

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

RENAN CARLOS DOS REIS SAMPAIO

DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL E CABECEIRAS DE UMA PONTE
ROLANTE

Xanxerê

2022

RENAN CARLOS DOS REIS SAMPAIO

DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL E CABECEIRAS DE UMA PONTE
ROLANTE

Monografia apresentada ao
Curso de Engenharia
Mecânica do Instituto Federal
de Santa Catarina Campus de
Xanxerê para a obtenção do
diploma de bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientador: Me. Carlos Alfredo
Gracioli Aita

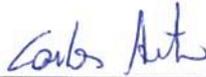
Xanxerê
2022

RENAN CARLOS DOS REIS SAMPAIO

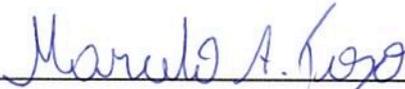
DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL E CABECEIRAS DE UMA PONTE
ROLANTE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

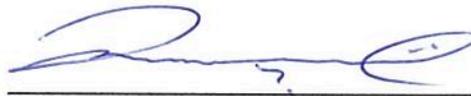
Xanxerê, 02 de dezembro de 2022.



Prof. Carlos Alfredo Gracioli Aita, Me.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Marcelo André Toso, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Raphael Basilio Pires Nonato, Me.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha amada mãe Jurema e meu amado pai Josias pelo carinho, afeto, dedicação e cuidado que me deram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A minha família, principalmente meus pais pelo incessante incentivo, apoio e atenção.

Ao meu orientador Prof. Me. Carlos Alfredo Gracioli Aita e aos demais professores do curso, por sua dedicação, paciência e conhecimento transmitido.

RESUMO

Máquinas de elevação e transporte de cargas são indispensáveis para o processo fabril nas indústrias, locais de construção e armazenagem. Para espaços delimitados e com processos definidos, torna-se mais coerente a utilização de pontes rolantes, devido ao seu alcance em todos os espaços do local de operação do equipamento. O presente estudo propõe realizar o dimensionamento de uma ponte rolante para movimentação dos equipamentos de uma hidrelétrica. Foram dimensionados os seguintes componentes estruturais da ponte rolante: viga principal e vigas das cabeceiras. Para o dimensionamento das vigas foram utilizados cálculos analíticos baseados na literatura e nas normas regulamentadoras NBR 8400:2019 e NBR 8800:2008, além do *software* FTOOL® para auxiliar na obtenção das reações e momentos fletores e seus respectivos diagramas. Para o cálculo dos componentes foram necessárias algumas considerações de projeto: A ponte rolante operará abrigada; o vão livre entre os trilhos da ponte rolante será de seis metros; e a massa da carga mais pesada a ser movimentada é de sete toneladas. Para estas condições de carga e operação é de prática corrente a utilização de uma ponte rolante univiga, com viga principal e cabeceiras formadas por perfil “I”. Foram selecionados os perfis tipo “I” W 460x97,0 para a viga principal e o perfil “I” W 200x22,5 para as cabeceiras. Nas condições apresentadas, os perfis dimensionados atendem a critérios de deformação máxima e tensões admissíveis estabelecidas pelas normas regulamentadoras do projeto destes equipamentos.

Palavras-chave: Ponte rolante; Dimensionamento; Viga.

ABSTRACT

Machines for lifting and transporting loads are indispensable for the manufacturing process in industries, construction sites and warehousing. For delimited spaces and with defined processes, the use of overhead cranes becomes more coherent, due to their reach in all spaces of the equipment operation site. The present study proposes to carry out the dimensioning of an overhead crane to move the equipments of a hydroelectric plant. The following crane structural components were designed: main beam and end trucks beams. For the dimensioning of the beams, analytical calculations were used based on the literature and the regulatory standards NBR 8400:2019 and NBR 8800:2008, in addition to the FTOOL® software to assist in obtaining the reactions and bending moments and their respective diagrams. For the calculation of the components, some design considerations were necessary: The overhead crane will operate sheltered; the free span between the overhead crane rails will be six meters; and the mass of the heaviest load to be moved is seven tons. For these load and operating conditions, it is current practice to use a single-girder overhead crane, with a main beam and end trucks formed by an "I" profile. "I" W 460x97.0 profiles were selected for the main beam and "I" W 200x22.5 profiles for the end trucks beams. Under the conditions presented, the dimensioned profiles meet the maximum deformation criteria and permissible stresses established by the regulatory standards for the design of these equipment.

Keywords: Overhead crane; Sizing; Beam.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ponte rolante com viga treliçada.....	12
Figura 2 – Ponte rolante suspensa em operação.....	19
Figura 3 – Ponte rolante apoiada operando em um armazém de bobinas de aço. ...	19
Figura 4 – Pontes rolantes de parede em linha de produção.....	20
Figura 5 – Pontes rolante univiga.....	21
Figura 6 – Ponte rolante biviga com carro guincho sobre as vigas principais.	21
Figura 7 – Viga tipo caixão (esquerda) viga em perfil “I” (direita).....	22
Figura 8 – À esquerda, barra sob tração pura (tensão normal). À direita, barra sob esforço cisalhante (tensão de cisalhamento).	24
Figura 9 – Fluxograma metodológico deste trabalho	30
Figura 10 – Estudo da ponte Rolante – Vista Frontal.....	32
Figura 11 – Estudo da ponte Rolante – Vista Lateral.	32
Figura 12 – Trecho de catálogo com dimensional da talha elétrica selecionada.....	33
Figura 13 – Interface entre trolley e viga de rolamento.	38
Figura 14 – Representação do trolley.....	41
Figura 15 – Esquema representativo da ponte rolante.....	42
Figura 16 – Diagrama de corpo livre da viga principal, posição 01.	42
Figura 17 – Diagrama de esforços cisalhantes, posição 01.	43
Figura 18 – Diagrama de momento fletor, posição 01.....	43
Figura 19 – Diagrama de corpo livre da viga principal, posição 02.	44
Figura 20 – Diagrama de esforços cisalhantes, posição 02.	44
Figura 21 – Diagrama de momento fletor, posição 02.....	44
Figura 22 – Diagrama de corpo livre da cabeceira.....	45
Figura 23 – Representação da seção de um perfil “I”.	46
Figura 24 – Vista frontal e lateral da ponte rolante com dimensões definitivas.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de utilização	27
Tabela 2 – Classes de espectro	27
Tabela 3 – Grupo de equipamentos	28
Tabela 4 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupos.....	28
Tabela 5 – Deslocamentos máximos	29
Tabela 6 – Valores de $\psi_{mín}$ e β_2	35
Tabela 7 – Valores do coeficiente de amplificação M_x	35
Tabela 8 – Coeficiente de segurança em relação ao limite elástico do material.....	36
Tabela 9 – Dados da seção transversal do perfil – viga principal.....	46
Tabela 10 – Dados da seção transversal do perfil – cabeceiras.....	47
Tabela 11 – Resultados das verificações – viga principal.....	48
Tabela 12 – Resultados das verificações – cabeceiras.	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema da pesquisa	13
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Revisão bibliográfica	15
2.2 Equipamentos de movimentação e elevação de cargas	16
2.3 Pontes rolantes	17
2.3.1 Ponte rolante suspensa.....	18
2.3.2 Ponte rolante apoiada	19
2.3.3 Ponte rolante de parede.....	19
2.3.4 Ponte rolante univiga.....	20
2.3.5 Ponte rolante biviga.....	21
2.4 Componentes da ponte rolante	22
2.4.1 Viga principal.....	22
2.4.2 Cabeceira	22
2.4.3 Carro guincho.....	22
2.4.5 Caminho de rolamento	23
2.5 Mecânica dos corpos rígidos	23
2.5.1 Tensão.....	24
2.5.2 Resistência do material e coeficiente de segurança	25
2.5.3 Deformação.....	25
2.6 Norma de projeto - NBR 8400:2019	25
2.6.1 Solicitações que interferem no cálculo da estrutura do equipamento	26
2.6.2 Classificação do equipamento.....	26
2.6.2.1 Classe de utilização.....	26
2.6.2.2 Espectro de carga	27
2.6.2.3 Classificação dos equipamentos de elevação em grupos	28
2.7 Norma de projeto - NBR 8800:2008	28
3 METODOLOGIA	30

3.1 Delimitação da pesquisa.....	31
3.2 Situação-problema e características gerais da ponte rolante.....	31
3.3 Classificação do equipamento.....	33
3.4 Carregamentos considerados no projeto	33
3.4.1 Cargas principais.....	34
3.4.2 Cargas devido ao movimento vertical.....	34
3.5 Caso de solicitação.....	35
3.6 Determinação da resistência da estrutura	35
3.6.1 Coeficiente de segurança.....	36
3.6.2 Tensão devido ao cisalhamento	36
3.6.4 Tensões combinadas.....	37
3.6.5 Verificação da resistência da aba inferior	38
3.6.6 Deslocamento	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Determinação das cargas	40
4.2 Cálculo das reações e momentos.....	41
4.2.1 Viga principal	42
4.2.2 Viga das cabeceiras	45
4.3 Definição do perfil da viga principal.....	45
4.4 Definição do perfil das cabeceiras	47
4.5 Verificações e análises	47
5 CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Máquinas de elevação e transporte de cargas são indispensáveis para o processo fabril nas indústrias, locais de construção e armazenagem. Rudenko (1976) destaca que esse tipo de processo de transporte não se limita em apenas mover cargas de um lugar para outro, mas também alojar mercadorias em armazéns e deslocá-las até os equipamentos de processo, além de assegurar uma constante transferência de cargas entre dois ou vários pontos ligados pelas atividades comuns de processo.

Para cada aplicação é utilizado um equipamento de movimentação específico. Sordi (2016) cita alguns exemplos como empilhadeiras, correias transportadoras, talhas, pontes rolantes, pórticos rolantes, transportadores pneumáticos e guindastes móveis. Para espaços bem delimitados e com processos definidos, como edifícios industriais, armazéns e usinas hidrelétricas, por exemplo, torna-se mais coerente a utilização de pontes rolantes, devido a sua capacidade de movimentação de cargas pesadas com alcance em todos os espaços do local em que está instalada. Isso porque a ponte rolante se desloca em um plano acima do plano de operação e movimentação dos materiais. A figura 1 apresenta uma ponte rolante com viga treliçada em operação.

Figura 1 - Ponte rolante com viga treliçada.



