

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA PONTE
ROLANTE**

Giovani Sordi

Lajeado, julho de 2016

Giovani Sordi

DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA PONTE ROLANTE

Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Marcelo André Toso

Lajeado, julho de 2016

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial aos meus pais, Nadir Sordi e Maria do Carmo Taufer Sordi pelo apoio e o grande incentivo, os quais nunca mediram esforços para que eu realizasse esse sonho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Marcelo André Toso, pelos ensinamentos, paciência e colaboração.

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, equipamentos entre outros, nas direções longitudinal, transversal e vertical. Este trabalho apresenta o projeto e dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante univiga para aplicação na indústria metal-mecânica. O procedimento de cálculo estrutural é baseado na norma NBR 8400 e NBR 8800. A NBR 8400 estabelece os critérios mínimos para o dimensionamento de equipamentos para transporte e elevação de carga, e a NBR 8800 define os requisitos mínimos para o projeto de estruturas de aço. Após o dimensionamento e análise estrutural seleciona-se o perfil comercial W360x39 (fabricante Gerdau) para a viga principal da ponte rolante. Por fim, realiza-se uma análise de elementos finitos utilizando o software Autodesk Inventor, onde se observa que os níveis de tensão e deflexão estrutural são valores dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos normativos.

Palavras-chave: Ponte rolante. Dimensionamento. Projeto mecânico.

ABSTRACT

Overhead Cranes are equipments used for the transporting and lifting of loads, generally with high capacities and high working cycles. It is a structure, normally installed inside buildings, that is able to move loads, materials, equipments and others, in the longitudinal, transversal and vertical directions. This work presents the project and sizing of the main beam of a uni-beam overhead crane used in the metal-mechanical industry. The structural calculation procedure is based on NBR 8400 and NBR 8800. The NBR 8400 establishes the minimum criterias for the sizing of equipments for transporting and lifting loads, and the NBR 8800 defines the minimum requirements for the design of steel structures. After the sizing and structural analysis, it is selected the commercial profile W360x39 (made by Gerdau) as the main beam of the overhead crane. Then, it is analyzed the finite elements using the software Autodesk Inventor, where we can check that the tension and deflexion levels of the structure are within the limits established by the normative regulation used in this study.

Keywords: Overhead cranes. Sizing. Mechanical design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - pontes rolantes univiga utilizadas para movimentação de matéria-prima .	12
Figura 2 - ponte rolante univiga apoiada	19
Figura 3 - ponte rolante univiga suspensa	20
Figura 4 - ponte rolante univiga.....	21
Figura 5 - ponte rolante biviga.....	21
Figura 6 - representação dos principais componentes de uma ponte rolante	22
Figura 7 - roda com aba para ponte rolante	23
Figura 8: conjunto trole e talha.	31
Figura 8 - valores do coeficiente ϕ	37
Figura 9 - coeficiente que determina as reações devidas ao rolamento	38
Figura 10 - figura esquemática do trole.....	41
Figura 11 - esquema da viga principal da ponte rolante.....	42
Figura 11 - perfil w.....	43
Figura 12 - representação da ponte rolante com a viga principal, cabeceiras e trole.	45
Figura 13 - disposição do trole na viga principal da ponte rolante.....	48
Figura 14 - diagrama do máximo esforço de tração/compressão.....	49
Figura 15 - diagrama do máximo esforço cisalhante na direção y.	49

Figura 16 - diagrama do máximo esforço cisalhante na direção z.	49
Figura 17 - diagrama do máximo momento fletor na direção x.	50
Figura 18 - diagrama do máximo momento fletor na direção y.	50
Figura 19 - classificação da seção da viga.....	52
Figura 20 – representação do projeto final da ponte.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de utilização do equipamento.....	26
Tabela 2 - Estado de tensão de um elemento.....	27
Tabela 3 - Dimensões do conjunto talha e trole. Dimensões em mm.	32
Tabela 4 - Classe de funcionamento do equipamento.	33
Tabela 5 - Coeficiente dinâmico.	34
Tabela 6 - Tempo de aceleração e acelerações.	35
Tabela 7 - Coeficiente majoração para equipamentos industriais.....	39
Tabela 8 - Propriedades do perfil w360x39.....	44
Tabela 9 – Carregamento utilizados na simulação.....	47
Tabela 10 – Máximos esforços obtidos.....	48
Tabela 11 – Comparação dos resultados.....	54

SUMÁRIO

1 Introdução	11
1.1 Definição do problema	12
1.2 Justificativa do trabalho	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivos específicos.....	14
2 Fundamentação teórica.....	15
2.1 Revisão bibliográfica	15
2.2 Movimentação de carga	18
2.3 Tipos de ponte rolante.....	19
2.3.1 Ponte rolante apoiada	19
2.3.2 Ponte rolante suspensa.....	20
2.3.3 Ponte rolante univiga.....	20
2.3.4 Ponte rolante biviga.....	21
2.4 Componentes da ponte rolante	22
2.5 Projeto de máquinas	24
2.6 Elementos de máquinas.....	25
2.7 Normas de projeto.....	25
2.7.1 Abnt nbr 8400 cálculo de equipamento para elevação e movimentação de cargas	25
2.7.1.1 Classe de utilização do equipamento.....	26
2.7.1.2 Estado da carga	26
2.7.1.3 Definições gerais da norma nbr 8400.....	27
3 Metodologia.....	29
3.1 Características gerais da ponte rolante univiga.....	30
3.2 Sistema de elevação da carga	31
3.3 Classe de utilização do equipamento.....	32
3.4 Solicitações segundo a norma nbr 8400	33
3.4.1 Solicitações estáticas	33
3.4.2 Solicitações devidas ao movimento vertical	34
3.4.3 Solicitações devidas ao movimento horizontal	34
3.4.4 Efeitos da inércia devido a aceleração e desaceleração.....	35
3.4.4.1 Solicitações horizontais devido ao movimento do trolley.....	35
3.4.4.2 Solicitações devido ao movimento da ponte	37
3.4.5 Solicitações devido ao movimento transversal.....	37
3.4.6 Efeitos de choque.....	38
3.5 Casos de solicitação	38
3.6 Deflexão da viga principal	39

4 Dimensionamento da estrutura	40
4.1 Pré-dimensionamento da viga	41
4.2 Solicitações na viga principal	44
4.2.1 Peso da estrutura	45
4.2.2 Solicitação devido ao movimento horizontal.....	46
4.2.3 Forças de inércia.....	46
4.2.3.1 Sistema de elevação e carga	46
4.2.3.2 Viga principal.....	46
4.3 Esforços atuantes na viga principal	47
4.4 Verificação dos carregamentos.	50
4.4.1 Tração	50
4.4.2 Momento fletor e força cortante.....	51
4.4.2.1 Momento fletor resistente ao cálculo	51
4.4.2.2 Força cortante resistente ao cálculo.....	53
4.5 Verificação final	53
5 Conclusões.....	56
Referências	58

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual a competitividade por melhores preços, redução de custos e desperdícios é fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa. Segundo Bornia (2002, p. 27) "entende-se por desperdícios todo insumo consumido de forma não eficiente e não eficaz desde materiais e produtos defeituosos, até atividades desnecessárias".

Sabe-se que a maior perda em um processo produtivo, é ocasionada pela movimentação de carga, podendo ser materiais, matéria-prima, peças, componentes ou demais equipamentos.

Para a movimentação de carga existe uma grande variedade de equipamentos, dependendo do tipo de indústria, utilizam-se empilhadeiras móveis, correias transportadoras, pontes rolantes, pórticos rolantes, transportadores pneumáticos, talhas, guindastes móveis entre outros. Porém o que mais se destaca, sendo largamente utilizado na movimentação e elevação de cargas são as pontes rolantes.

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, equipamentos entre outros, nas direções longitudinal, transversal e vertical. Estes equipamentos caracterizam-se pela sua versatilidade e robustez, operando em lugares e situações críticas, onde a utilização do trabalho braçal e/ou outros dispositivos se torna limitada.

Passos (2011) destaca que possuem capacidade de carga variada, normalmente de 0,5 a 300 toneladas, estes equipamentos vêm sendo cada vez mais utilizados nas indústrias modernas, sendo empregadas principalmente em siderúrgicas, portos e empresas metal-mecânicas, pois sua forma construtiva e configuração atendem as necessidades de várias operações. Pontes rolantes são de fácil manuseio, aplicadas a altos ciclos de trabalho com baixa necessidade de manutenção, o que as tornam uma boa opção para o transporte e movimentação de carga. A Figura 1 apresenta três pontes rolantes univiga instaladas dentro de uma indústria metal-mecânica. Observa-se que as mesmas são utilizadas para transporte de matéria prima e peças conformadas.

Figura 1 - Pontes rolantes univiga utilizadas para movimentação de matéria-prima



Fonte: <http://strongmachines.com/>.

1.1 Definição do problema

O presente estudo visa suprir a necessidade de uma empresa metal-mecânica localizada na serra gaúcha, com atuação no mercado nacional e internacional. Devido ao segmento de atuação, os principais equipamentos desenvolvidos pela empresa

geralmente são de grande porte, pesados e com grandes dimensões. Desta forma, tem-se a necessidade de instalação de uma ponte rolante no setor de montagem.

Atualmente a empresa dispõe e utiliza empilhadeiras e paleteiras para auxiliar o processo de montagem na movimentação da carga até a expedição. Porém muitas vezes as empilhadeiras não estão disponíveis ou as cargas a serem movimentadas possuem um peso elevado. Como consequências, podem-se gerar acidentes de trabalho bem como atrasos no setor de montagem da empresa. A instalação da ponte rolante visa buscar um ganho de produtividade e também uma maior segurança aos funcionários já que as empilhadeiras não são desenvolvidas para função a qual estão sendo utilizadas.

1.2 Justificativa do trabalho

De acordo com as normas vigentes NR17 – Ergonomia, NR 11 - Transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais e NR12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos a utilização de empilhadeiras não são indicadas para a movimentação das cargas que estão sendo deslocadas na indústria em questão. Os funcionários na maioria das vezes precisam improvisar suportes e amarras expondo-os a riscos de acidentes. Além disso, empilhadeiras possuem capacidade de carga limitada e pouca versatilidade. 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.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é dimensionar uma ponte rolante univiga para a futura instalação no setor de montagem de uma empresa metal-mecânica localizada na serra gaúcha.

A análise concentra-se na parte estrutural da ponte rolante, especificamente a viga principal. Avaliam-se os carregamentos e solicitações atuantes na estrutura. O projeto dos demais componentes, carro, talha, quadro de comando, cabo de aço e conjunto de acionamento não serão desenvolvidos nesse trabalho.

