



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO RAYAM SOUZA SANTOS

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA MOVIMENTAÇÃO DE
CARGAS**

Recife

2018

THIAGO RAYAM SOUZA SANTOS

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA MOVIMENTAÇÃO DE
CARGAS**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como exigência parcial para à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia mecânica

Orientador: Prof. MSc. Laerty Moraes Cavalcante

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S237p

Santos, Thiago Rayam Souza.

Projeto de uma estrutura metálica para movimentação de cargas / Thiago Rayam Souza Santos - 2018.

74folhas, Il.; Tab. e Simb.

Orientador (a): Prof. MSc. Laerty Moraes Cavalcante.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Graduação de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Projeto de estrutura metálica. 3. ABNT NBR 8400. 4. ABNT NBR8800. 5. Movimentação de carga. I. Cavalcante, Laerty Moraes. II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-07

THIAGO RAYAM SOUZA SANTOS

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA MOVIMENTAÇÃO DE
CARGAS**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como exigência parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 14/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Laerty Moraes Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Francisco Espedito de Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Adson Beserra da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todos da minha família, em especial a minha mãe, pelo apoio incondicional e incentivo durante toda a minha vida. Agradeço também a todos professores e colegas que fizeram e fazem parte do Centro de Ciências e Tecnologia – CTG e que contribuíram de algum modo na minha formação.

RESUMO

Atualmente a manutenção é um fator estratégico para garantir a alta produtividade das empresas. Um dos conceitos importantes na área de manutenção é o conceito de manutenibilidade, que se refere à facilidade, precisão, segurança e economia na execução de ações de manutenção. Uma forma de melhorar a manutenibilidade é facilitar e proporcionar maior segurança nas atividades de movimentação de equipamentos para manutenção. Assim, este trabalho visa a elaboração de um projeto de uma estrutura metálica para movimentação de cargas, visando facilitar a movimentação de conjuntos motobombas de uma empresa distribuidora de combustíveis do porto de SUAPE. A análise concentra-se na parte estrutural, especificamente na viga principal. Entende-se como viga principal a viga sobre a qual todos os elementos, como trole e talha, se movimentam. Avaliam-se os carregamentos e solicitações atuantes na estrutura. O projeto dos demais componentes como trole e talha não serão desenvolvidos neste trabalho. A elaboração do projeto se baseia nas normas de projeto ABNT NBR 8400 e ABNT NBR 8800.

Palavras-chave: Projeto de estrutura metálica. ABNT NBR 8400. ABNT NBR8800. Movimentação de carga.

ABSTRACT

Nowadays, maintenance is a strategic factor to ensure the high productivity of companies. One of the important concepts in the maintenance area is the concept of maintainability, which refers to the ease, precision, safety and economy in carrying out maintenance actions. One way to improve maintainability is to facilitate and provide greater safety in moving equipment for maintenance. Thus, this work aims at the elaboration of a metal structure design for cargo handling, aiming at facilitating the movement of pump-motor assemblies of a fuel distribution company of the port of SUAPE. The analysis focuses on the structural part, specifically the main beam. The main beam is understood as the beam on which all elements, such as trolley and carving, move. Evaluate the loads and requests acting on the structure. The design of the other components such as trolley and hoist will not be developed in this work. The design of the project is based on the ABNT NBR 8400 and ABNT NBR 8800 project standards.

Keywords: Steel structure design. ABNT NBR 8400. ABNT NBR8800. Materials handling.

LISTAS DAS FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do pórtico móvel utilizado.	16
Figura 2 - Ilustração de uma ponte rolante.	20
Figura 5- Perfil tipo I.	22
Figura 6- Talha manual.	23
Figura 7- Trole mecânico encaixado em viga com perfil do tipo I.	23
Figura 8- Representação de uma viga com carga distribuída.	26
Figura 9- Representação das cargas que atuam em um elemento dx da viga.	26
Figura 10- Flambagem local da alma.	28
Figura 11- Flambagem global, flambagem lateral.	29
Figura 12- Ilustração da monovia.	33
Figura 13- Coeficiente que determina as reações transversais devidas ao rolamento.	39
Figura 14- Representação da viga com carga de serviço.	42
Figura 15- Diagrama de esforço cortante x comprimento.	43
Figura 16- Representação da viga com carga de serviço.	43
Figura 17- Diagrama do momento fletor x comprimento.	44
Figura 18- Dados do perfil adotado.	44
Figura 19- Representação da carga devido ao peso próprio.	45
Figura 20- Diagrama de esforço cortante x comprimento.	46
Figura 21- Diagrama de momento fletor x comprimento.	46
Figura 22- Representação das cargas e reações nos apoios.	49
Figura 23- Representação das cargas devido ao peso próprio.	49
Figura 24- Diagrama de esforço cortante x comprimento.	50
Figura 25- Diagrama de momento fletor x comprimento.	50
Figura 26- Representação da carga de serviço.	50
Figura 27- Diagrama de esforço cortante x comprimento.	51
Figura 28- Diagrama de momento fletor x comprimento.	51
Figura 29- Dados do parafuso adotado, medidas em mm.	57
Figura 30- Representação das uniões.	62
Figura 31 - Representação de uma solda filete.	62
Figura 32- Representação da junção pela norma NBR8400.	66
Figura 33- Curva de fadiga para tensão normal.	67
Figura 34- Curva de fadiga para tensão cisalhante.	67

Figura 35- Resumo das especificações (viga principal)	68
Figura 36- Resumo das especificações (viga de apoio).....	69
Figura 37- Modelo 3D da monovia.	69
Figura 38- Foto da monovia montada.	70

LISTAS DAS TABELAS

Tabela 1- Custos de manutenção em relação ao faturamento bruto no ano de 2011.	15
Tabela 2- Vantagens e desvantagens de alguns equipamentos.....	31
Tabela 3- Dados do projeto.	33
Tabela 4- Classe de utilização.	34
Tabela 5- Estado da carga.....	35
Tabela 6- Estado de tensões.....	35
Tabela 7- Classificação da estrutura.	36
Tabela 8- Coeficiente de majoração.	36
Tabela 9- Coeficiente dinâmico.....	37
Tabela 10- Propriedades mecânicas do material.	41
Tabela 11- Tensão admissível a tração (ou compressão) simples.	41
Tabela 12- Tensão admissível para o aço ASTM A36.....	42
Tabela 13-Propriedades do perfil adotado.....	45
Tabela 14- Comparação entre os limites e as tensões devido a flexão e cisalhamento.	48
Tabela 15- Propriedades geométricas do perfil.	48
Tabela 16- Comparação entre os limites e as tensões obtidas.....	52
Tabela 17- Parâmetros referente ao momento fletor resistente.	53
Tabela 18- Parâmetros dos perfis adotados.	55
Tabela 19- Parâmetros referentes a esbeltez.....	55
Tabela 20- Comparação entre o momento fletor resistente e solicitante.....	56
Tabela 21- Fator de segurança.....	58
Tabela 22- Fator de segurança.....	60
Tabela 23- Tensão de comparação máxima admissível no cordão de solda.	63
Tabela 24- Comparação entre a tensão admissível e a tensão que atua no cordão de solda	64
Tabela 25- Tamanho mínimo da perna da solda filete.	65
Tabela 26- Tensões mínima e máxima.	66

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área
A_{ef}	Área efetiva
A_P	Área mínima do parafuso
A_w	Área do cordão de solda
A_{w1}	Área do cordão de solda da junta 1
A_{w2}	Área do cordão de solda da junta 2
C_w	Constante do empenamento da seção transversal
E	Módulo de elasticidade
F	Força
F_{Pa}	Força limite admissível
F_{PJ}	Força por junta
FS_N	Coefficiente de segurança
FS_P	Coefficiente de segurança
I	Momento de inércia
I_x	Momento de inércia no eixo X-X
I_y	Momento de inércia no eixo Y-Y
J	Constante de torção
L	Vão livre
L_b	Distância entre travamentos laterais
M	Momento de inercia
M_{cr}	Momento crítico de flambagem
M_g	Momento de inércia devido ao peso próprio
M_l	Momento de inércia devido a carga de serviço
M_{pl}	Momento resistente de plastificação
M_r	Momento resistente de flambagem
M_{rd}	Momento resistente de cálculo
M_x	Coefficiente de majoração
N	Força perpendicular
N_a	Força perpendicular admissível

R	Relação entre a tensão mínima e a tensão máxima
R_g	Reação devido ao peso próprio
R_l	Reação devido a carga de serviço
S_g	Solicitação devido ao peso próprio
S_h	Solicitação devido a carga horizontal
S_l	Solicitação devido a carga de serviço
S_w	Solicitação devido ao vento
T	Torque de aperto no parafuso
T_p	Tração no parafuso
V	Força cortante
V_g	Força cortante devido ao peso próprio
V_l	Força cortante devido a carga de serviço
W	Módulo de resistência do perfil
W_{min}	Módulo de resistência mínimo do perfil
W_{xx}	Módulo de resistência na direção X-X
W_{yy}	Módulo de resistência na direção Y-Y
Z	Módulo de resistência plástico
a	Distância entre os eixos do trole
b_f	Largura da mesa
d	Altura do perfil
d_w	Dimensão da perna do cordão de solda
h	Altura da alma
l_w	Comprimento do cordão de solda
m	Planos de cisalhamento
q	Carga distribuída
r_x	Raio de giração no eixo X-X
r_y	Raio de giração no eixo Y-Y
t	Garganta do cordão de solda
t_f	Espessura da mesa
t_w	Espessura da alma
v_l	Velocidade de elevação
ψ	Coefficiente dinâmico

ξ	Coefficiente de reação transversal
σ	Tensão normal
σ_a	Tensão normal admissível
σ_{cp}	Tensão de comparação
σ_e	Limite de escoamento
σ_m	Tensão máxima
σ_r	Limite de ruptura
σ_{xx}	Tensão normal na direção x
σ_{yy}	Tensão normal na direção y
τ	Tensão de cisalhamento
τ_a	Tensão de cisalhamento admissível
τ_m	Tensão de cisalhamento máxima
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento na direção x, no plano y
λ	Índice de esbeltez
λ_p	Índice de esbeltez referente a plastificação
λ_r	Índice de esbeltez referente ao escoamento
μ	Coefficiente de atrito
$\emptyset E$	Diâmetro do parafuso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	18
3.1	ESPECÍFICOS	18
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
4.1	EQUIPAMENTOS PARA MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS	19
4.1.1	Pórticos	19
4.1.2	Pontes rolantes	20
4.1.3	Guindaste	20
4.1.4	Monovias	21
4.1.5	Vigas	22
4.1.6	Talhas	22
4.1.7	Trole.....	23
4.2	PROJETO	24
4.2.1	Metodologia de Projeto	24
4.2.2	Normas de Projeto.....	25
4.2.3	Normas Regulamentadoras	25
4.3	ESTUDO DE CARGAS EM VIGAS	25
4.3.1	Tensões no regime elástico.....	27
4.3.2	Flambagem.....	28
4.3.3	Fadiga	29
5	DESENVOLVIMENTO	30
5.1	DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO	32
5.2	CLASSIFICAÇÃO.....	33
5.3	DETERMINAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES.....	37
5.3.1	Solicitações devidas aos movimentos verticais.....	37
5.3.2	Solicitações devidas aos movimentos horizontais	38
5.4	MÉTODO DE CÁLCULO.....	39
5.5	DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS	40
5.5.1	Ultrapassagem do limite de escoamento.....	41
5.5.2	Ultrapassagem das cargas críticas de flambagem	52
5.6	JUNÇÕES APARAFUSADAS.....	57
5.6.1	Forças paralelas aos planos de junção.....	57
5.6.2	Forças perpendiculares ao plano de junção.....	59

5.6.3	Forças combinadas	61
5.7	JUNÇÕES SOLDADAS	61
5.7.1	Dimensionamento do cordão de solda	62
5.7.2	Ultrapassagem do limite de fadiga	65
6	RESULTADOS	68
7	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual a competitividade por melhores preços, redução de custos e desperdícios é fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa. A manutenção é um fator estratégico para garantir a alta produtividade das empresas. Dados da associação Brasileira de Manutenção apresentam o custo de manutenção em relação ao faturamento bruto no ano de 2011 (ABRAMAN, 2011).

Tabela 1- Custos de manutenção em relação ao faturamento bruto no ano de 2011.

Setor	% de faturamento bruto
Máquinas e equipamentos	3,33
Petróleo	3,73
Transporte	>10,00
Cimento e construção civil	3,00
Automotivo e metalúrgico	3,46

Fonte: Adaptado de ABRAMAN, 2011.

Um conceito importante no segmento da manutenção é o conceito de Manutenibilidade, que é definido como uma característica inerente a um projeto de sistema ou produto, e se refere à facilidade, precisão, segurança e economia na execução de ações de manutenção nesse sistema ou produto (BLANCHARD, 1992). A manutenibilidade define o grau de facilidade de um sistema, elemento ou componente de ser mantido ou recolocado no estado no qual possa executar suas funções requeridas.

No setor de distribuição de combustível entre os equipamentos que necessitam de maior cuidado com a manutenção são as bombas e motores conhecidos como conjuntos motobombas, pois são responsáveis diretamente pelo carregamento de combustível.

Assim, visando diminuir o tempo entre a retirada e recolocação do conjunto motobomba do local de operação de uma base de distribuição de combustível, aumentando a manutenibilidade do sistema, este trabalho apresenta um projeto de uma estrutura metálica para movimentação das bombas e motores, quando necessário a manutenção destes equipamentos.