Fonte: www.demagcranes.com

1.1 Problema da pesquisa

As usinas hidrelétricas são obras de engenharia projetadas para produzir energia elétrica a partir da energia potencial hidráulica. Para isso são necessários equipamentos de grande porte, como turbinas, geradores, entre outros equipamentos periféricos. Nas usinas hidrelétricas, os equipamentos citados acima, ficam alocados em um edifício chamado casa de força. A montagem destes grandes equipamentos na casa de força, e futuras manutenções, tornam-se possíveis apenas com o auxílio de uma ponte rolante. O equipamento em estudo será responsável pela movimentação dos equipamentos dispostos na casa de força de uma pequena central hidrelétrica. Esta máquina de movimentação deve ser segura e funcional.

1.2 Justificativa

As pontes rolantes, de modo geral, são equipamentos de grande responsabilidade. A ponte rolante que será dimensionada neste estudo terá a função de movimentar equipamentos de alto valor; deve estar em condições de operação quando solicitada, pois, as paradas de geração de energia para manutenções são programadas a fim de obter o mínimo de perda na produção; o equipamento deve garantir a segurança das pessoas que circulam no plano de operação. Considerando estas premissas, é de suma importância que o projetista dimensione devidamente o equipamento, mantendo a competitividade de preço de mercado e a confiabilidade do produto final.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo dimensionar uma ponte rolante que será utilizada na implantação de uma pequena central hidrelétrica localizada em Santa Catarina. Serão dimensionados os componentes estruturais da ponte rolante: viga principal e vigas das cabeceiras. O carro guincho, responsável pelo içamento das cargas, não será dimensionado.

1.1.2 Objetivos específicos

Para este estudo, estão sendo adotados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema pontes rolantes, e dimensionamentos de componentes estruturais.
- Realizar uma apresentação da norma que regulamenta os cálculos das partes estruturais dos equipamentos de levantamento e movimentação de cargas.
- Delimitar as condições de operação da ponte rolante, e especificações de projeto.
- Definir os esforços e solicitações na estrutura da ponte e dimensionar seus componentes de acordo com a norma vigente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo se resume em apresentar as referências teóricas utilizadas para embasar o desenvolvimento deste trabalho. Portanto, serão expostos os conceitos principais relacionados ao tema. Será abordado, inicialmente, o tema referente a equipamentos de movimentação, onde serão apresentados e descritos alguns tipos de equipamentos. Na sequência serão detalhados os tipos de pontes rolantes e seus componentes. A partir disso, serão tratados dos referenciais teóricos utilizados para o dimensionamento dos componentes de uma ponte rolante. A norma brasileira que delimita os parâmetros para dimensionamento e fabricação de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas, também será abordada.

2.1 Revisão bibliográfica

Em seu trabalho, Sordi (2016) desenvolve o dimensionamento e projeto da viga principal de uma ponte rolante para utilização na indústria metal-mecânica. Para esse fim, o autor embasou o procedimento de cálculos nas normas NBR 8400 e 8800. Por fim, foi utilizado o método de elementos finitos disponível no *software* Autodesk Inventor® para visualização dos níveis de tensão e deflexão estrutural.

Ribeiro (2011) apresenta uma metodologia de dimensionamento de um pórtico rolante, fundamentado nas normas europeias. F.E.M (Fédération Européenne de la Manutention) e Eurocódigo 3. A metodologia do autor contém as definições de solicitações sobre a estrutura, de acordo com a norma F.E.M; determinação dos esforços na estrutura e verificação da resistência, de acordo com as normas F.E.M e EC3, com auxílio de um *software* de análise estrutural; especificação dos motorreductores e blocos de rodas; e elaboração dos desenhos de projeto do equipamento.

Tamasauskas (2000) disserta sobre o desenvolvimento de uma sequência de procedimentos que viabilizam a concepção de um projeto básico de um equipamento de movimentação, no caso, uma ponte rolante de aplicação não-siderúrgica. Ao decorrer do texto o autor faz análises sobre a função e classificação do equipamento, comenta e analisa o sistema de elevação de cargas, faz proposições referentes ao sistema de translação do carro, proposições para análise estrutural do carro e analisa possíveis maneiras de comando do equipamento. O

autor encerra o trabalho apresentando um exemplo do desenvolvimento da metodologia por ele elaborada, para um caso específico, de um mecanismo de levantamento de cargas de uma ponte rolante.

Fracalossi (2021) apresenta em seu artigo um estudo de viabilidade técnica e econômica de implementação de um sistema de frenagem regenerativa em movimentos de içamento de cargas por pontes rolantes, mais especificamente nos movimentos de descida da carga, com o objetivo de obter maior eficiência energética e redução de custos nos processos analisados. Para tal, o autor utilizou a biblioteca SimPowerSystems™ do software MATLAB®, para implementar um sistema de simulação do processo a ser estudado. Os parâmetros e dados essenciais para alimentação do sistema de simulação foram obtidos através de pesquisas de campo e estudos de materiais científicos. Os resultados obtidos na pesquisa mostram que, considerando o investimento inicial, no caso abordado, seria possível ter um retorno financeiro após 38 meses de uso do equipamento.

Campos (2018) desenvolve o dimensionamento dos componentes básicos de uma ponte rolante para pátio de sucata. Em sua metodologia foram aplicados cálculos analíticos embasados na literatura e normas vigentes brasileiras. Foram dimensionados os cabos de aço, o tambor, as rodas, a viga principal, o moitão, e selecionados os motores. Por fim, foi realizado um levantamento de custos do equipamento abordado.

Em sua dissertação, Soares (2018) inicia com a história do desenvolvimento das primeiras pontes rolantes, além de explicar brevemente os componentes e funcionalidades das pontes rolantes. Na sequência, são apresentados os parâmetros de projeto do equipamento e a partir disso as vigas principais são dimensionadas. Os cálculos são delimitados pelas normas europeias. Também são utilizados softwares como o Ftool® e o Solidworks® para simular o comportamento da estrutura quando aplicada a carga definida. Os demais componentes do equipamento são apenas selecionados. Soares (2018) finaliza seu trabalho com um levantamento de custos do equipamento.

2.2 Equipamentos de movimentação e elevação de cargas

A movimentação de produtos e cargas em geral, é parte indispensável dos processos de logística, armazenamento, e produção na indústria dos mais variados

segmentos. Rudenko (1976) destaca que a grande diversidade de projetos de máquinas de elevação e transporte existente é uma consequência da variedade de espécies e propriedades de cargas a serem movidas, sem as quais a produção moderna seria impossível.

Tamasauskas (2000) sugere a classificação dos equipamentos de manuseio de carga como:

- Equipamento de manuseio contínuo:
 - transportadores de correia;
 - transportadores de caneca;
 - transportadores que utilizam fusos.

- Equipamento de manuseio descontínuo:
 - talhas;
 - monovias;
 - equipamento com levantamento de carga e giro;
 - pontes rolantes
 - guindastes;

Para Tamasauskas (2000), em locais de operação fabril, ou outro segmento, para uma disposição ótima de máquinas no processo e circulação de pessoal, deve-se, sempre que possível, posicionar os equipamentos de movimentação de cargas consideravelmente acima do plano de circulação de pessoas e materiais. Máquinas como as pontes rolantes se encaixam nesse perfil. No entanto, isto pode se tornar inviável em casos onde os processos já existem, e esse tipo de concepção para movimentação das cargas não foi previsto.

Sendo assim, opta-se por alternativas diferentes da citada acima, tais como: pórticos em ambientes cobertos e empilhadeiras, por exemplo. Porém, essas opções, segundo Tamasauskas (2000) “encarecem o custo de transporte e, principalmente, provocam a necessidade de uma área maior para o processo. Têm a desvantagem, ainda, de contribuir para elevar os níveis de acidentes internos”.

2.3 Pontes rolantes

Pontes rolantes são estruturas horizontais suspensas, geralmente metálicas, que transladam sobre dois ou mais trilhos. Possuem sistemas que possibilitam a

elevação e movimentação de cargas. Portanto, são projetadas para resistir às solicitações da sua aplicação. Este tipo de máquina pode ser utilizado nos mais diversos segmentos industriais auxiliando na movimentação de matéria-prima, cargas e produtos durante todo o processo de fabricação, armazenagem e expedição.

Neto (2018) cita que a capacidade de operação das pontes rolantes pode variar entre 0,5 a 300 toneladas. Sendo que as pequenas podem elevar cargas de até 3 toneladas e as grandes até 120 toneladas. Acima de 120 toneladas são consideradas como de uso especial. Esses equipamentos geralmente operaram desde vãos pequenos de cerca de 5 metros até vãos de 30 metros, podendo atender em vãos maiores em projetos especiais.

Como consequência da variedade de situações e contextos onde as pontes rolantes podem ser aplicadas, temos algumas configurações de pontes rolantes. Estas podem ser classificadas em: ponte rolante apoiada, ponte rolante suspensa e ponte rolante de parede. Dentro dessas categorias ainda podem ser classificadas como ponte rolante univiga e ponte rolante biviga.

2.3.1 Ponte rolante suspensa

Neste tipo de ponte rolante a viga principal da estrutura do equipamento se desloca por baixo do caminho de rolamento, geralmente apoiada na aba inferior da viga do caminho. Sordi (2016) menciona que este modelo pode ser posicionado mais próximo ao teto do edifício, acarretando em um melhor aproveitamento da altura física. Por esse motivo, é aplicado quando a altura do pé direito do edifício é reduzida.

A figura 2 mostra um exemplo de ponte rolante suspensa sendo operada. Visualizando as extremidades da ponte na imagem, fica evidente o quão próximo o equipamento fica do teto.

Figura 2 – Ponte rolante suspensa em operação.



Fonte: www.demagcranes.com

2.3.2 Ponte rolante apoiada

Para Sordi (2016), o modelo de ponte rolante apoiada se caracteriza pela viga principal da estrutura da ponte transladar-se apoiada em cima do caminho de rolamento. Neste caso, o caminho de rolamento pode se firmar nas colunas e vigas do prédio, ou em pilares metálicos instalados após a construção do edifício. Um exemplo deste modelo pode ser observado na figura 3.

Figura 3 – Ponte rolante apoiada operando em um armazém de bobinas de aço.



Fonte: www.demagcranes.com

2.3.3 Ponte rolante de parede

Também conhecida como ponte rolante de console, este tipo de ponte rolante

caracteriza-se por se manter apoiada em apenas uma de suas extremidades. Passos (2011) explica que este equipamento pode ser alocado em um plano inferior a uma ponte rolante de maior porte. Desta forma, ambas podem operar em conjunto. Segundo Passos (2011), por se tratar de uma viga em balanço, são encontradas normalmente em capacidades de até 5 toneladas e extensão de até 10 metros.