1.3.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos para esse trabalho serão adotados os seguintes pontos:

- a) Fazer uma revisão bibliográfica do tema em estudo abrangendo os conceitos básicos de movimentação de carga e os principais componentes e elementos de uma ponte rolante;
- b) Analisar a norma NBR 8400 e NBR 8800 para poder aplicar as diretrizes da norma no projeto da ponte rolante;
- c) Classificar e definir as características gerais da ponte rolante, bem como as restrições de projeto;
- d) Avaliar as solicitações atuantes na viga principal e dimensioná-la conforme as normas vigentes;
- e) Realizar uma simulação de elementos finitos na viga principal da ponte rolante.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema em estudo. Inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre estado da arte. Após, avaliam-se conceitos de movimentação de carga, apresentando-se os tipos de pontes rolantes e seus respectivos componentes. Subsequentemente, avaliam-se os esforços atuantes na estrutura. Por fim, cita-se uma breve revisão condizente com as normas relacionadas ao tema em estudo.

2.1 Revisão bibliográfica

Cunha (2012) realiza um estudo teórico-prático com a finalidade de conhecer os mecanismos de desgastes envolvidos na interface roda-trilho de pontes rolantes utilizadas em siderúrgicas, com o objetivo de implementar melhorias no projeto dessas rodas, aumentando a sua vida útil, reduzindo desta forma o custo de manutenção e prejuízos causados por interrupções não programadas. O estudo consiste em analisar as influências das condições de superfície, geometria da roda, material e o efeito da lubrificação do sistema trilho-roda. Quanto à parte experimental, realizam-se quatro ensaios, onde cada roda dimensionada é colocada em operação sob as mesmas condições de trabalho. Simultaneamente fez-se o monitorando do desgaste da roda em relação ao tempo. O autor conclui que a lubrificação exerce uma influência predominante na vida útil das rodas, enquanto que a geometria da roda exerce uma influência secundária, porém com alguma contribuição.

Ribeiro (2011) apresenta uma metodologia para o dimensionamento de um pórtico rolante com vão de 13 m e capacidade de 30 ton instalado em uma pedreira.

Para dimensionamento estrutural, considera-se as normas F.E.M (Fédération Européenne De La Manutention e o Eurocódigo 3). Estas normas abordam questões específicas relativas às estruturas e dispositivos de movimentação de carga. O trabalho aborda questões como a definição das solicitações sobre a estrutura, o anteprojeto, dimensionamento dos acionamentos bem como desenhos do projeto. Na etapa final, utiliza-se um software de análise estrutural (*Multiframe3D*), para a verificação da resistência dos componentes mecânicos.

Tamasauskas (2000) apresenta em seu trabalho o desenvolvimento de modelos e procedimentos para a realização de um projeto básico de ponte rolante. O autor trata do projeto e dimensionamento dos componentes principais da ponte rolante. O trabalho é dividido em 9 Capítulos, onde cada um aborda uma parte isolada do projeto. Por exemplo, no Capítulo 4 é realizada uma proposição para o sistema de translação do carro. O Capítulo 5 aborda a análise estrutural do carro. Ao fim do trabalho, o autor apresenta um apêndice simplificado com o projeto da ponte rolante onde se utilizam os conceitos e metodologias desenvolvidas durante o trabalho.

Remor (2012) através de uma metodologia já existente de projeto de produto descreve um levantamento bibliográfico sobre o dimensionamento de uma máquina de elevação e transporte, mais especificamente um pórtico rolante. O autor realiza uma coleta de dados avaliando-se as possíveis necessidades dos usuários deste tipo equipamento. Por fim, apresenta-se a melhor concepção de produto a qual pode vir a atender as necessidades do cliente final de forma geral.

Zuberi et al. (2008) desenvolvem uma planilha de otimização para vigas de pontes rolantes, pórticos e guindastes. O trabalho consiste na criação de uma planilha, no software MS Excel, de fácil utilização. Os autores afirmam que com o uso desta metodologia obtêm-se dados confiáveis para o dimensionamento de vigas, minimizando o tempo de projeto para a fabricação das vigas confeccionadas a partir de chapas de aço. A planilha desenvolvida avalia os esforços de flexão, deflexão e cisalhamento que a viga estará sujeita. As solicitações de fadiga e soldagem não são consideradas para manter a simplicidade da planilha, porém podem ser adicionados a critério do projetista.

Moraes (2013) apresenta um projeto conceitual e o dimensionamento da estrutura de um pórtico rolante. Para o desenvolvimento do projeto, o autor utilizou as ferramentas do processo de desenvolvimento de produto (PDP). Esta ferramenta apresenta três opções de configuração para a definição do pórtico. Deve-se selecionar a configuração que obtém maior pontuação dentro do processo PDP. Além disso, para o dimensionamento da estrutura são utilizadas as normas NBR 8400 define as solicitações e as combinações de solicitações a serem consideradas na etapa de projeto e a NBR 8800 que estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto de estruturas de aço.

Sobue (2005) desenvolve uma ferramenta computacional para automatização de cálculos aplicada no projeto estrutural de pórticos rolantes. Utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF). Com esta ferramenta é possível obter-se respostas para as quais seriam difíceis de serem modeladas analiticamente. Porém em seu trabalho, o autor demonstra que apesar da ferramenta de elementos finitos ser uma ótima solução, ela por muitas vezes é demorada quando há muitas condições de contorno a serem consideradas. Com isso, foi desenvolvida uma ferramenta de pré-processamento para que sejam analisadas as várias alternativas do projeto, levando em consideração o projeto como um todo assim como o custo do mesmo. Como parte final do trabalho, o autor fez uma integração com os aplicativos Excel (Microsoft), Ansys (Ansys Inc.) e Mathcad (Mathsoft) a fim de obter uma interface amigável e um memorial de cálculo automático e confiável.

Rozzanti (2013) dimensiona e determina as tensões principais atuantes na viga principal de uma ponte rolante com capacidade de 12 toneladas para o transporte de bobinas de aço. Primeiramente o autor realiza uma revisão sobre os conceitos de mecânica dos sólidos/resistência dos materiais, bem como o método analítico de dimensionamento. Após, realiza-se um estudo sobre o método de elementos finitos, faz-se uma simulação da viga principal no software Ansys. Subsequentemente, apresenta-se os resultados do método analítico e os resultados da análise utilizando elementos finitos. Por fim, o autor faz uma comparação dos resultados obtidos através dos dois métodos, concluindo que ambas as metodologias apresentam resultados similares no que diz respeito às tensões atuantes na estrutura.

Hičár e Ritók (2006) apresentam em seu trabalho um projeto de grua com motor assíncrono e com controle de frequência para assegurar a robustez do projeto contra o peso da carga e o comprimento do cabo de içamento. Primeiramente os autores desenvolvem e aplicam modelos matemáticos nos principais componentes do guindaste que são a ponte, a lança e o caramujo para obtenção dos parâmetros para o projeto. Na segunda parte do trabalho, desenvolve-se o projeto avaliando-se a variação da carga ao longo da estrutura e o comprimento do cabo. Por fim, os autores realizam medições experimentais em um guindaste objetivando comparar os resultados com dados analíticos de projeto.

2.2 Movimentação de carga

Passos (2011) afirma que a técnica de movimentação de cargas compreende as operações de elevação, transporte e descarga de objetos manualmente ou utilizando sistemas mecânicos. Os sistemas de movimentação de cargas incluem no seu grupo os aparelhos e dispositivos que elevam e movimentam cargas cujas massas estão compreendidas pelos limites das suas capacidades nominais. O autor destaca que a eficiência na movimentação de carga é uma relação direta da especificação técnica adequada a cada uso particular, onde depende de vários fatores, dentre os mais importantes são:

O que? – a carga a ser movimentada e/ou transportada deve possuir todas as suas características definidas;

Onde? – faz-se necessário conhecer o destino final da carga que será movida;

Com que velocidade? – analisar o tempo necessário para realizar a movimentação da carga;

Como? – qual será o recurso utilizado para realizar a movimentação da carga.

Para Rudenko (1976), em toda indústria, tanto no transporte interno como externo, os manuseios de cargas dependem dos recursos disponíveis. As movimentações externas fornecem matéria-prima, artigos semi-acabados e materiais auxiliares. Já as movimentações internas transportam e distribuem as cargas que entram na empresa.

2.3 Tipos de ponte rolante

Para cada tipo de aplicação existe um equipamento ideal, as pontes rolantes seguem esse mesmo princípio. Dependendo do local e o tipo de aplicação, pontes rolantes podem ser classificadas em: ponte rolante apoiada, ponte rolante suspensa, ponte rolante univiga e ponte rolante biviga.

2.3.1 Ponte rolante apoiada

Esse tipo de ponte se desloca por cima dos trilhos do caminho de rolamento, normalmente possui travamento horizontal que impede o balanço lateral. Os trilhos são sustentados pelas colunas ou vigas dos prédios. Este modelo de ponte rolante possui vão de até 30 m e são extremamente adaptáveis aos locais de instalação, sendo uma ótima opção para locais com altura reduzida abaixo do caminho de rolamento.

A Figura 2 apresenta uma ponte rolante univiga apoiada sobre o caminho de rolamento, nota-se que essa configuração permite uma altura útil de elevação maior se comparada os outros modelos de ponte.

Figura 2 - Ponte rolante univiga apoiada



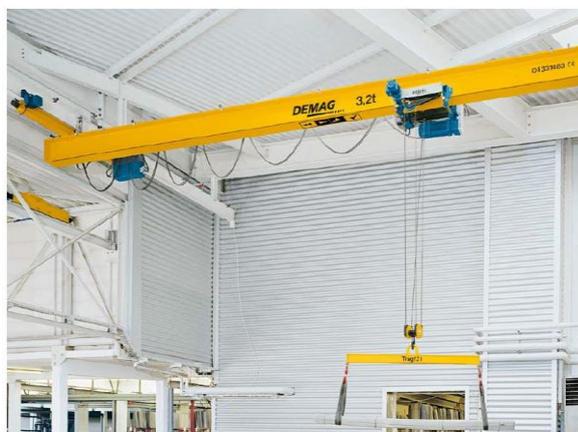
Fonte: <http://www.demagcranes.com.br/>, adaptado pelo autor (2015).

2.3.2 Ponte rolante suspensa

A viga principal desse tipo de ponte rolante se desloca por baixo do caminho de rolamento se transladando pela aba da viga do caminho. Com o caminho de rolamento fixado no teto do edifício esse modelo de ponte permite um melhor aproveitamento da altura física, sendo utilizada em locais onde a altura do pé direito é reduzida. Além disso, esse modelo de ponte permite estender o caminho de rolamento além dos pontos de fixação da estrutura, aproveitando assim ao máximo o comprimento disponível do edifício na qual a ponte rolante é instalada.

A Figura 3 mostra uma ponte rolante univiga suspensa, observa-se que devido a essa configuração é possível instalar a ponte próxima ao teto do edifício.

Figura 3 - Ponte rolante univiga suspensa



Fonte: <http://www.demagcranes.com.br>, adaptado pelo autor (2015).

2.3.3 Ponte rolante univiga

A ponte rolante univiga é constituída por duas cabeceiras, uma única viga e um ou dois carros trolley que sustentam a(s) talha trolley. O carro trolley corre na aba inferior da viga da ponte rolante. Dependendo da capacidade do vão, as vigas principais podem ser constituídas de viga tipo “I” laminada ou viga tipo “caixão” soldada. Geralmente esse tipo de ponte é aplicado para capacidades de cargas que podem chegar a até 15 toneladas (PASSOS, 2011).

