

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Giovane Carlos Boaventura

**DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE ROLAMENTO DE UM GALPÃO
METÁLICO**

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2020

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Giovane Carlos Boaventura

**DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE ROLAMENTO DE UM GALPÃO
METÁLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Fernando Toppan Rabello, Doutor

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Boaventura, Giovane
Dimensionamento de vigas de rolamento de um galpão metálico / Giovane Carlos Boaventura Boaventura ; orientação de Fernando Toppan Rabello Rabello. - Florianópolis, SC, 2020.
105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Estruturas metálicas. 2. Ponte rolante. 3. Dimensionamento. 4. Viga de rolamento. I. Rabello, Fernando Toppan Rabello. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE ROLAMENTO DE UM GALPÃO METÁLICO

GIOVANE CARLOS BOAVENTURA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 06 de novembro de 2020

Banca Examinadora:



Fernando Toppan Rabello, Doutor



André Puel, Doutor



Joatan Izolan da Rosa, Doutor

RESUMO

No que se refere ao uso do aço no Brasil, grande parte das construções são estruturas simples como coberturas e estruturas de um único pavimento. Dentro deste segmento, os galpões ou pavilhões lideram as construções. Estes são empregados para diversos serviços que se utilizam de equipamentos de movimentação de carga, sendo as pontes rolantes as que mais se destacam, a instalação deste tipo de equipamento depende de um componente fundamental, a viga de rolamento, que é o objeto de estudo deste trabalho. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo dimensionar vigas de rolamento em aço de um galpão metálico, de acordo com as prescrições da NBR 8800:2008. O dimensionamento das vigas será realizado com base em um projeto já existente, este fornecido pela empresa Eletrosul Centrais Elétricas S.A. Nos projetos, foi analisado a concepção estrutural da viga de rolamento e o tipo da ponte rolante que foi utilizada. A partir dessas informações foram encontrados os carregamentos das vigas de rolamento e definida as solicitações de cálculo. Posteriormente foram verificados o estado limite último e estado limite de serviço segundo NBR 8800:2008. Através desse trabalho, pode-se concluir que a viga de rolamento possui um dimensionamento diferente de uma viga comum, existe dois fatores que as diferenciam, o primeiro é que a viga de rolamento, possui um carregamento dinâmico, o qual se faz necessário a utilização de um trem-tipo, em que este fornece linhas de influência, outro fator é sobre seu carregamento ser cíclico, essa característica permite que a viga sofra um fenômeno chamado de fadiga. Os estudos da fadiga apresentados neste trabalho, mostram que apenas valores fora dos padrões de utilização podem ocasionar um risco a durabilidade da viga de rolamento. Em relação as verificações de Estado Limite Último (ELU) os resultados apontaram que os valores estão muito abaixo aos esforços solicitantes, logo assim a viga de rolamento não sofrerá ruptura. Este trabalho foi um grande aprendizado o dimensionamento de uma viga de rolamento envolve muitos processos e poderá ser utilizado como um guia para outros estudantes e profissionais.

Palavras-chave: Estruturas metálicas. Ponte rolante. Dimensionamento. Viga de rolamento.

ABSTRACT

With regard to the use of steel in Brazil, most of the constructions are simple structures such as roofs and structures with a single floor. Within this segment, warehouses or pavilions lead the way. These are used for various services that use cargo handling equipment, with cranes being the ones that stand out the most, the installation of this type of equipment depends on a fundamental component, the rolling beam, which is the object of study of this job. In this context, the present work aims to dimension steel bearing beams of a metallic shed, according to the requirements of NBR 8800: 2008. The dimensioning of the beams will be carried out based on an existing project, this provided by the company Eletrosul Centrais Elétricas S.A. In the projects, the structural design of the rolling beam and the type of crane that was used were analyzed. From this information, the loadings of the rolling beams were found and the calculation requests were defined. Subsequently, the ultimate limit state and service limit state were verified according to NBR 8800: 2008. Through this work, it can be concluded that the rolling beam has a different dimension from a common beam, there are two factors that differentiate them, the first is that the rolling beam has a dynamic loading, which makes it necessary to use of a model train, in which it provides lines of influence, another factor is that its loading is cyclical, this characteristic allows the beam to undergo a phenomenon called fatigue. The fatigue studies presented in this work show that only values outside the usage standards can cause a risk to the durability of the rolling beam. In relation to the Ultimate Limit State (ELU) checks, the results showed that the values are far below the requesting efforts, so the bearing beam will not suffer rupture. This work was a great learning process, the design of a rolling beam involves many processes and can be used as a guide for other students and professionals.

Key-words: Metallic structures. Overhead crane. Sizing. Rolling beam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e irmãos, que me deram todo o apoio e incentivo durante todos os meus anos de estudo.

Sou grato a minha namorada que sempre me estimulou a correr atrás dos meus sonhos. Obrigada aos bons amigos que sempre estiveram ao meu lado e que continuarão sempre comigo.

Sou agradecido pela à disposição da empresa Eletrosul Centrais Elétricas S.A em ter me ajudado, disponibilizando dados essenciais para trabalho, sendo meu agradecimento principalmente ao meu supervisor de estágio Joatan.

Sou imensamente grato a todos os professores que contribuíram com a minha formação, especialmente meu orientador Prof. Fernando, obrigado por todo ensinamento compartilhado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Galpão metálico com uma ponte rolante instalada.....	19
Figura 2- Ponte rolante univiga	20
Figura 3 - Ponte rolante dupla viga	20
Figura 4 - Ponte rolante suspensa	21
Figura 5 - Ponte rolante do tipo console.....	22
Figura 6 - Porcentagens máximas de elementos adicionais.....	22
Figura 7 - Esforços em vigas de rolamento causados pelas pontes rolantes	29
Figura 8 - Esquema de aplicação do carregamento combinado na viga de rolamento.	33
Figura 9 - Esforços cortantes nas vigas de rolamento.....	35
Figura 10 - Flambagem local e flambagem lateral em vigas.....	38
Figura 11 – Momento fletor em vigas de rolamento	39
Figura 12 - Comportamento de vigas com seções compacta, semi compacta e esbelta.	39
Figura 13 - Tipos de ruptura sem enrijecedores intermediários em viga sujeita a carga transversal concentrada.....	59
Figura 14 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior deformação.....	67
Figura 15 – Comprimento do vão adotado	71
Figura 16 – Perfil da viga de rolamento (dimensões em milímetro).....	71
Figura 17 - Enrijecedores transversais intermediários.....	72
Figura 18 - Enrijecedores transversais de apoio	72
Figura 19 - Ponte rolante vista frontal	73
Figura 20 - Ponte rolante vista superior.....	73
Figura 21 - Ponte rolante vista lateral.....	74
Figura 22 – Esquema de aplicação do carregamento combinado na viga de rolamento	82
Figura 23 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior flexão	83
Figura 24 – Cargas combinadas aplicadas no Ftool para obtenção do momento fletor máximo	83

Figura 25 – Valores de momento fletor máximo encontrado no Ftool.....	84
Figura 26 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior esforço cortante.	84
Figura 27 – Cargas combinadas aplicadas no Ftool para obtenção do esforço cortante máximo	84
Figura 28 - Valores de esforço cortante máximo encontrado no Ftool.....	85
Figura 29 – Faixa de variação de tensões (σ_{SR}) X Número de ciclos (N)	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de carga içada para galpões siderúrgicos	29
Tabela 2- Valores dos coeficientes de ponderação das ações.....	30
Tabela 3 - Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis.....	31
Tabela 4 – Deslocamentos máximos	69
Tabela 5 - Dados do Perfil I.....	71
Tabela 6 - Dados da ponte rolante	74
Tabela 7 - cargas verticais	75
Tabela 8 - cargas horizontais transversais	75
Tabela 9 - cargas horizontais longitudinais	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos:	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Vigas de rolamento	18
2.2 Pontes rolantes	18
2.3 Tipos de ponte rolante.....	19
2.3.1 Tipo apoiada	19
2.3.1.1 Univiga	19
2.3.1.2 Dupla viga	20
2.3.2 Ponte rolante suspensa.....	21
2.3.3 Ponte rolante do tipo console	21
2.4 Tipos de aços estruturais	22
2.4.1 Aços-carbono	22
2.4.2 Aços de baixa liga	23
2.4.3 Aços com Tratamento Térmico	23
2.5 Produtos de aços estruturais.....	23
2.5.1 Produtos siderúrgicos.....	23
2.5.1.1 Chapas.....	24
2.5.1.2 Perfis Laminados	24
2.5.1.3 Trilhos	24
2.5.2 Produtos metalúrgicos.....	25
2.5.2.1 Perfis soldados.....	25

2.6 Ligações de Peças Metálicas	26
2.7 Propriedades do aço	26
2.7.1 Ductilidade	26
2.7.2 Fragilidade	26
2.7.3 Resiliência e Tenacidade	27
2.7.4 Dureza	27
2.7.5 Fadiga	27
2.8 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 8800:2008	27
2.8.1 Cargas atuantes nas vigas de suporte do caminho de rolamento	27
2.8.1.1 Cargas verticais (P)	27
2.8.1.2 Forças horizontais longitudinais (H _L)	28
2.8.1.3 Forças horizontais transversais (H _T)	28
2.8.2 Combinação de ações e carregamento	29
2.8.3 Esforços solicitantes em uma viga de rolamento	33
2.8.3.1 Esforço cortante e momento fletor solicitante	33
2.8.3.2 Esforço normal solicitante	34
2.8.3.3 Tensão normal solicitante	34
2.9 Verificação Estado limite último de utilização (ELU)	35
2.9.1 Esforço cortante resistente	35
2.9.2 Momento fletor resistente	38
2.9.2.1 Momento Resistente de vigas de alma não-esbelta	40
2.9.2.2 Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta	49
2.9.3 Tensão normal resistente de calculo	54
2.9.4 Força transversal	59
2.9.4.1 ELU de escoamento local da alma	60
2.9.4.2 ELU de enrugamento de alma	60
2.9.4.3 ELU de flambagem lateral da alma	61

2.9.4.4 ELU de flambagem da alma por compressão.....	63
2.9.5 Enrijecedores transversais intermediários	63
2.9.6 Enrijecedores de apoio à viga	64
2.10 Verificação Estado limite último de Serviço (ELS)	65
2.10.1 Fadiga	65
2.10.2 Deslocamentos	67
2.10.2.1 Deslocamento vertical referente ao peso próprio	68
2.10.2.2 Deslocamento vertical referente à carga vertical por roda	68
2.10.2.3 Deslocamento horizontal referente à frenagem do trole por roda	68
3 METODOLOGIA	70
3.1 Concepção estrutural da viga de rolamento	70
3.1.1 Comprimento do vão	70
3.1.2 Perfil da viga de rolamento.....	71
3.1.3 Enrijecedores transversais	72
3.2 Ponte rolante.....	73
3.3 Definição dos carregamentos e combinação de ações	74
3.4 Definição das solicitações de cálculo	75
3.4.1 Esforço cortante e momento fletor solicitante	75
3.4.2 Esforço normal solicitante	76
3.4.3 Tensão normal solicitante	76
3.5 Verificações Enrijecedores transversais intermediários e de apoio	76
3.6 Verificações ELU segundo NBR 8800:2008	76
3.6.1 Verificação ELU de Momento fletor	76
3.6.2 Verificação ELU Esforço cortante.....	77
3.6.3 Verificação ELU Tensão normal	77
3.6.4 Verificação ELU Forças transversais localizadas	77
3.7 Verificações ELS segundo NBR 8800	78

3.7.1 Fadiga	78
3.7.2 Deslocamento vertical	79
3.7.3 Deslocamento horizontal	79
4 ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES	80
4.1 Dados da viga de rolamento	80
4.2 Dados da ponte rolante	80
4.3 Definição dos carregamentos e combinação de ações	80
4.3.1 Carga vertical móvel.....	81
4.3.2 Cargas horizontais transversais	81
4.3.3 Cargas horizontais longitudinais.....	81
4.3.4 Combinação das ações	82
4.4 Definição das solicitações de cálculo	82
4.4.1 Momento fletor solicitante	83
4.4.2 Esforço cortante solicitante	84
4.4.3 Esforço normal solicitante	85
4.4.4 Tensão normal solicitante	85
4.5 Verificações ELU segundo NBR 8800:2008	86
4.5.1 Momento fletor resistente	86
4.5.2 Esforço Cortante resistente	89
4.5.2.1 Esforço cortante resistente na alma	89
4.5.2.2 Esforço cortante resistente na mesa	90
4.5.3 Tensão normal de cálculo	91
4.5.4 Verificação ELU Forças transversais localizadas	96
4.5.4.1 ELU de escoamento local da alma	96
4.5.4.2 ELU de enrugamento da alma.....	96
4.5.4.3 ELU de flambagem lateral da alma	97
4.5.4.4 ELU de flambagem da alma por compressão.....	97

4.6.1 Enrijecedores transversais intermediários	97
4.6.2 Enrijecedores de apoio à viga	98
4.7 Verificações ELS segundo NBR 8800:2008	99
4.7.1 Fadiga	99
4.7.2 Deslocamento	100
4.7.2.1 Deslocamento vertical referente ao peso próprio	100
4.7.2.2 Deslocamento vertical referente à carga vertical por roda	100
4.7.2.3 Deslocamento horizontal referente à frenagem do trole por roda	100
4.7.3 Estudo da Fadiga	101
5 CONCLUSÕES	103
6 REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no que se refere ao uso do aço no Brasil, grande parte das construções são estruturas simples de estruturas cobertas ou de um único pavimento. Para Pinho (2005), os galpões e pavilhões lideram às construções. Chaves (2007) completa que a sua popularidade se deve a facilidade de montagem e desmontagem, facilidade de reforço e ampliação, que podem proporcionar um aumento do espaço útil e redução do tempo de construção. Salgado (2013) afirma que os galpões podem ser utilizados como fábricas, oficinas automotivas, depósitos, entre outros. Estes locais geralmente utilizam equipamentos de movimentação e elevação de carga, pois precisam movimentar materiais e objetos muito pesados. Neste âmbito, existe uma grande variedade de equipamentos, entre eles as empilhadeiras móveis, pontes rolantes, pórticos rolantes, transportadores pneumáticos e guindastes. Porém o que mais se destaca, sendo largamente utilizada são as pontes rolantes (SORDI, 2016). Esse destaque advém de sua localização, pois as pontes rolantes são instaladas na parte superior, não ocupando espaço útil. Para um galpão de armazenamento, por exemplo, isso é primordial.