A figura 4 apresenta várias pontes rolantes de parede posicionadas abaixo de pontes rolantes apoiadas, em uma linha de produção.

Figura 4 – Pontes rolantes de parede em linha de produção.



Fonte: www.demagcranes.com

2.3.4 Ponte rolante univiga

As pontes univiga são chamadas desta forma por possuírem uma viga única principal. São de construção mais simples e têm capacidades de carga relativamente baixas, normalmente até 15 toneladas, segundo Passos (2011). A viga principal serve de caminho para a talha com *trolley*, item responsável pelo içamento das cargas.

Na figura 5 pode ser visualizado um modelo de ponte rolante univiga.

Figura 5 – Pontes rolante univiga



Fonte: www.brevil.ind.br

2.3.5 Ponte rolante biviga

Sordi (2016) explica que as pontes biviga são projetadas para suportarem cargas elevadas. Para esse fim, são configuradas com duas vigas principais. As duas vigas servem de caminho para o carro guincho, que tem a mesma função das talhas, realizar o levantamento e descida das cargas. Para cargas mais elevadas, o carro guincho acaba ficando maior e mais robusto. Nesses casos, o sistema de dupla viga torna-se ideal para comportar este equipamento.

A figura 6 mostra um modelo de ponte rolante biviga. Para pontes de maiores capacidade e dimensões, passarelas são adicionadas para permitir acesso aos seus componentes de forma a facilitar a montagem e manutenção.

Figura 6 – Ponte rolante biviga com carro guincho sobre as vigas principais.



Fonte: www.brevil.ind.br

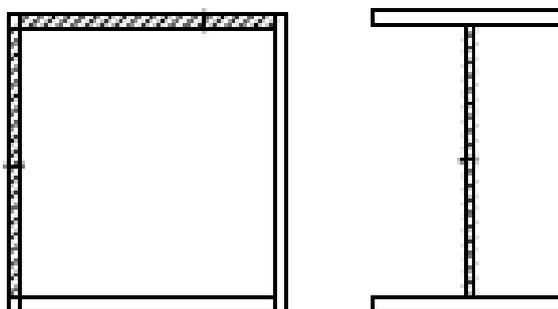
2.4 Componentes da ponte rolante

As pontes rolantes, como qualquer outro equipamento, são compostas por componentes que possuem diferentes funções no conjunto. Os principais componentes são a viga principal, cabeceiras, carro guincho, talha e caminho de rolamento.

2.4.1 Viga principal

Silva (2017) descreve a viga como um dos elementos mais importantes da ponte, pois é o elemento que servirá de caminho para o carro guincho, ou *trolley* com talha. Portanto, deverá suportar diretamente as cargas a serem elevadas. A viga pode ser um perfil “I”, viga caixão ou até mesmo treliçada. A figura 7 apresenta os dois tipos de viga principal de uso mais comum.

Figura 7 – Viga tipo caixão (esquerda) viga em perfil “I” (direita)



Fonte: Norma ABNT NBR 8800:2008, adaptado pelo autor.

2.4.2 Cabeceira

Segundo Silva (2017) as cabeceiras são estruturas fixadas nas extremidades da viga principal e têm a função de realizar a translação da ponte. Nas cabeceiras encontram-se as rodas, eixos, rolamentos e a motorização que permitem à ponte movimentar-se sobre o caminho de rolamento.

2.4.3 Carro guincho

Sordi (2016) destaca que o carro guincho é um componente que se desloca sobre a viga principal da ponte. Portanto, seu movimento ocorre perpendicular ao

movimento da ponte rolante. Nele encontra-se o conjunto da talha, responsável pela elevação das cargas. Em resumo, o carro guincho é uma estrutura com sistema de rotação que comporta o sistema de içamento da ponte.

O carro guincho é utilizado em pontes biviga, devido ao seu formato. Em casos de pontes univiga utiliza-se o *trolley*. (SILVA, 2017). O *trolley* tem a mesma função do carro guincho, porém em uma concepção mais simples. Ele é montado sob a viga principal e sustenta a talha da ponte.

2.4.4 Talha

Dispositivo fixado no carro guincho ou sob o *trolley*. É responsável pelo içamento das cargas. (SORDI, 2016). De forma simplificada, a talha é formada por um tambor onde é enrolado o cabo de aço. O tambor geralmente é acoplado em um motor elétrico. O acionamento do motor elétrico provoca o giro do tambor, enrolando ou desenrolando o cabo de aço e assim elevando ou abaixando a carga. Sordi (2016) explica que na extremidade do cabo de aço utiliza-se um gancho para facilitar a fixação da carga.

2.4.5 Caminho de rolamento

Segundo Sordi (2016), o caminho de rolamento é um trilho por onde a ponte se desloca. Rudenko (1976) cita alguns formatos de trilhos como barra chata de aço, barra quadrada de aço e trilho especial para ponte rolante. Este último tem a base larga e uma pequena altura. Todos possuem os cantos da face superior arredondados para melhorar o deslocamento da roda. Os trilhos do caminho de rolamento podem ficar sobre vigas metálicas ou de concreto, que por sua vez estão fixadas aos pilares do edifício elevadas do nível do solo.

2.5 Mecânica dos corpos rígidos

Em seu livro, Hibbeler (2010) descreve a mecânica dos corpos rígidos como essencial para o projeto e análise de muitos tipos de membros estruturais e componentes mecânicos encontrados na engenharia. Além de ser requisito básico para o estudo de outras áreas. Hibbeler (2010) ainda menciona que a mecânica dos corpos rígidos divide-se em duas áreas: estática e dinâmica. “A estática trata do

equilíbrio dos corpos, ou seja, aqueles que estão em repouso, ou em movimento, com velocidade constante; enquanto a dinâmica preocupa-se com o movimento acelerado dos corpos” (HIBBELER, 2010).

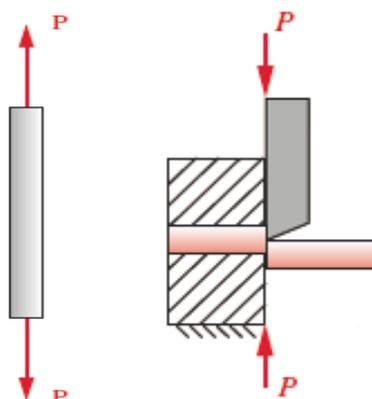
Segundo Hibbeler (2010), uma das etapas básicas no projeto de qualquer estrutura ou máquina, é usar os princípios da estática para determinar as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior. A estabilidade, tamanho dos elementos e sua deflexão, não dependem somente das cargas internas, mas também do tipo de material de que são feitos. Em virtude disso, a compreensão fundamental do comportamento do material é de vital importância para o desenvolvimento de projetos.

2.5.1 Tensão

Depois de identificadas as forças atuantes no sistema, torna-se necessário encontrar as tensões atuantes, assim como as deformações e deslocamentos. Segundo Beer e Johnston (1995), a tensão é a força por unidade de área, ou a intensidade das forças distribuídas por uma seção. A tensão é representada pela letra grega σ (sigma) ou τ (tau).

A tensão pode ser classificada como normal (σ) ou de cisalhamento (τ). Para Beer e Johnston (1995), a tensão normal ocorre quando a carga resultante e a tensão correspondente é perpendicular ao plano da seção. A tensão de cisalhamento, por sua vez, ocorre quando estes componentes estão paralelos ao plano da seção. A figura 8 representa as condições de tensão citadas acima.

Figura 8 – À esquerda, barra sob tração pura (tensão normal). À direita, barra sob esforço cisalhante (tensão de cisalhamento).



Fonte: Norton (2010), adaptado pelo autor.

2.5.2 Resistência do material e coeficiente de segurança

Beer e Johnston (1995) cita que um elemento importante a ser considerado em projeto é como o material se comportará quando aplicado um carregamento. Para isso são realizados testes específicos em corpos de prova padronizados do material em análise. Beer e Johnston (1995) explica que com os testes é possível medir as alterações no corpo de prova e a resistência do material à tração, compressão e cisalhamento. Segundo Budynas e Nisbett (2011), “a resistência é uma propriedade inerente a uma peça, uma propriedade incorporada à peça em razão do emprego de um determinado material e processo”.

Budynas e Nisbett (2011) mencionam que o projetista deve assegurar que a tensão máxima seja inferior à resistência com uma margem suficiente, para que, apesar das incertezas, as falhas sejam raras. Esta margem é o coeficiente de segurança ou fator de segurança. Para Norton (2013) o fator de segurança é tipicamente a razão entre duas quantidades que possuem as mesmas unidades, como $(\text{esforço crítico})/(\text{esforço aplicado})$, $(\text{resistência})/(\text{tensão atuante})$.

2.5.3 Deformação

Conforme Hibbeler (2010), a deformação é a mudança na forma e/ou tamanho de um corpo quando aplicada uma força sobre ele. Hibbeler (2010) categoriza a deformação como normal e por cisalhamento. A deformação normal é o alongamento ou contração de corpo por unidade de comprimento. Por sua vez, a deformação por cisalhamento é descrita por Hibbeler (2010) como sendo a mudança que ocorre no ângulo entre dois segmentos de reta de um elemento infinitesimal que inicialmente eram perpendiculares um ao outro.

2.6 Norma de projeto - NBR 8400:2019

No Brasil, a norma que baliza os parâmetros básicos para o cálculo das partes estruturais e componentes mecânicos dos equipamentos de levantamento e movimentação de cargas é a norma NBR 8400:2019. Sendo assim, este trabalho se baseará nesta norma regulamentadora para definir o dimensionamento dos componentes da ponte rolante.

A norma NBR 8400:2019 é dividida em cinco partes, cada uma delas

abordando um determinado assunto referente ao dimensionamento de equipamentos de movimentação. As partes são as seguintes:

- Parte 1: Classificação e cargas sobre estruturas e mecanismos;
- Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade;
- Parte 3: Verificação à fadiga e seleção de componentes dos mecanismos;
- Parte 4: Equipamento elétrico;
- Parte 5: Cargas para ensaio e tolerâncias de fabricação.

2.6.1 Solicitações que interferem no cálculo da estrutura do equipamento

Segundo a norma NBR 8400:2019 o cálculo da estrutura do equipamento deve ser realizado determinando as tensões atuantes na estrutura durante seu funcionamento. Essas tensões são calculadas com base nas seguintes solicitações:

- Principais, exercidas sobre a estrutura do equipamento suposto imóvel, no estado de carga mais desfavorável;
- devidas aos movimentos verticais;
- devidas aos movimentos horizontais;
- devidas aos efeitos climáticos;
- diversos;

Os tipos de solicitação citados acima serão abordados novamente no decorrer do dimensionamento da estrutura da ponte rolante.