A Figura 4 apresenta uma ponte rolante univiga apoiada com capacidade de 12,5 ton.

Figura 4 - Ponte rolante univiga



Fonte: http://www.modularcranes.com.au/images/big_images/DSC03298.jpg, adaptado pelo autor (2015).

2.3.4 Ponte rolante biviga

A ponte rolante biviga é similar à ponte univiga, porém possui duas vigas por onde o carro trolley se desloca. Utilizando-se esta configuração estrutural a capacidade de carregamento é muito maior se comparado às pontes rolantes univigas. Geralmente esse tipo de ponte rolante pode atender uma capacidade de carga de até 300 ton e vão de 70m. A Figura 5 mostra um exemplo de ponte rolante biviga.

Figura 5 - Ponte rolante biviga



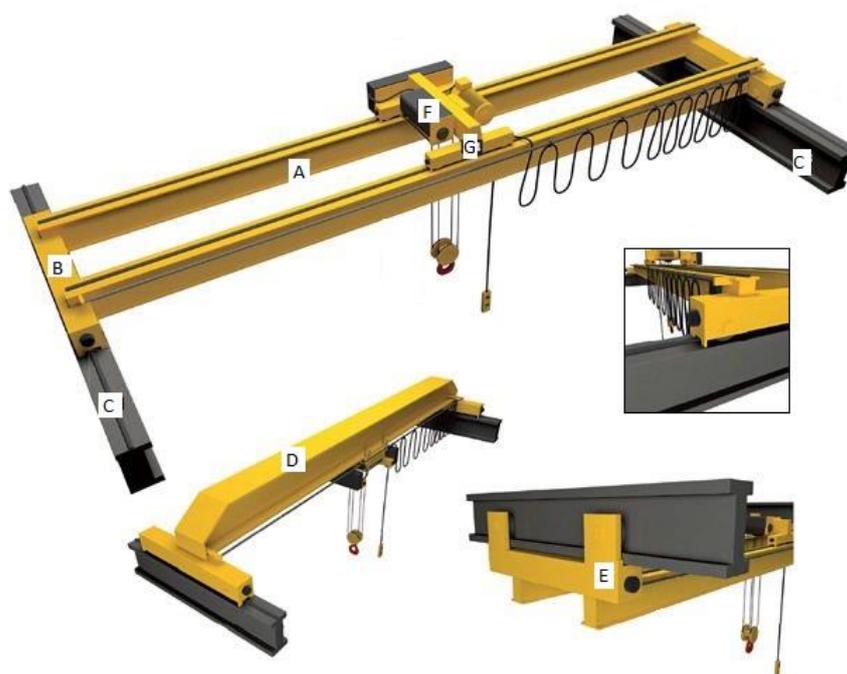
Fonte: <http://www.ainsmag.co.uk/newsimages/st165/5079st1h-mmd-factory-cranes.jpg>, adaptado pelo autor (2015).

2.4 Componentes da ponte rolante

As pontes rolantes são compostas por vários componentes onde cada qual desempenha uma função única e específica, basicamente são eles: viga principal, cabeceira, caminho de rolamento, carro, talha e rodas.

A Figura 6 representa a disposição desses componentes. As principais características construtivas destes componentes são descritas subsequentemente.

Figura 6 - Representação dos principais componentes de uma ponte rolante



Fonte: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/37/ponte-rolante-308775-1.aspx>, adaptado pelo autor (2015).

➤ Viga principal

É a estrutura principal da ponte, onde se realiza o movimento de translação do carro, percorrendo todo o vão de trabalho. A viga é a estrutura onde se concentra a maior solicitação de carga, pois é nela que o carro trolley está fixado. Usualmente construída de viga “I” ou confeccionada a partir de chapas soldadas formando uma caixa. Na Figura 6 a viga é representada por “A” e “D”.

➤ **Cabeceiras**

As cabeceiras (Figura 6 item “B”) estão localizadas nas extremidades da ponte, onde a viga principal esta fixada. Nas cabeceiras estão as rodas e o sistema de acionamento para realizar o movimento de translação da ponte rolante. As rodas se movem sobre os trilhos que compõem o caminho de rolamento da ponte.

➤ **Caminho de rolamento**

Caminho de rolamento (Figura 6 item “C”) é a base por onde a ponte ou o pórtico irá se movimentar. É através do caminho de rolamento que as cabeceiras se deslocam. Esse caminho possui diversas formas construtivas podendo ser fabricado de vigas, conforme pode ser visualizado no detalhe “E” da Figura 6, ou concreto e trilho. No caso de pontes rolantes esse caminho fica apoiado nos pilares. Tratando-se de pórticos o caminho de rolamento é feito diretamente no chão.

➤ **Carro**

Também chamado de Carro Trolley (Figura 6 item “F”). Este componente se movimenta sobre a viga principal, ou vigas no caso de uma ponte rolante biviga. No carro estão contidos o os mecanismos de elevação da carga ou a talha, item “G” da Figura 6. Desta forma, o carro é responsável pelo movimento transversal e vertical da ponte rolante.

➤ **Talha**

Este dispositivo é acoplado ao carro da ponte rolante sendo responsável por elevar a carga. É constituído basicamente por uma estrutura de fixação, um motor elétrico com sistema de freio, um tambor para recolher o cabo de aço e o cabo de aço. Usualmente utiliza-se um gancho na extremidade do cabo de aço para facilitar a fixação da carga.

➤ **Rodas**

As rodas de uma ponte rolante são fabricadas geralmente em aço doce e com o formato do trilho que irão se deslocar. Possuem uma aba lateral que impede a ponte rolante de sair do caminho de rolamento, conforme representado pela Figura 7.

Figura 7 - Roda com aba para ponte rolante



Fonte: <http://www.china360crane.com/productimage/20150822171444270.jpg>, adaptado pelo autor (2015).

2.5 Projeto de máquinas

Segundo Generoso (2009) apud Remor (2012), um projeto de máquina surge sempre para satisfazer uma necessidade, seja ela industrial, comercial, para lazer, etc. Surge da habilidade de uma pessoa ou de um grupo, transformando uma ideia em um projeto que possua a capacidade de atender e executar a tarefa desejada.

Para Shigley et al. (2005) projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema. Se tal plano resultar na criação de algo tendo uma realidade física, então o produto deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável.

Ao desenvolver um projeto é necessário atender aos requisitos mínimos de segurança, ergonomia, meio ambiente, custo de fabricação, aceitação de mercado, facilidades e manutenção. Para isso o projetista/engenheiro deve explorar ao máximo sua criatividade e conhecimento técnico para que o projeto seja desenvolvido visando atender as necessidades o qual foi proposto.

Shigley et al. (2005) cita que os recursos pessoais de criatividade, habilidade de comunicação e capacidade de solução de problemas que compõem o instrumental de um projetista estão entrelaçados com o conhecimento de tecnologia e princípios fundamentais.

2.6 Elementos de máquinas

Norton (2013) define que as peças inter-relacionadas também são chamadas de elementos de máquinas, onde a noção de trabalho útil é básica para a função de uma máquina, existindo quase sempre alguma transferência de energia envolvida.

A transferência de movimento e/ou energia é a parte fundamental para o sucesso de qualquer máquina, com isso, um estudo detalhado e minucioso sobre os elementos de máquinas é crucial para o sucesso de qualquer projeto. Os elementos de máquina são muitas vezes classificados conforme sua aplicação, ou seja:

- Elementos de fixação, onde são compreendidos os parafusos, porcas, arruelas e afins;
- Elementos de transmissão, que são basicamente os eixos, mancais, rolamentos e guias.

Remor (2012) cita que, para o desenvolvimento de um projeto, componente de máquina ou de uma estrutura, torna-se indispensável o dimensionamento dos elementos que o compõe, de modo que os mesmos possam resistir e garantir o bom funcionamento do equipamento durante a execução da tarefa a ser realizada.

2.7 Normas de projeto

Para o desenvolvimento desse trabalho utiliza-se como base a norma ABNT NBR 8400 - Cálculo de equipamento para elevação e movimentação de cargas. Esta norma estabelece os requisitos mínimos para o projeto e operação de pontes e pórticos rolantes.

2.7.1 ABNT NBR 8400 Cálculo de equipamento para elevação e movimentação de cargas

A norma base para o projeto de pontes rolantes e talhas elétricas é a NBR 8400:1984, que especifica parâmetros para dimensionamento e fabricação do equipamento. De acordo com a referida norma, os mecanismos e equipamentos de

uma máquina de elevação e transporte são classificados em diferentes grupos conforme condições de uso (LUZ, 2014).

A determinação dos grupos em que a estrutura irá pertencer dependerá de dois fatores:

- a) Classe de utilização;
- b) Estado da carga.

2.7.1.1 Classe de utilização do equipamento

Caracteriza a frequência de utilização do equipamento, ou seja, a quantidade de realizações do movimento de elevar a carga. Nessa classe estima-se a quantidade de ciclos que o equipamento irá realizar durante a sua vida útil. A classificação conta com quatro classes, sendo elas A, B, C, D. A Tabela 1 informa as classes de utilização do equipamento considerando o número de ciclos de levantamento de carga.

Tabela 1 - Classes de utilização do equipamento

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

Fonte: Norma ABNT NBR 8400, adaptado pelo autor (2015).

2.7.1.2 Estado da carga

O estado de carga caracteriza qual a proporção de carga máxima que o equipamento irá elevar ao longo de sua vida útil. Isso é comumente utilizado para caracterizar a severidade do serviço. A Tabela 2 relaciona quatro estados de carga

(ou estado de tensão) com a fração mínima de tensão máxima. Observa-se que se o estado é 0 (muito leve) a fração mínima da tensão máxima é nula, ou seja, o equipamento dificilmente irá ser submetido ao seu carregamento máximo. Por outro lado, o estado três (pesado) indica que frequentemente o equipamento será submetido ao seu carregamento máximo.

Tabela 2 - Estado de tensão de um elemento

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

Fonte: Norma ABNT NBR 8400, adaptado pelo autor (2015).