No que se diz respeito à instalação de uma ponte rolante, um componente fundamental é a viga de rolamento, pois possibilita o deslocamento longitudinal da ponte. As vigas, por sua vez, transmitem as solicitações causadas pela ponte rolante às demais estruturas da edificação. (SENA, 2017).

Neste trabalho será realizado um dimensionamento de uma viga de rolamento, com todas as verificações necessárias recomendadas pela NBR 8800:2008. Pois, as vigas de rolamento possuem um dimensionamento diferente de uma viga comum.

1.1 Justificativa

Nos cursos de Engenharia Civil, o estudo específico de dimensionamento de vigas de rolamento não é abordado nas grades curriculares de ensino. Portanto o estudo deste projeto se faz necessário para o enriquecimento de dados relacionados a estruturas de aço no Brasil. Além de se tornar uma vertente e parâmetro para que novas pesquisas de nível acadêmico se tornem mais frequentes entre os estudantes

do ramo. Outro fator de suma importância é o fato do estudo de dimensionamento de viga de rolamento abordar assuntos como: carregamento dinâmico e cíclico, em que implica na verificação de fadiga, item não retratado na academia com muito detalhe.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Dimensionar vigas de rolamento em aço de um galpão metálico, de acordo com as prescrições da NBR 8800:2008

1.2.2 Objetivos específicos:

- a) Fazer uma revisão bibliográfica do tema em estudo abrangendo os conceitos básicos sobre o aço e suas propriedades, perfis metálicos estruturais, vigas de rolamento e pontes rolantes;
- b) Analisar a NBR 8800:2008 para poder aplicar suas diretrizes no dimensionamento de uma viga de rolamento;
- c) Realizar um estudo de caso, utilizando dados de projetos existentes para o dimensionamento da viga de rolamento;
- d) Avaliar os carregamentos atuantes na viga de rolamento e dimensioná-la conforme a NBR 8800:2008.
- e) Encontrar os esforços solicitantes de cálculo utilizando o *software* FTOOL.
- f) Realizar verificações de estado limite último, dentre eles, esforço cortante, momento fletor, tensão normal e forças localizadas;
- g) Realizar verificações de estado limite último de serviço, dentre eles, fadiga, deslocamento vertical e horizontal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta capítulo será abordada uma revisão bibliográfica do assunto, contendo conceitos e critérios para o dimensionamento de uma viga de rolamento.

2.1 Vigas de rolamento

Segundo Salgado (2013) as vigas de rolamento são os elementos estruturais que têm por finalidade sustentar o caminho de rolamento das pontes rolantes, além disso, transmitem os esforços por elas causados para a edificação.

A movimentação tridimensional dada pela ponte rolante provoca um conjunto de solicitações que variam em magnitude e em posição, atuam ora isoladamente, ora combinadas. (SENA, 2017).

Outra consideração que pode ser realizada, é em relação a seu sistema de apoio, que pode ser projetado para que as vigas se comportem como elementos bi apoiados ou contínuos, ficando a critério do projetista, conhecendo as vantagens de cada caso, escolher o mais adequado (LEITE, 2011).

Na Figura 1 é ilustrado onde estão localizadas as vigas de rolamento em um galpão metálico.

2.2 Pontes rolantes

Pontes Rolantes são equipamentos utilizados no transporte e elevação de cargas. Trata-se de uma estrutura, normalmente instalada dentro de edificações, sendo possível movimentar cargas, materiais, equipamentos, entre outros (SORDI, 2016).

Tem o nome de "ponte rolante" por ser constituída basicamente de uma viga principal apoiada em cada uma de suas extremidades por apoios rolantes, que se deslocam sobre dois trilhos elevados. (PASSOS, 2011)

O sistema pode executar movimentos de no eixo – X, no eixo – Y que é executado pelo trole ou o carro e a talha que executa o movimento de suspensão da carga no eixo – Z, todos os movimentos são executados por motores elétricos (CASTRO, 2017).

Na Figura 1 é ilustrado onde estão localizadas as pontes rolantes em um galpão metálico.

Figura 1 - Galpão metálico com uma ponte rolante instalada



Fonte: Adaptado <http://www.ventowag.com.br>

2.3 Tipos de ponte rolante

As pontes rolantes podem ser classificadas de acordo com suas características construtivas. Podem ser divididas em três principais tipos, apoiada, suspensa e de console (PASSOS, 2011).

2.3.1 Tipo apoiada

O tipo de ponte rolante apoiada é subdividido em dois outros tipos, o tipo univiga e o tipo dupla viga.

2.3.1.1 Univiga

A ponte rolante univiga (Figura 2) é constituída por duas cabeceiras, onde estão localizadas as rodas, uma única viga principal e o carro trole que sustenta a talha.

As vigas principais podem ser constituídas de viga tipo "I" laminada ou viga tipo "caixão" soldada. Geralmente é aplicada para capacidade de cargas que podem

chegar a até 15.000 kg, sendo o tipo mais instalado em galpões industriais (PASSOS, 2011).

Figura 2- Ponte rolante univiga

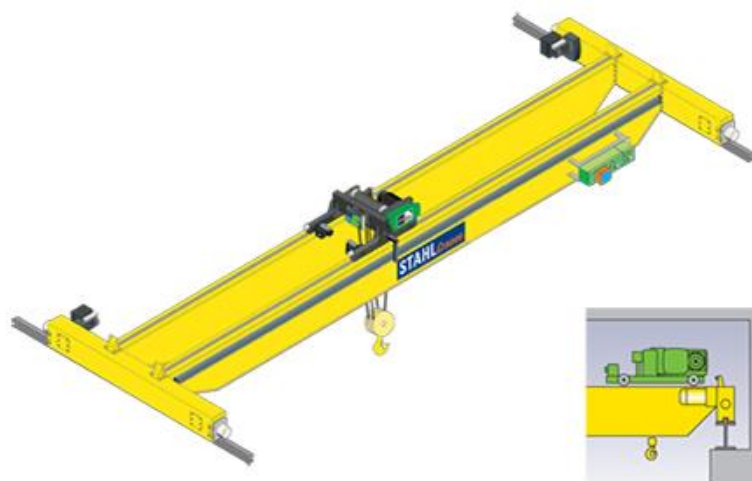


Fonte: www.stahl-talhas.com.br

2.3.1.2 Dupla viga

A ponte rolante dupla viga (Figura 3) é semelhante a univiga, a única mudança construtiva é referente às vigas principais, neste caso é constituída por duas vigas. Em função da adição da segunda viga, apresentam maior capacidade de carga, geralmente são fabricadas para aguentar cargas de até 50.000 kg (PASSOS, 2011).

Figura 3 - Ponte rolante dupla viga



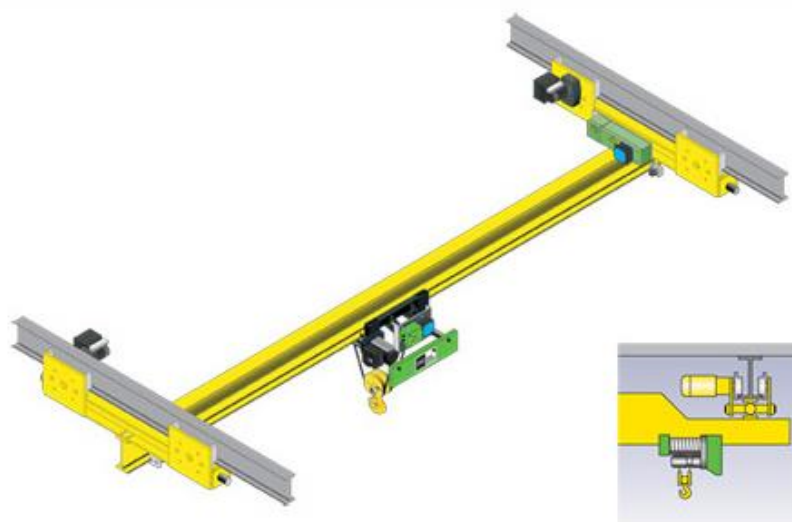
Fonte: www.stahl-talhas.com.br

2.3.2 Ponte rolante suspensa

Neste tipo de ponte rolante (Figura 4) as cabeceiras se movimentam na aba inferior da viga de rolamento que é montada diretamente na estrutura do prédio, assim não tem a necessidade de estrutura auxiliar de apoio no piso.

Outra vantagem é a flexibilização da altura de sua instalação, assim podem ser instaladas em locais com pé direito mais baixos. Em geral suportam até 10.000 kg (PASSOS, 2011).

Figura 4 - Ponte rolante suspensa



Fonte: www.stahl-talhas.com.br

2.3.3 Ponte rolante do tipo console

A ponte rolante tipo console (Figura 5) é muito utilizada em conjunto com outros tipos de ponte como um complemento, pois movimenta-se em um nível próprio, debaixo das grandes pontes. Com isso, ela proporciona um fluxo de materiais sem atritos através de possibilidades de movimentação adicionais para outras áreas de produção.

Geralmente têm capacidades de até 5.000 kg e comprimentos de lança de até 10m (PASSOS, 2011).

Figura 5 - Ponte rolante do tipo console



Fonte: www.ciriexabus-cranes.com.br

Dentre os tipos de ponte rolante expostos, a ponte utilizada no dimensionamento da viga de rolamento, é do tipo ponte dupla viga.

2.4 Tipos de aços estruturais

Os aços utilizados em estruturas segundo sua composição química são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga. Além disso os dois tipos podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.4.1 Aços-carbono

São os tipos mais usuais, nos quais o aumento de resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono e, em menor escala, pelo manganês. Eles contêm as seguintes porcentagens máximas de elementos adicionais (Figura 6).

Figura 6 - Porcentagens máximas de elementos adicionais

carbono	2,0%	manganês	1,65%
silício	0,60%	cobre	0,35%

Fonte: PFEIL E PFEIL, 2009

O aumento de teor de carbono eleva a resistência do aço, porém diminui a sua ductilidade, o que conduz a problemas na soldagem (PFEIL E PFEIL, 2009).

Segundo Bellei (2010) os aços-Carbono mais usados em estruturas, são os ASTM A36 e A570 e os ABNT NBR 6648, 6649 e DIN st37.

2.4.2 Aços de baixa liga

Os aços de baixa liga são aços-carbono acrescidos de alguns elementos de liga (cromo, cobre, manganês, níquel, fósforo, entre outros), esses podem melhorar algumas propriedades mecânicas. Graças a esse fato, pode-se obter resistência elevada com teor de carbono de ordem de 0,20%, sem que sua soldabilidade. (PFEIL E PFEIL, 2009).

Segundo Bellei (2010) os aços de baixa liga mais usados em estruturas, são os ASTM A572 e A441 e os ABNT NBR 5000, 5004 e DIN st52.

2.4.3 Aços com Tratamento Térmico

Tanto os aços-carbono quanto os de baixa liga podem ter suas propriedades modificadas, especialmente a resistência mecânica pelo tratamento térmico. A soldabilidade dos aços que são tratados termicamente é praticamente nula, o que torna seu emprego pouco usual em estruturas correntes. Porém, os parafusos de alta resistência utilizados como conectores são fabricados com aço de médio carbono sujeito a tratamento térmico (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.5 Produtos de aços estruturais

Os aços estruturais podem ser divididos em dois tipos, quanto a sua manipulação, siderúrgicos o ramo industrial onde são fabricados e realizados os tratamentos térmicos e metalúrgicos que é um conjunto de técnicas que o homem desenvolveu com o decorrer do tempo que lhe permitiu extrair e manipular metais e gerar ligas metálicas.

2.5.1 Produtos siderúrgicos

Os principais materiais siderúrgicos usados como elementos ou componentes estruturais na indústria da construção metálica e vigas de rolamento podem ser separados conforme a seguir:

2.5.1.1 Chapas

As chapas se dividem em duas categorias: Chapas finas que podem ser fabricadas a frio e a quente, e chapas grossas.

