensões da viga principal.

Cota	b_1	b_2	h	t_{f1}	t_{f2}	t_w	c
Dimensão (m)	0,4	0,4	0,68	0,0762	0,0762	0,0254	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das novas dimensões, calcula-se os novos diagramas de força cisalhante e momento fletor, dados na Figura 16. O desenho do projeto da viga principal da ponte rolante proposta neste trabalho se encontra no Anexo A.

Figura 16 – Diagrama cisalhante e fletor.



(a) Talha elétrica no início da viga.

(b) Talha elétrica no centro da viga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

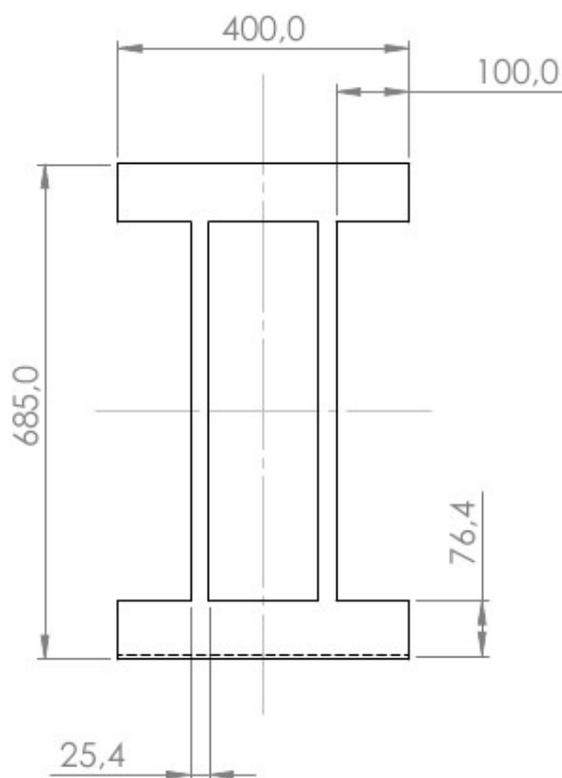
Com isso, chega-se as seguinte tensões máximas e deslocamento máximo. Comparando com os critérios já descritos, a viga está dimensionada de acordo com a norma vigente.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{max} &= 54,9 \text{ MPa} \\
 \tau_{max} &= 9,48 \text{ MPa} \\
 \delta &= 0,0177 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

4.2 Verificação Computacional

Para modelar a geometria da viga foi usado o software SolidWorks 2018 versão estudantil. Inicialmente foi feito um esboço do perfil da viga usando as medidas conforme Tabela 11. A Figura 17 mostra o esboço do perfil da viga no software de CAD, as dimensões mostradas pelas cotas estão em milímetros.

Figura 17 – Perfil final da viga principal.



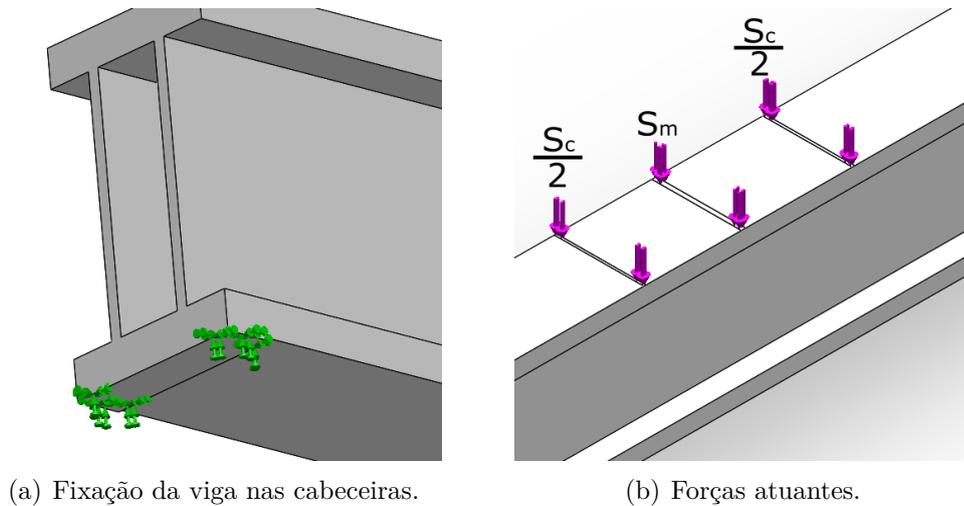
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do esboço, realizou-se o processo de modelagem da viga e foi especificado para o software que o material da viga é ASTM A572 grau 50 (considerando a região elástica do material) e em sequência foi dado início às simulações. Para realizar a simulação foi usada a plataforma Simulation do SolidWorks 2018.