2.7.1.3 Definições gerais da norma NBR 8400

A norma apresenta algumas definições gerais, conforme:

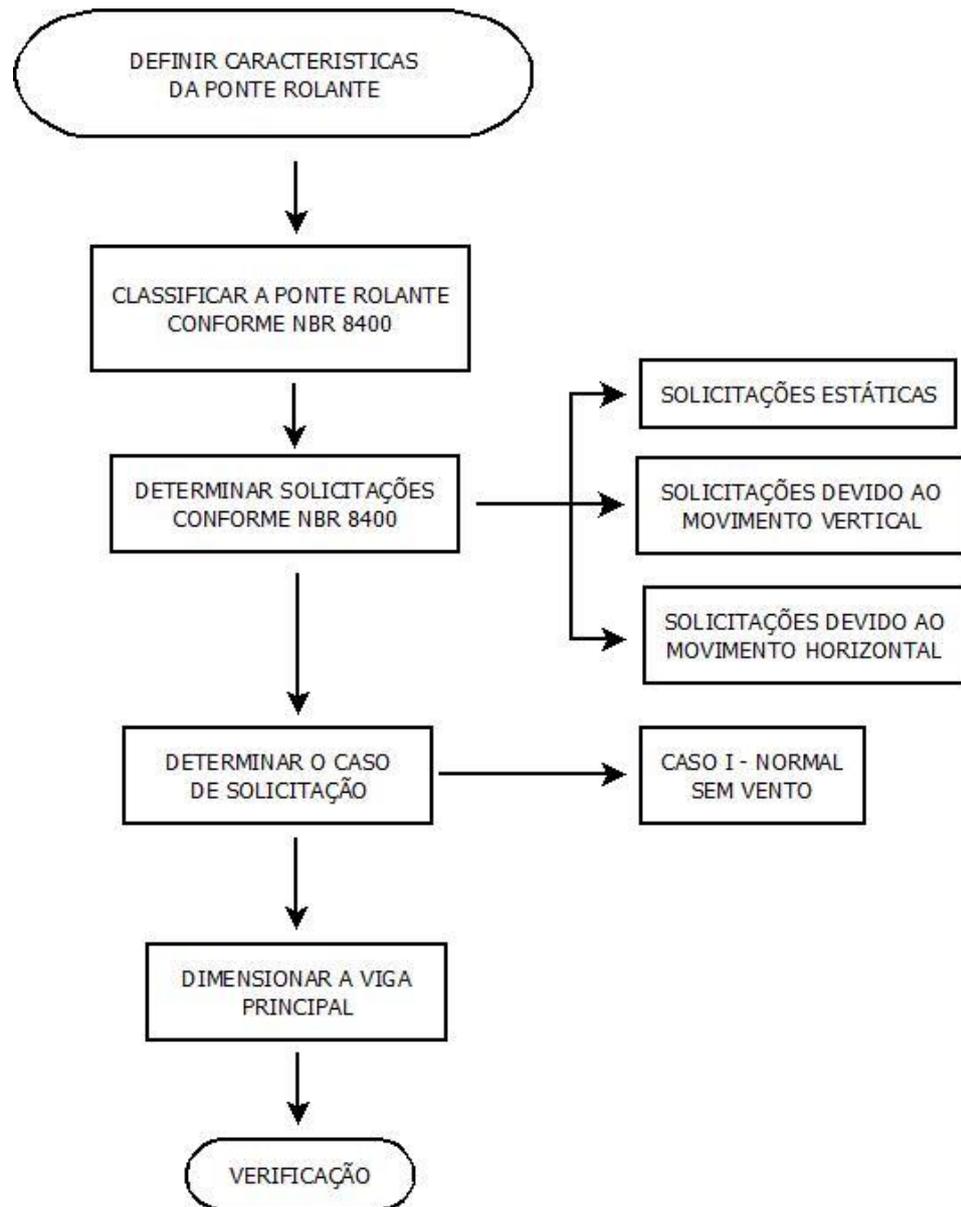
- a) **Carga útil:** é a carga que será sustentada pelo gancho ou por qualquer outro elemento de içamento;
- b) **Carga de serviço:** é a carga útil acrescida dos acessórios de içamento;
- c) **Carga permanente:** é a carga que está disposta em um componente somando todas as partes mecânicas, elétricas e o próprio peso do componente;
- d) **Serviço intermitente:** serviço em que o equipamento irá efetuar o deslocamento da carga com um número elevado de paradas;

- e) **Serviço intensivo:** serviço permanente, ou seja, utilizado sem pausa durante o turno de trabalho.

3 METODOLOGIA

Tamasauskas (2000) cita que um dos aspectos mais importantes e complexos é prever como o equipamento vai operar, ou seja, a proporção de carga usual de operação em relação à carga máxima, e a frequência de utilização.

Os critérios, características gerais, metodologia e validação do dimensionamento da viga principal da ponte rolante univiga segue os passos descritos no fluxograma a seguir:



3.1 Características gerais da ponte rolante univiga

- a) Carga nominal: a ponte rolante será dimensionada para um carregamento máximo de 5 [ton], porém normalmente as cargas içadas serão na faixa de 20% à 65% da sua capacidade máxima;
- b) Altura de elevação (H): 5 [m];
- c) Velocidade de elevação (V_L): 0,16 [m/s];

- d) Velocidade de descolamento (V_D): 0,5 [m/s];
- e) Tempo de trabalho (T): 8 [h/dia];
- f) Ciclagem média (N): 10 [ciclos/h];
- g) Tempo médio de duração do ciclo (T_s) = 350 [s];
- h) Vão: 5 [m].

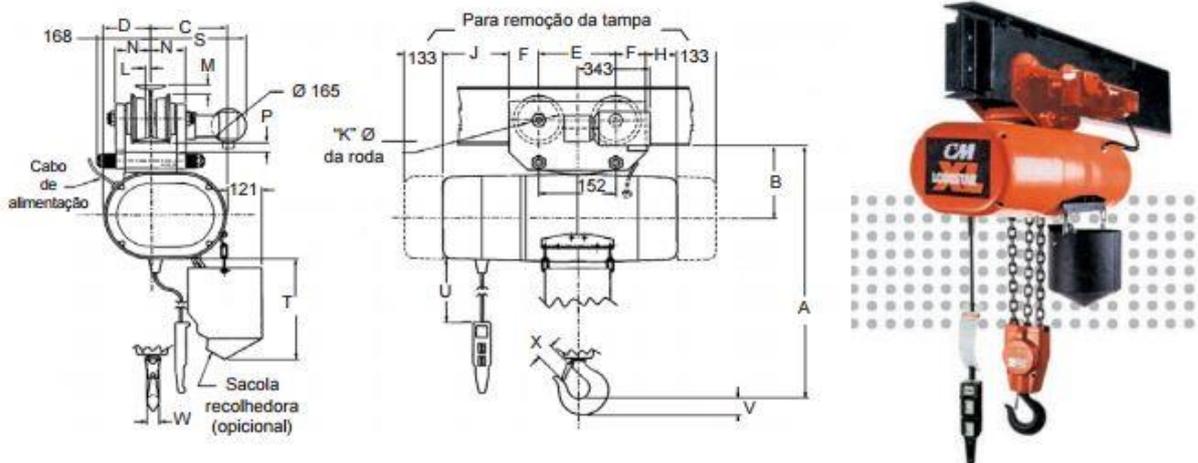
Os dados definidos previamente estão relacionados com o local de instalação da ponte, ou seja, levam em consideração as características físicas do edifício onde a ponte rolante será instalada.

3.2 Sistema de elevação da carga

O sistema de elevação será composto pelo trole e a talha. A figura 8 demonstra o conjunto selecionado para o projeto. Utilizou-se um sistema de 5 ton e 2 ramais de corrente.

Figura 8: Conjunto trole e talha.

Fonte: Columbus McKinnon.



A Tabela 3 apresenta as principais dimensões características do dispositivo selecionado.

Tabela 3 - Dimensões do conjunto talha e trole. Dimensões em mm.

5 ton 2 ramais de corrente	A	B	C	D	E	F	H	J	K
	857	271	289	140	305	122	68	191	165
	L	M	N	P	S	T	U	W	X
	16	0	98	11	335	360	1905	41	52

Fonte: Columbus McKinnon.

3.3 Classe de utilização do equipamento

Segundo a NBR 8400 a classificação do equipamento é baseada no número convencional de ciclos de levantamento (N_x), o qual é obtido a partir da Equação 3.1:

$$N_x = 3600 \times \frac{T_d}{T_s} \quad (3.1)$$

Onde, T_d é a duração teórica de utilização e T_s é o tempo médio de duração do ciclo.

O valor de $T_d = 3200$ [h] é obtido da Tabela 3, em função do tempo médio de funcionamento diário $T_m = 1,39$ [h/dia] definido pela Equação 3.2:

$$T_m = \frac{2 \times H \times N \times T}{60 \times V} \quad (3.2)$$

Resolvendo a Equação 3.1 obtém-se o valor de $N_x = 32914$. Considerando este valor e a Tabela 1, obtém-se a classe de utilização A.

A Tabela 4 apresenta as classes de funcionamento da ponte rolante de acordo com a norma NBR 8400.

Tabela 4 - Classe de funcionamento do equipamento.

Classe de funcionamento	Tempo médio de funcionamento (h)	Duração total teórica de utilização (h)
V0,25	$t_m \leq 0,5$	≤ 800
V0,5	$0,5 \leq t_m \leq 1$	1600
V1	$1 \leq t_m \leq 2$	3200
V2	$2 \leq t_m \leq 4$	6300
V3	$4 \leq t_m \leq 8$	12500
V4	$8 \leq t_m \leq 16$	25000
V5	$t_m > 16$	50000

Fonte: Norma ABNT NBR 8400, adaptado pelo autor (2015).

3.4 Solicitações segundo a norma NBR 8400

Segundo a norma NBR 8400 o cálculo da estrutura do equipamento é efetuado determinando as tensões atuantes durante seu funcionamento. Essas tensões são avaliadas com base nas seguintes solicitações:

- a) As exercidas sobre a estrutura estática, no estado de carregamento mais desfavorável;
- b) Devidas ao movimento vertical;
- c) Devidas ao movimento horizontal.

3.4.1 Solicitações estáticas

As solicitações que são significativas ao cálculo são:

- a) Devidas aos pesos próprios dos elementos, S_G ;
- b) Devidas à carga de serviço, S_L .

Os elementos móveis (carro, talha, trolley) são supostos na posição mais desfavorável, onde cada elemento da estrutura é calculado para uma determinada

posição do equipamento, originando as tensões máximas exercidas sobre cada componente da estrutura.

3.4.2 Solicitações devidas ao movimento vertical

As solicitações verticais são provenientes do içamento relativamente brusco da carga de serviço e de choques verticais devido ao movimento sobre o caminho de rolamento. Nas solicitações devidas ao levantamento da carga de serviço, considera-se, as oscilações provocadas pelo levantamento brusco da carga, multiplicando-se as solicitações devidas à carga de serviço, por um fator chamado coeficiente dinâmico (ψ). Os valores do coeficiente dinâmico são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficiente dinâmico.

Equipamento	Coeficiente dinâmico ψ	Faixa de velocidade de elevação da carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < V_L \leq 0,25$
	$1 + 0,6 V_L$	$0,25 < V_L < 1$
	1,60	$V_L \geq 1$

Fonte: Norma ABNT NBR 8400, adaptado pelo autor (2015).

Como a velocidade da ponte será de 0,16 [m/s], o coeficiente dinâmico (ψ) terá o valor de 1,15.

3.4.3 Solicitações devidas ao movimento horizontal

A norma 8400 prevê que as solicitações devidas aos movimentos horizontais são:

- a) Os efeitos da inércia devido a aceleração e desacelerações proveniente ao movimento de translação e levantamento da carga;
- b) As reações horizontais transversais provocadas pela translação direta;

c) Os efeitos de choque.