2 JUSTIFICATIVA

A operação de movimentação e elevação de material ou carga é um ponto decisivo para uma empresa quando levado em conta o tempo da operação, diminuição de esforço físico e maior segurança durante a operação de movimentação e elevação. Atualmente é utilizado um pórtico móvel conforme figura 1, o pórtico é composto pelos seguintes componentes:

1. A estrutura do pórtico (composta com uma viga);
2. Trole mecânico que se movimenta horizontalmente sobre a viga;
3. Talha mecânica fixa ao trole, responsável pelo movimento de elevação da carga.

Figura 1 - Ilustração do pórtico móvel utilizado.



Fonte: Directindustry, 2018.

A utilização do pórtico móvel é ineficiente em locais de difícil acesso. Em muitos casos os locais onde estão instaladas as bombas e motores em operação são considerados de difícil acesso devido a presença de outros equipamentos no local. Existe o problema do equipamento a ser retirado se encontrar em um local onde não possibilita a chegada do pórtico rolante ou que não permita a mobilidade do equipamento já fixado ao pórtico. Além do tempo para retirada destes equipamentos é necessário garantir a segurança na operação de retirada e recolocação do equipamento, bem como diminuir os esforços do operador responsável.

A eficiência operacional dos equipamentos de movimentação de cargas é uma relação direta da especificação técnica adequada a cada uso particular (PASSOS, 2011). Os sistemas selecionados para o desempenho das mais variadas operações estão dependentes de muitos fatores. Em toda indústria, tanto no transporte interno como externo, os manuseios de cargas dependem dos recursos disponíveis (RUDENKO, 1976). Um fato importante levado em conta na concepção de uma nova forma de movimentação é a existência de uma estrutura metálica próxima ao local de operação das bombas. A estrutura existente consiste de em um pórtico trava quedas, ele é utilizado como linha de vida para o operador subir em algum caminhão tanque na operação de descarga.

Com base nos recursos disponíveis e na existência de uma estrutura metálica no local de operação das bombas, este trabalho apresenta um projeto de uma estrutura metálica utilizada para facilitar a retirada e recolocação das bombas e motores no local de operação.

3 OBJETIVOS

Dimensionar uma estrutura metálica para a futura instalação em uma base de distribuição de combustível localizada no Porto de SUAPE. A análise concentra-se na parte estrutural, especificamente na viga principal. Entende-se como viga principal a viga sobre a qual todos os elementos, como trole e talha, se movimentam.

Avaliam-se os carregamentos e solicitações atuantes na estrutura. O projeto dos demais componentes como trole e talha não serão desenvolvidos neste trabalho.

3.1 ESPECÍFICOS

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

1. Fazer uma revisão bibliográfica do tema em estudo abrangendo os conceitos básicos de movimentação de carga e os principais componentes e elementos necessários para movimentação da carga sobre a viga dimensionada;
2. Estudo da norma NBR 8400 e NBR 8800 para poder aplicar as diretrizes da norma no projeto;
3. Classificar e definir as características gerais da estrutura, bem como as restrições de projeto;
4. Avaliar as solicitações atuantes na viga principal e dimensioná-la conforme as normas vigentes;

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A manutenção é uma atividade obrigatória no ciclo de vida de qualquer equipamento. Em muitos casos é necessária a movimentação do equipamento para um local adequado, onde possa ser realizada a manutenção. A técnica de movimentação de cargas compreende as operações de elevação, transporte e descarga de objetos manualmente ou utilizando sistemas mecânicos (PASSOS, 2011). 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.

É necessário definir o equipamento correto para a execução da tarefa de elevação e transporte da carga desejada, pois a escolha do equipamento adequado contribui diretamente com a execução segura do trabalho. Para isso, é necessário conhecer qual a carga a ser movimentada, qual o seu espaço para realização da tarefa e o investimento envolvido no projeto e construção do equipamento.

Assim como qualquer outra atividade, a movimentação de cargas requer um equipamento ideal para o seu funcionamento seguro e eficaz. Quando se busca uma redução de custo, um dos fatores importantes é o encurtamento das distâncias percorridas tanto pela matéria prima como pelo produto final. (TAMASAUSKAS, 2000). Este trabalho visa a elaboração do projeto de um equipamento que será utilizado para movimentação de cargas.

4.1 EQUIPAMENTOS PARA MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

Para o projeto de uma estrutura para movimentação de cargas é importante o conhecimento de equipamentos utilizados para movimentação de cargas, bem como os componentes que os constituem.

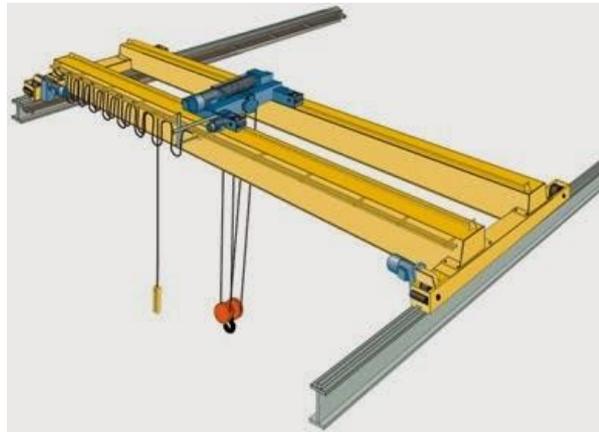
4.1.1 Pórticos

Os pórticos são equipamentos formados por uma ou duas vigas e possuem uma estrutura própria. O deslocamento de toda a estrutura do pórtico ocorre através de rodas em sua base, para pórticos do tipo fixo não é possível este movimento. O movimento horizontal ocorre por meio de um trole acoplado na viga do pórtico, enquanto o movimento vertical, ascendente ou descendente, é através do enrolamento dos cabos de aço.

4.1.2 Pontes rolantes

A ponte rolante é uma máquina de elevação no qual um carro talha se desloca sobre a viga principal da ponte e essa viga se desloca sobre vigas de cabeceira. As cabeceiras, como são conhecidas, estão localizadas nas extremidades da viga principal. Nas cabeceiras estão fixadas as rodas, uma das quais geralmente é acionada por uma caixa de engrenagem, que por sua vez é acionada por um motor elétrico, o que permite o movimento de translação da ponte rolante. Estas rodas se movem por sobre os trilhos que compõem o caminho de rolamento. A figura 2 apresenta um exemplo de ponte rolante.

Figura 2 - Ilustração de uma ponte rolante.



Fonte: Schwabredutores, 2018

4.1.3 Guindaste

É um equipamento utilizado para movimentação de cargas pesadas, podendo chegar até a ordem de mil toneladas. Essencialmente o guindaste é composto por grua, cabos ou correntes e roldanas. Ele pode ser utilizado tanto para elevar e baixar a carga como para movê-las horizontalmente. A figura 3 apresenta um exemplo de guindaste.

Figura 3- Ilustração de um guindaste.



Fonte: Depositphotos, 2018

4.1.4 Monovias

São estruturas metálicas retilíneas ou curvilíneas formadas por uma viga nas quais deslocam-se as talhas manuais ou elétricas, normalmente as monovias são utilizadas para transferir cargas que possuem uma trajetória pré-definida. A figura 4 apresenta exemplos de monovias retilíneas.

Figura 4- Ilustração de monovias retilíneas.

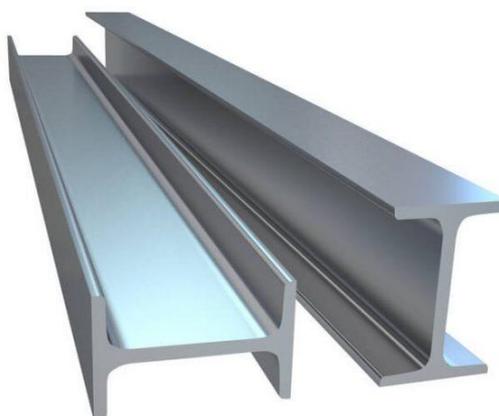


Fonte: Stahl-talhas, 2018.

4.1.5 Vigas

Por definição, uma viga é um elemento estrutural sujeito a cargas transversais. Ou seja, quando um perfil metálico tem como função principal resistir aos esforços transversais, este perfil é conhecido por viga. Existem alguns perfis que são utilizados como vigas, estes perfis podem ter várias formas conhecidas como perfis laminados “U”, “I” e “H”. A figura 5 apresenta um perfil do tipo “I”, esse perfil é geralmente laminado em aço carbono no padrão ASTM A-36 ou ASTM A-572GR50 e possui esse nome devido seu formato semelhante à letra “I”, com as abas internas inclinadas. As partes superiores horizontais da viga são conhecidas como flanges para força.

Figura 3- Perfil tipo I.



Fonte: Tetraferro, 2018.

Nos perfis “I” e “H” o elemento vertical chama-se *alma* e os dois elementos horizontais são conhecidos como *mesa*.

4.1.6 Talhas

As talhas são destinadas basicamente ao deslocamento vertical de cargas, e/ou deslocando-as por meio de cabos de aço ou correntes. São mais utilizadas para serviços leves de montagem e manutenção que necessitam de baixa a moderada capacidade de carga. A figura 6 apresenta um exemplo de uma talha manual.

Figura 4- Talha manual.



Fonte: RRMaquinas, 2018.

São isentas de sistema de propulsão própria, mas podem ser instaladas em carros do tipo trole para permitir a movimentação em vigas com perfil tipo “I”.

4.1.7 Trole

O trole, apresentado na figura 7, é responsável pela translação horizontal, é composto por rodízios metálicos montados em estrutura de chapas e eixos fechados e encaixados no interior das vigas por onde percorrem transladando de uma extremidade a outra da lança.

Figura 5- Trole mecânico encaixado em viga com perfil do tipo I.



Fonte: Cofermeta, 2018.

Podem apresentar sistema de autopropulsão através do uso de motor elétrico e caixa de redução acoplada diretamente a estrutura do trole.

4.2 PROJETO

Um projeto de engenharia pode ser definido como um processo de aplicações de técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização (NORTON, 2013).

O projeto de máquina surge sempre para satisfazer uma necessidade, seja ela industrial, comercial, para lazer, etc. Ele surge da habilidade de uma pessoa ou de um grupo de transformar uma ideia em um projeto que possua a capacidade de atender e executar a tarefa desejada (GENEROSO, 2009).

Projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema (SHIGLEY, 2005). Se tal plano resultar na criação de algo tendo uma realidade física, então o produto deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e com valor de mercado. Ao projetar é necessário atender aos requisitos mínimos de segurança, custo de fabricação, facilidades e manutenção.

4.2.1 Metodologia de Projeto

Com intuito de orientar o projetista na elaboração do projeto, uma metodologia de projeto define etapas que direcionam o projetista. Abaixo estão apresentadas as etapas utilizadas para elaboração deste projeto, a metodologia utilizada foi baseada na utilizada pelo NORTON (2013).

1. Síntese;
2. Análise;
3. Seleção;
4. Projeto detalhado.

Na etapa de síntese se busca o maior número de alternativas de projeto, sem levar em consideração valor ou qualidade. Na etapa de análise o custo e qualidade de todas as alternativas são avaliados, então, é realizada a seleção da solução mais adequada. Diante da solução escolhida é realizado o projeto detalhado, que neste trabalho consiste em um projeto mecânico de uma estrutura metálica.

4.2.2 Normas de Projeto

Para garantir a funcionalidade dos equipamentos de elevação e transporte, o seu dimensionamento, projeto e fabricação devem seguir normas e critérios que estabeleçam as condições necessárias para a sua funcionalidade. O procedimento de cálculo estrutural é baseado nas seguintes normas:

ABNT NBR 8400 - Cálculo de equipamento para elevação e movimentação de cargas. Esta norma estabelece os requisitos mínimos para o projeto e operação de equipamentos utilizados para elevação e movimentação de cargas.

ABNT NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Esta norma define os requisitos mínimos para o projeto de estruturas de aço.

4.2.3 Normas Regulamentadoras

Além das normas técnicas de projeto utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, as normas regulamentadoras que estabelecem os requisitos legais pertinentes para este e foram utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho foram a NR11 e NR12.

NR11 - Transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais: Estabelece os requisitos de segurança a serem observados nos locais de trabalho, no que se refere ao transporte, à movimentação, à armazenagem e ao manuseio de materiais, tanto de forma mecânica quanto manual, objetivando a prevenção de infortúnios laborais;

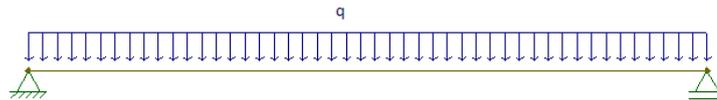
NR12 - Máquinas e equipamentos: Estabelece as medidas preventivas de segurança e higiene do trabalho a serem adotadas pelas empresas em relação à instalação, operação e manutenção de máquinas e equipamentos, visando à prevenção de acidentes do trabalho.