A primeira etapa é informar ao software os locais e os valores dos carregamentos, no caso analisado foi considerado que a talha elétrica se encontrava no meio da viga, isso foi feito para que fossem gerados os maiores valores das tensões fletoras e deflexão da viga. A Figura 18 apresenta o modelo da viga com as cargas distribuídas nos seus devidos locais e também os locais de fixação, restringindo os 6 graus de liberdade (translação e rotação nos 3 eixos) no pontos fixados.

A segunda etapa é a mais importante, pois corresponde a criação da malha, sendo que quanto menor e mais refinado for o tamanho da malha maior será o número de cálculos que o software irá executar. Contudo, uma grande quantidade de cálculos acaba por demandar um maior tempo de processamento além de exigir um maior poder de processamento do computador.

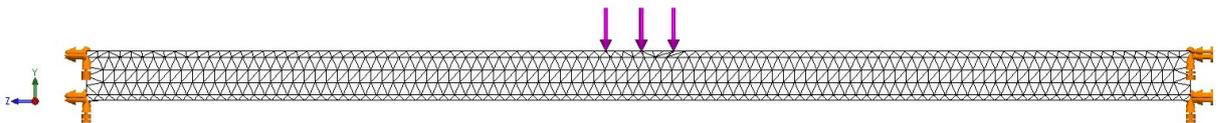
Figura 18 – Condições de fixação e carregamento da viga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha foi criada usando o gerador de malha com base em curvatura, esse gerador cria automaticamente uma malha 3D de elementos sólidos tetraédricos, ao usar o gerador de malha com base em curvatura não se tem a necessidade de se fazer o controle da malha pois o mesmo já se encarrega de refinar a malha nos locais onde se é necessário. Como a viga possui uma geometria relativamente simples não foi necessário fazer modificações na malha que o software gerou.

Figura 19 – Malha gerada.

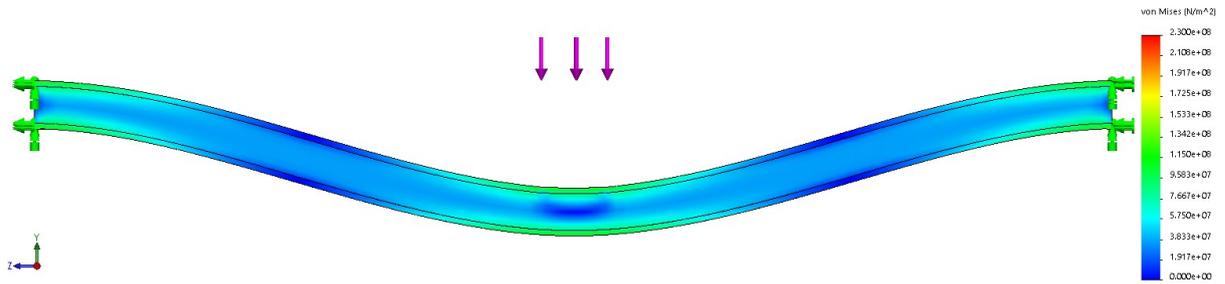


Fonte: Elaborado pelo autor.

Definida a malha, executa-se a simulação computacional. As respostas computacionais à tensão fletora, tensão cisalhante e deflexão são apresentadas na Figura 20, 21 e 22 respectivamente.