3.4.4 Efeitos da inércia devido a aceleração e desaceleração

Segundo a NBR 8400 a cálculo das forças horizontais resultantes da aceleração e desaceleração é baseado no movimento do trolley e no movimento da ponte. Para esse trabalho essas solicitações não são necessárias para o dimensionamento da viga principal.

3.4.4.1 Solicitações horizontais devido ao movimento do trole

Os esforços devem ser calculados em função do tempo de aceleração e desaceleração conforme as condições de utilização do equipamento e a velocidade de elevação da carga. Sabendo que a velocidade de elevação da ponte será de 0,16 [m/s] tem-se que o tempo de aceleração é 2,5 [s], e aceleração 0,064 [m/s²]. Esses valores são obtidos a partir da Tabela 6.

Tabela 6 - Tempo de aceleração e acelerações.

Velocidade a atingir		Equipamentos de velocidade lenta e média	
(m/s)	(m/min)	Tempos de aceleração (s)	Acelerações (m/s ²)
2	120	9,1	0,22
1,6	96	8,3	0,19
1,0	60	6,6	0,15
0,63	37,8	5,2	0,12
0,40	24	4,1	0,098
0,25	15	3,2	0,078
0,16	9,6	2,5	0,064

Fonte: NBR 8400, adaptado pelo autor.

Segundo a NBR 8400 o método de cálculo para determinar as solicitações horizontais segue o seguinte procedimento:

- a) massa equivalente. A massa equivalente para esse caso é igual a massa do sistema de elevação, ou seja, é a massa da talha mais a massa do trolley (Columbus McKinnon.);

$$m_{e_q} = 135 \text{ [kg]} \quad (3.3)$$

- b) força de inércia média: a força de inércia média é obtida a partir da Equação 3.4, onde m_1 é a massa, e J_m é a aceleração ou desaceleração média;

$$F_{cm} = m_1 \times J_m \quad (3.4)$$

Resolvendo a Equação 3.4, sabendo que a carga $m_1 = 5000 \text{ [kg]}$ e $J_m = 0,064 \text{ [m/s}^2\text{]}$, obtém-se o valor de $F_{cm} = 320 \text{ [N]}$

- a) Período de oscilação: O período de oscilação é obtido através da Equação 3.5 é $T_1 = 4,48 \text{ [s]}$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.5)$$

Onde:

l = comprimento de suspensão da carga no ponto mais elevado.

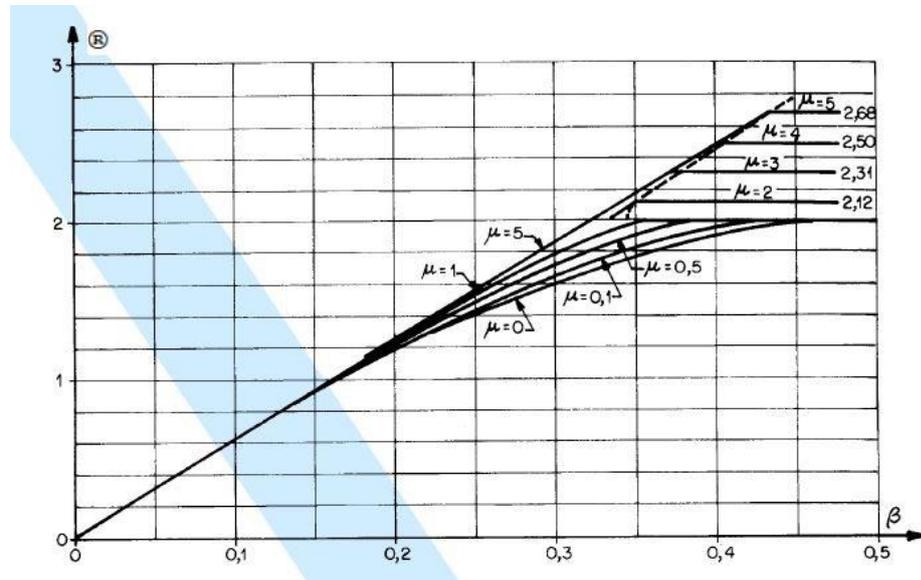
g = aceleração da gravidade

- b) Coeficiente μ : Segundo a norma 8400, quando o sistema possuir controle de aceleração e desaceleração o valor de $\mu = 0$, portanto será adotado esse valor para os cálculos subsequentes. Neste projeto, o trolley e todo o sistema de movimentação contará com um sistema eletrônico de controle de aceleração, desaceleração e de torque;
- c) Coeficiente β : Esse coeficiente relaciona a duração média de aceleração ou desaceleração pelo período de oscilação. Através da Equação 3.6 o valor obtido de $\beta = 0,55$;

$$\beta = \frac{T_m}{T_l} \quad (3.6)$$

- d) Coeficiente \textcircled{R} : Esse coeficiente é obtido a partir da Figura 8, onde relaciona os valores de μ e β . Portanto o valor $\textcircled{R} = 2$

Figura 8 - Valores do coeficiente \textcircled{R}



Fonte: NRB 8400, adaptado pelo autor (2015).

- e) Força de inércia devido a carga: $F_{cm} = 640 [N]$ calculada pela Equação 3.7.

$$F_{cm\acute{a}x} = \textcircled{R} \times F_{cm} \quad (3.7)$$

3.4.4.2 Solicitações devido ao movimento da ponte

As solicitações devido ao movimento da ponte serão avaliadas após o pré-dimensionamento da viga.

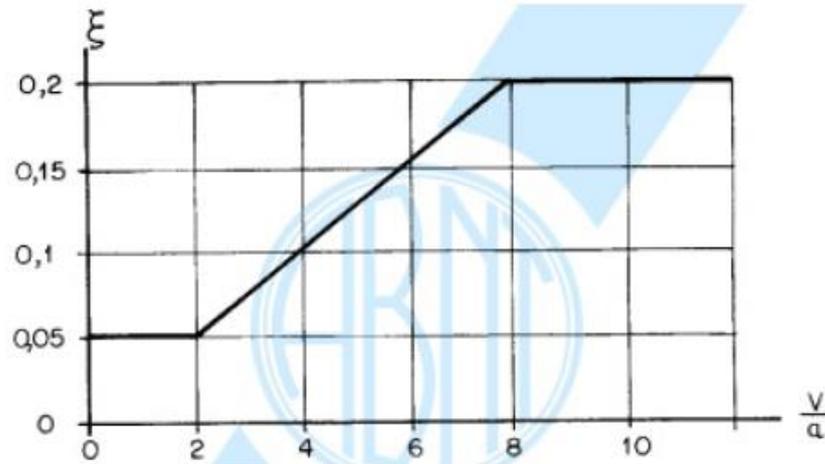
3.4.5 Solicitações devido ao movimento transversal

Segundo a norma NBR 8400 essas solicitações são devidas ao levantamento, considerando o desalinhamento da carga de trabalho ou o travamento das rolas do trole. Para o cálculo dessa solicitação deve-se multiplicar a carga de trabalho pelo coeficiente (ξ), que pode ser obtido pela Figura 9, onde:

$V =$ vão;

a = distância entre eixos do trolley.

Figura 9 - Coeficiente que determina as reações devidas ao rolamento



Fonte: NRB 8400, adaptado pelo autor (2015).

Considerando o vão (V) 200 [mm] e distância entre eixos de 305 [mm], tem-se que:

$$\frac{V}{a} = 0,65$$

Assim o coeficiente ξ é igual a 0,05.

3.4.6 Efeitos de choque

Segundo a norma NBR 8400, velocidades de deslocamento horizontal menores que 0,7 [m/s] os efeitos de choque contra batentes não são considerados.

3.5 Casos de solicitação

De acordo com a norma NBR 8400 são previstos nos cálculos 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.

Em virtude da ponte rolante ser instalada e utilizada dentro do edifício, será abordado apenas o Caso I – serviço normal sem vento.

A NBR 8400 ressalta que as diversas solicitações determinadas conforme seção 4 podem, em alguns casos, serem ultrapassadas devido a imprevistos e/ou dimensionamento errôneo da estrutura. Portanto, utiliza-se um coeficiente de majoração (M_x) nos cálculos. Esse coeficiente depende do grupo de trabalho que o equipamento está classificado, de acordo com o exposto na Tabela 7. Desta forma, devido à classificação da ponte rolante, o coeficiente de majoração (M_x) = 1.

A norma NBR 8400 estabelece que para o caso I, devem-se considerar as solicitações estáticas devidas ao peso próprio S_G , as solicitações devidas à carga de serviço S_L , e os dois efeitos horizontais mais desfavoráveis, S_H multiplicados pelo coeficiente de majoração (M_x).

$$M_x \times (S_G + (\text{®} \times S_L) + S_H) \quad (3.8)$$

Tabela 7 - Coeficiente majoração para equipamentos industriais

GRUPO	1	2	3	4	5	6
M_x	1	1	1	1,06	1,12	1,2

Fonte: Norma ABNT NBR 8400, adaptado pelo autor (2015).

3.6 Deflexão da viga principal

A norma NBR 8800 estabelece que para pórticos com capacidade inferiores a 200 kN a flecha máxima admissível (δ_m) seja $L/600$, onde L é o comprimento da viga principal. Desta forma, para esse trabalho será utilizada a relação $L/600$.

4 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Nessa seção será apresentado o dimensionamento, escolha e validação do perfil da viga principal da ponte rolante. O dimensionamento será regido pelas normas ABNT 8400 e ANBT 8800.

Na visão de Sobue (2005) não existe ferramentas analíticas disponíveis para o dimensionamento estrutural de pórticos e pontes rolantes, mas sim equações de verificação, com base na experiência do projetista.

Segundo a NBR 8400 (1984) devem-se analisar os seguintes casos para evitar falhas estruturais:

- a) Ultrapassagem do limite de escoamento;
- b) Ultrapassagem das cargas críticas de flambagem;
- c) Fadiga.

Neste trabalho não será analisado nenhum mecanismo que promova a falha por fadiga na viga principal, pois a mesma será confeccionada a partir de um perfil comercial não havendo concentradores de tensão ou redução em sua seção transversal.