4.3 ESTUDO DE CARGAS EM VIGAS

Em resistência dos materiais uma viga é um elemento estrutural no qual o seu comprimento é bem maior que as dimensões da seção e tem como principal função suportar as cargas verticais, transmitindo horizontalmente até os pontos de apoio. O dimensionamento de uma viga consiste em obter o material e a geometria da seção da viga. Os dados necessários para o dimensionamento de uma viga são as cargas que atuam ao longo da viga em sua condição mais crítica. A teoria de resistência dos materiais permite relacionar estas cargas externas com

os esforços internos que atuam ao longo da viga. A figura 8 representa uma viga simples apoiada em dois pontos.

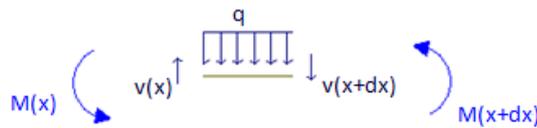
Figura 6- Representação de uma viga com carga distribuída.



Fonte: O autor, 2018.

Na figura 8 q representa uma carga externa qualquer. Assumindo que a viga esteja em equilíbrio estático, temos que o somatório das forças que atuam em um pequeno elemento da viga dx seja igual a zero. A figura 9 apresenta as forças e momentos que atuam em um elemento diferencial dx , onde M representa o momento fletor e v representa a força cortante.

Figura 7- Representação das cargas que atuam em um elemento dx da viga.



Fonte: O autor, 2018.

Logo, utilizando a equação de equilíbrio estático, em que o somatório de momentos e o somatório de forças seja igual a zero encontramos a relação 1.

$$q(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (1)$$

Com base nessa relação é possível encontrar os diagramas de esforço cortante e de momento fletor, estes diagramas representam os esforços internos ao longo de toda viga, onde é possível avaliar as condições mais críticas. Para representação destes diagramas foi utilizado

neste trabalho o software *ftool*, no qual a partir das condições de carregamento e fixação da viga são gerados os diagramas.

4.3.1 Tensões no regime elástico

Considerando que o momento fletor máximo, visto no item anterior, é tal que as tensões permanecem abaixo da tensão de escoamento do material, é possível obter a tensão máxima na viga σ_m a partir da expressão **2** (BEER, 1995).

$$\sigma_m = \frac{M c}{I} \quad (2)$$

Onde c representa a maior distância da superfície neutra (que para o perfil adotado corresponde à metade do comprimento da alma da viga) e I representa o momento de inercia da viga. A equação **2** é conhecida como *equação da flexão em regime elástico*. Como o momento de inercia e a maior distância a superfície neutra dependem apenas da geometria da seção transversal é comum a utilização da equação na forma **3**.

$$\sigma_m = \frac{M}{W} \quad (3)$$

Onde W representa o módulo de resistência do perfil. Como para um dado carregamento a tensão máxima é inversamente proporcional ao módulo de resistência, as vigas devem ser projetadas com um maior valor de W possível.

Para o caso em que exista, além da solicitação de flexão, uma força normal que atue na viga, é possível somar a contribuição desta solicitação conforme equação **4**.

$$\sigma_m = \frac{M}{W} + \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde A representa a área da seção transversal e F representa uma força perpendicular à seção transversal.

Para a tensão de cisalhamento em perfil do tipo **I** é comum assumir que toda força cortante V é suportada pela alma, e que uma boa aproximação do valor da tensão máxima de cisalhamento τ_m pode ser obtida dividindo-se V pela área da seção transversal da alma (BEER, 1995).

Com os valores de tensões máximas é possível verificar a não ultrapassagem do limite de escoamento, um dos requisitos da norma de projeto adotada.

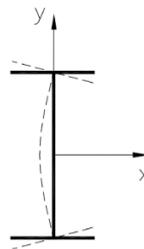
4.3.2 Flambagem

O fenômeno de flambagem é conhecido como a perda de estabilidade de um corpo devido uma solicitação e é caracterizado por grandes deformações transversais. As deformações que caracterizam a flambagem não são compatíveis com estado de tensão. A tensão crítica para que ocorra a flambagem independe da tensão de escoamento, assim, a flambagem pode ocorrer sem que a tensão que atue no material ultrapasse a tensão de escoamento.

Se tratando de vigas, existem duas categorias na qual se deve analisar a possibilidade de falha devido a flambagem:

- Flambagem local - devido a flambagem da alma ou da mesa da viga, representada na figura 10;

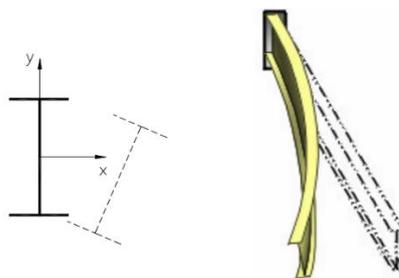
Figura 8- Flambagem local da alma.



Fonte: Adaptado de Fruchtengarten, 2018.

- Flambagem global - devido a flambagem da própria viga, representada na figura 11.

Figura 9- Flambagem global, flambagem lateral.



Fonte: Adaptado de Fruchtengarten, 2018.

Para verificação da não ultrapassagem ao limite das cargas críticas de flambagem é necessário obter o momento resistente de flambagem, ou seja, o momento máximo na qual a estrutura pode suportar sem que ocorra a flambagem. A norma NBR8800 apresenta uma metodologia de cálculo na qual é possível obter o momento resistente de flambagem. O momento resistente obtido de acordo com a norma é comparado com o momento máximo obtido no diagrama de momento fletor.

4.3.3 Fadiga

A fadiga do material significa mudanças nas propriedades do material devido repetidos ciclos de carregamento e descarregamento. Tais mudanças podem levar a uma falha sob níveis de tensão abaixo do limite de escoamento do material. A falha por fadiga significa uma ruptura decorrente do crescimento instável de trincas e é conhecida como uma fratura frágil. Assim, é necessário levar em conta no projeto o modo de falha devido a fadiga. Um dos principais fatores de influencia da falha por fadiga é a presença de concentradores de tensão. Uma forma de concentração de tensão em estruturas compostas por vigas ocorre nas uniões entre as vigas da estrutura.

Além da presença de trincas a falha por fadiga está diretamente vinculada ao número de ciclos de carregamento, intensidade da tensão e a relação entre a tensão máxima e a tensão mínima que atua no material. Assim a norma NBR8400 estabelece uma metodologia na qual a partir da quantidade de ciclos e do tipo de união são apresentadas curvas de fadiga que indicam a tensão máxima admissível para fadiga de acordo com a relação entre a tensão máxima e a tensão mínima.

5 DESENVOLVIMENTO

A determinação de um equipamento para utilização de movimentação de cargas utilizou de uma metodologia de projeto que consiste na síntese, análise, seleção e projeto detalhado. Na etapa de síntese e análise se busca diversas alternativas para solução do problema, sem levar em consideração aspectos como o valor e a qualidade da solução apresentada. Como solução para o problema de movimentação de cargas existem diversos equipamentos que podem ser utilizados. A lista abaixo apresenta as máquinas de elevação de fabricação especial (BRASIL, 1985):

- Pórticos
- Pontes rolantes
- Monovias
- Guindaste

Nesta etapa são analisadas as possíveis soluções que foram abordadas na etapa de síntese. Para a análise são levados em conta fatores como custo e a qualidade de cada solução. A tabela 2 apresenta os pontos positivos e negativos com relação a cada solução apresentada, as vantagens e desvantagens são apresentadas de modo comparativo entre o equipamento e os demais apresentados.

Tabela 2- Vantagens e desvantagens de alguns equipamentos.

	Vantagens	Desvantagens
Pórticos	Equipamento apto a trabalhar em ambientes abertos;	Necessitam de um pátio livre;
Pontes rolantes	Alta capacidade de carga; Carregam e descarregam em qualquer ponto no qual a ponte se encontre; Configuração com posicionamento aéreo;	Necessitam de um galpão para instalação; Alto investimento; Exige uma estrutura robusta.
Monovias	Transporte ideal de cargas em pontos pré-definidos; Baixo investimento;	Possuem um trajeto fixo; Baixa capacidade de carga.
Guindastes	Alta capacidade de carga; Equipamento apto a trabalhar em ambientes abertos;	Alto investimento; Exige uma estrutura robusta.

Fonte: O autor, 2018.

A escolha do equipamento a ser utilizado se baseia em diversos fatores. Além do fator econômico e do tempo utilizado para a movimentação da carga, a segurança é um dos fatores mais importante para qualquer empresa. O equipamento utilizado para movimentação de cargas deve estar de acordo com as características físicas do local, observando a existência de obstáculos a serem transportados.

De um modo geral a capacidade de carga de um equipamento está diretamente vinculada ao seu investimento, assim, equipamentos que possuem uma alta capacidade de carga necessitam de um alto investimento inicial, como o caso de pontes rolantes e guindastes.

Assim, por possuir um custo de investimento relativamente baixo e atendendo de maneira segura os valores das cargas que serão transportadas, a monovia se tornou uma solução bastante promissora. Além de ter um menor investimento inicial quando comparado com os

equipamentos de alta capacidade de carga, as monovias se destacam em relação aos pórticos pelos motivos abaixo:

- O transporte da carga possui um trajeto fixo;
- O local para movimentação da carga possui várias obstruções;
- No local para movimentação da carga existe uma estrutura que facilita a construção de uma monovia.

Com base na análise o equipamento selecionado para utilização foi a monovia. As monovias são equipamentos compostos essencialmente por uma talha acoplada no trole, onde todos são vinculados e suportados por uma viga dada por um perfil do tipo “I”. Esta viga será dimensionada de forma a suportar, além do próprio peso, todas as cargas a serem transportadas. Visando um menor custo inicial, tanto a talha quanto o trole serão adotados como manuais.

O projeto detalhado consiste em obter todas as especificações técnicas necessárias para futura fabricação de um protótipo teste. Para construção de um protótipo teste são necessárias algumas informações como dimensões, materiais, tipos de conexões. Para obtenção destas informações este trabalho se baseia na norma ABNT NBR 8400. Esta norma define diretrizes necessárias no cálculo estrutural de um equipamento utilizado para movimentação de carga.

Com a escolha de uma monovia para movimentação de carga o seu dimensionamento tem como objetivo a concepção de uma estrutura que atenda a todas as questões de segurança e requisitos legais. Assim, foi feito um levantamento dos dados necessários para o dimensionamento da monovia conforme a norma NBR 8400.

5.1 DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO

A tabela 3 apresenta os dados iniciais para o dimensionamento da estrutura. A carga nominal foi dada com base no peso máximo do motor, o vão e o material escolhido foi definido com base na distância entre as colunas da estrutura montada no local.

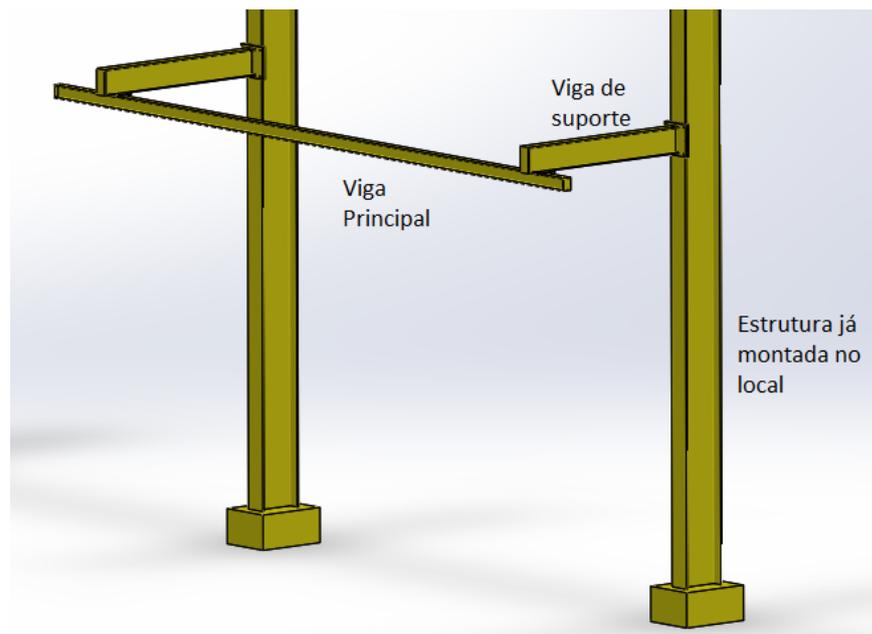
Tabela 3- Dados do projeto.

Carga nominal	3,5 kN
Velocidade de elevação da carga	0,25 m/s
Vão	5 m
Material	Aço ASTM A36

Fonte: O autor, 2018.

Inspirado na figura 3 e com base nas restrições físicas do local foi elaborado um modelo em 3D conforme figura 12.

Figura 10- Ilustração da monovia.



Fonte: O autor, 2018.

5.2 CLASSIFICAÇÃO

O dimensionamento de uma estrutura conforme a NBR 8400 inicia com a classificação da estrutura, primeiramente obtém-se a classe de utilização e o estado da carga levantada (ou estado de tensão para os elementos). De acordo com a NBR 8400 o dimensionamento se baseia

no quanto a carga usual se aproxima da carga máxima e na frequência de utilização da estrutura. 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 (TAMASAUSKAS, 2000).

A classe de utilização 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. Para cada uma delas estipula-se um número total teórico de ciclos de levantamento que o equipamento deverá efetuar durante sua vida. A tabela 4 informa as classes de utilização definida pela norma.

Tabela 4- Classe de utilização.

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: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

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 norma NBR 8400 considera quatro estados de carga e define a fração mínima da carga máxima para cada estado conforme a Tabela 4. Como alguns elementos podem ficar submetidos a estados de tensões menores ou maiores que os impostos pelas cargas levantadas.