2.6.2 Classificação do equipamento

Em razão da grande variedade de equipamentos de elevação e movimentação de cargas a norma classifica a estrutura do equipamento em diversos grupos, conforme o serviço que será executado pelo equipamento em questão. Para determinar o grupo a que pertence à estrutura, são levados em consideração dois fatores: classe de utilização, e espectro de carga.

2.6.2.1 Classe de utilização

Pela norma NBR 8400-1:2019, a classe de utilização caracteriza a frequência

de utilização do equipamento em função da utilização do movimento de levantamento, definindo-se em quatro classes. Vide Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de utilização

Símbolo	Duração total do uso		
	(Número $\eta_{m\acute{a}x}$ de ciclos de elevação)		
<i>U0</i>		$\eta_{m\acute{a}x} <$	16000
<i>U1</i>	16000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	32000
<i>U2</i>	32000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	63000
<i>U3</i>	63000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	125000
<i>U4</i>	125000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	250000
<i>U5</i>	250000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	500000
<i>U6</i>	500000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	1000000
<i>U7</i>	1000000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	2000000
<i>U8</i>	2000000	$< \eta_{m\acute{a}x} <$	4000000
<i>U9</i>	4000000	$< \eta_{m\acute{a}x}$	

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019

2.6.2.2 Espectro de carga

A normativa descreve o espectro de carga como sendo a proporção em que o equipamento levanta a carga máxima, ou apenas uma carga reduzida, ao longo de sua vida útil. A tabela 2 destaca os quatro estados de carga. Percebe-se que no estado tensão Q1 o equipamento excepcionalmente será submetido à sua tensão máxima, já no estado Q4 a estrutura estará sujeita a carga máxima regularmente.

Tabela 2 – Classes de espectro

Símbolo	Fator de espectro k_p		
	<i>Q1</i>		$k_p <$
<i>Q2</i>	0,125	$< k_p <$	0,250
<i>Q3</i>	0,250	$< k_p <$	0,500
<i>Q4</i>	0,500	$< k_p <$	1,000

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019

2.6.2.3 Classificação dos equipamentos de elevação em grupos

A tabela 3 determina os grupos dos equipamentos de elevação.

Tabela 3 – Grupo de equipamentos

Classe de espectro de carga	Classe de utilização									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019

Caso não seja possível determinar a classe de utilização e o espectro de carga, é possível declarar somente o grupo de estrutura na qual o equipamento deve ser classificado. A figura 15 apresenta um trecho da tabela guia para a escolha do grupo.

Tabela 4 – Exemplos de classificação de equipamentos em grupos.

Tipo de equipamento		Detalhes relacionados a natureza do uso	Grupo do equipamento	Classe da elevação
Referência	Indicação			
1	Equipamentos operados manualmente	-	A1-A2	HC1
2	Equipamentos de montagem e desmontagem	-	A1-A2	HC1/HC2
3	Equipamentos para casa de força	-	A2 -A4	HC1
4	Equipamentos para oficina em geral	Gancho	A3-A5	HC2/HC3
5	Equipamentos industriais em geral			
6	Equipamentos para carregamento de fundição	Garra ou eletroimã	A6-A8	HC3/HC4
7	Equipamentos para manuseio de panela de metal líquido	-	A6-A8	HC2/HC3

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019, adaptado pelo autor.

2.7 Norma de projeto - NBR 8800:2008

A norma NBR 8800:2008 se baseia no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto

de edificações.

Como a norma NBR 8400:2019 não impõe limites para a deformação ou deslocamento máximo da estrutura quando submetida a uma carga, utilizaremos a norma NBR 8800:2008 para garantirmos uma maior estabilidade e segurança do equipamento em estudo. A tabela 5 apresenta os deslocamentos máximos para as vigas de rolamentos para pontes rolantes, segundo a norma NBR 8800:2008. O símbolo δ representa o deslocamento. A letra L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço.

Tabela 5 – Deslocamentos máximos

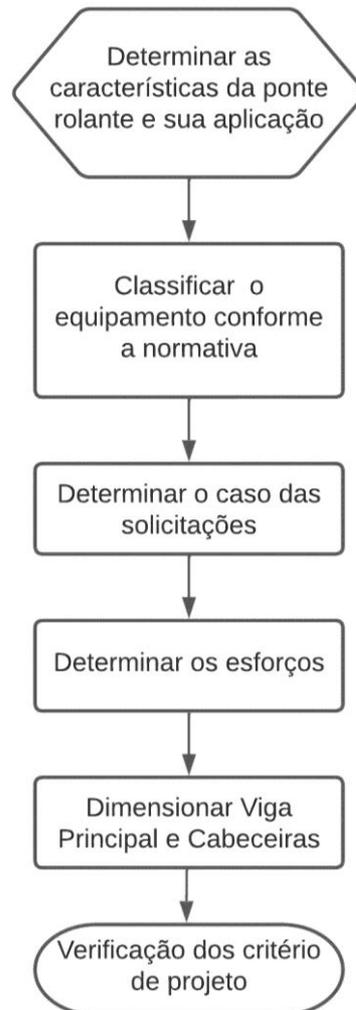
Descrição	δ
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	$L/600$
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN, exceto pontes siderúrgicas	$L/800$
Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual	$L/1000$
ou superior a 200 kN Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	$L/400$
Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600$

Fonte: Norma ABNT NBR 8800:2008, adaptado pelo autor.

3 METODOLOGIA

O presente estudo teve como propósito dimensionar os principais componentes estruturais de uma ponte rolante, mais especificamente a viga principal, e a estrutura da cabeceira. Os cálculos e análises para o dimensionamento foram baseados nas normas NBR 8400:2019 e NBR 8800:2008 e literaturas complementares. Para a realização do dimensionamento foram aplicados cálculos analíticos e utilizado o *software* FTOOL® para auxiliar na obtenção dos esforços cortantes e momentos fletores e seus respectivos diagramas. Os procedimentos para o êxito deste trabalho seguem descritos no fluxograma abaixo.

Figura 9 – Fluxograma metodológico deste trabalho



Fonte: Autor

3.1 Delimitação da pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo dimensionar componentes de uma ponte rolante para a casa de força de uma pequena central hidrelétrica. No que diz respeito à forma de abordagem do problema, este estudo qualifica-se como quantitativo, tendo em vista que as análises dos resultados serão embasadas nos cálculos dimensionais. Concernente ao ponto de vista do seu objetivo, este trabalho pode ser definido como pesquisa descritiva.

3.2 Situação-problema e características gerais da ponte rolante

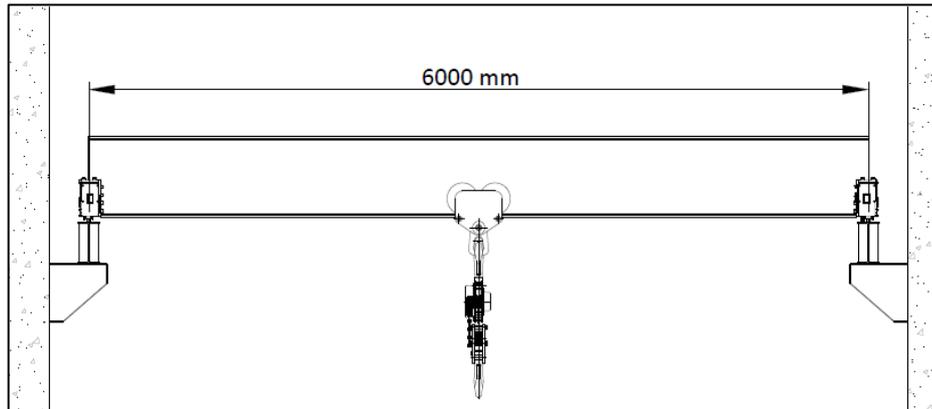
A ponte rolante em questão será utilizada para a movimentação dos equipamentos da casa de força de uma pequena central hidrelétrica localizada em Santa Catarina.

A ponte rolante operará abrigada, com temperatura máxima de 40°C. O vão livre entre os trilhos da ponte rolante será de 6 (seis) metros, e a massa da carga mais pesada a ser movimentada é de 7 (sete) toneladas. As características da ponte rolante são as seguintes:

- Carga nominal: 7000 kgf;
- Vão livre: 6 m;
- Altura de elevação: 8 m,
- Velocidade máxima de deslocamento longitudinal: 0,25 m/s;
- Velocidade máxima do *trolley*: 0,25 m/s.

Para as condições de carga e operação apresentadas acima, é de prática corrente a utilização de uma ponte rolante univiga, com viga principal formada por perfil "I". Está sendo admitida essa característica para prosseguimento do dimensionamento do equipamento. As cabeceiras da ponte rolante também são formadas por perfil "I". A ponte tem uma cabeceira de cada lado. Cada cabeceira possui duas rodas em suas extremidades, uma motora e uma movida. As figuras 10 e 11 apresentam um estudo básico ilustrando a ponte rolante com as características citadas acima.

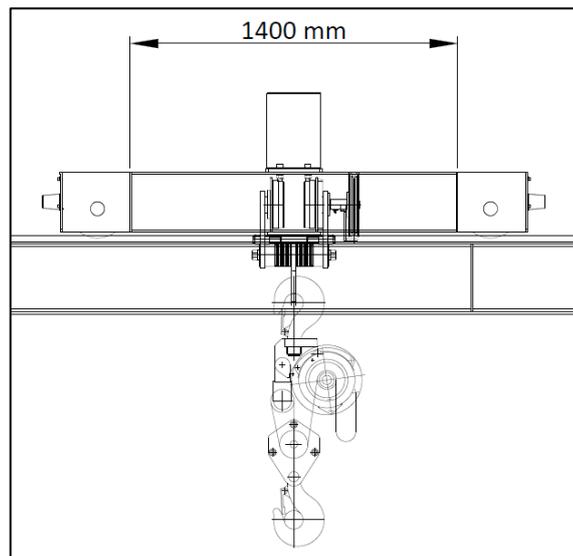
Figura 10 – Estudo da ponte Rolante – Vista Frontal.



Fonte: Autor

A figura 10 mostra uma vista frontal do estudo da ponte rolante destacando a viga principal e seu comprimento efetivo. Por sua vez, a figura 11 mostra uma vista lateral da ponte rolante com destaque para a cabeceira.