Chapas finas fabricadas a frio possuem espessuras de 0,3 a 2,65 mm, nas larguras padrão de 1000 mm, 1200 mm e 1500 mm e comprimentos padrão de 2000 mm e 3000 mm, ainda pode ser distribuída em forma de bobinas, seu uso é amplo em fabricação de esquadrias, dobradiças, portas, batentes, calhas e rufos (BELLEI, 2010).

Chapas finas fabricadas a quente possuem espessura que variam entre 1,2 a 5,0mm, são distribuídas em bobinas com larguras de 2000 mm, 3000 mm e 6000 mm. Essas chapas são usadas na construção de estruturas metálicas como terças e vigas de tapamento (BELLEI, 2010).

Chapas grossas possuem espessuras entre 6,3 a 102 mm em diversas larguras de 1000 a 3800 mm e comprimentos padrão 6000 mm e 12000 mm. seu uso está na formação de perfis soldados para trabalhar como vigas, colunas e estacas (BELLEI, 2010).

2.5.1.2 Perfis Laminados

Segundo Bellei (2010) os perfis geralmente utilizados em estruturas de construção metálica, são: perfil H, Perfil I, Perfil U e as cantoneiras, seus usos principais estão na construção da treliça da cobertura, sendo o perfil I o mais utilizado nas vigas de rolamento.

2.5.1.3 Trilhos

Os trilhos são produtos laminados destinados a servir de apoio para as rodas metálicas de pontes rolantes ou trens (PFEIL E PFEIL, 2009). No caso, das pontes rolantes a escolha do tipo de trilho é responsabilidade do fabricante da ponte. As formas usuais de trilhos são do tipo barras retangulares com cantos vivos ou arredondados, os trilhos especiais e os trilhos para ferrovias (BELLEI, 2010).

2.5.2 Produtos metalúrgicos

O principal material metalúrgico usado como elemento estrutural nas vigas de rolamento são os perfis soldados, descritos a seguir:

2.5.2.1 Perfis soldados

Os perfis são formados pela associação de chapas ou de perfis laminados simples, sendo a ligação entre os perfis feita por solda, esses possuem grande versatilidade de combinações de espessuras com alturas e larguras diferentes (BELLEI, 2010).

A norma brasileira NBR 5884: 2013 padronizou duas séries de perfis soldados:

a) Série Simétrica

Perfil CS - Tipo pilar com ($d / b_f = 1$);

Perfil CVS - Tipo viga com ($1 < d / b_f \leq 1,5$);

Perfil VS - Tipo viga-pilar com ($1,5 < d / b_f \leq 4$);

Perfil PS - Tipo viga duplamente simétrica.

b) Série Monossimétrica

Perfil VSM - Tipo viga com ($1 < d / b_f \leq 4$), com mesas iguais;

Perfil PSM - Perfis que possuem mesas diferentes.

Onde:

d : distância entre faces externas das mesas (m)

b_f : largura da mesa (m)

2.6 Ligações de Peças Metálicas

As peças metálicas estruturais são fabricadas com dimensões transversais limitadas pela capacidade dos laminadores e com comprimentos limitados pela capacidade dos veículos de transporte (PFEIL E PFEIL, 2009).

Assim para construção de grandes estruturas de aço, são formadas associação de peças ligadas entre si, onde podem ser utilizados vários elementos de ligação que são incluídos no conjunto para permitir ou facilitar a transmissão dos esforços, como por exemplo: Enrijecedores, chapas *gusset*, cantoneiras, consolos, etc. (VASCONCELLOS (Rev.), 2011)

Os meios de ligação que promovem união entre as partes da estrutura para formar a ligação são divididos basicamente em dois tipos: por meio de conectores ou por solda. Os conectores (rebites, parafusos) são colocados em furo que atravessam as peças a ligar. A ligação por solda consiste em fundir as partes em contato de modo a provocar coalescência das mesmas (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.7 Propriedades do aço

2.7.1 Ductilidade

Ductilidade é a capacidade do material se deformar sob a ação de cargas. Os aços dúcteis, quando sujeitos a tensões sofrem deformações plásticas e são capazes de redistribuir as tensões. A ductilidade tem importância porque conduz a mecanismos de ruptura acompanhados de grandes deformações que fornecem avisos da atuação de cargas elevadas (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.7.2 Fragilidade

É o oposto da ductilidade. O estudo das condições em que os aços se tornam frágeis tem grande importância nas construções metálicas, uma vez que os materiais frágeis se rompem bruscamente, sem aviso prévio. A falta de ductilidade pode originar-se de temperatura baixa, estado triaxial de tensões, efeito de encruamento, fragilização por hidrogênio etc (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.7.3 Resiliência e Tenacidade

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), ambas as propriedades se relacionam com a capacidade de absorver energia mecânica. Resiliência é energia mecânica total que o material pode absorver em deformações elásticas, conseqüentemente, a quantidade de energia que o material consegue restituir. Tenacidade é a energia mecânica total que o material pode absorver em deformações elásticas e plásticas até sua ruptura, isto é, energia necessária para romper o material.

2.7.4 Dureza

Denomina-se dureza a resistência ao risco ou abrasão. Na prática mede-se dureza pela resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.7.5 Fadiga

Fadiga é o efeito de ruptura em tensões inferiores às consideradas resistentes em ensaios estáticos, que ocorre em peças sujeitas a esforços repetitivos. A partir do momento que surge uma trinca no material, todo sistema fica instável, pois a seção restante não é capaz de suportar a carga aplicada. Assim, o estudo do efeito da fadiga é muito importante na concepção de estrutura (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.8 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 8800:2008

2.8.1 Cargas atuantes nas vigas de suporte do caminho de rolamento

As vigas de rolamento estão basicamente sujeitas às cargas verticais, forças horizontais transversais e as forças horizontais longitudinais, a seguir são descritas cada uma delas e quais são as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.8.1.1 Cargas verticais (P)

Segundo Bellei (2010) as cargas que são consideradas como verticais no dimensionamento das vigas de rolamento são:

- a) Peso próprio ponte rolante com todos os seus equipamentos.
- b) Carga máxima a ser içada na posição mais desfavorável (trem tipo)
- c) Peso próprio da viga de rolamento
- d) Trilho e seus acessórios

De acordo com o item B.4.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008) as ações verticais de cálculo provenientes da ponte rolante devem ser majoradas por um coeficiente de impacto, na ausência de especificação mais rigorosa, nos seguintes casos:

- a) Pontes rolantes comandadas de uma cabine: 25%
- b) Pontes rolantes comandadas por controle pendente ou controle remoto: 10%

2.8.1.2 Forças horizontais longitudinais (H_L)

As forças horizontais longitudinais são causadas pela aceleração ou pela frenagem da ponte. Essas forças têm pouca influência no dimensionamento das vigas de rolamento, sendo usadas para o dimensionamento do para-choque, dispositivo colocado na extremidade da viga que impede a queda da ponte rolante, assim como para a ligação entre a viga e a coluna e também para o dimensionamento dos contraventamentos verticais (BELLEI, 2010)

O item B.7.2 (b) da NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda que a força longitudinal ao caminho de rolamento, a ser aplicada no topo do trilho, de cada lado e em cada roda, deve ser igual a 10% das cargas verticais máximas das rodas (não majoradas pelo impacto).

2.8.1.3 Forças horizontais transversais (H_T)

Estas forças são basicamente causadas pelo movimento e pela frenagem do trole e pelo içamento das cargas com o cabo inclinado (BELLEI, 2010).

Quando não há especificação mais rigorosa, o item B.7.2 (a) da NBR 8800/2008, recomenda que a força transversal ao caminho de rolamento a ser aplicada no topo do trilho, de cada lado da edificação, para pontes comandadas por cabines, deve ser igual ou maior que os seguintes valores:

- a) 10% da soma da carga içada, peso do trole e demais dispositivos para içamento;

- b) 5% da soma da carga içada, peso total da ponte, incluindo trole e dispositivos para içamento;
- c) 15% da carga içada para edifícios em geral, exceto edifícios destinados à siderurgia cujos os valores são mostrados na Tabela 1:

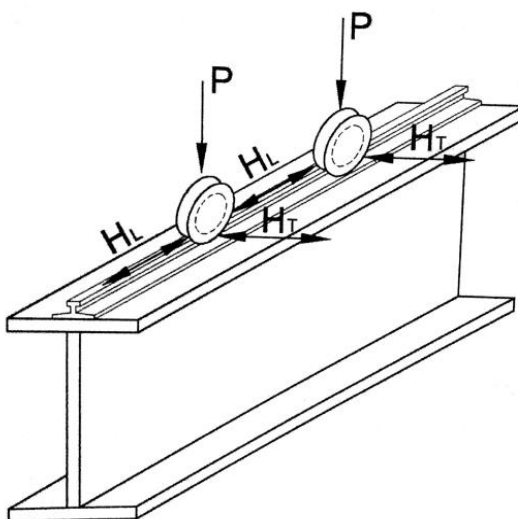
Tabela 1 - Porcentagem de carga içada para galpões siderúrgicos

Tipo de ponte	Força transversal % de carga içada (para cada lado)
Ponte de aciaria e laminação	20
Ponte com caçamba e eletroímã Ponte de pátio de placa e tarugos	50
Ponte de forno poço	100
Ponte de estripador	100% do peso do lingote e lingoteira

Fonte: Bellei, 2010

Na Figura 7 pode ser observado de forma esquemática as cargas aplicadas na viga de rolamento.

Figura 7 - Esforços em vigas de rolamento causados pelas pontes rolantes



Fonte: Bellei,2010

2.8.2 Combinação de ações e carregamento

Segundo Sena (2017) para o cálculo dos carregamentos as ações devem ser multiplicadas por coeficientes de ponderação, que são dados em função da

variabilidade das ações e de sua simultaneidade de atuação, essa combinação de ações deve ser feita de modo a considerar as situações mais desfavoráveis para estrutura.

Para os estados-limites últimos, são utilizados coeficientes de ponderação que correspondem ao γ_g , para as ações permanentes, e γ_q , para as ações variáveis. As ações variáveis ainda podem ser reduzidas pelos fatores ψ : no estado limite de utilização ψ_0 é multiplicado às ações variáveis secundárias, ψ_1 e ψ_2 são utilizados nas combinações de estados-limites de serviço (SENA, 2017).

Na Tabela 2 e Tabela 3 são mostrados os coeficientes de ponderação das ações recomendados pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 2- Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{ad}					
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
	Normais	1,20	1,40	1,20	1,50	
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

- a - Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.
- b - O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.
- c - Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.
- d - Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Tabela 3 - Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis

Ações		ψ_{f2}^a		
		ψ_0	ψ_1^d	ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
<p>a - Ver alínea c) de 4.7.5.3.</p> <p>b - Edificações residenciais de acesso restrito.</p> <p>c - Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.</p> <p>d - Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar y_1 igual a 1,0.</p> <p>e - Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para y_2 o valor zero.</p>				

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Em decorrência da força horizontal devida ao choque da ponte rolante com o batente a NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda que as ações devem ser consideradas apenas em combinações últimas especiais, na qual devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação.

Segundo Sena (2017) na análise de vigas de rolamento, tem-se apenas uma combinação de ações, ver Equação 2.1, a qual considera a ponte rolante como a ação variável principal.

$$F_d = q + 1,5 \times (F_V + F_T + F_L) \quad (2.1)$$

Sendo:

$$q = 1,25 \times PP + 1,25 \times PP_{Trilho}$$

$$F_V = 1,50 \times P$$

$$F_T = 1,50 \times H_T$$

$$F_L = 1,50 \times H_L$$

Onde:

PP - Peso próprio da viga de rolamento;

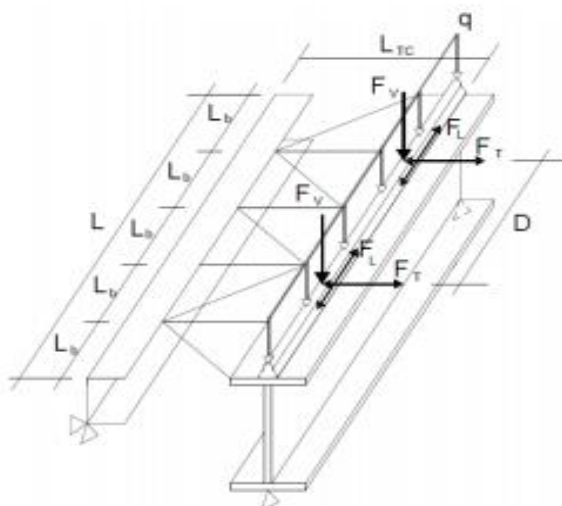
PP_{Trilho} - Peso próprio das estruturas metálicas que se apoiam sobre a viga de rolamento;

F_V - Força vertical das cargas da ponte rolante sobre a viga de rolamento;

F_T - Força transversal das cargas da ponte rolante sobre a viga de rolamento;

F_L - Força longitudinal das cargas da ponte rolante sobre a viga de rolamento;

Figura 8 - Esquema de aplicação do carregamento combinado na viga de rolamento.