Tabela 5- Estado da carga.

Estado	Definição	Fração mínima
0 (muito leve)	Equipamento levanta excepcionalmente a carga nominal e comumente cargas muito reduzidas	0
1 (leve)	Equipamentos que raramente levantam a carga nominal e comumente cargas de ordem de 1/3 da carga nominal	1/3
2 (médio)	Equipamentos que frequentemente levantam a carga nominal e comumente cargas compreendidas entre 1/3 e 2/3 da carga nominal	2/3
3 (pesado)	Equipamentos regularmente carregados com a carga nominal	1

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Como alguns elementos de uma estrutura podem ficar submetidos a estados de tensões menores ou maiores que os impostos pelas cargas levantadas. Estes estados de tensões são convencionalmente definidos de modo análogo ao dos estados das cargas, segundo as definições da tabela 6, onde P representa uma fração de tensão máxima, ou seja, $\sigma/\sigma_{m\acute{a}x}$.

Tabela 6- Estado de tensões.

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

A classe de utilização bem como o estado da carga são conceitos importantes para classificação da estrutura a ser dimensionada e antecede todo dimensionamento pela NBR 8400. A partir do estado da carga e da classe de utilização classifica-se a estrutura ou seus elementos de acordo com seis grupos, conforme a Tabela 7.

Tabela 7- Classificação da estrutura.

Estado de cargas	Classe de utilização			
	A	B	C	D
0	1	2	3	4
1	2	3	4	5
2	3	4	5	6
3	4	5	6	6

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Os diversos grupos indicados na Tabela 7 classificam a estrutura e determinam o valor do coeficiente de majoração M_x , que por sua vez caracteriza o dimensionamento da estrutura. Esse coeficiente é dado a partir da Tabela 8 e será utilizado para multiplicar as solicitações obtidas no cálculo estrutural.

Tabela 8- Coeficiente de majoração.

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Como a estrutura será utilizada apenas quando for necessário a manutenção do equipamento levantado e inutilizada por um longo período, de acordo com a norma temos a classe de utilização A. E como a estrutura será utilizada frequentemente para o levantamento da carga nominal (levantamento dos motores) e comumente cargas inferiores a carga nominal (levantamento das bombas) o estado da carga de acordo com a norma é 2. Assim temos um coeficiente de majoração 1.

5.3 DETERMINAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES

Após a classificação da estrutura é necessário obter as solicitações no qual a estrutura estará submetida. As solicitações se dividem entre:

- Solicitações estáticas;
- Solicitações devido ao movimento vertical;
- Solicitações devido ao movimento horizontal.

As principais solicitações são as devidas aos pesos próprios dos elementos S_G e as devidas à carga de serviço S_L . Para os elementos móveis a posição considerada será aquela mais desfavorável, ou seja, a posição responsável por gerar no elemento considerado os maiores valores de tensão.

5.3.1 Solicitações devidas aos movimentos verticais

Estas solicitações são provenientes dos movimentos do içamento relativamente brusco da carga de serviço, durante levantamento. Nessas solicitações, levam-se em contas as oscilações provocadas pelo levantamento brusco da carga, por meio de um coeficiente dinâmico ψ , conforme tabela 9.

Tabela 9- Coeficiente dinâmico

Equipamento	Coeficiente dinâmico	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	$v_L \geq 1$
Guindastes com lanças	1,15	$0 < v_L \leq 0,5$
	$1 + 0,3 v_L$	$0,5 < v_L < 1$
	1,3	$v_L \geq 1$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Devido a utilização de um trole mecânico, que trabalha com um levantamento em baixa velocidade, a velocidade adotada para o dimensionamento foi de 0,25 m/s, assim, o coeficiente dinâmico adotado é de 1,15.

5.3.2 Solicitações devidas aos movimentos horizontais

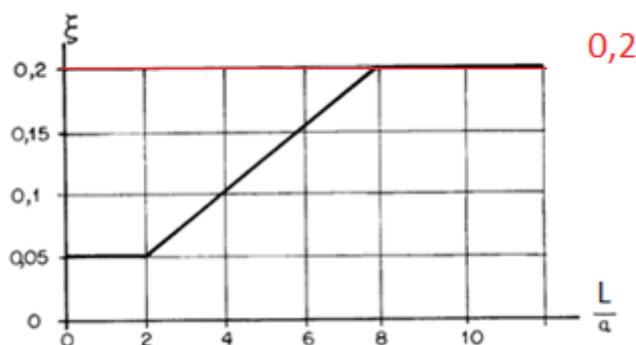
Elas são:

- Os efeitos da inércia devidos às acelerações ou desacelerações dos movimentos de direção, de translação, de orientação e de levantamento de lança, calculáveis em função dos valores destas acelerações ou desacelerações;
- Os efeitos de forças centrífugas;
- As reações horizontais transversais provocadas pela translação direta;
- Os efeitos de choque.

Os efeitos horizontais são levados em conta devido as acelerações e desacelerações imprimidas nos elementos móveis, calculando-se os efeitos resultantes desse movimento nos diferentes elementos da estrutura.

Devido à insuficiência de informações na fase de pré-dimensionamento da viga, a norma NBR 8800 recomenda a utilização de 20% da carga içada como força horizontal decorrente da movimentação. Esta é uma prática comum na fase de orçamento, onde ainda não se tem informações sobre o trole e a talha. Esse valor adotado atende aos requisitos de segurança e também pode ser identificado na norma NBR 8400, onde ela apresenta um gráfico para obtenção de um coeficiente ξ que deve ser multiplicado pela carga de serviço para obter a carga transversal devida ao rolamento. No gráfico apresentado na figura 13 o valor máximo desse coeficiente é igual ao valor adotado, para utilização do gráfico o coeficiente é obtido a partir da relação entre o vão da viga L e a distância entre os eixos do trole a .

Figura 11- Coeficiente que determina as reações transversais devidas ao rolamento.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Os efeitos de forças centrífugas são utilizados no projeto de guindastes, devido ao movimento de orientação.

Os efeitos de choque contra batentes não serão considerados neste trabalho, por se tratar de um trole mecânico manual a velocidade de translação será baixa e segundo a norma NBR 8400, em casos onde a carga suspensa pode oscilar e a velocidade de deslocamento horizontal for menor que ($0,7 \text{ m/s}$) não se levam em consideração os efeitos de choque.

Além das solicitações apresentadas a norma NBR 8400 apresenta outras solicitações como as devidas aos efeitos climáticos resultantes da ação do vento ou variação da temperatura. As solicitações devidas às variações de temperatura só são consideradas em casos especiais, onde os elementos da estrutura não podem se dilatar livremente.

5.4 MÉTODO DE CÁLCULO

Com base na teoria de resistência dos materiais são encontradas as solicitações apresentadas acima, posteriormente estas solicitações são comparadas com valores limites que são estabelecidos de acordo com requisitos da norma com intuito de garantir que não ocorrerá a falha da estrutura. A norma NBR 8400 considera as três seguintes causas de falha possíveis:

- Ultrapassagem do limite de escoamento;
- Ultrapassagem das cargas críticas de flambagem;

- Ultrapassagem do limite de resistência à fadiga.

Na norma NBR 8400 estão previstos nos cálculos três casos de solicitações, de acordo com cada caso a norma apresenta o coeficiente de segurança que deve ser adotado:

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

Para o caso I considera-se as solicitações estáticas devido ao peso próprio da estrutura S_G , as solicitações devido a carga de serviço S_L multiplicada pelo coeficiente dinâmico ψ e os efeitos horizontais mais desfavoráveis S_H (excluindo os efeitos de choque). As solicitações ditas acima devem ser multiplicadas pelo coeficiente de majoração M_x . Para o caso II é necessário acrescentar uma solicitação devido ao vento S_W , conforme mostra equação 5.

$$M_x(S_G + \psi S_L + S_H) + S_W \quad (5)$$

Para o caso de solicitação III são levadas em consideração efeitos excepcionais como:

- Equipamento fora de serviço em vento máximo;
- Equipamento em serviço sobre efeito de amortecimento;
- Equipamento submetido a ensaio.

Neste trabalho foi adotado o uso do primeiro caso para o dimensionamento da estrutura.

5.5 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

O dimensionamento da viga é feito com base nas solicitações e condições previstas acima. De acordo com os valores de tensões que atuam nos diferentes elementos da estrutura e nas junções o dimensionamento é feito de forma que o material e as dimensões adotadas atendam todas as condições previstas na norma adotada.

O material utilizado será o mesmo da estrutura existente no local que servirá como suporte para viga principal, a tabela 10 apresenta o material com suas propriedades.

Tabela 10- Propriedades mecânicas do material.

ASTM A36	
Limite de escoamento (MPa)	250 mín.
Limite de ruptura (MPa)	400 mín.
Alongamento após ruptura (%)	20 mín.

Fonte: Adaptado da GERDAU, 2018.

5.5.1 Ultrapassagem do limite de escoamento

Primeiramente é verificada a condição de não ultrapassagem do limite de escoamento. A partir da norma obtemos os valores de tensões admissíveis σ_a de acordo com cada caso de sollicitação. Os valores de tensões admissíveis são obtidos a partir do limite de escoamento do material σ_e conforme mostra tabela 11.

Tabela 11- Tensão admissível a tração (ou compressão) simples.

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

A tabela é válida apenas para materiais onde a relação entre o limite de escoamento σ_e e o limite de ruptura do material σ_r seja menor que 0,7. Para o material escolhido esse valor não foi ultrapassado. Para o cisalhamento puro a norma apresenta a equação 6 para a tensão admissível τ_a .

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Assim, temos os valores das tensões admissíveis para cada caso de sollicitação na tabela 12.

Tabela 12- Tensão admissível para o aço ASTM A36.

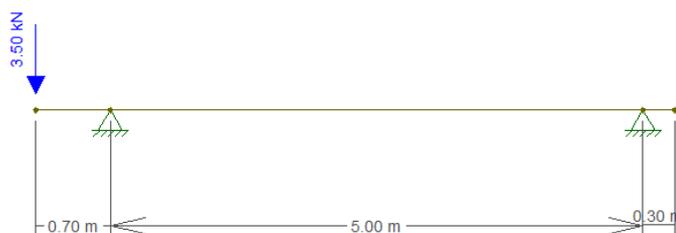
Caso de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
Tensão admissível σ_a (MPa)	166,67	187,97	227,27
Tensão admissível τ_a (MPa)	96,23	108,52	131,21

Fonte: O autor, 2018.

O caso de solicitação adotado neste trabalho foi o caso I. Com o uso de métodos conhecidos na literatura de resistência dos materiais é possível calcular as solicitações em suas condições mais críticas, em seguida os valores de tensões encontrados são comparados com as tensões admissíveis estabelecidas anteriormente. Primeiramente as situações mais críticas foram avaliadas com o uso da ferramenta *ftool*, com a obtenção dos diagramas de esforço cortante e momento fletor.

A figura 14 representa uma viga apoiada em dois pontos com a carga de serviço em sua condição mais crítica para o esforço cortante.

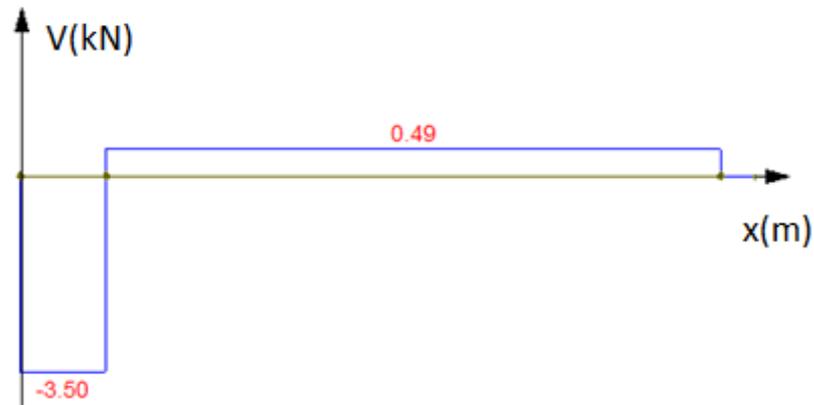
Figura 12- Representação da viga com carga de serviço.



Fonte: O autor, 2018.

As dimensões e locais de apoios representados na figura 14 foram definidos com base na estrutura que servira como suporte para a viga e na localização da carga. As figuras 15 e 16 apresentam os diagramas de esforço cortante e o de momento fletor para condição representada pela figura 14.

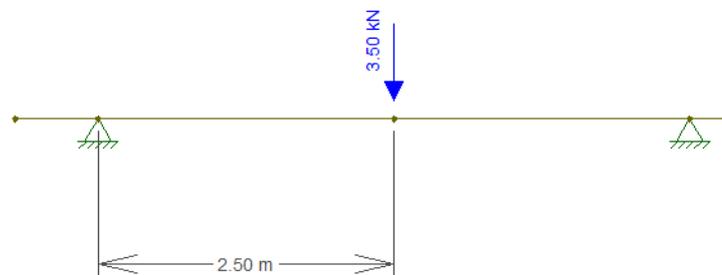
Figura 13- Diagrama de esforço cortante x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Para o momento fletor a condição mais crítica para carga de serviço é apresentada na figura 16.