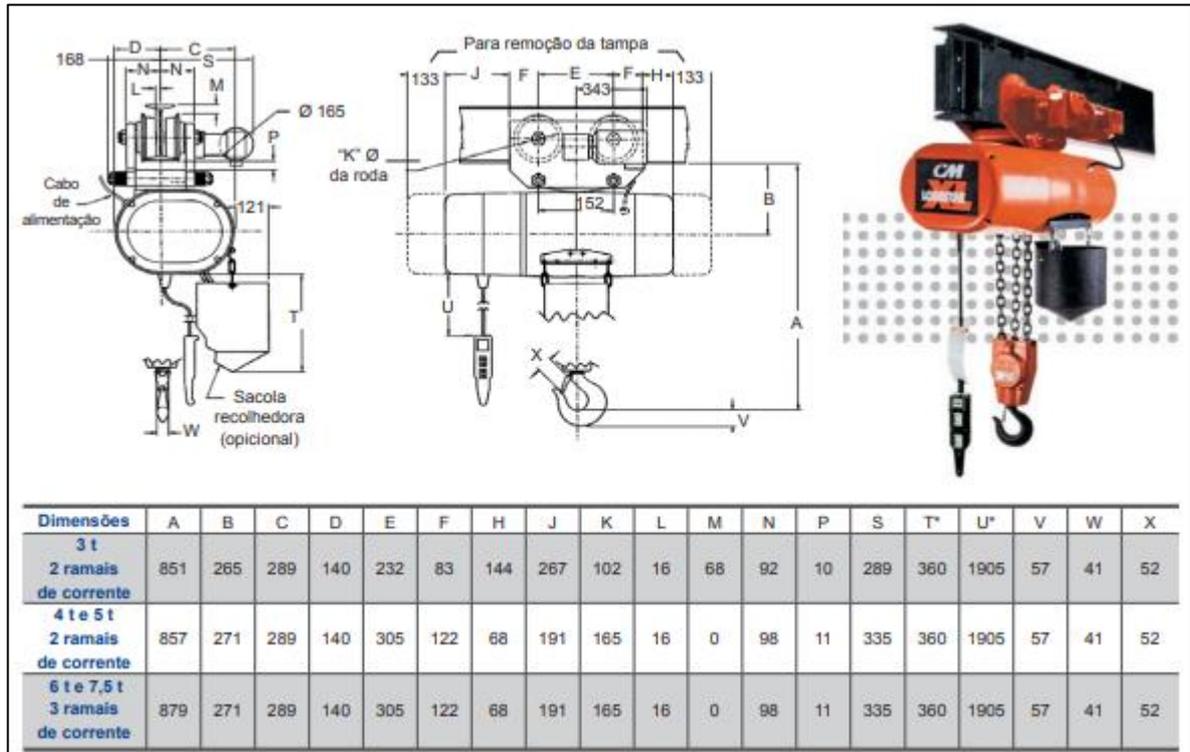
Figura 11 – Estudo da ponte Rolante – Vista Lateral.



Fonte: Autor

A talha de correntes será acionada por motor elétrico e possuirá *trolley*, também de operação motorizada, para se deslocar sob a viga principal da ponte rolante. A figura 12 apresenta o dimensional da talha escolhida: talha com três ramais de correntes e capacidade de içamento para cargas de até 7,5 toneladas.

Figura 12 – Trecho de catálogo com dimensional da talha elétrica selecionada.



Fonte: Columbus McKinnon, adaptado pelo autor.

3.3 Classificação do equipamento

Conforme explanado pela norma 8400-1:2019, a classificação do equipamento não requer um alto grau de precisão, sendo mais de natureza de estimativa. Além disso, os números de ciclos de elevação que determinam as classes de utilização não constituem valores assegurados. São apenas valores guia que servem como base para os cálculos de fadiga e correspondem à vida média esperada com um grau de segurança razoável.

Para determinar o grupo e a classe de elevação do equipamento utilizaram-se as sugestões da tabela 4. Como o equipamento em estudo será aplicado em uma casa de força de uma pequena central hidrelétrica consideramos o grupo A3 e classe de elevação HC1.

3.4 Carregamentos considerados no projeto

Devem ser determinadas as tensões desenvolvidas no equipamento durante a sua operação para conduzir os cálculos estruturais. Serão consideradas as cargas

abaixo:

- Principais, exercidas sobre a estrutura do equipamento suposto imóvel, no estado de carga mais desfavorável;
- devidas aos movimentos verticais;

3.4.1 Cargas principais

Segundo a norma 8400-1:2019, as cargas principais são as seguintes:

- carga devido ao peso morto dos componentes (peso dos componentes do equipamentos, excluindo a carga de trabalho);
- carga devido à carga de trabalho;

3.4.2 Cargas devido ao movimento vertical

Cargas originadas do içamento da carga de trabalho repentinamente, de acelerações ou desacelerações do movimento de elevação e do choque vertical das cargas devido ao deslocamento sobre trilhos.

“As oscilações causadas pela elevação da carga devem ser levadas em consideração, multiplicando-se as cargas pelo fator denominado coeficiente dinâmico ψ . (ABNT NBR 8400-1:2019).

A equação 1 descreve como é obtido o fator ψ :

$$\psi = \psi_{min} + \beta_2 \cdot V_h \quad (1)$$

Onde ψ_{min} e β_2 são fornecidos na tabela 6. Os valores estão em função da classe de elevação *HC1* a *HC4*. A classe de elevação pode ser encontrada na tabela 6. A variável V_h é a velocidade de elevação em regime constante expressa em m/s.

Tabela 6 – Valores de ψ_{\min} e β_2 .

Classe de elevação do equipamento	β_2	ψ_{\min}
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019, adaptado pelo autor.

Tendo em vista que a classe de elevação da ponte rolante em estudo é *HC1*, pela equação 1 chegamos no valor de 1,0925 para o coeficiente dinâmico. Será considerado o valor de $\psi = 1,10$.

3.5 Caso de solicitação

Para efeito de dimensionamento, três casos de solicitação devem ser avaliados. São os seguintes:

- caso I: serviço normal sem vento;
- caso II: serviço normal com vento limite de serviço;
- caso III: solicitações excepcionais;

Devido às várias cargas a serem determinadas, aumenta-se a probabilidade de imprecisão nos cálculos. Por esse motivo aplica-se um coeficiente de amplificação M_x que varia de acordo com o grupo de classificação do equipamento. Este coeficiente deve ser multiplicado às cargas mencionadas anteriormente. A tabela 7 apresenta os valores de M_x em função do grupo do equipamento.

Tabela 7 – Valores do coeficiente de amplificação M_x .

Grupo do equipamento	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
M_x	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-1:2019, adaptado pelo autor.

3.6 Determinação da resistência da estrutura

Neste tópico serão apresentados os cálculos e métodos necessários para verificar a resistência dos elementos em estudo da ponte rolante.

3.6.1 Coeficiente de segurança

A norma 8400-2:2019 estabelece que a tensão calculada não pode exceder a tensão admissível σ_a . Ao dividir a tensão de limite de escoamento σ_E pelo coeficiente v_E , que depende do caso de solicitação, obtém-se o valor da tensão admissível. A tabela 8 fornece os dados necessários para esta verificação. A ponte em estudo classifica-se no caso I.

Tabela 8 – Coeficiente de segurança em relação ao limite elástico do material.

	Caso I	Caso II	Caso III
Valores de v_E	1,5	1,33	1,1
Valores de σ_a .	$\sigma_E/1,5$	$\sigma_E/1,33$	$\sigma_E/1,1$

Fonte: Norma ABNT NBR 8400-2:2019, adaptado pelo autor.

Por sua vez, a tensão admissível ao cisalhamento τ_a , é definida pela norma 8400-2:2019 por meio da equação 2:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Onde σ_a é a tensão admissível à tração.

O material dos perfis será o aço de alta resistência mecânica ASTM A 572 Grau 50. Sua tensão de resistência ao escoamento é de 345 MPa. Portanto, resolvendo as razões apresentadas na tabela 8, para o caso I, temos que a tensão admissível é $\sigma_a = 230$ MPa. Logo, resolvendo a equação 2 encontra-se a tensão admissível ao cisalhamento, $\tau_a = 132,8$ MPa.

3.6.2 Tensão devido ao cisalhamento

Para elementos sujeitos a esforços de cisalhamento, Hibbeler (2010) descreve que o valor de tensão para esse caso pode ser obtido pela equação 3.

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (3)$$

Sendo:

τ = tensão de cisalhamento na seção;

V = força de cisalhamento interna resultante na seção determinada pelas equações de equilíbrio;

A = área da seção.

3.6.3 Tensão devido à flexão

Noton (2013) descreve que o valor tensão para elementos sujeitos a esforços de flexão pode ser obtido pela equação 4.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

Sendo:

σ = tensão normal;

M = momento fletor

I = momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro.

c = distância do plano neutro até a face mais externa da viga (ponto de maior tensão normal).

3.6.4 Tensões combinadas

Segundo a norma 8400-2:2019, em casos de tensões normais combinadas à tensões de cisalhamento a equação 5 deve ser verificada.

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

Sendo:

σ = tensão normal;

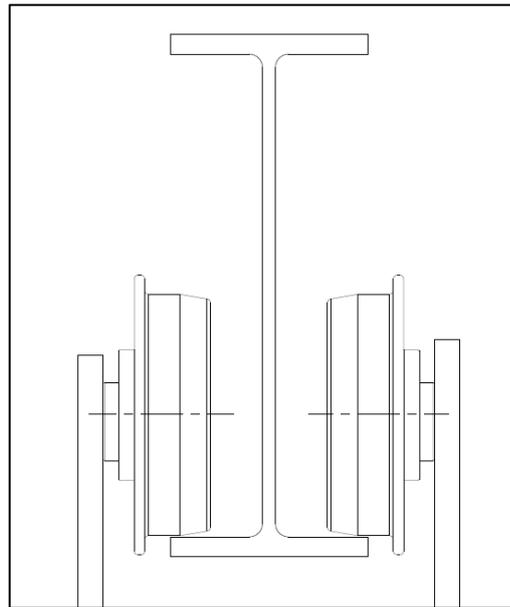
σ_c = tensão combinada;

τ = tensão de cisalhamento.

3.6.5 Verificação da resistência da aba inferior

Para Rudenko (1976), é necessário realizar uma verificação da resistência da aba inferior da viga, devido ao esforço vertical para baixo advindo das rodas da talha em operação. A figura 13 destaca de forma representativa as rodas do *trolley* de uma talha sobre a aba inferior de um perfil “I”.