4.1 Pré-dimensionamento da viga

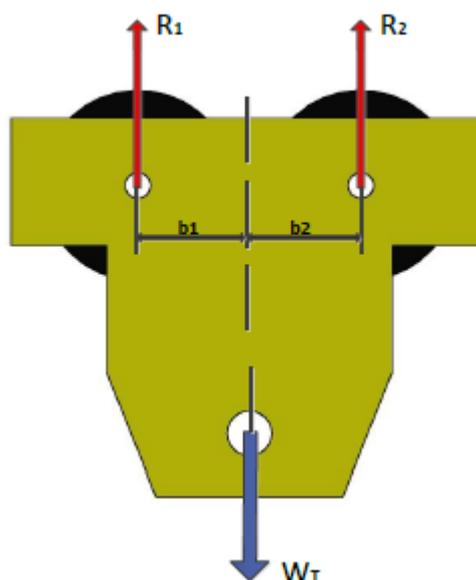
A Figura 10 demonstra as reações no trole, sendo W_T o carregamento total do sistema de elevação, (trole e talha), somado a carga nominal da ponte, b_1 e b_2 são as distâncias do centro das rodas até a aplicação da carga. Desta forma, fazendo o somatório das forças e momentos iguais a zero e considerando que b_1 é igual a b_2 sendo 152,5 [mm], tem-se a Equação 4.0:

$$R_1 = R_2 = \frac{W_T}{2} \quad (4.0)$$

Onde, $R_1 = R_2 = 2567,5$ [kgf]

Aplicando o coeficiente ξ calculado na seção 3.4.5 obtém-se a sollicitação devido ao movimento transversal do trole, que é $R_{T1} = R_{T2} = 128,38$ [kgf].

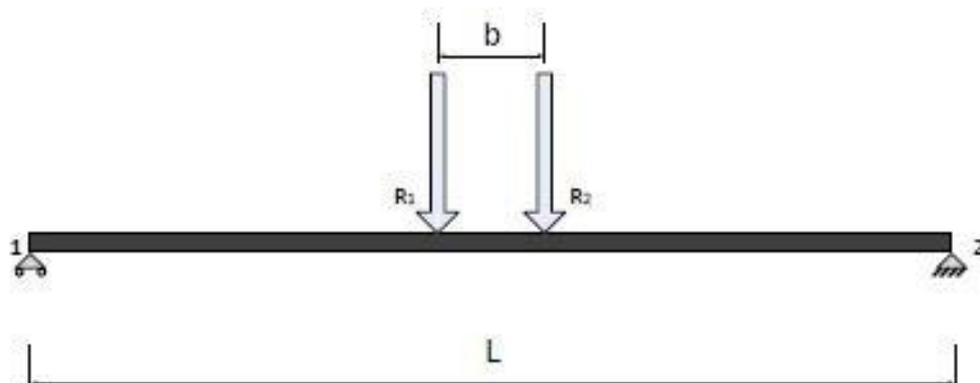
Figura 10 - Figura esquemática do trole.



Fonte: O autor.

A Figura 11 mostra um esquema da viga principal com as reações do trole (R_1 e R_2), os pontos de apoio 1 e 2, e L (5 m) como sendo o comprimento total da viga e b (305 mm) a distância entre rodas do trole.

Figura 11 - Esquema da viga principal da ponte rolante.



Fonte: O autor.

Para calcular o momento máximo na viga utiliza-se a Equação 4.1, onde os valores serão majorados com os coeficientes calculados na seção 3.4 e 3.5. Assim o valor obtido através da equação 4.1 é igual à 133,2 [kNm].

$$Mm = Mx * \psi * R1 * \left(\frac{L-B}{2}\right) \quad (4.1)$$

Conforme a NBR 8400 (1984) para o caso de solicitação I, serviço normal em vento, a tensão admissível (σ_a) de tração e compressão é definida sendo como $\sigma_e/1,5$ onde σ_e é a tensão de escoamento do material.

O perfil da ponte rolante é selecionado com base no catálogo da Gerdau, onde o aço escolhido é o ASTM A572 grau 50 que possui uma tensão de escoamento (σ_e) de 370 [MPa]. Desta forma, o modulo estático mínimo da seção (W_x), que é definido pela Equação 4.2, tem que ser superior à 540 [cm^3].

$$W_x = \frac{Mm * 10^6}{\sigma_a} \quad (4.2)$$

Conforme descrito na seção 3.7, a NBR 8800 (2008) estabelece que para pórticos e pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN o valor máximo

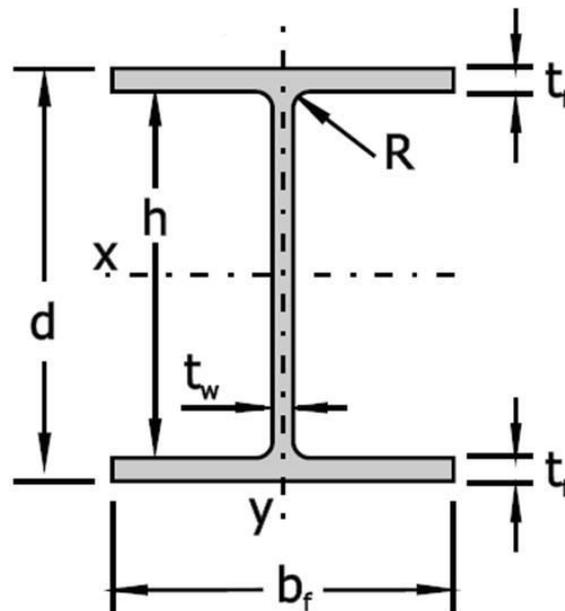
da deflexão estrutural (δ_m) não deve ultrapassar o valor de $L/600$, sendo L o comprimento da ponte rolante (mm). Portando, tem-se que $\delta_m = 8,3$ [mm].

Assim, o momento de inercia da viga (I_x) é $8866,33$ [cm^4] calculado a partir da Equação 4.3, onde o módulo de elasticidade, segundo o catálogo da Gerdau, é 205 [GPa].

$$I_x = \frac{(2 * R1 * \psi) * L^3}{48 * E * \delta_m} \quad (4.3)$$

Considerando os valores de W_x e I_x seleciona-se o perfil comercial W360x39 (fabricante Gerdau). A Figura 11 apresenta as principais dimensões que caracterizam o perfil selecionado.

Figura 11 - Perfil W.



Fonte: O autor.

As propriedades do perfil selecionado encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades do perfil W360x39

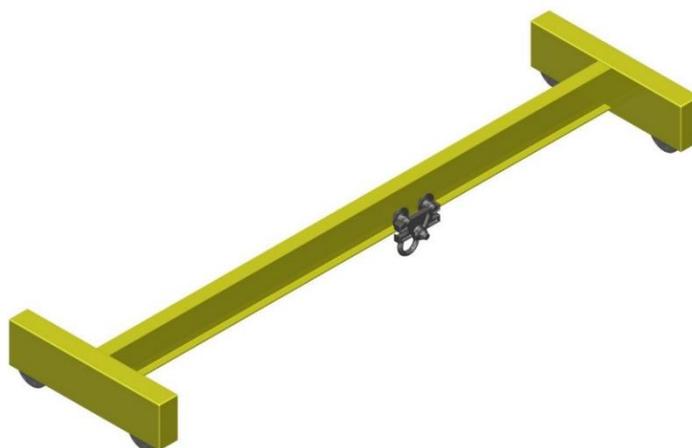
Propriedade	Unidade	Valor
Peso	Kg/m	39
b_f	mm	128
d	Mm	353
t_f	Mm	10,7
t_w	mm	6,5
R	mm	3,2
h	mm	332
W_x	cm^3	585,3
I_x	cm^4	10331
Área	cm^2	50,2

Fonte: Gerdau

4.2 Solicitações na viga principal

Nessa seção avaliam-se as solicitações atuantes na viga principal da ponte rolante. A Figura 12 representa a estrutura da ponte rolante, utilizando o sistema de coordenadas conforme representado na figura.

Figura 12 - Representação da ponte rolante com a viga principal, cabeceiras e trole.



Fonte: o autor

4.2.1 Peso da estrutura

O peso da estrutura é composto pelo peso do sistema de elevação somado ao peso da própria viga. Esse carregamento será considerado como uniformemente distribuído sobre a estrutura. Desta forma tem-se que o peso da estrutura (S_{Ge}) é 647,46 [N/m].

4.2.2 Solicitação devido ao movimento vertical

A solicitação devido ao movimento vertical (S_v) da ponte é calculada a partir da Equação 4.4, onde R1 e R2 foram calculados na seção 4.1, e g é a aceleração da gravidade, sendo 9,81 [m/s^2], desta forma S_v é 57,93 [kN]

$$S_v = Mx * \psi * (2 * R1) * g \quad (4.4)$$

4.2.3 Solicitação devido ao movimento horizontal

Conforme descrito na seção 4.1 o carregamento horizontal ($RT1 = RT2$) é 128,38 [kgf], portanto a solicitação devido ao movimento horizontal (S_h) é 2,518 [kN], calculado pela equação 4.5.

$$S_h = Mx * (2 * RT1).g \quad (4.5)$$

4.2.4 Forças de inércia

São resultantes do produto da massa multiplicada pela aceleração, onde a aceleração é 0,064 [m/s^2], previamente avaliada na seção 3.4.4.1. Além disso, os valores foram multiplicados pelo o coeficiente de majoração (Mx).

4.2.4.1 Sistema de elevação e carga

Conforme Equação 4.6 a força de inércia do sistema de elevação e carga nominal é 721 [N], onde a massa das cabeceiras (ma_c) foi estimada em 475 [Kg] (Strong). O valor do coeficiente ® foi calculado na seção 3.4.41, sendo igual a 2.

$$F_l = ® * (me_q + ma_c + m1) * J_m * Mx \quad (4.6)$$

4.2.4.2 Viga principal

A força de inércia uniformemente distribuída pelo comprimento da viga principal é calculada conforme a Equação 4.7, onde a massa da viga principal (mv) será considerada uniformemente distribuída. Desta forma tem-se que $F_v = 49$ [N/m]

$$F_v = \frac{® * mv * J_m * Mx}{L} \quad (4.7)$$

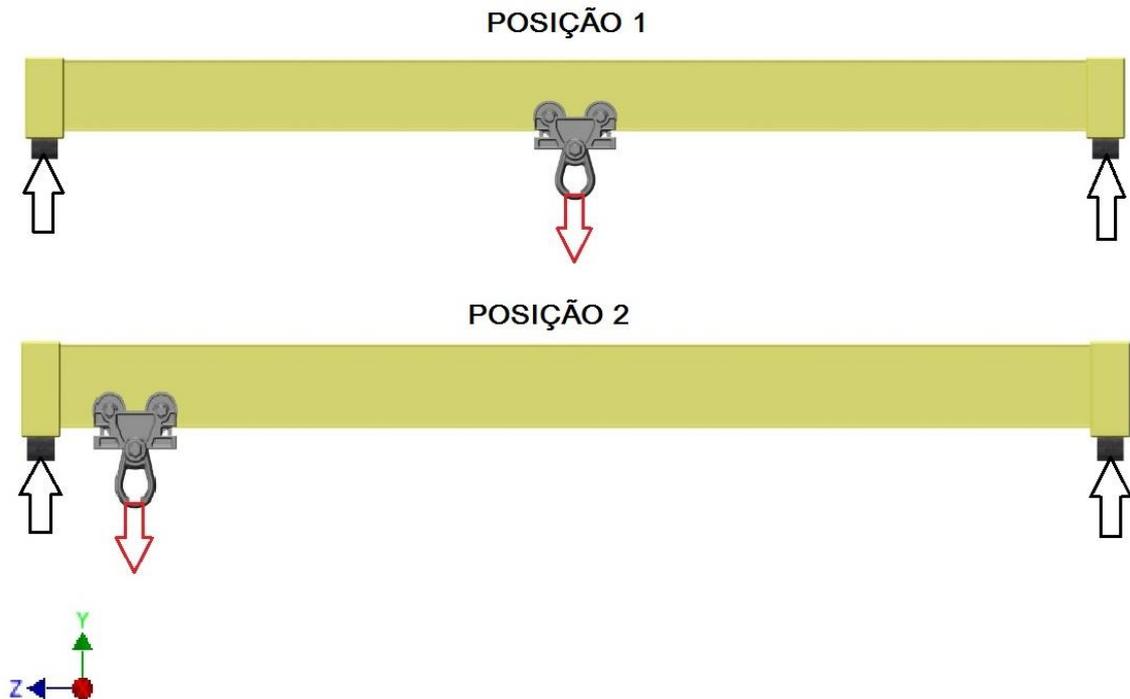
4.3 Análise dos esforços atuantes na viga principal utilizando elementos finitos