Fonte: Sena, 2017

2.8.3 Esforços solicitantes em uma viga de rolamento

Os esforços solicitantes nas vigas de rolamento são basicamente: Esforço cortante, momento fletor, esforço normal e tensão normal

2.8.3.1 Esforço cortante e momento fletor solicitante

Segundo Holtz (2005) Para o dimensionamento de qualquer estrutura é necessário conhecer os máximos e mínimos do momento fletor e esforços cortantes que ela apresentará ao ser submetida a um determinado carregamento. Para estruturas submetidas a cargas móveis existe um diagrama, chamado de envoltória de esforços, que determina esses os valores limites solicitados pela estrutura.

Os esforços internos nestes tipos de estrutura não variam apenas com a magnitude das cargas aplicadas, mas também com a posição de atuação das mesmas. Portanto, o projeto de uma viga de rolamento, envolve a determinação das

posições das cargas móveis que produzem valores extremos dos esforços nas seções do elemento (HOLTZ, 2005).

2.8.3.1.1 Linhas de influência

Segundo Holtz (2005) linhas de Influência (LI) descrevem a variação de um determinado efeito (esforço cortante ou momento fletor) em função da posição de um trem tipo que passeia sobre a estrutura. Com base nos traçados de LI's, é possível obter as chamadas envoltórias limites de esforços que são necessárias para o dimensionamento de estruturas submetidas a cargas móveis ou acidentais, no caso as vigas de rolamento.

2.8.3.2 Esforço normal solicitante

Segundo Sena (2017), o esforço normal será admitido como sendo de compressão para a avaliação na tensão normal máxima na mesa superior. O carregamento combinado gera uma parcela de esforço devida à frenagem ou aceleração longitudinal da ponte rolante. Esta parcela atua sobre o centro geométrico da seção transversal bruta da viga de rolamento, e, para um trem tipo de n rodas, é dada Equação 2.2:

$$N_{c,sd} = nF_L \quad (2.2)$$

Onde:

$N_{c,sd}$ – Esforço normal solicitante;

n – Número de rodas da ponte rolante;

F_L - Esforço de frenagem ou aceleração longitudinal da ponte rolante.

2.8.3.3 Tensão normal solicitante

Da resistência dos materiais, a determinação da tensão normal máxima que atua em um ponto da seção transversal da viga de rolamento, é dada pela equação 2.3:

$$\sigma_{sd} = \frac{N_{c,Sd}}{A_g} + \frac{M_{sd}}{W_x} \quad (2.3)$$

onde:

$N_{c,Sd}$ – Esforço normal solicitante;

σ_{sd} - Tensão normal solicitante

A_g - Área bruta da seção transversal da viga de rolamento;

M_{sd} – Momento fletor solicitante;

W - Módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo x ;

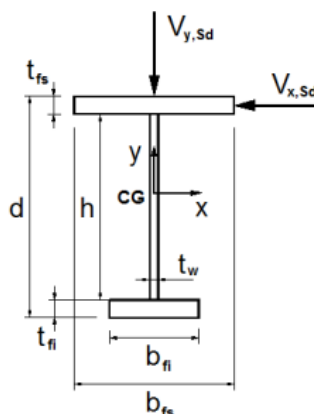
2.9 Verificação Estado limite último de utilização (ELU)

Nesta parte serão apresentados os critérios para a determinação das resistências de cálculo. Serão abordadas as considerações dos estados-limites últimos associados ao momento fletor, esforço cortante, tensão normal, forças transversais localizadas e enrijecedores transversais

2.9.1 Esforço cortante resistente

Segundo Bellei (2010) os carregamentos aplicados nas vigas de rolamento causados pelas pontes rolantes geram esforços cortantes (Figura 9). para a construção das vigas de rolamento a seção mais utilizado é o perfil I, podendo ser laminado ou soldado.

Figura 9 - Esforços cortantes nas vigas de rolamento



Fonte: Sena,2017

Segundo a NBR 8800 a força cortante resistente de cálculo de vigas mistas de alma cheia, perfil I, H e U, deve ser determinada considerando-se apenas a resistência do perfil de aço.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (2.4)$$

Onde:

V_{Sd} – Esforço cortante solicitante

V_{Rd} – Esforço cortante resistente

Segundo PFEIL E PFEIL (2009) nas vigas metálicas, as almas servem principalmente para absorver os esforços cortantes. Nos perfis laminados, as almas são pouco esbeltas, tendo geralmente resistência à flambagem suficiente para atender aos esforços solicitantes, de modo que a resistência é determinada pelo escoamento ao cisalhamento do material. Nos perfis soldados, as almas são geralmente mais esbeltas, de modo que a resistência da viga fica limitada pela flambagem da alma.

O item 5.4.3 da NBR 8800 (ABNT, 2008) fornece os valores das forças cortantes resistente de cálculo, considerando os estados-limites últimos dependendo da esbeltez da viga.

Em seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma (eixo de maior inércia), a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é dada pelas equações 2.5, 2.6 e 2.7:

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (2.5)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (2.6)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (2.7)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (2.8)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (2.9)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (2.10)$$

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (2.11)$$

$$A_w = d t_w \quad (2.12)$$

$k_v = 5,0$ para almas sem enrijecedores transversais, para $\frac{a}{h} > 3$ ou para $\frac{a}{h} > \left[\frac{260}{(h/t_w)} \right]^2$

$k_v = 5,0 + \frac{5}{(a/h)^2}$ para todos os outros casos

Onde:

λ – Limite de esbeltez;

λ_r - Limite de esbeltez relacionado ao início de escoamento da seção;

λ_p - Limite de esbeltez correspondente à plastificação total da seção;

V_{pl} - Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento;

V_p - Força cortante correspondente à plastificação total da seção;

$\gamma_{a1} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade);

a - é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes;

k_v - Coeficiente de flambagem referente ao esforço cortante;

h - Altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados;

t_w - Espessura da alma;

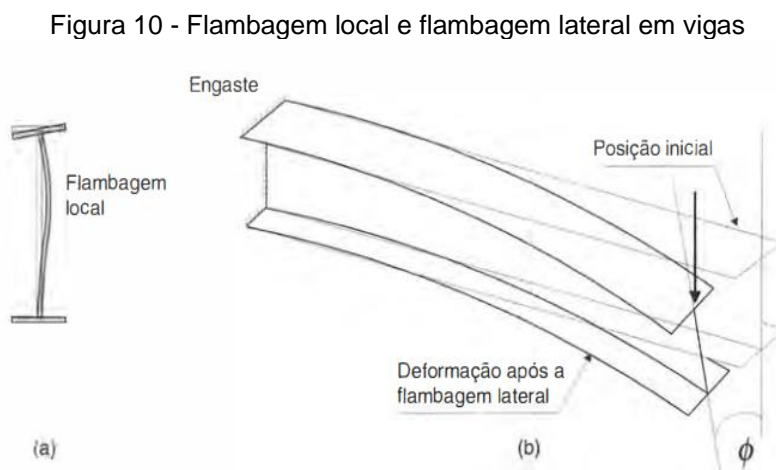
d - Altura total da seção transversal;

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço

2.9.2 Momento fletor resistente

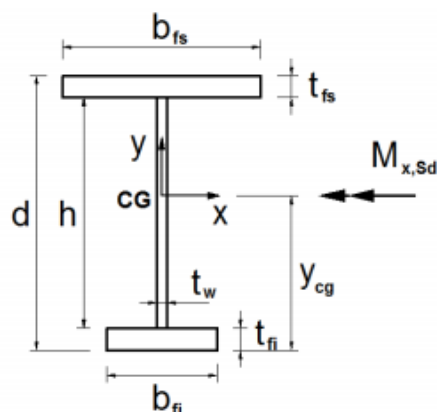
A resistência à flexão das vigas pode ser afetada pela flambagem local e pela flambagem lateral. A flambagem local (Figura 10a) é a perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento resistente da seção. Na flambagem lateral (Figura 10b) a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão (em geral vertical) e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção (PFEIL E PFEIL, 2009).



Fonte: PFEIL E PFEIL, 2009

Na Figura 11 é mostrado como o momento fletor atua sobre a viga de rolamento monossimétricas.

Figura 11 – Momento fletor em vigas de rolamento



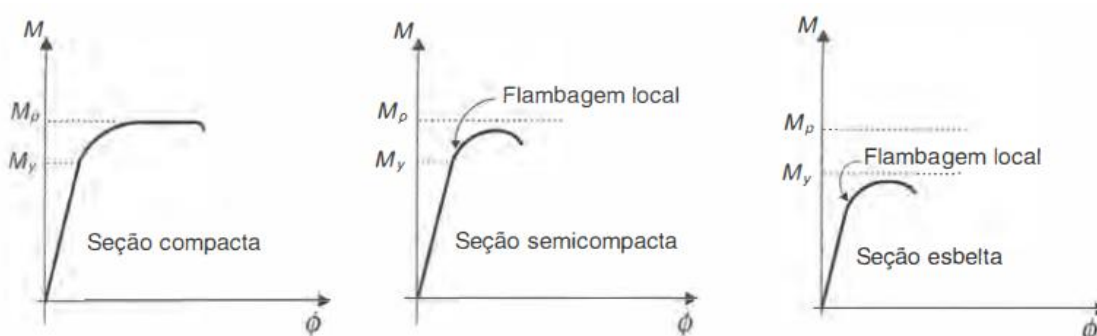
Fonte: Sena, 2017

De acordo com a PFEIL E PFEIL (2009), as seções das vigas podem ser divididas em três classes conforme a influência da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes (M_{res}):

- Seção compacta - é aquela que atinge o momento de plastificação total ($M_{res} = M_p$) e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica para configurar uma rótula plástica;
- Seção semi compacta - é aquela em que a flambagem local ocorre após ter desenvolvido plastificação parcial ($M_{res} > M_y$) mas sem apresentar significativa rotação;
- Seção esbelta - seção na qual a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento de início de plastificação ($M_{res} < M_y$);

Sendo Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p , na Figura 12 pode ser verificado o comportamento de vigas com seções compacta, semi compacta e esbelta.

Figura 12 - Comportamento de vigas com seções compacta, semi compacta e esbelta.



Fonte: PFEIL E PFEIL, 2009

Em relação ao índice de esbeltez:

- a) Para seções compactas: $\lambda \leq \lambda_p$
- b) Para seções semi compactas: $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$
- c) Para seções esbeltas: $\lambda > \lambda_r$

Onde:

λ – Limite de esbeltez

λ_r - Limite de esbeltez relacionado ao início de escoamento da seção

λ_p - Limite de esbeltez correspondente à plastificação total da seção

Segundo PFEIL E PFEIL (2009) as vigas sem contenção lateral contínua podem ser divididas em três categorias, dependendo da distância entre os pontos de apoio lateral (L_b).

- a) Vigas curtas - o efeito de flambagem lateral pode ser desprezado. A viga atinge o momento definido por escoamento ou flambagem local;
- b) Vigas longas - atingem o estado limite de flambagem lateral em regime elástico;
- c) As vigas intermediárias apresentam ruptura por flambagem lateral inelástica, a qual é muito influenciada por imperfeições geométricas da peça e pelas tensões residuais embutidas durante o processo de fabricação da viga.

2.9.2.1 Momento Resistente de vigas de alma não-esbelta

O anexo G da NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta procedimentos para determinação do momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta ou compacta.

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) a seção I Monossimétrica só pode ser utilizada se satisfizer duas limitações geométricas: A razão entre o momento de inércia da mesa comprimida (I_{yc}) e da mesa tracionada (I_{yt}) em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma deve atender à equação 2.13; A soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à mesa de maior área, conforme inequação 2.15.

$$\frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9 \quad (2.13)$$

Sendo:

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} = \frac{t_{fs} b_f^3 / 12}{t_{fi} b_i^3 / 12} \quad (2.14)$$

Onde:

I_{yc} - momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado houver momentos positivo e negativo, tomar a mesa de menor momento de inércia em relação ao eixo mencionado);

I_{yt} - momento de inércia da mesa tracionada em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado houver momentos positivo e negativo, tomar a mesa de maior momento de inércia em relação ao eixo mencionado);

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

$$A_{fi} + A_w > A_{fs} \quad (2.15)$$

Sendo:

$$A_{fi} = b_{fi} t_{fi} \quad (2.16)$$

$$A_w = t_w h \quad (2.17)$$

$$A_{fs} = b_{fs} t_{fs} \quad (2.18)$$

Onde:

A_w - é a área da alma do perfil de aço;

A_{fs} - é a área da mesa superior do perfil de aço;

A_{fi} - é a área da mesa inferior do perfil de aço;

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

t_w - espessura da alma;

h - Altura da alma, tomada igual à distância entre faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados e igual ao comprimento da parte plana nas seções tubulares retangulares;

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) o momento fletor resistente a ser comparado com o momento solicitante deve ser adotado como o menor valor entre os momentos resistentes calculados para os três ELU de flexão supracitados, flexão lateral com torção (FLT), flexão local da mesa (FLM) e flexão local da alma (FLA).

a) Estado-Limite Ultimo de flexão Lateral com torção (FLT)

Os momentos resistentes para a flexão lateral com torção para vigas monossimétricas são calculados segundo as equações 2.19, 2.20 e 2.21.