Figura 13 – Interface entre *trolley* e viga de rolamento.



Fonte: Autor.

Segundo Rudenko (1976), a tensão na aba pode ser obtida pela equação 6.

$$\sigma_L = 3,05P/t^2 \quad (6)$$

Sendo:

σ_L = tensão na aba;

P = força exercida por uma roda;

t = espessura da aba.

3.6.6 Deslocamento

Para Hibbler (2010), a equação 7 pode ser utilizada para encontrar analiticamente a deflexão máxima em uma viga biapoiada com carga concentrada e centralizada.

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (7)$$

Sendo:

δ = Deflexão máxima;

P = Carga concentrada;

L = Comprimento entre apoios da viga.

E = Módulo de elasticidade do material da viga.

I = momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão definidos os perfis “I” que irão compor a viga principal e cabeceiras da ponte rolante garantindo a estabilidade e segurança necessária para a operação.

Os critérios utilizados para especificar os perfis estão listados abaixo:

- as tensões máximas devido aos esforços devem ficar abaixo das tensões admissível estabelecidas pela norma NBR 8400:2019;
- a deflexão máxima deve ficar abaixo do estabelecido pela norma NBR 8800:2008;

4.1 Determinação das cargas

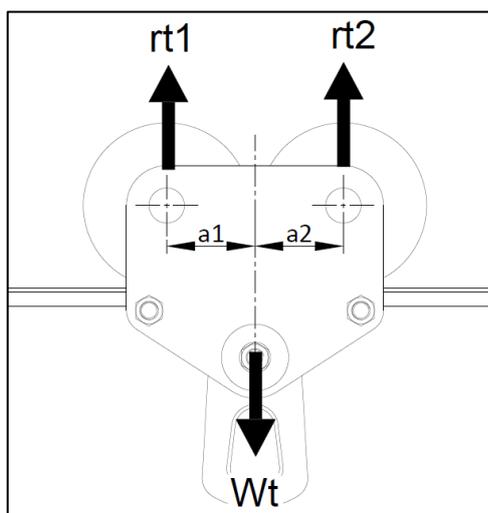
A norma NBR 8400-5:2019 estabelece que os equipamentos de movimentação devem ser submetidos a uma condição de sobrecarga em testes dinâmicos antes de entrarem em operação de fato. Segundo a norma NBR 8400-5:2019, para a ponte rolante em estudo, a carga para testes deve ser 20% maior que a carga nominal. Portanto, para o dimensionamento será considerada a carga de testes multiplicada pelo coeficiente dinâmico encontrado em 3.4.2. Esta carga será somada a massa do conjunto da talha (352 kg). Chamaremos a resultante desta carga total de Wt . A equação 8 resume como obtém-se o valor de Wt , em newtons.

$$Wt = ((7000kg \cdot 1,2 \cdot \psi) + 352kg) \cdot g \quad (8)$$

Sendo g o valor da aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), pela equação 8 obtém-se o valor de $Wt = 94097,52 \text{ N}$.

A figura 14 mostra as reações nas rodas do *trolley*. Onde $a1$ e $a2$ são as distâncias entre o centro das rodas e o centro do *trolley*, $rt1$ e $rt2$ são as reações em cada par de rodas.

Figura 14 – Representação do *trolley*.



Fonte: Autor.

Como os valores de $a1$ e $a2$ são iguais a 152,5 mm, logo temos que:

$$rt1 = rt2 = Wt/2 \quad (8)$$

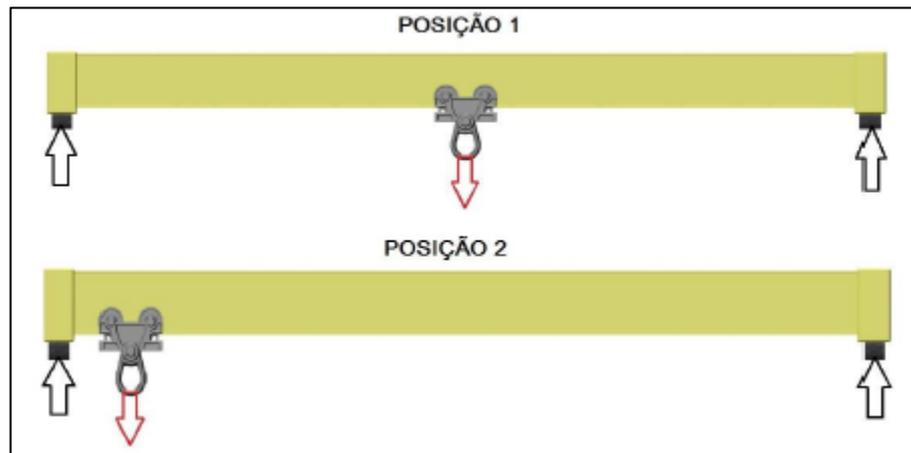
Portanto, $rt1 = rt2 = 47048,76$ N.

Além da carga pontual na viga proveniente do içamento das cargas, deve-se considerar a carga distribuída em virtude do peso próprio da viga. Como as dimensões da viga não foram definidas, foi considerada uma massa de 100kg/m. Esse valor pode ser refinado em uma próxima iteração, caso esteja muito distante do valor real.

4.2 Cálculo das reações e momentos

Definidas as cargas atuantes na estrutura, o próximo passo é obter os valores dos esforços cisalhantes e momentos fletores mais críticos. Para isso, foram simuladas através do *software* FTOOL® as condições de carga na viga principal com a talha em duas posições, conforme destaca a figura 15. Com a talha operando na posição central da viga principal, temos o caso de momento fletor máximo. Por sua vez, quando a talha opera o mais próximo possível das laterais, a viga principal está sujeita a uma condição de esforço cortante máximo, além de ser o caso de carga mais crítica que serve para o dimensionamento das cabeceiras.

Figura 15 – Esquema representativo da ponte rolante.

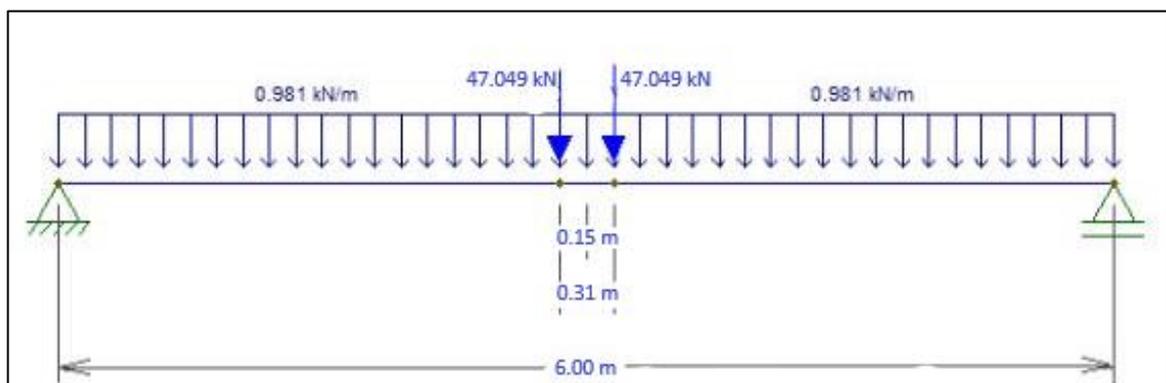


Fonte: Sordi (2016), adaptado pelo autor.

4.2.1 Viga principal

Na figura 16 pode ser verificado um desenho esquemático da viga principal com a aplicação dos esforços obtidos na seção 4.1, para a talha posicionada no centro da viga.

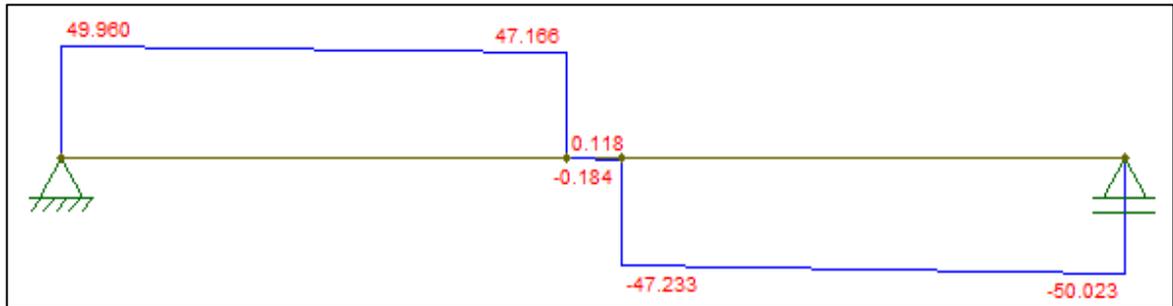
Figura 16 – Diagrama de corpo livre da viga principal, posição 01.



Fonte: Autor.

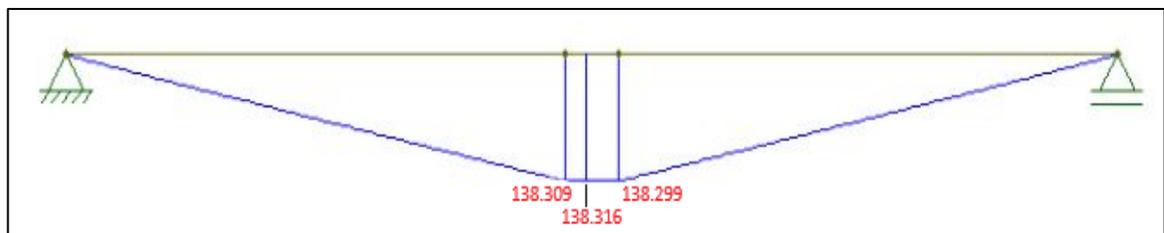
As figuras 17 e 18 mostram os diagramas de esforço cisalhante e de momento fletor na viga principal respectivamente.

Figura 17 – Diagrama de esforços cisalhantes, posição 01.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Diagrama de momento fletor, posição 01.



Fonte: Autor.