Os esforços atuantes na viga principal são analisados no software Autodesk Inventor 2015 Pro. Os carregamentos são adicionados, conforme tabela 9, calculados na seção 4.2. Para a análise, considera-se a situação mais crítica para a estrutura, ou seja, quando todos os carregamentos estão atuando de maneira simultânea. Além disso, como o trole se desloca por todo o comprimento da viga principal, realizam-se duas análises: *i*) trole na posição central, no meio do vão; *ii*) trole na posição mais próxima da cabeceira, início do vão. A Figura 13 demonstra as posições do trole que será considerado na análise. Na posição 1 o gancho do trole está no centro da viga, ou seja, a 2,5 [m] da cabeceira, e na posição 2 ele está a 0,152 [m] da cabeceira da ponte rolante.

Tabela 9 – Carregamento utilizados na simulação

Peso da própria estrutura	647,46 [N/m]
Solicitações devido ao movimento vertical	57,93 [kN]
Solicitações devido ao movimento horizontal	2,52 [kN] (a cada 2 rodas do trole)
Força de inércia	320 [N]
Peso próprio da viga principal	49 [N/m]
Sistema de elevação	721 [N/m]

Figura 13 - Disposição do trole na viga principal da ponte rolante.



Fonte: O autor

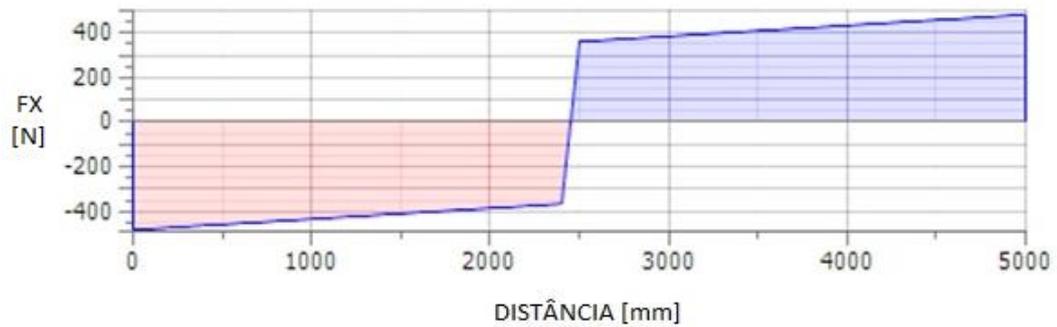
Os esforços máximos obtidos através da simulação utilizando o software de Elementos Finitos estão apresentados na Tabela 9, considerando as duas posições de trabalho.

Tabela 10 – Máximos esforços obtidos

Fx [KN] (tração/compressão)	Fy [KN] (cortante)	Fz [KN] (cortante)	Mx [KNm] (fletor)	My [KNm] (fletor)	Deflexão (mm)	Von Misses (Mpa)
0,483	26,1	0,320	32,1	0,5	1,7	64,9

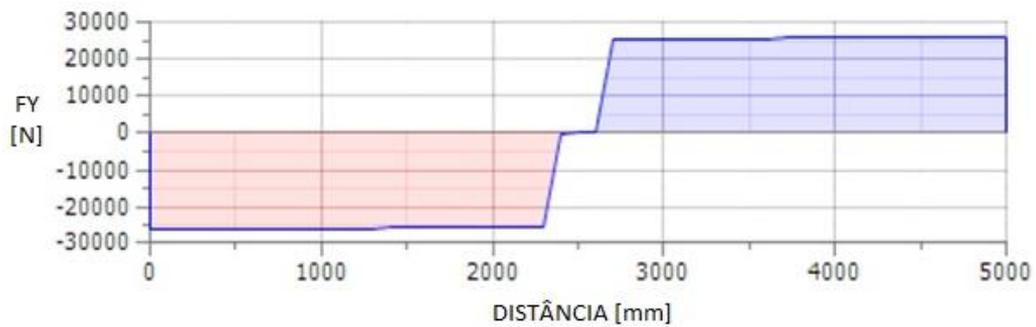
As Figuras 14, 15, 16 e 17, representam respectivamente os resultados dos esforços de tração/compressão, cortante na direção Y, cortante na direção Z, momento fletor na direção X e momento fletor na direção Y.

Figura 14 - Diagrama do máximo esforço de tração/compressão.



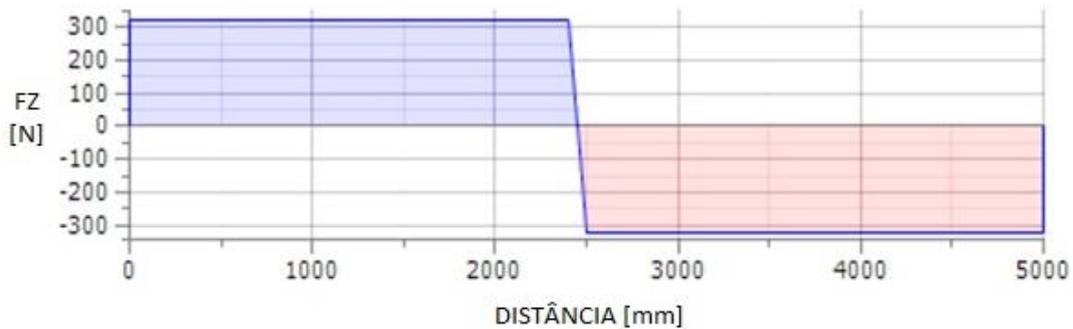
Fonte: O autor.

Figura 15 - Diagrama do máximo esforço cisalhante na direção Y.



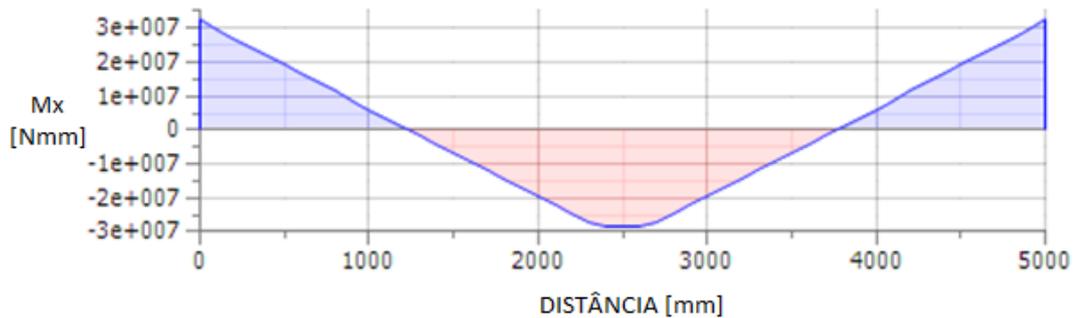
Fonte: O autor.

Figura 16 - Diagrama do máximo esforço cisalhante na direção Z.



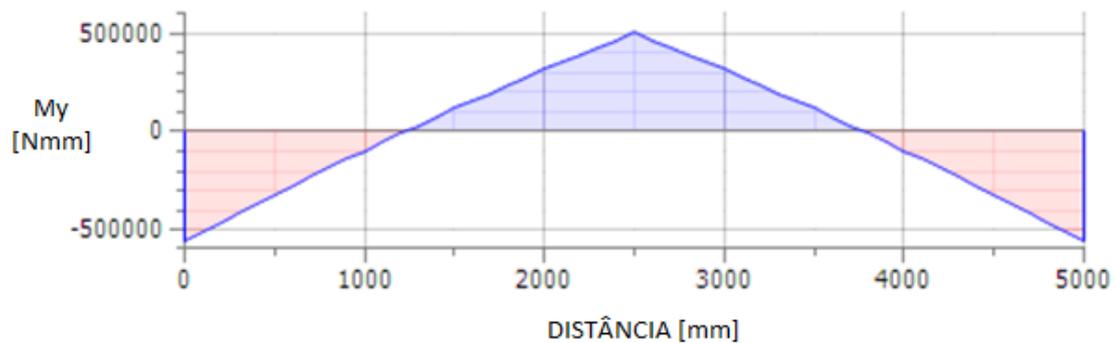
Fonte: O autor.

Figura 17 - Diagrama do máximo momento fletor na direção X.



Fonte: O autor.

Figura 18 - Diagrama do máximo momento fletor na direção Y.



Fonte: O autor.

4.4 Verificação dos carregamentos

Nesta Seção realiza-se uma verificação dos esforços obtidos nas simulações numéricas anteriores. Comparam-se os valores obtidos com as recomendações apresentadas na norma NBR 8800 (2006).

4.4.1 Tração

Segundo a NBR 8800 (2008) as vigas submetidas a tração devem atender a condição de que a sollicitação calculada na viga, conforme seção 4.3, seja menor ou igual a sollicitação resistente ao cálculo (F_{rt}). A sollicitação resistente ao cálculo é determinada pela Equação 4.8

$$F_{rt} = \frac{A * \sigma_e}{\gamma} \quad (4.8)$$

Onde:

A = área da seção transversal da viga

σ_e = Tensão de escoamento do material

γ = Coeficiente de segurança. Como foi adotado o valor de 1,5 para a tensão admissível (σ_a) será, novamente, utilizado esse valor como referência.

Resolvendo a Equação 4.8, obtém-se o valor de 123,8 [KN]. Portanto, como $F_x = 0,483$ [KN] e $F_{rt} = 123,8$ [KN] a condição de projeto é atendida.

4.4.2 Momento fletor e força cortante

A NBR 8800 (2008) afirma que o dimensionamento de vigas devem atender as condições $M_s \leq M_r$ e $V_s \leq V_r$, onde:

M_s é o momento fletor solicitante, calculado na seção 4.3;

M_r é o momento fletor resistente ao cálculo;

V_s é a força cortante solicitante, calculada na seção 4.3;

V_r é a força cortante resistente ao cálculo;

4.4.2.1 Momento fletor resistente ao cálculo

Segundo Pfeil (2010), a NBR 8800 (2008) divide em três classes as seções da viga, conforme a flambagem local sobre os momentos fletores resistentes:

- a) Compacta: $\lambda_b \leq \lambda_p$;
- b) Semi-Compacta: $\lambda_p < \lambda_b \leq \lambda_r$;
- c) Esbelta: $\lambda_r < \lambda_b$.