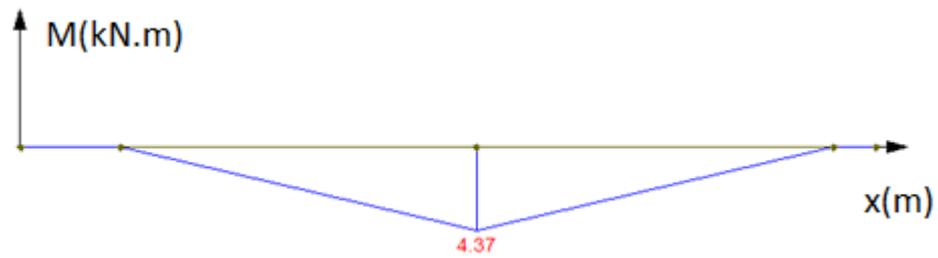
Figura 14- Representação da viga com carga de serviço.



Fonte: O autor, 2018.

A figura 17 apresenta o diagrama do momento fletor para a condição apresentada na figura 16.

Figura 15- Diagrama do momento fletor x comprimento.



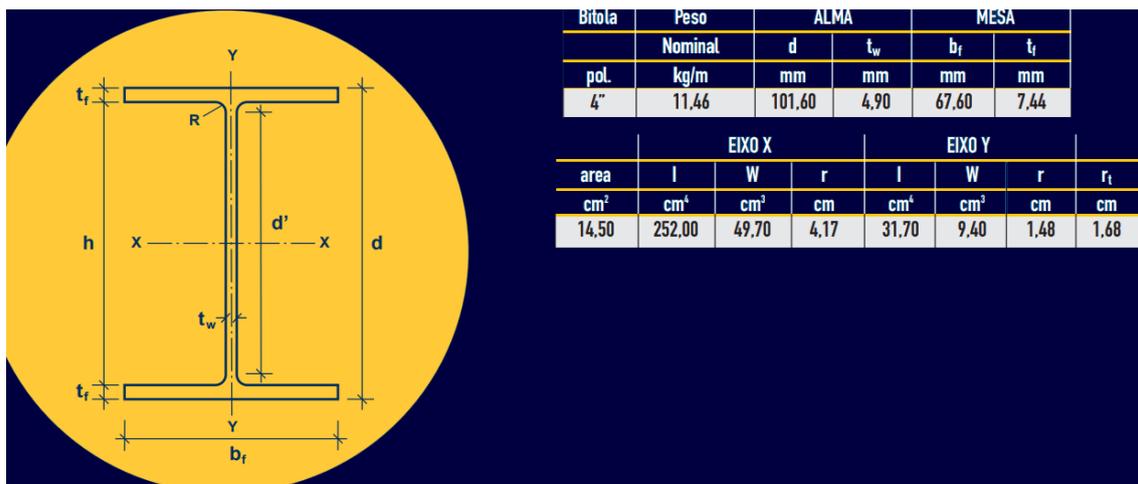
Fonte: O autor, 2018.

Primeiramente, os dados obtidos no diagrama de momento fletor da figura 17 auxiliam na escolha do perfil adequado. A equação 7 apresenta o módulo de resistência mínimo W_{min} que deve ser utilizado para escolha do perfil.

$$W_{min} = \frac{M}{\sigma_a} = 26,22 \text{ cm}^3 \quad (7)$$

Com base no módulo de resistência mínimo calculado foi adotado um perfil I. A figura 18 apresenta os dados do perfil escolhido.

Figura 16- Dados do perfil adotado.



Fonte: Adaptado da GERDAU, 2018.

Com as dimensões apresentadas foi possível calcular a área efetiva do perfil A_{ef} , que é dada pelo produto da altura da seção d e a espessura da alma t_w . A tabela 13 apresenta as propriedades do perfil utilizadas na verificação da não ultrapassagem do limite de escoamento.

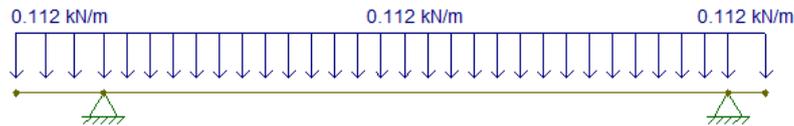
Tabela 13-Propriedades do perfil adotado.

Área efetiva (A_{ef})	Módulo resistente (W_{xx})
4,97 cm ²	49,70 cm ³

Fonte: O autor, 2018.

Considerando a massa linear para o perfil adotado e considerando a aceleração gravitacional igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ temos na figura 19 a representação do peso próprio da estrutura em kN/m .

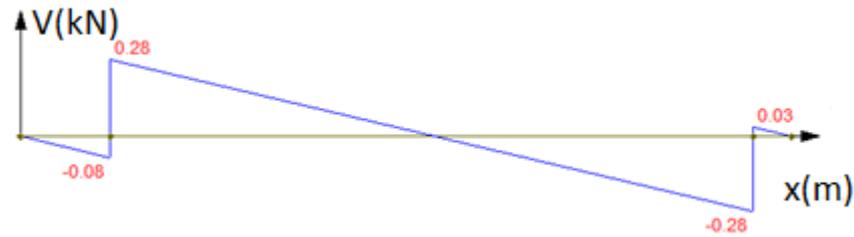
Figura 17-Representação da carga devido ao peso próprio.



Fonte: O autor, 2018.

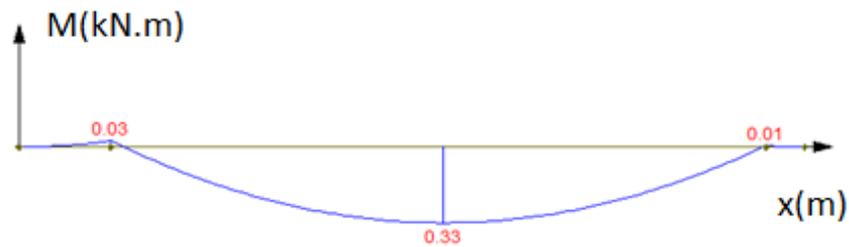
Para o carregamento indicado obtemos os seguintes diagramas de esforço cortante e momento fletor.

Figura 18- Diagrama de esforço cortante x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 19- Diagrama de momento fletor x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Com os diagramas obtidos podemos calcular as solicitações segundo a norma NBR 8400, a equação 8 apresenta o cálculo da solicitação devido a tração simples σ_{xx} .

$$\sigma_{xx} = M_x \left(\psi \frac{M_l}{W_{xx}} + \frac{M_g}{W_{xx}} \right) \quad (8)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $M_l = 4,37 \text{ kN.m}$, momento fletor máximo devido carga de serviço;
- $M_g = 0,33 \text{ kN.m}$, momento fletor máximo devido ao peso da estrutura;
- $W_{xx} = 49,70 \text{ cm}^3$, representa o módulo resistente a flexão do perfil;

Como solicitação horizontal foi considerado um coeficiente ξ igual a 0,2 conforme figura 13. Assim, a equação 9 apresenta o cálculo da solicitação horizontal σ_{yy} .

$$\sigma_{yy} = M_x \left(\frac{0,2 M_l}{W_{yy}} \right) \quad (9)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $M_l = 4,37 \text{ kN.m}$, momento fletor máximo devido carga de serviço;
- $W_{yy} = 9,40 \text{ cm}^3$, representa o módulo resistente a flexão do perfil;

Do mesmo modo, foi realizado o cálculo da solicitação devido ao cisalhamento τ_{xy} .

$$\tau_{xy} = M_x \left(\psi \frac{|V_l|}{A_{ef}} + \frac{|V_g|}{A_{ef}} \right) \quad (10)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $V_l = 3,50 \text{ kN}$, esforço cortante máximo devido carga de serviço;
- $V_g = 0,28 \text{ kN}$, esforço cortante máximo devido ao peso da estrutura;
- $A_{ef} = 4,97 \times 10^2 \text{ mm}^2$, área da alma, área efetiva do perfil;

Obtemos assim os seguintes resultados, conforme tabela 14:

Tabela 14- Comparação entre os limites e as tensões devido a flexão e cisalhamento.

Limites	
$\sigma_a = 166,67 \text{ MPa}$	$\tau_a = 96,23 \text{ MPa}$
Resultados	
$\sigma_{xx} = 107,76 \text{ MPa}$	$\tau_{xy} = 8,66 \text{ MPa}$
$\sigma_{yy} = 92,99 \text{ MPa}$	

Fonte: O autor, 2018.

Além da verificação das tensões apresentadas na tabela 14, a NBR 8400 apresenta a tensão de comparação apresentada pela equação 11.

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3 * \tau_{xy}^2} = 102,29 \text{ MPa} \quad (11)$$

A tensão de comparação, assim como as tensões σ_{xx} e σ_{yy} atendem a exigência da norma, elas devem ser menores que a tensão σ_a .

Como na viga principal, as vigas utilizadas de suporte foram analisadas com a mesma metodologia. Porém, para as vigas de suporte será aproveitado um perfil W200x22.5 da Gerdau. Assim a sua análise já parte de um perfil definido. A tabela 15 apresenta as propriedades do perfil adotado.

Tabela 15- Propriedades geométricas do perfil.

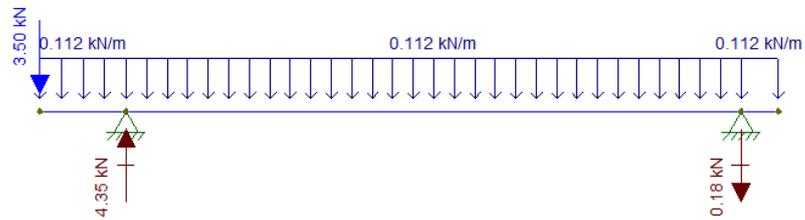
Área (A)	Área efetiva (A_{ef})	Momento de inércia (I_x)	Módulo resistente (W_{xx})
$2,90 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$1,28 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$2,03 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$196,99 \text{ cm}^3$

Fonte: Adaptado da GERDAU, 2018.

O comprimento destas vigas está definido pela distância entre a estrutura e a posição das cargas a serem transportadas.

Para obter a solicitação na viga de apoio primeiramente são obtidas as reações nos pontos de apoio da viga principal. A figura 22 apresenta as reações na condição mais crítica utilizando o software *ftool*.

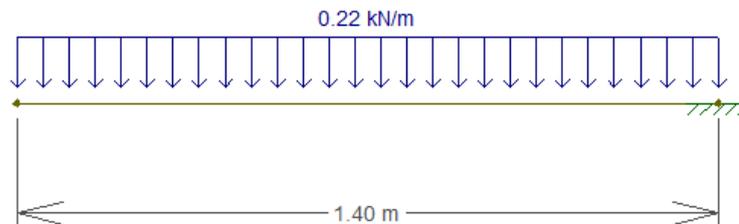
Figura 20- Representação das cargas e reações nos apoios.



Fonte: O autor, 2018.

Com a obtenção do valor da reação no apoio obtemos o valor da carga de serviço para viga de apoio e com a escolha do perfil a carga devido ao peso próprio já é definida, assim, temos nas figuras 23 a representação das solicitações devido a carga de serviço e devido ao peso próprio.

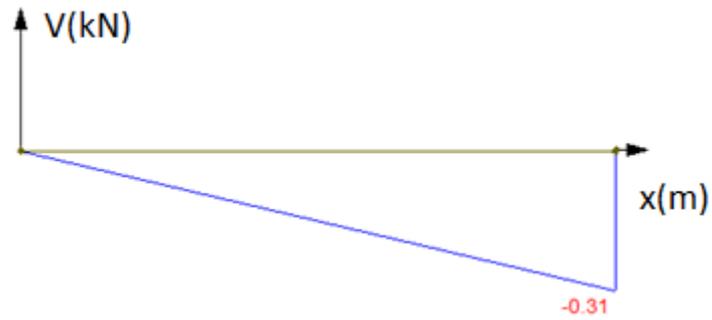
Figura 21- Representação das cargas devido ao peso próprio.



Fonte: O autor, 2018.

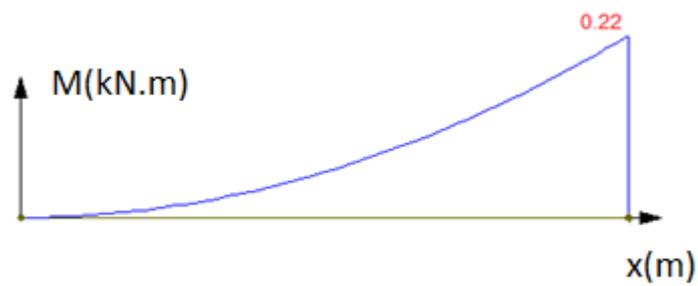
Para condição representada na figura 23 foram obtidos os diagramas de momento fletor e esforço cortante conforme mostram figuras 24 e 25.

Figura 22- Diagrama de esforço cortante x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 23- Diagrama de momento fletor x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

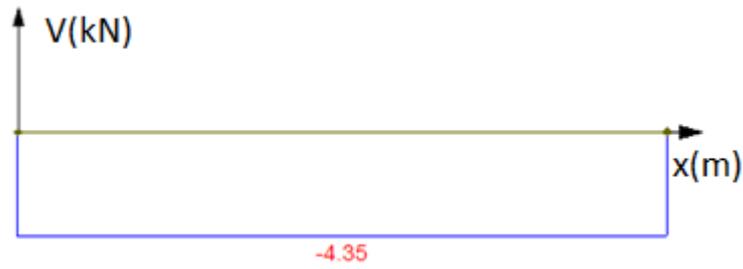
Para a solicitação da carga de serviço conforme figura 26, foram obtidos os diagramas de esforço cortante e momento fletor nas figuras 27 e 28.