Para esta primeira posição da talha, os valores obtidos pelo FTOOL® foram:

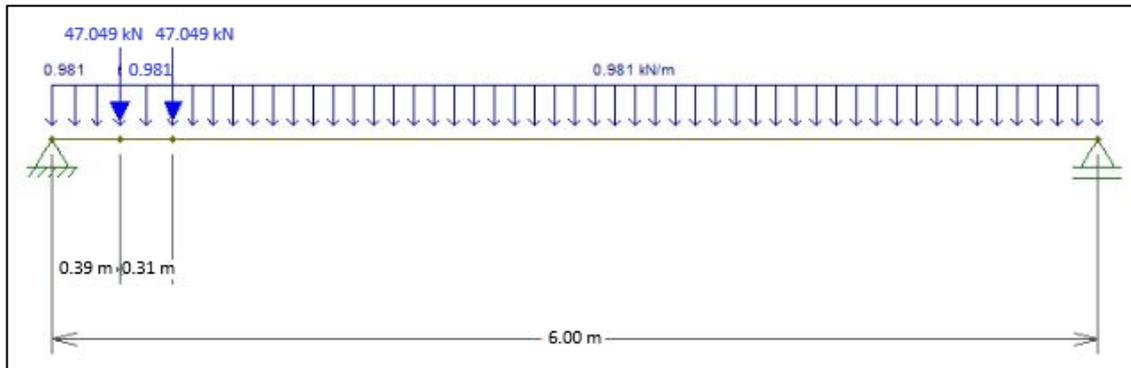
- Esforço cisalhante máximo $V1_{m\acute{a}x} = 50,023$ kN;
- Momento fletor máximo $M1_{m\acute{a}x} = 138,316$ kNm;

Estes valores devem ser multiplicados pelo coeficiente de amplificação (M_x). Segundo a tabela 7, para o caso em estudo, $M_x = 1,05$. Portanto os valores a serem considerados para o prosseguimento dos cálculos são:

- Esforço cisalhante máximo $V1_{m\acute{a}x} = 52,524$ kN;
- Momento fletor máximo $M1_{m\acute{a}x} = 145,232$ kNm;

Por sua vez, a figura 19 apresenta um desenho esquemático da viga principal com a aplicação dos esforços para a talha posicionada em uma das extremidades da viga.

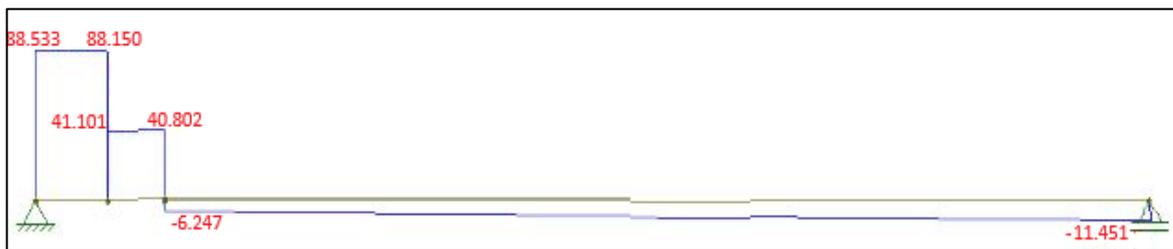
Figura 19 – Diagrama de corpo livre da viga principal, posição 02.



Fonte: Autor.

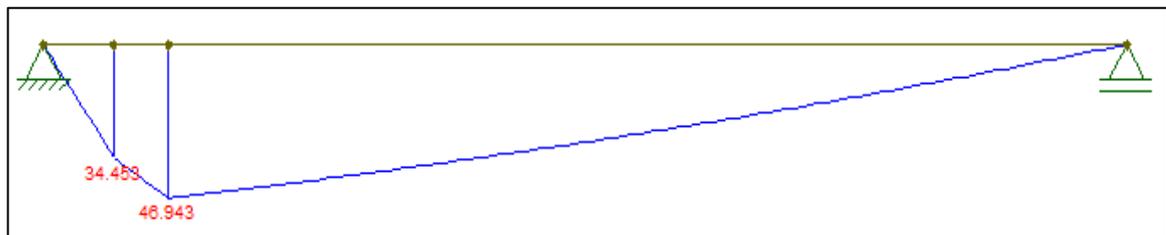
Os diagramas de esforço cisalhante e de momento fletor na viga principal são mostrados nas figuras 20 e 21 respectivamente.

Figura 20 – Diagrama de esforços cisalhantes, posição 02.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Diagrama de momento fletor, posição 02.



Fonte: Autor.

Para a segunda posição da talha, os valores obtidos pelo FTOOL®, já multiplicados por $M_x = 1,05$ são:

- Esforço cisalhante máximo $V2_{máx} = 92,960$ kN;
- Momento fletor máximo $M2_{máx} = 49,290$ kNm;

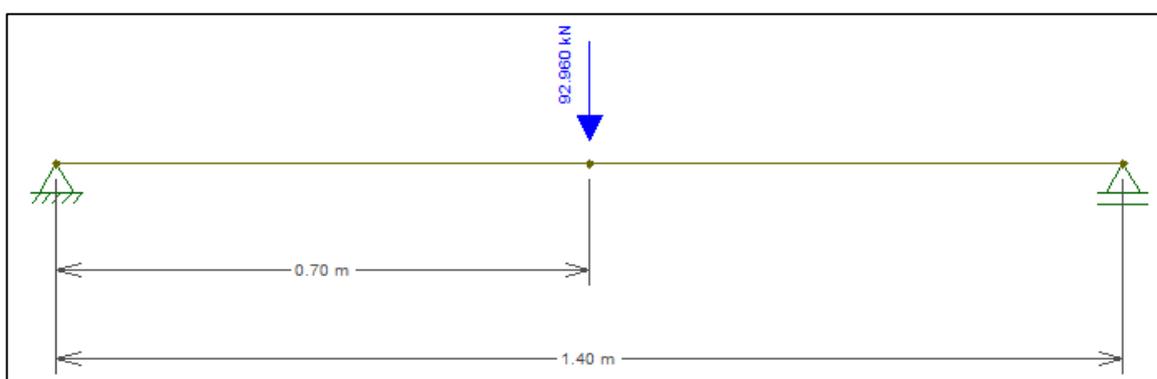
Verifica-se que na posição 1 temos uma condição de maior momento fletor

possível, já na posição 2 temos o maior esforço cisalhante possível.

4.2.2 Viga das cabeceiras

Na figura 22 pode ser verificado um desenho esquemático de uma das cabeceiras. A carga central é o esforço $V2_{máx}$ obtido na seção 4.2.1, quando a talha está toda deslocada para uma das laterais. Neste caso, a massa da viga será desconsiderada, tendo em vista que se trata de um comprimento pequeno, e estima-se um perfil de dimensões bem inferiores a da viga principal.

Figura 22 – Diagrama de corpo livre da cabeceira.



Fonte: Autor.

Os valores dos esforços obtidos pelo FTOOL® são estes:

- Esforço cisalhante máximo $V_{C_{máx}} = 46,480$ kN;
- Momento fletor máximo $M_{C_{máx}} = 32,536$ kNm;

4.3 Definição do perfil da viga principal

Inicialmente resolve-se a equação 9, com o objetivo de encontrar um valor para w_x (módulo de resistência elástico em torno do eixo x-x). Portanto, utiliza-se o momento fletor mais crítico, $M = M1_{máx} = 145,232$ kNm, e substitui-se σ pela tensão admissível $\sigma_a = 230$ MPa, conforme apresentado na seção 3.6.1. Resolvendo a equação 9, encontramos que w_x deve ser maior que $631,44$ cm³.

$$\sigma = M \cdot 10^3 / W_x \quad (9)$$

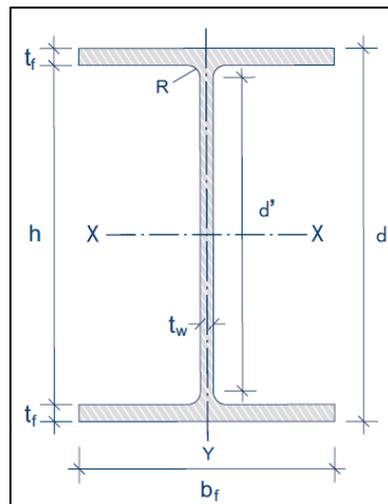
Em seguida, resolve-se a equação 6 a fim de encontrar um valor mínimo para a espessura da aba t . Considera-se $\sigma = \sigma_a = 230\text{MPa}$; $P = Wt/4 = 23524,38\text{ N}$. Resolvendo a equação 6 conclui-se que a espessura t não deve ser menor que 17,66mm

Por sua vez, resolvendo a equação 7 pode ser encontrado um valor para I (momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro). Conforme apresentado na seção 2.7 a deflexão máxima aceitável é igual a $L/600$. Portanto, para $\delta = L/600 = 10\text{mm}$; $P = Wt = 94097,52\text{ N}$; $E = 200000\text{ MPa}$; $L = 6000\text{ mm}$, conclui-se que I deve ser maior que $2,117 \times 10^8\text{ mm}^4$.

Utilizou-se um catálogo de perfis comerciais da fornecedora GERDAU para especificar o perfil "I". As informações obtidas nesta seção podem ser encontradas em catálogos de perfis. A partir desse princípio foi selecionado o perfil "I" W 460 x 97 para a viga principal.

A figura 23 junto a tabela 9 apresentam os dados da seção transversal do perfil selecionado.

Figura 23 – Representação da seção de um perfil "I".



Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

Tabela 9 – Dados da seção transversal do perfil – viga principal.

Tipo	d(mm)	bf(mm)	tw(mm)	tf(mm)	kg/m	A(mm ²)	I(mm ⁴)	W _x (cm ³)
W 460X97	466	193	11,4	19	97	1,23x10 ⁴	4,47x10 ⁸	1916,7

Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

4.4 Definição do perfil das cabeceiras

Assim como na definição da viga principal, resolvendo a equação 9 encontra-se um valor mínimo para w_x . Em vista disso, considera-se $M = M_{C_{máx}} = 32,536$ kNm e considera-se $\sigma = \sigma_a = 230$ MPa. Resolvendo a equação 9, encontramos que w_x deve ser maior que $141,46$ cm³.

Resolvendo a equação 3, encontra-se um valor mínimo para a área A da seção transversal do perfil. Considera-se $\tau = \tau_a = 132,8$ MPa; $V = V_{C_{máx}} = 46,480$ kN. Resolvendo a equação 3 conclui-se que a área da seção transversal do perfil não deve ser menor que $3,5 \times 10^2$ mm².

Por sua vez, resolvendo a equação 7 pode ser encontrado um valor para I (momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro). A deflexão máxima aceitável é igual a $L/600$. Portanto, para $\delta = L/600 = 2,33$ mm; $P = V_{2_{máx}} = 92960$ N; $E = 200000$ MPa; $L = 1400$ mm, conclui-se que I deve ser maior que $1,14 \times 10^7$ mm⁴.

Através das informações obtidas nesta seção e utilizando um catálogo de perfis comerciais, foi selecionado o perfil “I” W 200 x 22,5 para as cabeceiras.