Para: $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{RD} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (2.19)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{C_b}{\gamma_{al}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (2.20)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{al}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (2.21)$$

Sendo:

$$M_{pl} = f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_{x,min} \quad (2.22)$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) W_x^{sup} \leq f_y W_x^{inf} \quad (2.23)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \left[\beta_3 + \sqrt{\beta_3^2 \frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \right] \quad (2.24)$$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_{yc}} \quad (2.25)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.26)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (2.27)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{m\acute{a}x}}{2,5 M_{m\acute{a}x} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m \leq 3,0 \quad (2.28)$$

$$J = \frac{[2 b_f t_f^3 + (d - t_f) t_w^3]}{3} \quad (2.29)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (2.30)$$

$$r_{yc} = \sqrt{I_y^T / A^T} \quad (2.31)$$

$$I_y^T = \frac{t_{fs} b_{fs}^3}{12} + \frac{[d - t_f - y_{cg}] t_w^3}{12} \quad (2.32)$$

$$A^T = b_{fs} t_{fs} + (d - t_{fs} - y_{cg}) t_w \quad (2.33)$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x^{sup}}{E J} \quad (2.34)$$

$$\beta_2 = 5,2\beta_1\beta_3 + 1 \quad (2.35)$$

$$\beta_3 = 0,45 \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right) \quad (2.36)$$

$$\sigma_r = 0,30f_y \quad (2.36)$$

Onde:

M_{cr} - momento fletor de flambagem elástica;

M_{pl} - momento fletor de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástico (Z) pela resistência ao escoamento do aço (f_y);

M_r - Momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais em alguns casos;

$\gamma_{a1} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade).

C_b - Fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme.

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r - Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

L_b - Comprimento destravado, distância entre os pontos contidos lateralmente para impedir a FLT;

$M_{m\acute{a}x}$ - Valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado em análise;

M_A - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado em análise, medido a partir da extremidade da esquerda;

M_B - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado em análise;

M_C - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado em análise, medido a partir da extremidade da esquerda;

R_m - Para vigas de rolamento biapoiadas = 1,0;

r_y - raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

I_y - momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da

alma;

σ_r – Tensão residual do processo de fabricação, seja por laminação ou por soldagem;

C_w - constante do empenamento da seção transversal;

J - Constante de torção da seção transversal;

W - Módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

W_c - módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;

W_t - módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão;

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

d - Altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

h - Altura da alma, tomada igual à distância entre faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados e igual ao comprimento da parte plana nas seções tubulares retangulares;

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

b) Estado-Limite Ultimo de flexão Local da mesa (FLM)

Os momentos resistentes para a flexão local da mesa são calculados segundo as equações 2.36, 2.37 e 2.38.

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{RD} = \frac{M_{pl2}}{\gamma_{al}} \quad (2.36)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{al}} \left[M_{pl2} - (M_{pl2} - M_{r2}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (2.37)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{al}} \quad (2.38)$$

Sendo:

$$M_{pl2} = f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_{x,min} \quad (2.39)$$

$$M_{r2} = (f_y - \sigma_{r2}) W_x^{sup} \quad (2.40)$$

$$M_{cr2} = \frac{0,90 E k_c}{\lambda^2} W_x^{sup} \quad (2.41)$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_{fs}/2}{t_{fs}} \quad (2.42)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.43)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{\frac{(f_y - \sigma_{r2})}{K_c}}} \quad (2.44)$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad (2.45)$$

$$\sigma_{r2} = 0,30 f_y \quad (2.46)$$

Onde:

M_{cr} - momento fletor de flambagem elástica;

M_{pl} - momento fletor de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástica (Z) pela resistência ao escoamento do aço (f_y);

M_r - Momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais em alguns casos;

$\gamma_{a1} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade).

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r - Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

I_y - momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

σ_r - Tensão residual do processo de fabricação, seja por laminação ou por soldagem;

W - Módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

E - Módulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

t_w - espessura da alma;

h - Altura da alma, tomada igual à distância entre faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados e igual ao comprimento da parte plana nas seções tubulares retangulares;

c) Estado-Limite Último de Flexão Local da Alma (FLA)

Os momentos resistentes para a flexão local da alma são calculados segundo as equações 2.47 e 2.48.

Para: $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{RD} = \frac{M_{pl3}}{\gamma_{a1}} \quad (2.47)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{al}} \left[M_{pl3} - (M_{pl3} - M_{r3}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (2.48)$$

Nos casos de seções esbeltas $\lambda > \lambda_r$ não é aplicável a flexão local da alma (FLA).

Sendo:

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} \quad (2.49)$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r \quad (2.50)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.51)$$

$$M_{pl3} = f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_x \quad (2.52)$$

$$M_{r3} = f_y W_x \quad (2.53)$$

$$h_c = 2(d - t_{fs} - y_{cg}) \quad (2.54)$$

$$h_p = 2(d - t_{fs} - y_p) \quad (2.55)$$

Onde:

M_{cr} - momento fletor de flambagem elástica;

M_{pl} - momento fletor de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástico (Z) pela resistência ao escoamento do aço (f_y);

M_r - Momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais em alguns casos;

$\gamma_{al} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade).

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r - Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

I_y - momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

σ_r - Tensão residual do processo de fabricação, seja por laminação ou por soldagem;

W - Módulo de resistência (mínimo) elástico da seção, relativo ao eixo de flexão;

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

t_w - espessura da alma;

h - Altura da alma;

y_p - Distância da linha neutra plástica à face externa da mesa inferior.

h_c - é igual a duas vezes a distância do CG à face interna da mesa superior;

h_p - é igual a duas vezes a distância da linha neutra plástica à face interna da mesa superior;

2.9.2.2 Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta

O Anexo H da NBR 8800 (ABNT, 2008) aborda os procedimentos para a determinação do momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma esbelta.

As vigas de rolamento de alma esbelta com perfil I monossimétrico soldado, são aquelas em que o índice de esbeltez para o ELU de FLA atende a equação 2.56.

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} > 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.56)$$

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) as vigas de alma esbelta devem atender aos seguintes requisitos:

a) No caso de seções monossimétrico, a soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa, deve satisfazer o intervalo a seguir:

$$\frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9 \quad (2.57)$$

Sendo:

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} = \frac{t_{fs} b_f^3 / 12}{t_{fi} b_i^3 / 12} \quad (2.58)$$

Onde:

I_{yc} - momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado houver momentos positivo e negativo, tomar a mesa de menor momento de inércia em relação ao eixo mencionado);

I_{yt} - momento de inércia da mesa tracionada em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado houver momentos positivo e negativo, tomar a mesa de maior momento de inércia em relação ao eixo mencionado);

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

b) A relação entre a área da alma e da mesa comprimida não pode exceder 10;

c) A relação h/t_w não pode exceder 260 nem:

Para $a/h \leq 1,5$

$$11,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.59)$$

Para $a/h > 1,5$

$$\frac{0,42E}{f_y} \quad (2.60)$$

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) o valor do momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de escoamento da mesa tracionada, é dado pela equação 2.61:

$$M_{RD} = \frac{W_{xt}f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.61)$$

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) o momento fletor resistente a ser comparado com o momento solicitante deve ser adotado como o menor valor entre os momentos resistentes calculados para os três ELU de flexão supracitados, flexão lateral com torção (FLT), flexão local da mesa (FLM) e flexão local da alma (FLA).

a) Estado-Limite Ultimo de flexão Lateral com torção (FLT)

Os momentos resistentes para a flexão lateral com torção são calculados segundo as equações 2.62, 2.63 e 2.64.

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{RD} = \frac{k_{pg}W_{xc}f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.62)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{a1}} C_b k_{pg} \left[1 - 0,3 \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] W_{xc} f_y \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.63)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{C_b k_{pg} \pi^2 E W_{xc}}{\lambda^2} \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.64)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{l_b}{r_y T} \quad (2.65)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.66)$$

$$\lambda_r = \pi \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y}} \quad (2.67)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{m\acute{a}x}}{2,5 M_{m\acute{a}x} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m \leq 3,0 \quad (2.68)$$

$$k_{pg} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300 a_r} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.69)$$

Onde:

$\gamma_{a1} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade).

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r - Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

σ_r - Tensão residual do processo de fabricação, seja por laminação ou por soldagem;

W_{xt} - é o módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção;

l_b - Comprimento destravado, distância entre os pontos contidos lateralmente para impedir a FLT;

$r_y T$ - é o raio de giração, relativo ao eixo de menor momento de inércia, da seção formada pela mesa comprimida mais um terço da alma comprimida;

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

t_w - espessura da alma;

h_c - é igual a duas vezes a distância do CG à face interna da mesa superior;

$M_{m\acute{a}x}$ - Valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado em análise;

M_A - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado em análise, medido a partir da extremidade da esquerda;

M_B - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado em análise;

M_C - Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado em análise, medido a partir da extremidade da esquerda;

R_m - Para vigas de rolamento biapoiadas =1,0;

b) Estado-Limite Ultimo de flexão Lateral com torção (FLM)

Os momentos resistentes para a flexão local da mesa são calculados segundo as equações 2.70, 2.71 e 2.72.

Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.70)$$

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{a1}} k_{pg} \left[1 - 0,3 \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] W_{xc} f_y \quad (2.71)$$

Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{RD} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,90 k_{pg} \pi^2 E W_{xc}}{\lambda^2} \quad (2.72)$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (2.73)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.74)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{k_c E}{0,7 f_y}} \quad (2.75)$$

$$k_{pg} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.76)$$

Onde:

$\gamma_{a1} = 1,10$ Coeficiente de ponderação da resistência do aço (para escoamento, flambagem e instabilidade).

λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r - Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

σ_r - Tensão residual do processo de fabricação, seja por laminação ou por soldagem;

W_{xt} - é o módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção;

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

2.9.3 Tensão normal resistente de calculo

De acordo com o item 5.5.2.3 da NBR 8800 (ABNT, 2008), a tensão normal resistente de cálculo para o ELU de instabilidade ou flambagem, sob efeito de tensão normal, é dada pela equação 2.77. Esta tensão resistente deve ser igual ou superior à tensão normal solicitante.

$$\sigma_{sd} \leq \sigma_{Rd} = \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.77)$$

De acordo com o item 5.3.3.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008) o fator de redução devido a flambagem global (χ) é dado pelas equações 2.78 e 2.79:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (2.78)$$

Para $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (2.79)$$

A esbeltez reduzida (λ_0) é dada pela equação 2.80:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (2.80)$$

Onde:

Q - Fator de redução devido à flambagem local;

A_g - Área bruta da seção transversal da viga de rolamento;

N_e - Carga crítica de flambagem elástica da viga;

O fator de redução devido à flambagem local (Q) é calculado de acordo com a equação 2.81, segundo o Anexo F da NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$Q = Q_s Q_a \quad (2.81)$$

Onde:

Q_a - fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AA

Q_s - fatores de redução que levam em conta a flambagem local de elementos AL

AA - Duas bordas longitudinais vinculadas (alma do Perfil I)

AL - Uma borda longitudinal vinculada (mesas do Perfil I)

No caso de viga de rolamento o fator Q_s que consta na equação 2.81 é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da mesa superior desta viga.

Valores de Q_s para perfis laminados

Os valores de Q_s para vigas de rolamento com perfil I ou H laminado é dado pelas equações 2.82, 2.83 e 2.84 e depende da esbeltez local da mesa superior:

$$\text{Para: } \frac{b_f/2}{t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = 1 \quad (2.82)$$

$$\text{Para: } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b_f/2}{t_f} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b_f/2}{t_f} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.83)$$

$$\text{Para: } \frac{b_f/2}{t_f} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b_f/2}{t_f}\right)^2} \quad (2.84)$$

Onde:

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

Valores de Q_a

No caso de viga de rolamento o fator Q_a que consta na equação 2.81 é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da alma desta viga, sendo dado ou pela equação 2.31, ou pela equação 2.32, a depender da esbeltez da alma.

$$\text{Para: } \frac{h}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_a = 1 \quad (2.85)$$

$$\text{Para: } \frac{h}{t_w} > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (2.85)$$

Sendo:

$$A_{ef} = A_g - (h - h_{ef}) t_w \quad (2.86)$$

$$h_{ef} = 1,92 t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{h/t_w} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq h \quad (2.87)$$

Onde:

E - Modulo elasticidade do aço;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço.

t_w - espessura da alma;

h - Altura da alma;

O cálculo da carga crítica de flambagem global elástica (N_e) é feito de acordo com o Anexo E da NBR 8800 (ABNT, 2008). No caso de viga de rolamento biapoiada com a mesa superior contida lateralmente por treliça de contenção, considera-se: $K_x = K_y = K_z = 1$; $L_x = L$; $L_y = L_z = L_b$.

Valor de N_e para perfil I monossimétrico

No caso de viga de rolamento com seção transversal em perfil I monossimétrico, N_e é o menor valor entre os fornecidos pelas equações 2.88 e 2.89.

Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal da viga:

Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal da viga, é dado na equação 2.89:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2} \quad (2.88)$$

Para flambagem elástica por flexo-torção é dado pela equação 2.89:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{\frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right] \quad (2.89)$$

Sendo:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} \quad (2.90)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{L_b^2} + GJ \right] \quad (2.91)$$

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + y_0^2)} \quad (2.92)$$

$$y_0 = \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \frac{b_{fs}^3}{b_{fs}^3 + b_{fi}^3} + \frac{t_{fi}}{2} - y_{cg} \quad (2.93)$$

Onde:

E - é o módulo de elasticidade do aço;

C_w - é a constante de empenamento da seção transversal;

r_0 - Raio de giração polar da seção da viga com dupla simetria;

r_x e r_y - Raios de giração em relação aos eixos x e y da seção;

G - é o módulo de elasticidade transversal do aço;

J - é a constante de torção da seção transversal;

t_f - espessura da mesa (t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior);

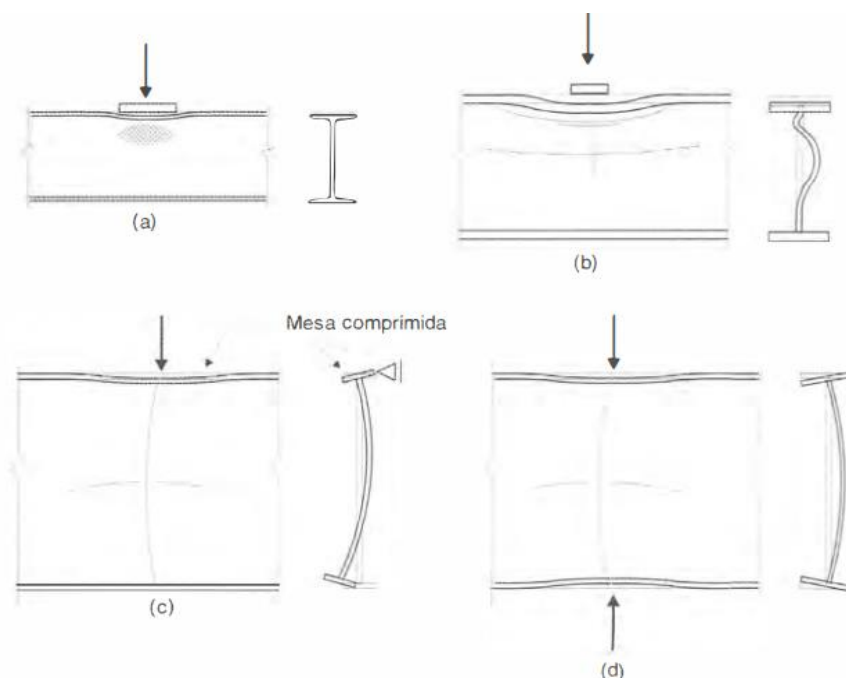
b_f - largura total da mesa (b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior);

2.9.4 Força transversal

Segundo PFEIL E PFEIL (2009) em vigas sujeitas a cargas concentradas em regiões de alma não enrijecida podem ocorrer os seguintes tipos de ruptura da alma por compressão transversal devido à ação de cargas concentradas, conforme Figura 13:

- a) Escoamento local da alma;
- b) Enrugamento da alma com flambagem localizada;
- c) Flambagem da alma com ou sem deslocamento lateral da mesa tracionada;
- d) Flambagem da alma por compressão transversal.

Figura 13 - Tipos de ruptura sem enrijecedores intermediários em viga sujeita a carga transversal concentrada.



Fonte: PFEIL E PFEIL, 2009

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), se a força solicitante de cálculo superar a força resistente de cálculo, devem ser colocados, na seção de atuação da força, enrijecedores transversais de ambos os lados da alma.

2.9.4.1 ELU de escoamento local da alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) na verificação do estado limite ultimo de escoamento local a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

a) quando a força está a uma distância da extremidade da barra maior que a altura da seção transversal é calculada com a equação 2.94:

$$F_{Rd} = \frac{1,10(5k + l_n)f_y t_w}{\gamma_{a1}} \quad (2.94)$$

b) quando a força está a uma distância da extremidade da barra maior que a altura da seção transversal é calculada com a equação 2.95:

$$F_{Rd} = \frac{1,10(2,5k + l_n)f_y t_w}{\gamma_{a1}} \quad (2.95)$$

Onde:

l_n - Comprimento de atuação da força na direção longitudinal da viga;

k - Espessura da mesa carregada mais o lado do filete de solda paralelo à alma, no caso de perfis soldados, ou a espessura da mesa mais o raio de concordância com a alma, no caso de perfis laminados;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço

t_w - Espessura da alma;

γ_{a1} - coeficiente de ponderação.

2.9.4.2 ELU de enrugamento de alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) na verificação do estado limite ultimo de enrugamento a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

a) quando a força de compressão está a uma distância da extremidade da barra maior ou igual à metade da altura da seção transversal é calculada com a equação 2.96:

$$F_{Rd} = \frac{0,66t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (2.96)$$

b) quando a força de compressão está a uma distância da extremidade da barra menor que a metade da altura da seção transversal é calculada com a equação 2.97 ou pela equação 2.98:

Para $l_n/d \leq 0,2$:

$$F_{Rd} = \frac{0,33t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (2.97)$$

Para $l_n/d \leq 0,2$:

$$F_{Rd} = \frac{0,33t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + \left(\frac{4l_n}{d} - 0,2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (2.98)$$

Onde:

d - Altura da seção transversal da barra;

t_f - Espessura da mesa carregada;

l_n - Comprimento de atuação da força na direção longitudinal da viga;

t_w - Espessura da alma;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço;

E - Módulo de elasticidade longitudinal do aço

γ_{a1} - coeficiente de ponderação.

2.9.4.3 ELU de flambagem lateral da alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) a alma de uma barra, solicitada por compressão provocada por uma força localizada que atue na mesa comprimida, deve ser verificada para o estado-limite último de flambagem lateral, caso o deslocamento

lateral relativo entre a mesa comprimida carregada e a mesa tracionada não esteja impedido no ponto de aplicação da força.

A menos do disposto em a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

a) se a rotação da mesa carregada for impedida é calculada pela equação 2.99:

Para $(h/t_w)/(l/b_f) \leq 2,30$

$$F_{Rd} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{\gamma_{a1} h^2} \left[0,94 + 0,37 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (2.99)$$

b) se a rotação da mesa carregada for impedida é calculada pela equação 2.100:

Para $(h/t_w)/(l/b_f) \leq 1,70$

$$F_{Rd} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{\gamma_{a1} h^2} \left[0,37 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (2.100)$$

Onde:

l = Maior comprimento destravado lateralmente, envolvendo a seção de atuação da força concentrada, considerando as duas mesas;

h - Altura da alma;

C_r = Igual a 32E quando $M_{Sd} < M_r$ e a 16E quando $M_{Sd} \geq M_r$ na seção da força (M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo e M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento).

b_f – Largura da mesa carregada;

t_f - Espessura da mesa carregada;

t_w - Espessura da alma;

γ_{a1} - coeficiente de ponderação.

Se $(h/t_w)/(l/b_f)$ superar 2,30 ou 1,70, respectivamente quando a rotação da mesa carregada for ou não impedida, o estado-limite último de flambagem lateral da alma não tem possibilidade de ocorrer.

2.9.4.4 ELU de flambagem da alma por compressão

Segundo NBR 8800 (ABNT,2008) a alma de uma barra, solicitada por compressão provocada por um par de forças localizadas em sentidos opostos, atuando em ambas as mesas da mesma seção transversal, deve ser verificada para o estado-limite último de flambagem por compressão.

A força solicitante de cálculo (valor de cada força do par) não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada pela equação 2.101:

$$F_{Rd} = \frac{24t_w^3 \sqrt{E f_y}}{\gamma_{a1} h} \quad (2.101)$$

Onde:

h - Altura da alma;

t_w - Espessura da alma;

f_y - Tensão limite de escoamento do aço;

E - Módulo de elasticidade longitudinal do aço

γ_{a1} - coeficiente de ponderação.

Quando o par de forças concentradas se encontra a uma distância da extremidade da viga menor que metade da altura da seção transversal, a força resistente dada em deve ser reduzida à metade.

2.9.5 Enrijecedores transversais intermediários

Os enrijecedores transversais intermediários são geralmente, constituídos de chapas soldadas na alma. Além de dividir a alma em painéis, eles servem também de apoio transversal para a mesa comprimida, melhorando a resistência à torção (PFEIL E PFEIL, 2009).

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) no lado tracionado do perfil não há necessidade de contato do enrijecedor com a mesa, podendo-se parar a chapa do enrijecedor de modo que o cordão de solda alma-enrijecedor fique a uma distância da solda alma-mesa tracionada entre $4 t_w$ e $6 t_w$.

Ainda no item 5.7.9.5 da norma brasileira recomenda que os enrijecedores transversais ou diagonais devem também atender às seguintes exigências:

- a) A largura de cada enrijecedor somada à metade da espessura da alma da barra não pode ser menor que um terço da largura da mesa ou da chapa de ligação que recebe a força localizada;
- b) A espessura de um enrijecedor não pode ser menor que a metade da espessura da mesa da barra ou da chapa de ligação que recebe a força localizada, nem menor que sua largura dividida por 15.

A relação entre largura e espessura dos elementos que formam os enrijecedores não pode ultrapassar:

$$0,56 \sqrt{E/f_y} \quad (2.102)$$

Onde:

f_y - Tensão limite de escoamento do aço;

E - Módulo de elasticidade longitudinal do aço

O momento de inércia da seção de um enrijecedor singelo ou de um par de enrijecedores (um de cada lado da alma) em relação ao eixo no plano médio da alma não pode ser inferior a 2.103:

$$I \geq at_w^3 \left[\frac{2,5}{(a/h_w)^2} - 2 \right] \geq 0,5at_w^3 \quad (2.103)$$

Onde:

t_w - Espessura da alma;

a - Distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes

2.9.6 Enrijecedores de apoio à viga

Independentemente ou não da necessidade, aconselha-se a colocação de enrijecedores na região de apoio da viga de rolamento, para transmitir as reações

provocadas pelas pontes rolantes na mesa superior das vigas até a mesa inferior, a área para a transmissão de carga leva em conta uma parcela da alma $12 t_w$ para os apoios extremos e a $25 t_w$ para os centrais, no caso de vigas contínuas (BELLEI, 2010).

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) para evitar a flambagem local do enrijecedor, recomenda-se que a relação largura-espessura do mesmo não exceda:

$$0,56 \sqrt{E/f_y} \quad (2.104)$$

Onde:

f_y - Tensão limite de escoamento do aço;

E - Módulo de elasticidade longitudinal do aço

2.10 Verificação Estado limite último de Serviço (ELS)

2.10.1 Fadiga

O fenômeno conhecido como fadiga, acontece quando uma fissura é iniciada por meio de descontinuidade mecânica ou metalúrgica e se propaga pelo material com sucessivas repetições de carga, até que a parte afetada perca sua capacidade de suportar a carga (BELLEI, 2010).

Segundo Sena (2017) as vigas de rolamento são estruturas vulneráveis ao fenômeno de fadiga, com histórico de fissuras oriundas deste fenômeno na mesa tracionada, na região de solda entre a mesa tracionada e a alma e na região de solda entre o enrijecedores intermediário e a alma (no ponto de solda mais próximo da mesa tracionada).

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) aplicação dos critérios de verificação da fadiga, só é válida para estruturas que atendam às seguintes recomendações:

- a) Tenham adequada resistência à corrosão atmosférica ou sujeitas apenas a atmosferas levemente corrosivas;
- b) Em temperaturas abaixo de 150°C;

c) As tensões no metal-base calculadas usando-se a combinação de ações descrita na equação 2.43, cujo valor não ultrapasse $0,66 f_y$ ou $0,40 f_y$, para tensões normais ou de cisalhamento, respectivamente.

Não é necessária a verificação da resistência à fadiga nos seguintes casos:

- a) Quando o número de ciclos de aplicação das ações variáveis for inferior a 20.000 durante a vida útil da estrutura;
- b) Quando a faixa de variação de tensões ($\Delta\sigma$) for inferior ao limite admissível da faixa de variação de tensões (σ_{TH}).

Na equação 2.105 tem-se a combinação frequente de fadiga apresentada de maneira genérica de acordo com o anexo K da norma brasileira.

$$F_{d,fad} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + \psi_1 \sum_{j=1}^n F_{Qj,k} \quad (2.105)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ - Representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Qi,k}$ - Valor característico da ação variável considerada principal para a combinação

ψ_1 - Fator de redução para as ações variáveis, igual a 1,0.

No anexo K da NBR 8800 (ABNT, 2008) são apresentadas as recomendações de verificação de fadiga, deve-se considerar, em cada caminho de rolamento, a atuação de somente uma ponte rolante com suas cargas verticais máximas das rodas majoradas pelo impacto e com 50% das forças horizontais.

Faixa de variação de tensões (σ_{SR}) é definida como a magnitude da mudança de tensão devido à aplicação ou remoção das ações variáveis da combinação de ações da equação 2.105 (SALGADO, 2013).

Para obter-se a faixa de variação de tensões consultam-se, os parâmetros de fadiga, o tipo de detalhe da seção crítica e coeficiente C_f , dados nas tabelas K.2 e K.1 da NBR 8800:2008.