Figura 24- Representação da carga de serviço.



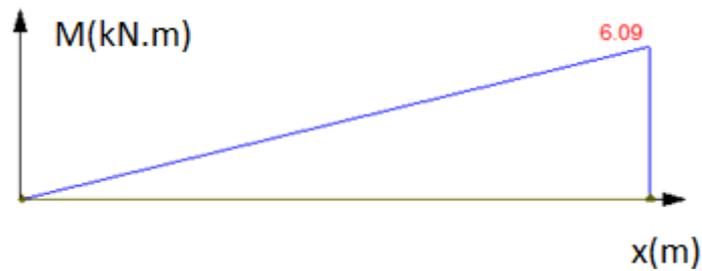
Fonte: O autor, 2018

Figura 25- Diagrama de esforço cortante x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 26- Diagrama de momento fletor x comprimento.



Fonte: O autor, 2018.

Da mesma forma da viga principal obtemos os valores das tensões atuantes conforme equação 12.

$$\sigma_{xx} = M_x \left(\psi \frac{M_l}{W_{xx}} + \frac{M_g}{W_{xx}} \right) \quad (12)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $M_l = 6,09 \text{ kN.m}$, momento fletor máximo devido carga de serviço;
- $M_g = 0,22 \text{ kN.m}$, momento fletor máximo devido ao peso da estrutura;
- $W_{xx} = 196,99 \text{ cm}^3$, representa o módulo resistente a flexão do perfil;

$$\tau_{xy} = M_x \left(\psi \frac{|V_l|}{A_{ef}} + \frac{|V_g|}{A_{ef}} \right) \quad (13)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $V_l = 4,35 \text{ kN}$, esforço cortante máximo devido carga de serviço;
- $V_g = 0,31 \text{ kN}$, esforço cortante máximo devido ao peso da estrutura;
- $A_{ef} = 1,28 \times 10^3 \text{ mm}^2$, área da alma, área efetiva do perfil;

Obtemos assim os seguintes resultados, conforme tabela 16:

Tabela 16- Comparação entre os limites e as tensões obtidas.

Limites	
$\sigma_a = 166,67 \text{ MPa}$	$\tau_a = 96,23 \text{ MPa}$
Resultados	
$\sigma_{xx} = 36,67 \text{ MPa}$	$\tau_{xy} = 4,15 \text{ MPa}$
$\sigma_{cp} = 37,37 \text{ MPa}$	

Fonte: O autor, 2018.

5.5.2 Ultrapassagem das cargas críticas de flambagem

Para verificação das cargas críticas de flambagem a norma NBR 8400 em seu anexo E deixa a critério do fabricante o método de cálculo. Assim, este trabalho adota como método de cálculo o abordado na norma NBR 8800, onde é aprofundado de maneira mais detalhada as situações de falha devido a ultrapassagem das cargas críticas de flambagem.

Com base na norma NBR 8800 foram consideradas três situações de flambagem, uma flambagem lateral com torção (FLT), uma flambagem local da mesa comprimida (FLM) e a flambagem local da alma (FLA).

Primeiramente obtemos o índice de esbeltez λ dos perfis definidos, para posterior comparação com os parâmetros de esbeltez correspondente a plastificação λ_p e correspondente ao início do escoamento λ_r definidos pela norma.

A tabela 17 apresenta os parâmetros referente ao momento fletor resistente considerando como falha a flambagem.

Tabela 17- Parâmetros referente ao momento fletor resistente.

Tipo de seção	Estados limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos simétricos, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia .	FLT	$(\sigma_e - \sigma_r) W$	Ver nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}}$	Ver nota 1
	FLM	$(\sigma_e - \sigma_r) W$	Ver nota 2	$\frac{b_f}{2 t_f}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}}$	Ver nota 2
	FLA	$\sigma_e W$	Anexo H NBR 8800	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}}$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Onde,

- E é módulo de elasticidade do aço, $E = 200.000 \text{ MPa}$;
- L_b é a distância entre travamentos laterais, ou seja, é o comprimento destravado;
- M_r representa o momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo o efeito das tensões residuais em alguns casos;
- M_{cr} representa o máximo momento que pode ser aplicado a viga, em condições ideais, sem que ocorra FLT;
- W é o módulo de resistência elástico;
- r_y é o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

- σ_r é a tensão residual de compressão nas mesas, tomada igual a 30% da resistência de escoamento do aço considerado;
- σ_e é a tensão de escoamento do aço;
- h , b_f , t_f e t_w são dimensões do perfil definidas na figura 18.

De acordo com a norma a tabela 17 deve ser usada para vigas de alma não esbeltas, a norma NBR 8800 classifica como viga de alma não esbelta aquela que satisfaz a condição.

$$\frac{h}{t_w} < 5,70 \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}} \quad (14)$$

NOTA 1:

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (15)$$

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J L_b^2}{C_w}\right)} \quad (16)$$

Para a seção do tipo I,

$$\beta_1 = \frac{(\sigma_e - \sigma_r) W}{E J} \quad (17)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (18)$$

NOTA 2:

$$M_{cr} = \frac{0,69 E}{\lambda^2} W_c \quad (19)$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(\sigma_e - \sigma_r)}} \quad (20)$$

Onde,

- d é altura da seção transversal;
- J é a constante de torção da seção transversal;
- W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de c flexão;
- I_y é momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y .

A tabela 18 apresenta os parâmetros geométricos para os perfis adotados, com exceção do comprimento destravado L_b e da constante de torção J para o perfil 1, todos os dados foram obtidos no catálogo da Gerdau.

Tabela 18- Parâmetros dos perfis adotados.

	W (mm^3)	I_x (mm^4)	I_y (mm^4)	J (mm^4)	r_x (mm)	r_y (mm)	L_b (mm)
Perfil 1	$4,97 \times 10^4$	$2,52 \times 10^6$	$3,17 \times 10^5$	$8,53 \times 10^3$	41,7	14,8	5000
Perfil 2	$1,97 \times 10^5$	$2,03 \times 10^7$	$1,42 \times 10^6$	$6,18 \times 10^4$	83,7	22,2	1400

Fonte: Adaptado da GERDAU, 2018.

A constante de torção J do perfil 1 foi obtido conforme equação 21 (LUI, 1999).

$$J = \frac{1}{3}(2 b_f t_f^3 + h t_w) \quad (21)$$

Considerando os dados apresentados, a tabela 19 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 19- Parâmetros referentes a esbeltez.

	FLT			FLM			FLA		
	λ	λ_p	λ_r	λ	λ_p	λ_r	λ	λ_p	λ_r
Perfil 1	337,84	49,78	259,93	4,54	10,75	28,06	17,70	106,35	161,22
Perfil 2	63,06	49,78	177,12	6,38	10,75	28,06	30,65	106,35	161,22

Fonte: O autor, 2018.

Para a verificação da FLT temos que $\lambda > \lambda_r$ logo a norma NBR 8800 define o momento fletor resistente de cálculo M_{rd} como a equação 22.

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{1,1} \quad (22)$$

Para a verificação da FLM e FLA temos que $\lambda < \lambda_p$ logo a norma NBR 8800 define o momento fletor resistente de cálculo M_{rd} como a equação 23.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{1,1} \quad (23)$$

+

Onde M_{pl} representa o momento fletor de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástico Z pela resistência ao escoamento do aço σ_e . O módulo de resistência plástico do segundo perfil foi obtido do catálogo GERDAU, para o primeiro perfil foi obtido conforme equação 24 (MEGSON, 2005).

$$Z = b_f t_f (d - t_f) + 0,25 t_w h^2 \quad (24)$$

A tabela 20 apresenta a comparação entre o momento fletor resistente de cálculo M_{rd} e o momento solicitante de cálculo M_{sd} .

Tabela 20- Comparação entre o momento fletor resistente e solicitante.

Perfil 1	$M_{sd} = \sigma_{xx} W_{xx} = 5,36 \text{ kN.m}$		
	FLT	FLM	FLA
	$M_{rd} = 6,01 \text{ kN.m}$	$M_{rd} = 12,86 \text{ kN.m}$	$M_{rd} = 12,86 \text{ kN.m}$
Perfil 2	$M_{sd} = \sigma_{xx} W_{xx} = 7,22 \text{ kN.m}$		
	FLT	FLM	FLA
	$M_{rd} = 148,98 \text{ kN.m}$	$M_{rd} = 49,44 \text{ kN.m}$	$M_{rd} = 49,44 \text{ kN.m}$

Fonte: O autor, 2018.

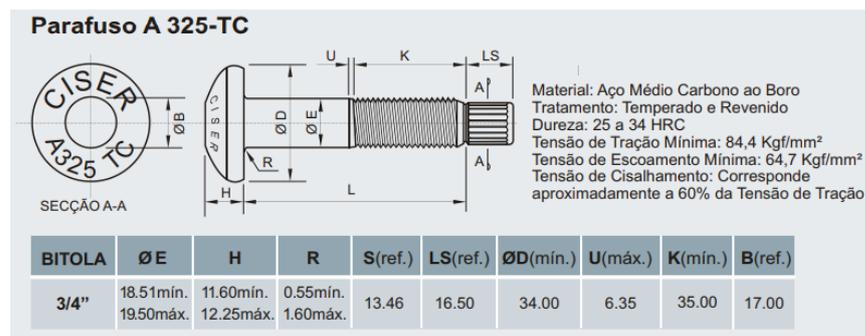
Para ambos os perfis é garantida a não ultrapassagem das cargas críticas de flambagem de acordo com o método descrito na NBR 8800.

5.6 JUNÇÕES APARAFUSADAS

Após o dimensionamento da viga é necessário realizar o dimensionamento das uniões e posteriormente verificar a condição de falha por fadiga. Inicialmente foi verificado a situação na qual existia uma máxima reação em um dos suportes, a figura 22 apresenta a situação de maior reação em um dos suportes. Como ponto de partida foram considerados quatro parafusos por junto, assim, seguiu o cálculo da seção resistente mínima.

Devido a existência de material na empresa disponível para utilização na construção, foi estipulado inicialmente a utilização do parafuso indicado na figura 29.

Figura 27- Dados do parafuso adotado, medidas em mm.



Fonte: Adaptado da CISER, 2018.

Para junção de peças montadas por parafusos a norma NBR8400 apresenta os seguintes esforços como solicitações:

- Forças paralelas aos planos de junção;
- Forças perpendiculares ao plano de junção;
- Combinações das forças indicadas acima.

5.6.1 Forças paralelas aos planos de junção

De acordo com a norma NBR8400 as forças paralelas ao plano de junção (F_p) tendem a fazer deslizar as peças em contato. Para determinar o esforço limite admissível (F_{pa}) que pode ser transmitido a cada parafuso, considera-se o esforço de tração (T_p) que se exerce no parafuso após o aperto, multiplicado pelo coeficiente de atrito aço/aço ($\mu = 0,3$) das superfícies em

contato e aplica-se a este esforço limite o coeficiente de segurança (FS_p) indicado pela tabela 21, multiplicando-se o resultado pelo número de planos de atrito (m), ou seja:

$$F_{Pa} = \frac{\mu T_p}{FS_p} m \quad (25)$$

Tabela 21- Fator de segurança.

Caso de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
FS_p	1,50	1,33	1,10

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

O esforço de tração (T_p) apresentado depende do torque de aperto aplicado ao parafuso. Adotando como o esforço limite admissível o esforço máximo que atua no parafuso podemos calcular esforço de tração mínimo necessário.

A condição de força perpendicular ao plano de junção é vista na união entre as vigas utilizadas como suporte e a estrutura existente no local. A partir dos diagramas de esforço cortante vistos nas figuras 24 e 27 temos os valores das reações do ponto de apoio da viga. Assim, podemos calcular a força por junta F_{PJ} na equação 26.

$$F_{PJ} = M_x (R_g + \psi R_l) = 5,31 \text{ kN} \quad (26)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $R_l = 4,35 \text{ kN}$, reação no apoio devido a carga de serviço;
- $R_g = 0,31 \text{ kN}$, reação no apoio devido ao peso da estrutura;

Assim, dividindo o valor da força por junta F_{PJ} pela quantidade de parafusos adotados inicialmente temos o esforço que atua no parafuso que será considerado como F_{Pa} .

$$F_{Pa} = \frac{5,31 \text{ kN}}{4} = 1,32 \text{ kN} \quad (27)$$

Considerando o fator de segurança do caso I, o coeficiente de atrito aço/aço apresentado pela norma e apenas um plano de atrito, temos então esforço de tração mínimo necessário.

$$T_P = \frac{1,5}{0,31} 1,32 \text{ kN} = 6,60 \text{ kN} \quad (28)$$

De acordo com a norma NBR8400 a tensão admissível para parafusos de alta resistência deve ser dada pela relação 5.25:

$$\sigma_a = \sigma_e 0,7 = 444,74 \text{ MPa} \quad (29)$$

O limite de escoamento para o parafuso adotado está apresentado na figura 29. Assim, obtemos o valor da seção mínima do parafuso A_P através da expressão 5.26:

$$A_P = \frac{T_P}{\sigma_a} = \frac{6600}{444,74} = 14,84 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

O parafuso adotado possui um diâmetro na seção resistente $\varnothing E$ de $18,51 \text{ mm}$, assim, a NBR8400 estabelece o torque de aperto necessário T por:

$$T = T_P 0,2 \varnothing E = 24,43 \text{ kN} \quad (31)$$

5.6.2 Forças perpendiculares ao plano de junção

De acordo com a NBR8400 as forças perpendiculares ao plano de junção N tendem a provocar uma descompressão das peças em contato. O valor admissível N_a é determinado dividindo-se o esforço de tração no parafuso após o aperto T_P pelo coeficiente de segurança FS_N dado pela tabela 22, ou seja:

$$N_a = \frac{T_P}{FS_N} \quad (32)$$

Tabela 22- Fator de segurança.