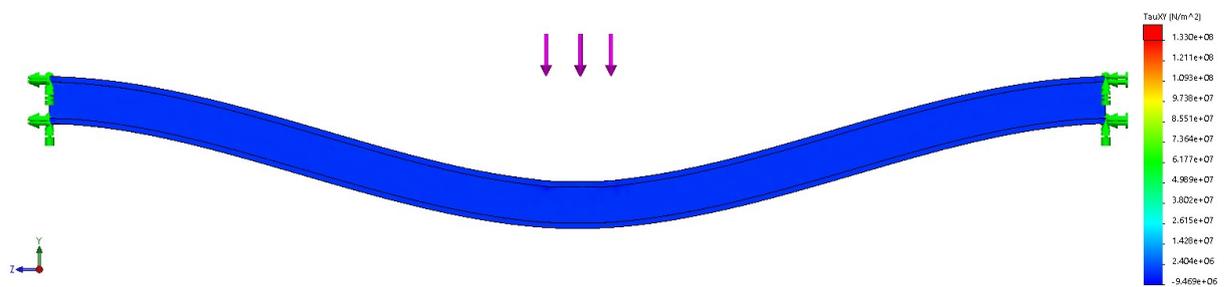
Após o término das simulações foi possível fazer uma comparação entre as tensões obtidas analiticamente e numericamente, apresentadas na Tabela 12.

Figura 20 – Resultado computacional - tensão fletora.



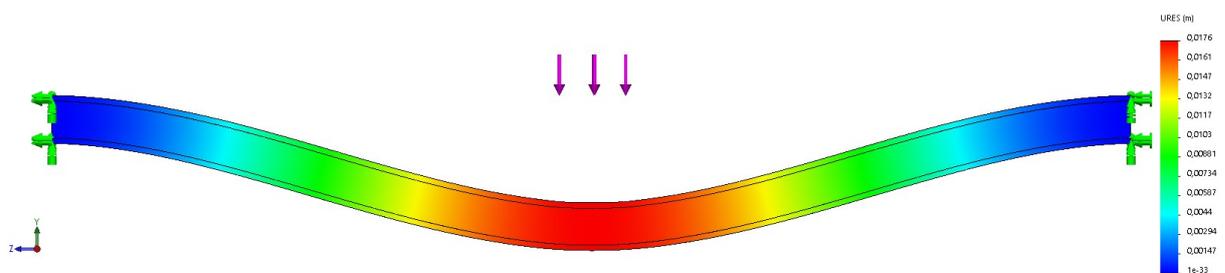
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Resultado computacional - tensão cisalhante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Resultado computacional - deflexão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Diferença entre valores obtidos pelo método analítico e simulação numérica.

Caso	Tensão Fletora Máxima (MPa)	Tensão Cisalhante Máxima (MPa)	Deflexão (m)
Analítico	54,90	9,48	0,0177
Numérico	52,82	9,47	0,0176
Diferença (%)	3,78	0,21	0,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Inicialmente, para o desenvolvimento do projeto proposto, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangendo conceitos de movimentação de carga e os principais componentes e elementos de pontes rolante. Pode-se observar que a ponte rolante desempenha um papel muito importante para a indústria, fazendo a elevação e transporte de cargas. Com a utilização destes equipamentos pode-se melhorar a eficiência do sistema de produção, movimentando quantidades exatas de materiais ao longo da linha de produção e armazenamento, reduzindo custos, garantindo um transporte seguro, maximizando a utilização do espaço e minimizando o risco de acidentes durante a movimentação manual de materiais, insumos e matéria prima.

O projeto da viga principal foi baseado nas normas ABNT NBR 8400:1984 e ANBT NBR 8800:2008. Portanto, foi de suma importância o estudo e domínio técnico dessas normas. E ainda, elas são como um guia do projetista para o dimensionamento correto de equipamentos de elevação de carga.

Para o dimensionamento da viga, foi apresentada uma metodologia analítica baseada na resistência dos materiais. Então, as equações de força cortante, momento fletor e deflexão para a viga foram determinadas. Com o auxílio de planilhas em Microsoft Excel e rotinas programadas em *software* Octave, as tensões atuantes na viga e as deflexões máximas foram obtidas. Assim, o perfil da viga do tipo caixão foi selecionada baseado no critério do módulo de resistência estático e de máxima deflexão admissível. As dimensões finais para o perfil da viga foram apresentadas na Tabela 11.