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) para as categorias de detalhe A, B, B', C, D, E e E', a faixa admissível de variação de tensões, σ_{SR} , em megapascal, deve ser determinada pela equação 2.106:

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} \quad (2.106)$$

Onde:

C_f - Constante dada na tabela K.1 da NBR 8800:2008 para a categoria correspondente;

N - Número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da estrutura

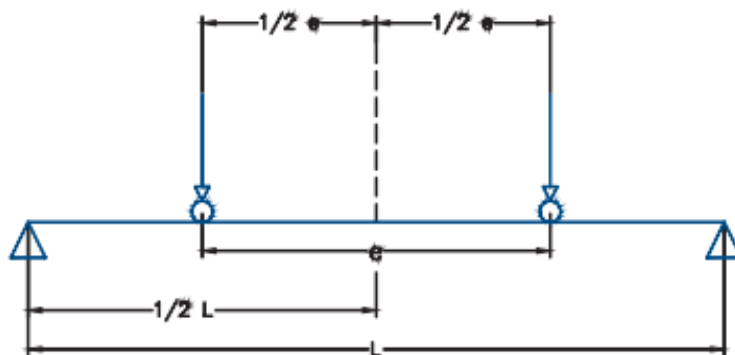
σ_{TH} - Limite admissível da faixa de variação de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, dado na tabela K.1.

2.10.2 Deslocamentos

Nas vigas de rolamento deve-se verificar deslocamentos na direção vertical que ocorre devido ao peso próprio da viga e o peso da ponte rolante, e na horizontal o deslocamento pode ocorrer pela frenagem do trole.

Para o deslocamento máximas admissíveis deve-se considerar o carregamento na posição mais desfavorável, ou seja, quando as rodas do trole estão posicionadas de forma central na viga de rolamento (MACHADO, 2014).

Figura 14 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior deformação



Fonte: MACHADO, 2014

A seguir são apresentadas as equações segundo Machado (2014) para o cálculo dos deslocamentos na direção vertical e horizontal:

2.10.2.1 Deslocamento vertical referente ao peso próprio

$$\delta = \frac{5 \times PP \times L^4}{384 \times E \times I_x} \quad (2.107)$$

2.10.2.2 Deslocamento vertical referente à carga vertical por roda

$$\delta = \frac{C_{MV} \times a}{24 \times E \times I_x} \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2) \quad (2.108)$$

2.10.2.3 Deslocamento horizontal referente à frenagem do trole por roda

$$\delta = \frac{H_T \times a}{24 \times E \times I_y} \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2) \quad (2.109)$$

Sendo:

$$a - (L - D) / 2. \quad (2.110)$$

Onde:

PP - Peso próprio da viga de rolamento

C_{VM} - Carregamento vertical móvel (por roda do trole)

H_T - Esforço causado pela frenagem do trole (por roda)

I_y - momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

L - Comprimento da viga de rolamento entre os apoios;

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) os deslocamentos máximos admissíveis para vigas de rolamento são dados em função da capacidade máxima da ponte rolante e do tipo de galpão. A Tabela 4 fornece tais deslocamentos limites:

Tabela 4 – Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
Vigas de rolamento: ^{j)} - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas - Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN - Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas - Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600^i$ $L/800^i$ $L/1000^i$ $L/400$ $L/600$
ⁱ - Valor não majorado pelo coeficiente de impacto. ^j - Considerar combinações raras de serviço.	

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de estudo de caso, pois será realizado um dimensionamento de viga de rolamento com base nos dados obtidos em projetos executivos, fornecidos pela empresa Eletrosul Centrais Elétricas S.A, localizada na cidade de Florianópolis, no Bairro Pantanal, na Rua Dep. Antônio Edu Vieira, número 999.

Os dados foram obtidos com devida autorização do Departamento de Engenharia de Geração (DEG), onde o autor realiza estágio. O projeto consiste em uma Central Geradora Hidráulica (CGH), onde a casa de força é toda em estrutura metálica. Na etapa de construção, para colocar a turbina hidráulica no local e para posteriores manutenções na mesma, é necessário o uso de uma ponte rolante.

A metodologia do presente trabalho será dividida em seis etapas: (1) Concepção estrutural da viga de rolamento; (2) Ponte rolante e suas especificações técnicas; (3) Definição dos carregamentos (4) Definição das solicitações de cálculo; (5) Verificações Enrijecedores transversais intermediários e de apoio Verificações (6) ELU segundo NBR 8800:2008; (7) Verificações ELS segundo NBR 8800:2008.

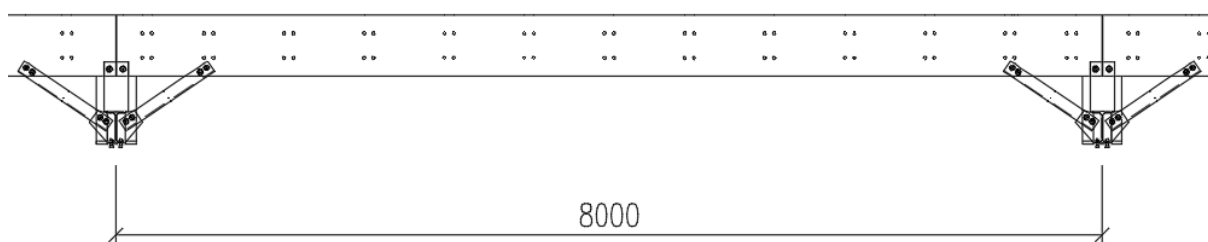
3.1 Concepção estrutural da viga de rolamento

Esta etapa consiste na verificação de como foi construída a viga de rolamento do galpão em questão, esta verificação será realizada com base nos projetos executivos da CGH, os pontos importantes a serem observados nessa etapa são:

3.1.1 Comprimento do vão

O primeiro dado obtido é o comprimento do vão efetivo, a viga de rolamento estudada é biapoiada e possui cinco vãos no total, variando entre 7,3 m e 8 m. O vão adotado para o trabalho será o maior, um vão central de 8 m conforme Figura 15:

Figura 15 – Comprimento do vão adotado



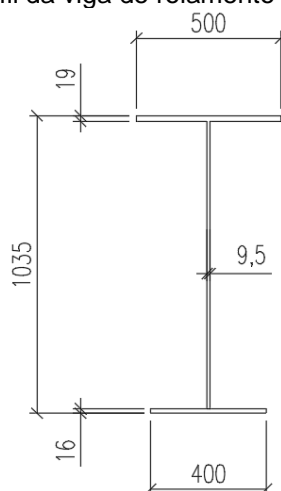
Fonte: ELETROSUL ,2019

Serão desconsiderados no dimensionamento da viga de rolamento os travamentos entre os vãos.

3.1.2 Perfil da viga de rolamento

O perfil da viga de rolamento, é um perfil I soldado monossimétrico, feito sob encomenda, produzido com o aço ASTM A36, ilustrado na Figura 16, na Tabela 5 são colocados todos os dados referente ao perfil em questão;

Figura 16 – Perfil da viga de rolamento (dimensões em milímetro)



Fonte: Adaptado ELETROSUL ,2019

Tabela 5 - Dados do Perfil I

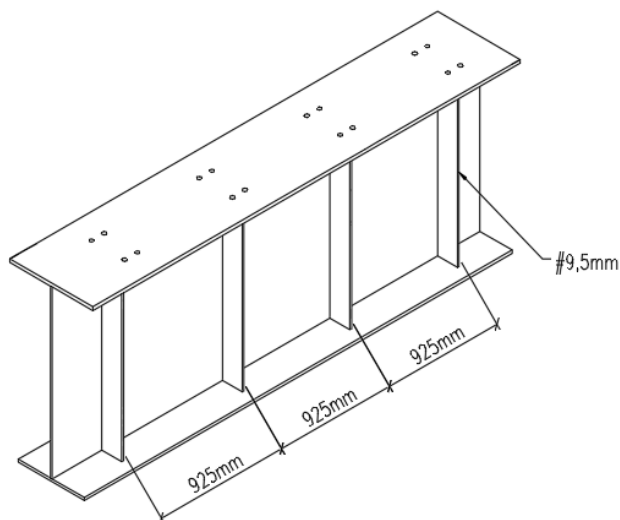
PERFIL I												
MASSA	ÁREA	ALT.	ALMA		MESAS				EIXO X-X		EIXO Y-Y	
m	A_g	d	t_w	h	t_{fs}	t_{fi}	b_{fs}	b_{fi}	I_x	r_x	I_y	r_y
kg/m	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm	cm ⁴	cm
28,2	254	1035	9,5	1000	19	16	500	400	481039,3	43,52	28332,14	10,56

Fonte: Autor

3.1.3 Enrijecedores transversais

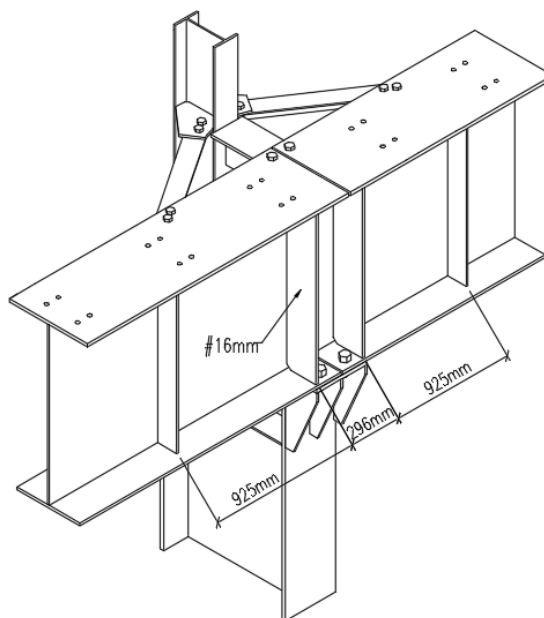
Outra verificação realizada nos projetos foi quanto aos enrijecedores, em relação sua espessura e altura. Nos enrijecedores transversais intermediários a espessura de # 9,5 mm e altura de 1000 mm, já nos de apoio a espessura é de #16,0 mm e altura de 1000 mm, como pode ser visto abaixo na Figura 17 e Figura 18 respectivamente:

Figura 17 - Enrijecedores transversais intermediários



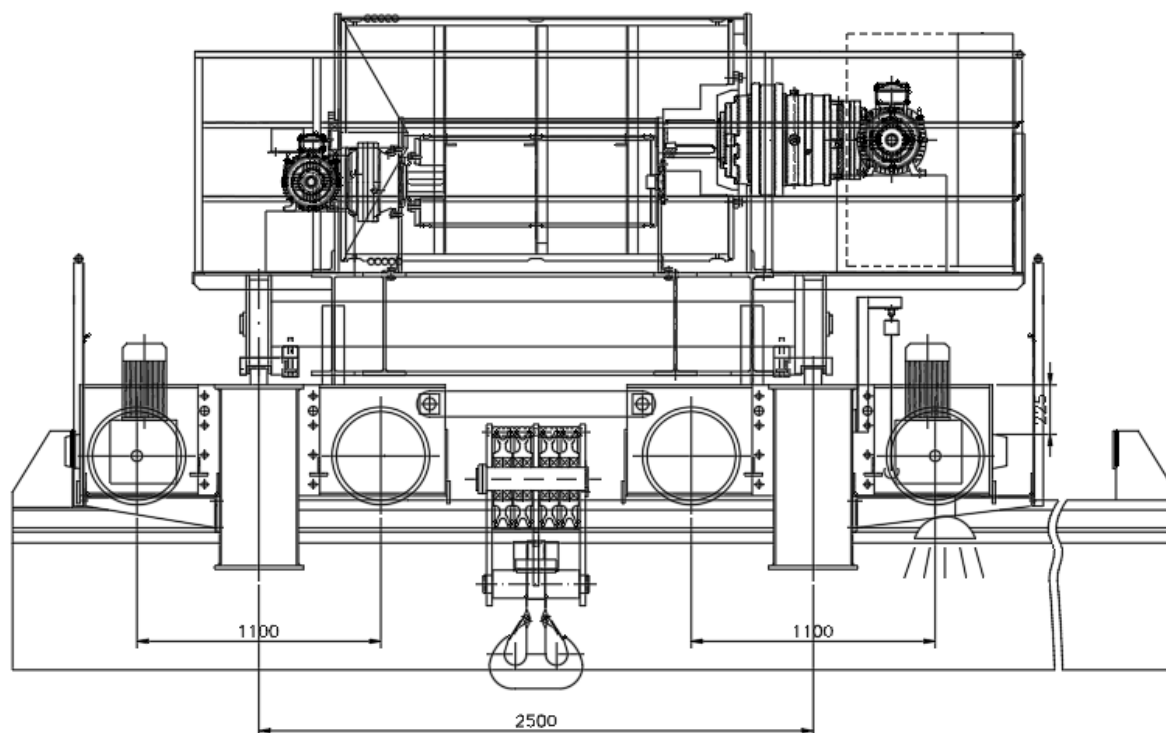
Fonte: Adaptado ELETROSUL ,2019

Figura 18 - Enrijecedores transversais de apoio



Fonte: Adaptado ELETROSUL ,2019

Figura 21 - Ponte rolante vista lateral



Fonte: Adaptado ELETROSUL ,2019

Tabela 6 - Dados da ponte rolante

Tipo	Dupla Viga
Classe de utilização	A
Estado de carga	1
Grupo 2	2
Capacidade	60000 kgf
Peso total aproximado	10000 kg
Peso total aproximado (ponte mais trole)	15500 kg
Reação máxima por roda	15170 kgf
Velocidade da ponte	10m/min
Flecha máxima	$\leq L/800$

Fonte: Adaptado ELETROSUL ,2019

3.3 Definição dos carregamentos e combinação de ações

Após a definição e coleta dos dados da concepção estrutural da viga de rolamento e o tipo de ponte rolante utilizada no projeto, é possível definir os carregamentos que são aplicados no dimensionamento, com seus respectivos

coeficientes de impactos recomendados pela NBR 8800:2008, que são as cargas verticais (Tabela 7), cargas horizontais transversais (Tabela 8) e cargas horizontais longitudinais (Tabela 9), conforme visto no item 2.8.1 da revisão bibliográfica.