Caso de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
FS_p	1,65	1,45	1,10

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

A condição de força paralela ao plano de junção é vista na união entre a viga principal e a viga de suporte. Da mesma forma que no item anterior, inicialmente calculamos o valor da força por junta.

$$F_{PJ} = M_x(R_g + \psi R_l) = 4,95 \text{ kN} \quad (33)$$

Onde,

- $M_x = 1$, representa o coeficiente de majoração obtido pela tabela 7;
- $\psi = 1,15$, representa o coeficiente dinâmico obtido pela tabela 8;
- $R_l = 3,99 \text{ kN}$, reação no apoio devido a carga de serviço;
- $R_g = 0,36 \text{ kN}$, reação no apoio devido ao peso da estrutura;

Considerando o fator de segurança do caso I, o coeficiente de atrito aço/aço apresentado pela norma e apenas um plano de atrito, temos então esforço de tração mínimo necessário.

$$T_p = 1,65 \cdot 4,95 \text{ kN} = 8,17 \text{ kN} \quad (34)$$

Do mesmo modo que no item anterior, obtemos o valor da seção mínima do parafuso A_p através da expressão 5.30:

$$A_p = \frac{T_p}{\sigma_a} = \frac{8170}{444,74} = 18,37 \text{ mm}^2 \quad (35)$$

O parafuso apresentado na figura 29 possui dimensões que garante uma área maior que a exigida na seção resistente. Para as duas situações apresentadas o parafuso apresentado atende os requisitos. O parafuso adotado possui um diâmetro na seção resistente ϕE de $18,51 \text{ mm}$, assim, a NBR8400 estabelece o torque de aperto necessário T por:

$$T = T_p 0,2 \phi E = 30,25 \text{ kN} \quad (36)$$

5.6.3 Forças combinadas

De acordo com a NBR8400, para solicitações combinadas devem-se fazer as seguintes verificações:

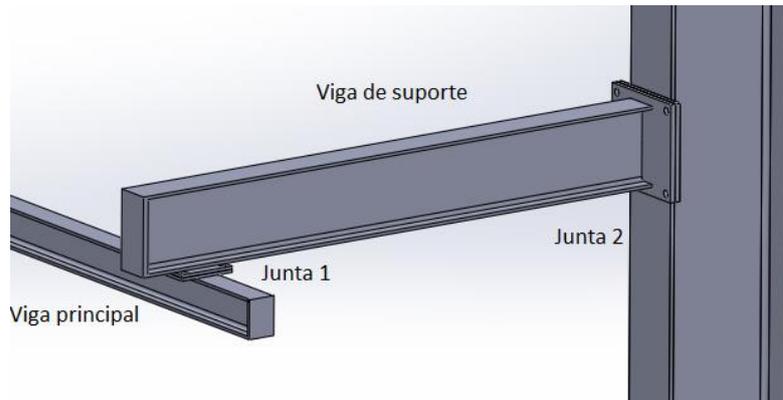
- Para o parafuso mais tensionado, a soma dos esforços de tração devida à solicitação N dever permanecer inferior ao esforço de tração admissível definido no item 5.6.1.
- O esforço médio transmitido por atrito deve permanecer inferior ao seguinte valor:

$$F_{Pa} = \frac{\mu (T_p - N)}{FS_p} m \quad (37)$$

5.7 JUNÇÕES SOLDADAS

Mesmo com a utilização de junções aparafusadas será necessário a soldagem de chapas na estrutura e nas vigas dimensionadas. Essas chapas serão confeccionadas de forma a permitir uma montagem por meio de parafusos. A figura 30 ilustra o modo de união que será adotado neste projeto.

Figura 28- Representação das uniões.

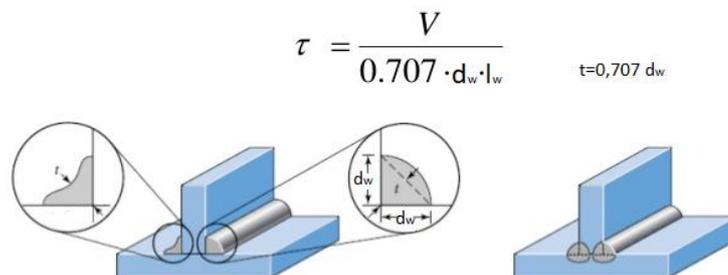


Fonte: O autor, 2018.

5.7.1 Dimensionamento do cordão de solda

Assumindo o modo de união representado na figura 30, de acordo com a geometria o tipo de junta soldada foi definido como de junta sobreposta. Para esse caso a melhor escolha é a solda de filete, visto que as soldas do tipo tampão são mais fracas. As soldas de filete são definidas pelo comprimento l_w , mas a resistência da solda é limitada pela dimensão da garganta t . A área total de solda é definida como a altura da garganta t vezes o comprimento do cordão l_w . A figura 31 ilustra uma solda de filete e apresenta a expressão para tensão cisalhante no cordão de solda para uma força V .

Figura 29 - Representação de uma solda filete.



Fonte: Adaptado do JUVINALL, 2018.

Para junções soldadas é necessário que o metal da solda possua propriedades mecânicas tão boas quanto a do metal de base. Assim, a tensão de ruptura dos eletrodos utilizados deverá

ser no mínimo igual a do metal de base. A norma NBR8400 considera como tensão admissível para junção a mesma utilizada no limite ao escoamento, para tensões de cisalhamento a norma considera como tensão admissível o valor da expressão 5.33:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{2}} \quad (38)$$

Dependendo do tipo da solda e do tipo de sollicitação na união a norma apresenta uma tabela que fornece uma tensão de comparação admissível para o cordão de solda.

Tabela 23- Tensão de comparação máxima admissível no cordão de solda.

Tensão de ruptura do aço daN/mm ²	37			42			52		
Casos de sollicitação	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
Tensões de comparação longitudinais para qualquer tipo de cordão de solda	16,0	18,0	21,5	17,5	19,5	24,0	24,0	27,0	32,5
Tensões transversais em tração:									
a) solda topo a topo e solda em K, qualidade especial	16,0	18,0	21,5	17,5	19,5	24,0	24,0	27,0	32,5
b) solda em K, qualidade comum	14,0	15,8	18,5	15,3	17,0	21,0	21,0	23,6	28,5
c) solda em ângulo	11,3	12,7	15,2	12,4	13,8	17,0	17,0	19,1	24,0
Tensões transversais em compressão:									
a) solda topo a topo e solda em K	16,0	18,0	21,5	17,5	19,5	24,0	24,0	27,0	32,5
b) solda em ângulo	13,0	14,6	17,5	14,2	15,8	19,5	19,5	22,0	26,5
Cisalhamento em todos os tipos de solda	11,3	12,7	15,2	12,4	13,8	17,0	17,0	19,1	24,0

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Como o aço adotado neste trabalho possui uma tensão de ruptura entre 370 e 420 MPa, foi considerado a menor tensão de ruptura da tabela. Para o caso de cisalhamento temos da tabela 23 uma tensão de comparação de 113 MPa.

Com os dados das dimensões dos perfis é possível obter a dimensões do cordão de solda. Para solda entre o perfil I e a chapa, representada na figura 30 como junta 1, o comprimento do cordão de solda está limitado pela dimensão da mesa do perfil b_f e o comprimento da chapa, definido inicialmente como 150mm. Temos assim a expressão para a área efetiva do perfil do cordão de solda A_{w1} em função da dimensão da perna da solda d_w :

$$A_{w1} = 2 (0,676 + 0,150) 0,707 d_w = 0,308 d_w \quad (39)$$

Para solda entre o perfil I e a chapa, representada na figura como junta 2, o comprimento do cordão de solda está limitado exclusivamente pelo perfil. Considerando o comprimento do cordão de solda como duas vezes o comprimento da alma mais o comprimento da mesa, temos na equação 40 a área efetiva do cordão de solda A_{w2} em função da dimensão da perna da solda d_w :

$$A_{w2} = 2 (0,102 + 0,170) 0,707 d_w = 0,385 d_w \quad (40)$$

Considerando a força que atua em cada junta obtida no item 5.6 temos a tensão cisalhante que atua no cordão de solda de cada união. A tabela 24 apresenta a comparação entre a tensão admissível com a tensão que atua no cordão de solda em função da dimensão da perna do cordão de solda.

Tabela 24- Comparação entre a tensão admissível e a tensão que atua no cordão de solda

Tensão admissível	Tensão no cordão de solda	d_w mínimo
$\tau_a = \frac{113}{\sqrt{2}} = 79,9MPa$	$\frac{F_{PJ}}{A_{w1}} = \frac{4,95 kN}{0,308 d_w}$	0,2 mm
	$\frac{F_{PJ}}{A_{w2}} = \frac{5,31 kN}{0,385 d_w}$	

Fonte: O autor, 2018.

A dimensão da mínima da perna do cordão de solda representa um valor muito pequeno, assim, será considerado no projeto a utilização das recomendações da NBR8800 para dimensão mínima da perna do cordão de solda. A tabela 25 apresenta o tamanho mínimo da perna da solda filete de acordo com a menor espessura do metal-base na junta.

Tabela 25- Tamanho mínimo da perna da solda filete.

Menor espessura do metal-base na junta mm	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, d_w ^a mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5 Junta 1	5
Acima de 12,5 até 19 Junta 2	6
Acima de 19	8
^a Executadas somente com um passe.	

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Para a junta 1 representada pela figura 30 será utilizada uma chapa de espessura similar a espessura da mesa do perfil. Assim será adotado 5mm como o tamanho mínimo do filete. Para a junta 2 representada pela figura 30 será utilizada uma chapa de espessura similar a espessura da estrutura na qual será fixada a monovia. Assim será adotado 6mm como o tamanho mínimo da perna da solda filete.

5.7.2 Ultrapassagem do limite de fadiga

Na verificação do limite de fadiga a norma NBR8400 leva em conta os seguintes parâmetros:

- Número convencional de ciclos e o diagrama de tensões a que está submetido o elemento;
- Material empregado e o efeito do entalhe no ponto considerado;
- Tensão máxima a que está submetido o elemento;
- Relação entre a tensão máxima e a tensão mínima.

O diagrama de tensões é visto na verificação da não ultrapassagem do limite de escoamento do material e o número convencional de ciclos é definido de acordo com o numero em que está classificado o elemento da estrutura. Conforme tabela 7 o grupo definido é o grupo 3.

Definido o grupo é necessário considerar o efeito do entalhe na diminuição da resistência a fadiga do material. De um modo geral a junção de um material provoca uma diminuição da resistência a fadiga devido à presença de furos e de cordões de solda, a norma considera estas

mudanças na seção como “efeitos de entalhe”. Para caracterizar a importância destes efeitos a norma apresenta uma tabela na qual ordena os efeitos do entalhe para diversos tipos de união. Para elementos soldados a norma subdivide por ordem de efeito de entalhe, crescente de K_0 a K_4 , correspondendo aos elementos de estrutura situados próximos aos cordões de solda. Baseado na tabela 62 da norma NBR8400 foi definida a subdivisão K_4 conforme apresenta figura 32.

Figura 30- Representação da junção pela norma NBR8400.

Definição	Figura	Caso
Solda com qualidade comum ligando peças solicitadas a flexão e ao cisalhamento		K4

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Definido o grupo e o caso em que se enquadra a junta escolhida é necessário obter a relação entre a tensão mínima e a tensão máxima R . Para as junções representadas na figura 32 a tensão máxima é obtida quando se leva em conta a carga de serviço e é mínima quando o elemento da estrutura está submetido apenas a carga devido ao peso próprio da estrutura. Temos então:

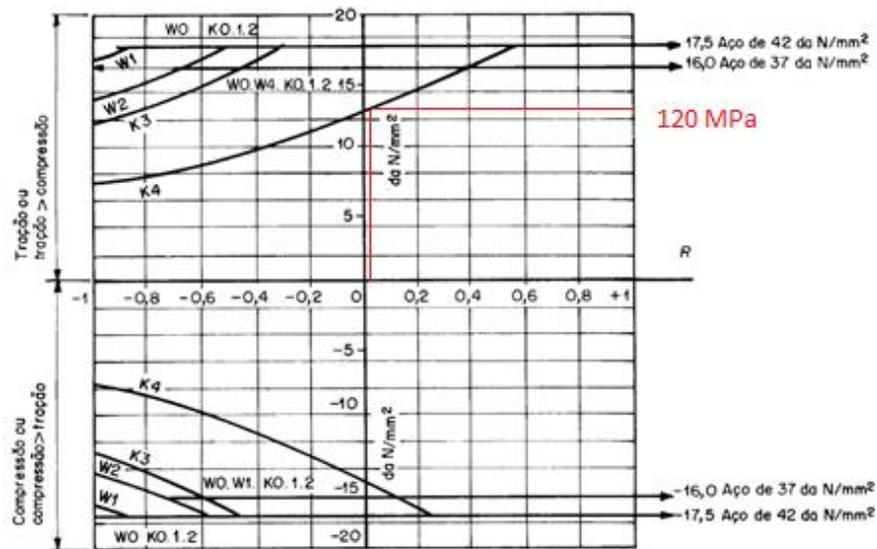
Tabela 26- Tensões mínima e máxima.