Através da Figura 19, é possível calcular os valores de λ_p , λ_b e λ_r .

Resolvendo as equações da Figura 19, conclui-se que a seção é compacta, pois $\lambda_b = 5,981$ para a mesa e $\lambda_b = 51,07$ para a alma, e $\lambda_p = 9,1$ para a mesa e $\lambda_p = 90$ para a alma.

Figura 19 - Classificação da seção da viga

		Valores Limites de λ_b	
	Aço	λ_p	λ_r
Flambagem local da mesa $\lambda_b = \frac{1}{2} \frac{b_f}{t_f}$	Geral	$0,38 \sqrt{E/f_y}$	$C \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y / k_c}}$
	MR250	10,7	28 (perfis laminados)
	AR350	9,1	24 (perfis laminados)
Flambagem local da alma $\lambda_b = h_w / t_0$	Geral	$D \sqrt{E/f_y} < \lambda_r$	$5,70 \sqrt{E/f_y}$
	MR250	106 (dupla simetria)	161
	AR350	90 (dupla simetria)	136

*Para perfis laminados: $C = 0,83$; $k_c = 1$; para perfis soldados: $C = 0,95$; $k_c = \frac{4}{\sqrt{h_0/t_0}}$ sendo $0,35 < k_c < 0,76$ (ver nota da Tabela 5.1)

**Para perfis com dupla simetria: $D = 3,76$; para perfis monossimétricos: $D = \frac{(h_c/h_p)}{(0,54 M_p/M_r - 0,09)^2}$

Fonte: Pfeil

O momento resistente ao cálculo é definido pela Equação 4.9:

$$M_r = \frac{Z * \sigma_e}{\gamma} \quad (4.9)$$

Onde Z é o módulo plástico da viga, obtido no catálogo da Gerdau, onde:

$$Z_x = 667,7 [cm^3]$$

$$Z_y = 91,9 [cm^3]$$

$$M_{rx} = 164,7 [KNm]$$

$$M_{ry} = 2,18 \text{ [KNm]}$$

Desta forma, conclui-se que o momento fletor resistente ao cálculo é maior que o calculado no dimensionamento da viga, validando a condição.

4.4.2.2 Força cortante resistente ao cálculo

Segundo a NBR 8800 (2008) a força cortante resistente ao cálculo é definida pela Equação 4.10, obtendo-se o valor de: 339,6 [KN]

$$V_r = \frac{0,6 * d * t_w * \sigma_e}{\gamma} \quad (4.10)$$

Assim, a condição $F_y \leq V_r$ é satisfeita, validando o perfil previamente dimensionado para suportar as solicitações de esforços cortantes.

4.5 Verificação final

Para a validação do perfil selecionado é necessário que os valores obtidos através da simulação da viga não ultrapassem os limites previamente definidos pela NBR 8800 (2008), os quais estão apresentados na tabela 11. Além disso, é necessário que a máxima tensão não exceda a tensão admitida estabelecida pela NBR 8400, a qual é $\frac{\sigma_e}{1,5}$ para essa aplicação.

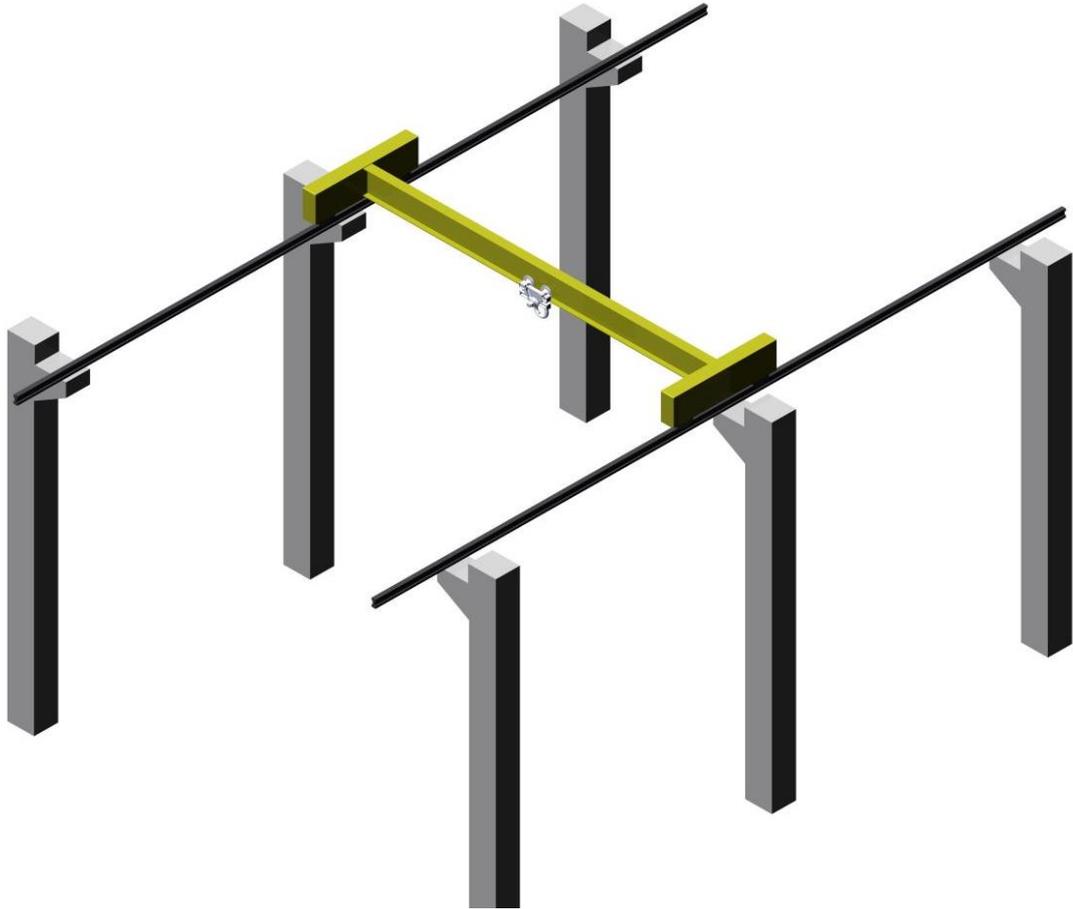
Tabela 11 – Comparação dos resultados

Solicitação	Valor da simulação	Valor NBR 8800	Coeficiente de segurança
Tração/Compressão [kN]	0,48	123,80	256
Cortante em Y [kN]	26,10	339,60	13
Momento fletor em X [kNm]	32,10	164,70	5
Momento fletor em Z [kNm]	0,50	2,18	4
Deflexão [mm]	1,70	8,33	5

Ainda, verifica-se que a tensão máxima obtida através da simulação (Von Misses) é 26,30 % da admissível do material.

A Figura 20 representa o conjunto completo da ponte rolante univiga apoiada sobre o caminho de rolamento que é sustentado pelos pilares do prédio onde a mesma será instalada.

Figura 20 – Representação do projeto final da ponte rolante.



Fonte: O autor

5 CONCLUSÕES

Através desse estudo, pode-se concluir que a utilização das pontes rolantes como equipamento para movimentação e transporte de carga possui um papel muito importante dentro da indústria. 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. Com uma forma construtiva relativamente simples, porém com alta robustez estrutural e flexibilidade, as pontes rolantes se destacam na gama dos equipamentos destinados a movimentação de carga.

Este projeto é regido pela norma NBR 8400, onde o dimensionamento estrutural da ponte rolante é apresentado de forma objetiva. A norma aborda as metodologias para determinação das solicitações, tensões e esforços atuantes sobre a estrutura da ponte rolante, podendo assim, o engenheiro desenvolver o projeto de forma adequada para cada aplicação específica.

Através do critério de máxima deflexão admissível e módulo de resistência estático selecionou-se o perfil comercial da Gerdau W360x39. Posteriormente, a estrutura foi submetida a uma análise de elementos finitos no software Autodesk Inventor 2015 Pro onde foram consideradas as solicitações resultantes da carga nominal, da utilização da ponte rolante, e do próprio peso da estrutura.

Os esforços obtidos na simulação foram validados a partir da metodologia proposta pela norma NBR 8800, onde se avaliou o último estado de tensão para as tensões normais e cisalhantes, momentos fletores e cortantes, máxima tensão e deflexão da viga. Por fim, verificou-se que o deslocamento calculado é 20,5% do solicitado e a tensão corresponde a 26,3% da tensão admissível do material, confirmando a adequação e conformidade da estrutura previamente dimensionada.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Brasil, ABNT. 2008.

_____. **NR 11**. Disponível em:

<http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF1FA6256B00/nr_11.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015.

_____. **NR 12**. Disponível em:

<[http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A4DA189CA014E505FF4496DF0/NR-12%20\(atualizada%202015\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A4DA189CA014E505FF4496DF0/NR-12%20(atualizada%202015).pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2015.

_____. **NR 17**. Disponível em:

<http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEFBAD7064803/nr_17.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015.

BORNIA, Antônio Cezar. **Análise gerencial de custos em empresas modernas**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

CUNHA, José Tiago da. **Estudo do desgaste de rodas de pontes rolantes utilizadas em siderúrgicas**. Porto Alegre, 2012.

HIČÁR, Marek; RITÓK, Juraj. Robust crane control. **Acta Polytechnica Hungarica**. Košice. Eslováquia. v. 3, n. 2. 2006.

LUZ, Simeão Ribeiro. **Aperfeiçoamento do disco de fricção utilizado em um sistema de freio de uma talha**. Porto Alegre, 2014.

MORAES, Marcus Vinícius Amélio. **Projeto conceitual e dimensionamento da estrutura de um pórtico rolante**. Rondonópolis, 2013.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas, uma abordagem integrada**. São Paulo, 2014.

PASSOS, Lucas da Costa dos. **Pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de cargas**. Brasil. 2011.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos S.A, 2010

REMOR, Gustavo Strassburger. **Projeto conceitual de um pórtico rolante para movimentação de pallets**. Horizontina. 2012.

RIBEIRO, Fernando José Granja. **Dimensionamento de um pórtico rolante**. Porto, Portugal. jun. 2011.

ROZZANTI, Fábio de Oliveira. **Estudo de uma ponte rolante comercial no transporte de bobina de aço de 12 toneladas**. Guaratinguetá. Brasil. 2013.

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

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. São Paulo: Bookman, 2005.

SOUBE, Gustavo. **Modelagem paramétrica de pórticos rolantes: estabilidade estrutural e otimização**. São Paulo. 2005.

TAMASAUSKAS, Artur. **Metodologia do projeto básico de equipamento de manuseio e transporte de cargas - ponte rolante – aplicação não-siderúrgica**. São Paulo, 2000.

ZUBERI, Rehan H.; KAI, Long; ZHENGXING, Zuo. **Design optimization of EOT Crane Bridge**. Rio de Janeiro, 01-05 jun. 2008.