Posteriormente, a estrutura projetada foi submetida a uma análise de elementos finitos utilizando o *software* SolidWorks 2018.

Por fim, foi feita a comparação entre os resultados obtidos pelo método analítico e pelo método numérico. Os resultados se mostraram equivalentes, com diferenças insignificantes, comprovando a correto dimensionamento da viga para as solicitações de cargas requeridas.

Finalmente, este trabalho de conclusão de curso, possibilitou a aplicação de conceitos teóricos adquiridos na área de resistência dos materiais, a capacidade de sentir as próprias deficiências e a busca de auto-aprimoramento. Além disso, permitiu o aperfeiçoamento em projetos mecânicos envolvendo análise estrutural via software CAE SolidWorks.

Sugere-se para trabalhos futuros o estudo envolvendo as soldas para a construção da viga caixão e também o projeto e/ou seleção dos demais componentes da ponte rolante.

Referências

- ABUS CRANE SYSTEMS. *Cranes Solution*. 2018. Disponível em: <<https://www.abuscranes.com/>>.
- ACCENT SALES AND SERVICE. *Cranes Types*. 2015. Disponível em: <<http://accentkc.com/crane-types/>>.
- ANDY SA. *Ponte Rolante - Energia*. 2015. Disponível em: <<http://andysa.com.br/ponte-rolante-energia/>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8400*: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro, 1984. 108 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.
- BUDYNAS, R. *Elementos de Máquinas de Shigley*. São Paulo: Amgh Editora, 2016. 1096 p.
- CLIMBER. *Talha Especial*. 2017. Disponível em: <<http://www.climber.com.br/produtos/talhas-eletricas/talha-eletrica-de-cabo-de-aco/especiais>>.
- CSM, E. d. M. *Catálogo de Produtos*. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2017. 20 p.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. São Paulo: Pearson Brasil, 2009. 656 p. ISBN 9788576053736.
- MOVISERVI. *Cabeceiras para Pontes e Pórticos*. 2018. Disponível em: <<http://www.moviservi.com.br/inicial>>.
- RUDENKO, N. *Máquinas de Elevação e Transporte*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976. 425 p.
- SENA, L. d. M.; COSTA, T. S. Pórtico dupla viga com duplo balanço. *Universidade Federal Fluminense* — Departamento de Engenharia Mecânica, Niterói, p. 166, 2015.
- SGO EQUIPAMENTOS DE ELEVACAO DE CARGAS. *Ponte Rolante Dupla Viga*. 2018. Disponível em: <<http://sgoequipamentos.com/produto/ponte-rolante-dupla-viga/>>.
- SILVA, J. P. W. d. Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante. *UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul* — Departamento de ciências exatas e engenharias, Panambi, p. 52, 2017.
- SMITH, P. N. *Fundamentos para o Projeto de Componentes de Máquina*. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, [s.n.], 2005. 464 p.
- SOARES, J. O. Projecto e optimização de pontes rolantes. *Universidade do Minho* — Escola de engenharia, Braga, p. 122, 2011.

SOBUE, G. *Modelagem paramétrica de pórticos rolantes: estabilidade estrutural e otimização*. Escola Politécnica, São Paulo: [s.n.], 2005. 93 p.

SORDI, G. Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante. *Centro Universitario UNIVATES* — Centro de ciências exatas e tecnológicas, Lajeado, p. 60, 2016.

TAMASAUSKAS, A. *Metodologia do Projeto Básico de Equipamento de Manuseio e Transporte de Cargas-Ponte Rolante-Aplicação Não-Siderúrgica*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, 2000.

TECHNICAL TRANSLATION DICTIONARY. *Underslug Bridge Crane*. 2008. Disponível em: <<http://technical-portuguese.blogspot.com/2008/11/underslung-bridge-crane-ponte-rolante.html>>.

VENTOWAG. *Pórticos Rolantes*. 2014. Disponível em: <<http://www.ventowag.com.br/portico-rolante-dupla-viga-linha-stone-scd2b.php>>.

APÊNDICE A – Desenho Técnico