		Tensão mínima MPa	Tensão máxima MPa	R
Junta 1	σ_{xx}	6,64	107,76	0,06
	σ_{yy}	0	92,99	0
	τ_{xy}	0,56	8,66	0,06
Junta 2	σ_{xx}	1,12	36,67	0,03
	τ_{xy}	0,24	4,15	0,06

Fonte: Feito pelo autor, 2018.

Com os dados obtidos é possível consulta os gráficos de curva de fadiga fornecidos pela norma NBR8400. A figura 33 apresenta a curva de fadiga relativa a tração e compressão para o grupo 3.

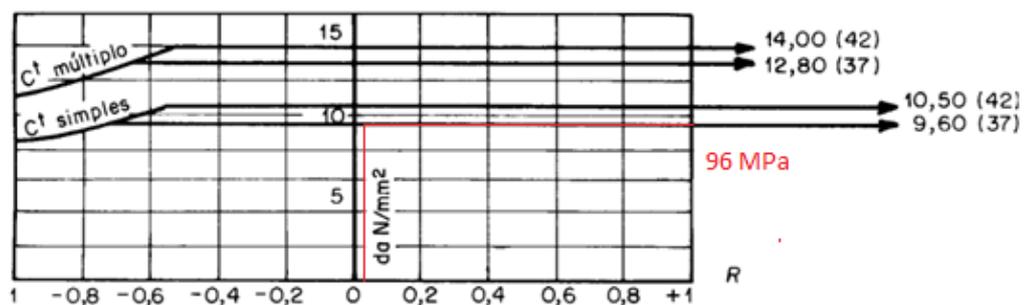
Figura 31- Curva de fadiga para tensão normal.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Considerando a junção do tipo K4 e a relação entre as tensões próximas de zero podemos obter as tensões admissíveis de fadiga para compressão e tração. Da curva podemos identificar uma tensão admissível maior que as tensões de tração obtidas na tabela 26. Para o cisalhamento temos a curva de fadiga mostrada na figura 34.

Figura 32- Curva de fadiga para tensão cisalhante.



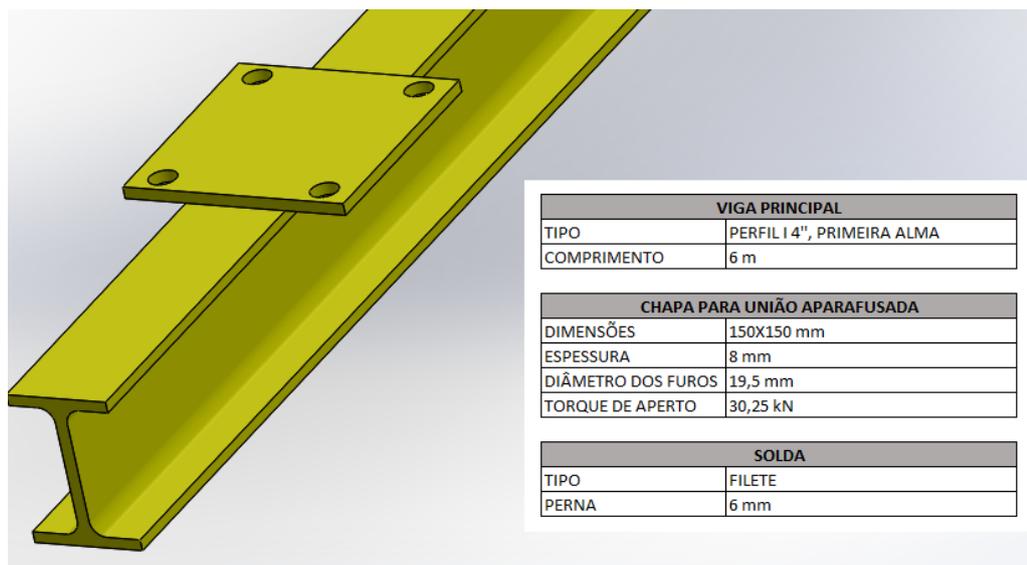
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8400, 2018.

Da mesma forma, a curva de fadiga apresenta uma tensão admissível maior que a tensão máxima obtida na tabela 26.

6 RESULTADOS

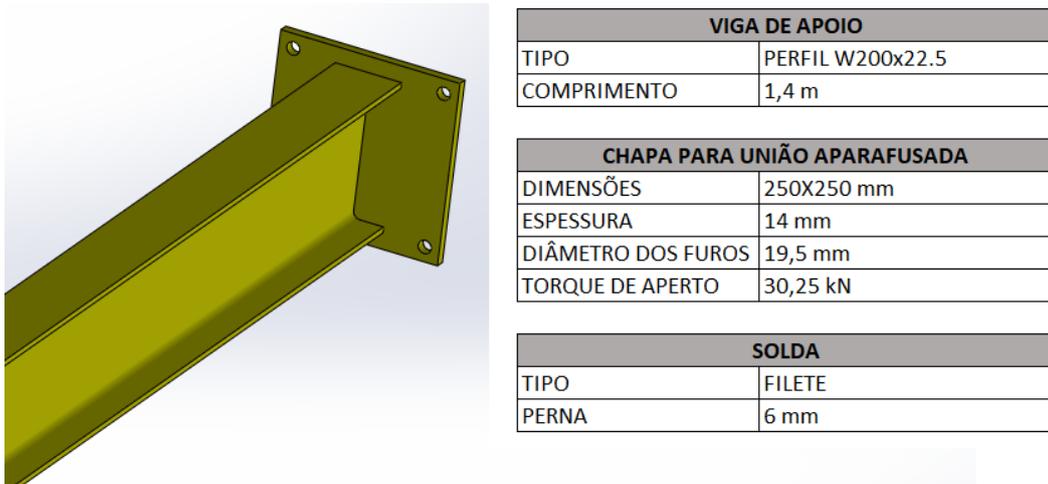
Com a escolha e o dimensionamento da estrutura utilizada para movimentação de cargas foi possível desenhar a estrutura com o auxílio do software de CAD. As figuras 35 e 36 apresentam uma modelagem 3D da estrutura dimensionada e o resumo das especificações necessárias para fabricação da estrutura.

Figura 33- Resumo das especificações (viga principal)



Fonte: O autor, 2018.

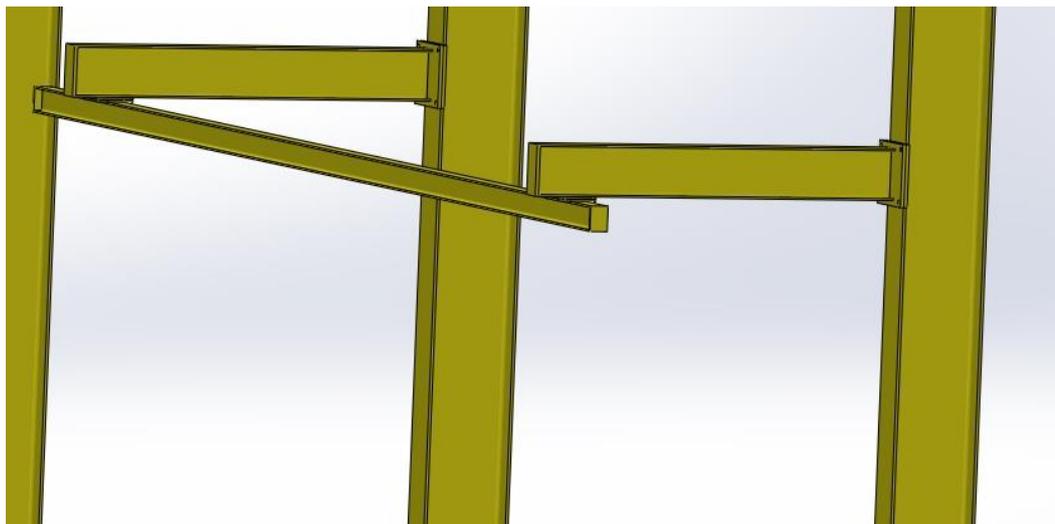
Figura 34- Resumo das especificações (viga de apoio)



Fonte: O autor, 2018.

Estas informações foram repassadas para uma empresa que atua na área de fabricação de estruturas metálicas, assim, foi realizada a fabricação e montagem da estrutura no local. As imagens 37 e 38 apresentam o modelo em 3D feito em software CAD e a estrutura da monovia já montada no local.

Figura 35- Modelo 3D da monovia.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 36- Foto da monovia montada.



Fonte: O autor, 2018.

7 CONCLUSÃO

Com a utilização de algumas normas de projeto e o conhecimento adquirido nas disciplinas de estática, mecânica dos sólidos e projetos de máquinas, foi possível dimensionar uma monovia para utilização de movimentação de cargas. Com a elaboração deste trabalho tive a oportunidade de conhecer e utilizar algumas normas de projeto, essa experiência possibilitou a capacidade de desenvolver outros projetos no futuro.

Com o conhecimento adquirido ao longo da graduação foi possível realizar o dimensionamento com relação ao limite de escoamento, um desafio para o dimensionamento foi à determinação de algumas propriedades geométricas do primeiro perfil dimensionado. Sem algumas informações no catálogo foi necessária uma pesquisa mais aprofundada sobre o cálculo de algumas propriedades relevantes no cálculo do limite das cargas críticas de flambagem. Superada essa dificuldade, o desenvolvimento do projeto pode seguir a diante, analisando o limite das cargas críticas de flambagem segundo método da norma. No dimensionamento das uniões bem como o limite de fadiga foi utilizado um método de cálculo específico da norma que se assemelhava a uma abordagem já vista durante o curso de graduação.

Quanto a concretização deste Trabalho de Conclusão de Curso, me sinto realizado. A experiência de construí-lo me assegurou que posso compreender normas de projetos da área de engenharia mecânica, aprendi com ele novos conceitos e teorias, bem como obtive a satisfação de contribuir com a construção de um novo equipamento.

Atualmente a estrutura depende apenas da compra de um novo trole para sua utilização. Mesmo sem dar início a sua utilização é possível constatar uma maior segurança e facilidade de movimentação das bombas e motores. Por fim, após a utilização da estrutura será possível consultar os operadores, responsáveis pela movimentação das bombas e motores, com intuito de verificar a eficácia do equipamento projetado.

Uma indicação para trabalhos futuros seria a elaboração de um projeto mais detalhado contemplando as especificações dos componentes como talha e trole que serão utilizados na monovia.

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.
- ABRAMAN. Página eletrônica. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br>>. Acesso em: 11 Jun. 2018.
- BAXTER, M. **Projeto de produto**: guia prático para o design de novos produtos. 2. ed. Editora Edgard Blücher Ltda. 1995.
- BEER, F.P.JOHNSTON, JR. E.R. **Resistência dos materiais**. 3. ed. Makrom Books, 1995.
- BLANCHARD, Benjamin. **Logistics engineering and management**. 4. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.
- BRASIL, Haroldo Vinagre. **Máquinas de levantamento**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A. 1985.
- COFERMETA, Disponível em: <<https://www.cofermeta.com.br/movimentacao-e-carga/movimentacao/carros-trole/carro-trole-mecanico-para-3000-kg>> Acesso em: 18 Jun. 2018.
- DIRECTINDUSTRY, Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/verlinde/product-8590-731815.html>> Acesso em: 21 Jun. 2018.
- GENEROSO, Daniel João. **Elementos de Máquinas**. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Campos de Araranguá. 2009.
- FRUCHTENGARTEN, Jairo. **Estudo da flambagem lateral de viga de aço**. São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado). Escola politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.
- LUI, E.M. **Structural steel design**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

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

MEGSON, T H G. **Structural and stress analysis**. 2. ed. p. 598 EQ (iv). 2005.

NASSAR, Wilson Roberto. **Apostila de máquinas de elevação e transporte**. Universidade de Santa Cecília. 2004.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas, uma abordagem integrada**. 4. ed. Bookman, 2013.

NR 11. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr11.htm>>. Acesso em 20 Mar. 2018.

NR 12. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr12.htm>>. Acesso em 20 Mar. 2018.

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

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.

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

RRMAQUINAS, Disponível em: <<http://www.rrmaquinas.com.br/talha-manual-500-kg-5-m-sc-0-5-koch.html>> Acesso em: 15 Jun. 2018.

STAHL-TALHAS, Disponível em: <<http://www.stahl-talhas.com.br/monovias>> Acesso em: 25 Set. 2018.

SCHWABREDUTORES, Disponível em: <<http://schwabredutores.com.br/ponte-rolante>> Acesso em: 25 Set. 2018.

TAMASAUSKA, Arthur. **Metodologia do projeto básico de equipamentos de manuseio e transporte de carga**. 125p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

TETRAFERRO, Disponível em: < <http://tetraferro.com.br/veja-onde-aplicar-o-perfil-w-e-quais-os-diferenciais/>> Acesso em: 25 Set. 2018.