A tabela 10 apresenta os dados da seção transversal do perfil selecionado. Estes dados podem ser mais bem compreendidos verificando a figura 23.

Tabela 10 – Dados da seção transversal do perfil – cabeceiras.

Tipo	d(mm)	bf(mm)	tw(mm)	tf(mm)	kg/m	A(mm ²)	I(mm ⁴)	W _x (cm ³)
W 200X22,5	206	102	6,2	8	22,5	$2,9 \times 10^3$	$2,03 \times 10^7$	197,0

Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

4.5 Verificações e análises

Com os perfis especificados, resta verificar se todos os critérios de dimensionamento estão sendo atendidos, e realizar uma análise para definir se estes serão os perfis aplicados no equipamento ou serão substituídos por outros.

Considera-se inicialmente a condição de carga centralizada na viga. Para encontrar a tensão resultante do momento fletor máximo, deve-se resolver a equação 4. Portanto, substituindo M por $M_{1_{máx}} = 145232$ Nm, e sendo $I =$

$4,47 \times 10^8 \text{ mm}^4$, e c igual à metade da altura total da viga, portanto $c = 233 \text{ mm}$. Logo, tem-se que $\sigma_{flexão} = 75,70 \text{ MPa}$.

A tensão devido ao esforço cisalhante é obtida resolvendo a equação 3. Então, substituindo V por $V_{1\text{máx}} = 52524 \text{ N}$ e sendo $A = 1,23 \times 10^4 \text{ mm}^2$, temos que $\tau = 4,27 \text{ MPa}$.

Neste ponto é possível encontrar a tensão combinada para este estado de solitação. Para isso, resolve-se a equação 5. Sendo $\sigma = 75,70 \text{ MPa}$ e $\tau = 4,27 \text{ MPa}$, obtém-se $\sigma_c = 76,06 \text{ MPa}$

Para encontrar a deflexão máxima, utiliza-se a equação 7. Substitui-se P por Wt somado ao peso da viga, portanto $P = 99807 \text{ N}$. Sendo $L = 6000 \text{ mm}$, $I = 4,47 \times 10^8 \text{ mm}^4$ e $E = 200000 \text{ MPa}$, obtém-se $\delta = 5 \text{ mm}$.

A verificação da tensão na aba inferior é realizada através da equação 6. Sendo $t = 19 \text{ mm}$, e $P = Wt/4 = 23524 \text{ N}$. Logo, temos $\sigma_L = 198,75 \text{ MPa}$.

De forma análoga, foram realizadas as verificações para a viga principal com a aplicação do esforço próximo às laterais, e para as cabeceiras. Os resultados das verificações da viga principal podem ser visualizados na tabela 11. Já as verificações das cabeceiras são apresentadas na tabela 12. Os coeficientes de segurança são calculados levando em consideração as tensões de resistência ao escoamento do material, $\sigma_e = 345 \text{ MPa}$, $\tau_e = \sigma_e / \sqrt{3} = 199 \text{ MPa}$.

Tabela 11 – Resultados das verificações – viga principal.

Viga principal – esforço no centro da viga			
Resultados obtidos		Admissíveis	Coeficiente de segurança
$\sigma_{flexão}$	75,70 MPa	230 MPa	4,6
$\tau_{cisalhante}$	4,27 MPa	132,8 MPa	46,6
$\sigma_{combinada}$	76,06 MPa	230 MPa	4,5
σ_{aba}	198,75 MPa	230 MPa	1,7
$\delta_{deflexão}$	5 mm	10 mm	2,0
Viga principal – esforço na extremidade da viga			
$\sigma_{flexão}$	25,72 MPa	230 MPa	13,4
$\tau_{cisalhante}$	7,53 MPa	132,8 MPa	26,4
$\sigma_{combinada}$	28,84 MPa	230 MPa	11,9

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Resultados das verificações – cabeceiras.

Cabeceiras			
Resultados obtidos		Admissíveis	Coefficiente de segurança
$\sigma_{flexão}$	165,17 MPa	230 MPa	2,1
$\tau_{cisalhante}$	16,03 MPa	132,8 MPa	12,4
$\sigma_{combinada}$	167,48 MPa	230 MPa	2,0
$\delta_{deflexão}$	1,3 mm	2,33 mm	1,8

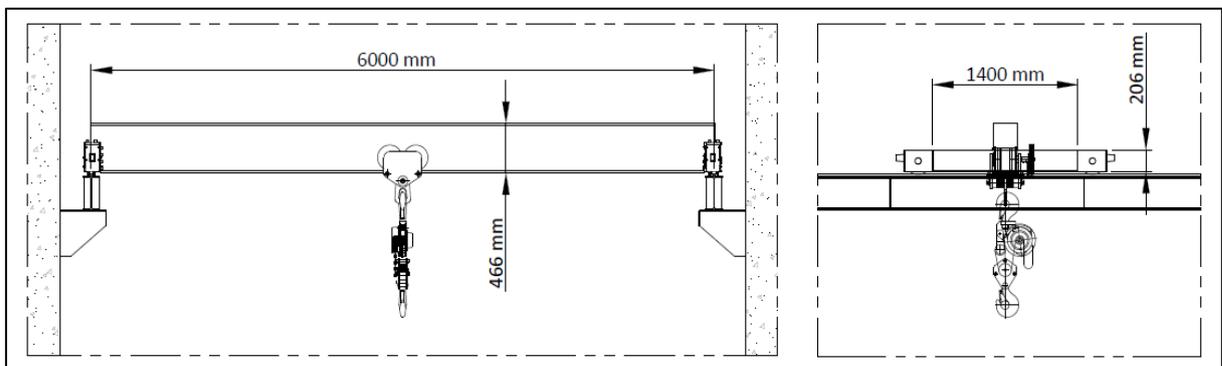
Fonte: Autor.

A tabela 12 mostra que o perfil escolhido para as cabeceiras atende aos limites impostos pelas normas. Levando-se em conta que existe uma diferença considerável entre as tensões das solicitações e as admissíveis, poderia ser escolhido um perfil mais leve. No entanto, com um coeficiente de segurança próximo de 2, o perfil escolhido se encaixa bem no contexto de aplicação do equipamento, sem excessos.

Concernente a viga principal, observa-se na tabela 11 que no geral as tensões ficaram bem abaixo das admissíveis, exceto pela tensão na aba onde o coeficiente de segurança ficou em 1,7. A deflexão obtida analiticamente com a magnitude de 5 mm é adequada para o vão livre e para a aplicação do equipamento. Este valor de deflexão indica que o componente tem uma boa rigidez e contribuirá para a ponte rolante operar com segurança.

A figura 24 apresenta uma representação da ponte rolante com as dimensões atualizadas. Percebe-se que os perfis também ficaram visualmente proporcionais ao vão livre.

Figura 24 – Vista frontal e lateral da ponte rolante com dimensões definitivas.



Fonte: Autor.

Em suma, os perfis especificados apresentam uma boa segurança e estabilidade, o que condiz com a responsabilidade do equipamento, neste caso, a movimentação de equipamentos fundamentais da casa de força de uma hidrelétrica.

Vale destacar que os coeficientes de segurança obtidos consideram o equipamento em condição de teste, portanto, com cargas 20% acima das cargas nominais. Sendo assim, evidencia-se uma maior confiabilidade na integridade dos componentes dimensionados quando em operação.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo dimensionar a viga principal e cabeceiras de uma ponte rolante através de cálculos analíticos baseados nas normas ABNT NBR 8400 e ABNT NBR 8800. Ao longo do trabalho foi destacada a importância deste equipamento de movimentação nas mais diferentes aplicações. Entre suas principais características, pode-se citar o alcance em todos os pontos da sua zona de operação.

A ponte rolante em estudo tem como função movimentar equipamento da casa de força de uma pequena central hidrelétrica. O dimensionamento dos componentes da ponte segue as orientações das normas vigentes.

As fórmulas de cálculo deste estudo baseiam-se no método dos estados limites. Portanto, as tensões e deflexões obtidas pelos cálculos não podem ser superiores as tensões e deflexões admissíveis estabelecidas pelas normas vigentes.

Para a viga principal foi selecionado o perfil "I" W460x97. Depois de realizadas as verificações, constatou-se, que a tensão mais crítica foi a tensão fletora na aba, de magnitude igual a 198,75 MPa. Neste caso o coeficiente de segurança é igual a 1,7. Por sua vez, a deflexão calculada é 5 mm, valor abaixo do limite de 10 mm estabelecido pela norma.

Para as cabeceiras foi selecionado o perfil "I" W200x22,5. Neste caso a tensão mais crítica foi a tensão combinada, de magnitude igual a 167,48 MPa. Logo o coeficiente de segurança é igual a 2,0. Por sua vez, a deflexão calculada é 1,3mm, valor abaixo do limite de 2,33 mm estabelecido pela norma.

Uma vez que, para o caso em estudo, a norma estabelece o coeficiente de segurança mínimo em 1,5, conclui-se que os componentes especificados são seguros e aptos para o pleno funcionamento da ponte rolante.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8400:2019. **Equipamentos de elevação e movimentação de carga – Regras para projeto**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT NBR 8800:2008. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Person Makron Books, 1995.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CAMPOS, A. P. M. **Projeto de Ponte Rolante**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.

FRACALOSSI, Luiz Guilherme Vianna; DOS SANTOS, Walbermark Marques. Frenagem Regenerativa na indústria: Um estudo de caso em Pontes Rolantes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 44128-44141, 2021.

HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para Engenharia**. 12 ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7 ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

LEITE NETO, A. L. L. **Projeto detalhado de uma ponte rolante para uma empresa metal mecânica**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PASSOS, L. C. **Pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de cargas**. Brasil, 2011.

PINTO, A. F. C. M. **Metodologia do Trabalho Científica**. Belo Horizonte, 2001.

RIBEIRO, F. J. G. **Dimensionamento de um pórtico rolante**. Porto, Portugal. 2011.

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

SILVA, E L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. UFSC, Florianópolis, 4. edição, v. 123, 2005.

SILVA, J. P. W. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2017.

SOARES, J. O. **Projecto e Optimização de Pontes Rolantes.** Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho – Escola de Engenharia, Braga, 2011.

SORDI, G. **Dimensionamento da Viga principal de Uma Ponte Rolante.** 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2016.

TAMASAUSKAS, A. **Metodologia do Projeto Básico de Equipamento de Manuseio e Transporte de Cargas - Ponte Rolante - Aplicação Não-Siderúrgica.** Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.