Tabela 7 - cargas verticais

P	CARGA VERTICAL (POR RODA)
PESO/CARGA (kN)	148,77
COEFICIENTE DE IMPACTO (%)	10

Fonte: Autor

Tabela 8 - cargas horizontais transversais

H_T	A		B		C
	PP_{TROLE}	CARGA IÇADA	PP_{PONTE}	CARGA IÇADA	CARGA IÇADA
PESO/CARGA (kN)	528,94	588,40	1490,64	588,40	588,40
COEFICIENTE DE IMPACTO (%)	10		5		15

Fonte: Autor

Tabela 9 - cargas horizontais longitudinais

H_L	CARGA VERTICAL (POR RODA)
PESO/CARGA (kN)	148,77
RECOMENDAÇÃO NBR (%)	10

Fonte: Autor

3.4 Definição das solicitações de cálculo

A seguir são apresentados os métodos para encontrar todas as solicitações de cálculo.

3.4.1 Esforço cortante e momento fletor solicitante

Com todos os carregamentos encontrados e a combinação das ações realizada, com o auxílio do software Ftool, fornecido gratuitamente no site

<https://www.ftool.com.br/Ftool/>. É possível obter as linhas de influência, que fornecem os momentos fletores e cortante máximos e mínimos.

3.4.2 Esforço normal solicitante

O carregamento combinado gera uma parcela de esforço normal devida à frenagem ou aceleração longitudinal da ponte rolante, calculado pela equação 2.2.

3.4.3 Tensão normal solicitante

A determinação da tensão normal máxima que atua em um ponto da seção transversal da viga de rolamento é calculada pela equação 2.3

3.5 Verificações Enrijecedores transversais intermediários e de apoio

A verificação dos enrijecedores transversais intermediários será em relação a sua largura e espessura utilizando a equação 2.102 e seu momento de inércia utilizando a equação 2.103.

Nos enrijecedores transversais de apoio será apenas realizado a verificação em relação a sua largura e espessura utilizando a equação 2.104.

3.6 Verificações ELU segundo NBR 8800:2008

Nesta etapa serão realizadas as verificações de Estado Limite Último (ELU), comparando as solicitações encontradas na etapa 4 com as resistências de cálculo, estas que serão calculadas utilizando as equações descritas no item 2.9 da revisão bibliográfica. A seguir são apresentadas todas as verificações necessárias, e quais equações foram utilizadas para cada caso.

3.6.1 Verificação ELU de Momento fletor

Para realizar a verificação ELU de momento fletor é necessário saber a esbeltez da viga, podendo ser esbelta ou não esbelta, para isso será utilizada a equação 2.56.

Se no caso, a viga for não esbelta é necessário calcular os momentos resistentes de FLT, FLM e FLA conforme descrito no item 2.9.2.1, após realizar o cálculo dos momentos resistentes, tomar o maior valor para realizar a verificação ELU, e comparar com o momento solicitante encontrado no item 3.4.1 através do *software* FTOOL.

Se a viga for esbelta é necessário calcular os momentos resistentes de FLT, FLM e FLA conforme descrito no item 2.9.2.2, após realizar o cálculo dos momentos resistentes, tomar o maior valor para realizar a verificação ELU, para o comparar com o momento solicitante encontrado no item 3.4.1 através do *software* FTOOL.

3.6.2 Verificação ELU Esforço cortante

Antes de fazer a verificação é necessário verificar em que intervalo de esbeltez a viga está, para isso serão utilizadas as equações 2.8, 2.9 e 2.10. Após definir o intervalo de esbeltez, será calculado o esforço cortante resistente de cálculo referente ao intervalo encontrado. Assim é possível realizar a verificação ELU Esforço cortante, utilizando a equação 2.4, ou seja, comparar o esforço resistente calculado, com esforço solicitante encontrado no *software* FTOOL.

3.6.3 Verificação ELU Tensão normal

Na verificação de ELU da tensão normal, será apenas a comparação do valor obtido no item 3.4.3 da metodologia, ou seja, a tensão solicitante com o valor de tensão normal resistente calculado utilizando a equação 2.77.

3.6.4 Verificação ELU Forças transversais localizadas

As verificações ELU das forças transversais localizadas, serão realizadas conforme descrito no item 2.9.4 da revisão bibliográfica, para verificação de escoamento da alma utilizar as equações 2.94 e 2.95, para enrugamento da alma utilizar as equações 2.96, 2.97 e 2.98, para flambagem lateral da alma utilizar as equações 2.99 e 2.100 e por último para a verificação de flambagem da alma por compressão, utilizar a equação 2.101

3.7 Verificações ELS segundo NBR 8800

Após definidas as solicitações e resistência de cálculo é possível fazer todas as verificações de estado limite último de serviço, conforme a NBR 8800:2008. utilizando as equações descritas na parte 2.10 da revisão bibliográfica, abaixo são mostradas quais verificações se aplicam:

3.7.1 Fadiga

Mesmo não havendo necessidade da verificação de fadiga para viga de rolamento estudada, pois a ponte rolante possui um número de utilização inferior a 20.000 ciclos na sua vida útil. Porém, se faz necessária para um completo dimensionamento da viga de rolamento.

A verificação da fadiga é realizada comparando a tensão solicitante na seção crítica da viga de rolamento com a faixa admissível de variação de tensões recomendada pela NBR 8800 (ABNT, 2008), equação 2.106.

Adotaremos assim como Fabeane *et al* (2012) a seção crítica para ocorrência do fenômeno de fadiga, a solda do filete utilizada no pé do enrijecedor, localizado na metade do vão da viga de rolamento. A tensão solicitante nesse local é calculada com a equação 3.1.

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} \cdot y \quad (3.1)$$

Onde:

σ – Tensão solicitante;

M_x – Momento solicitante no eixo de maior inércia;

I_x – Momento inércia no eixo de maior inércia;

y – Distância que o pé do enrijecedor está afastado do centroide da seção transversal.

3.7.2 Deslocamento vertical

A verificação de deslocamento vertical é realizada, comparando os valores calculados nas equações 2.107 e 2.108 com os valores recomendados pela NBR 8800:2008 contidos na Tabela 4.

3.7.3 Deslocamento horizontal

A verificação de deslocamento horizontal é realizada, comparando os valores calculados nas equações 2.109 com os valores recomendados pela NBR 8800:2008 contidos na Tabela 4.

4 ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES

Neste capítulo será desenvolvido um dimensionamento completo de uma viga de rolamento, para aplicar de maneira prática os critérios de dimensionamento pela NBR 8800:2008. Para os cálculos utilizados neste trabalho, os carregamentos se restringem apenas os provenientes da ponte rolante, ou seja, será um modelo local, sem considerações externas de vento ou outros componentes do galpão metálico. Além dessa consideração, vale a pena comentar que as cargas provenientes da ponte rolante são aplicadas na mesa superior da viga.

A seguir de acordo com a metodologia, capítulo 3, será iniciado o dimensionamento de uma viga rolamento com dados retirados de um projeto já existente.

4.1 Dados da viga de rolamento

O perfil da viga de rolamento (Figura 16) é um perfil I soldado assimétrico, com dimensões específicas para esse galpão metálico, ou seja, não estão catalogadas por fabricantes.

Na Tabela 5 são apresentados dados do perfil que serão utilizados no dimensionamento.

4.2 Dados da ponte rolante

O tipo de ponte rolante é a dupla viga, como visto na Figura 19, Figura 20, Figura 21, os dados e as especificações técnicas disponibilizadas pela fabricante são apresentadas na Tabela 6:

4.3 Definição dos carregamentos e combinação de ações

De acordo com as tabelas do item 3.3 da metodologia, são calculadas as cargas provenientes da ponte rolante.

4.3.1 Carga vertical móvel

$$P = C_v + 10\%$$

$$P = 148,77 * 1,10 = 163,65 \text{ kN/roda}$$

4.3.2 Cargas horizontais transversais

A)

$$H_T = \frac{(PP_{Trole} + C_I)}{N_{Rodas}} * 10\%$$

$$H_T = \frac{(53,94 + 637,43)}{4} * 10\% = 17,18 \text{ kN}$$

B)

$$H_T = \frac{(PP_{Ponte} + C_I)}{N_{Rodas}} * 5\%$$

$$H_T = \frac{(152 + 637,43)}{4} * 5\% = 9,86 \text{ kN}$$

C)

$$H_T = \frac{C_I}{N_{Rodas}} * 15\%$$

$$H_T = \frac{637,43}{4} * 15\% = 23,90 \text{ kN}$$

A carga horizontal transversal adotada é a maior entre os valores calculados acima nos itens A, B e C. Portanto será utilizada no dimensionamento $H_T = 23,90 \text{ kN}$

4.3.3 Cargas horizontais longitudinais

$$H_L = C_v * 10\%$$

$$H_L = 148,77 * 10\% = 14,88 \text{ kN}$$

4.3.4 Combinação das ações

$$F_d = q + 1,5 \times (F_V + F_T + F_L)$$

Sendo:

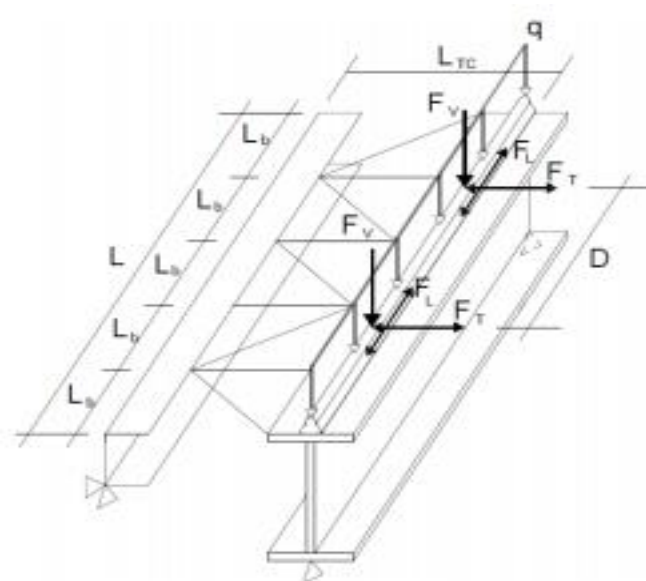
$$q = 1,25 \times PP + 1,25 \times PP_{Trilho} = 1,25 \times 225,62 + 1,25 \times (44,64) = \frac{337,82 \text{ kg}}{\text{m}} = 3,31 \text{ kN/m}$$

$$F_V = 1,50 \times P = 1,5 \times 163,65 \text{ kN} = 245,50 \text{ kN}$$

$$F_T = 1,50 \times H_T = 1,5 \times 27,93 = 41,90 \text{ kN}$$

$$F_L = 1,50 \times H_L = 1,5 \times 14,88 = 22,32 \text{ kN}$$

Figura 22 – Esquema de aplicação do carregamento combinado na viga de rolamento



Fonte: Sena, 2017

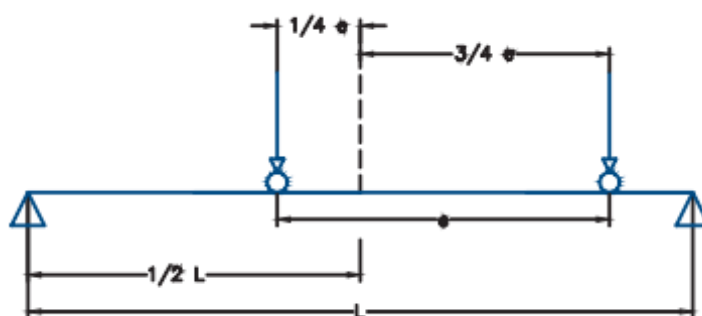
4.4 Definição das solicitações de cálculo

Para o dimensionamento da estrutura é necessário conhecer os valores máximos e mínimos que ela solicitará ao ser submetida ao carregamento combinado. Para o esforço cortante e momento fletor será utilizado o *software* Ftool, que fornece as linhas de influência do trem-tipo do carregamento móvel aplicado sobre a viga de rolamento.

4.4.1 Momento fletor solicitante

Para montar o trem tipo no *software* Ftool além do carregamento combinado é necessário saber qual posição o carregamento irá proporcionar maior flexão. No artigo de Machado (2014) utilizou-se uma pratica citada no 7º *Steel Design Guide* do AISC, para identificar a situação mais desfavorável para o cálculo do momento fletor máximo, conforme Figura 23.

Figura 23 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior flexão

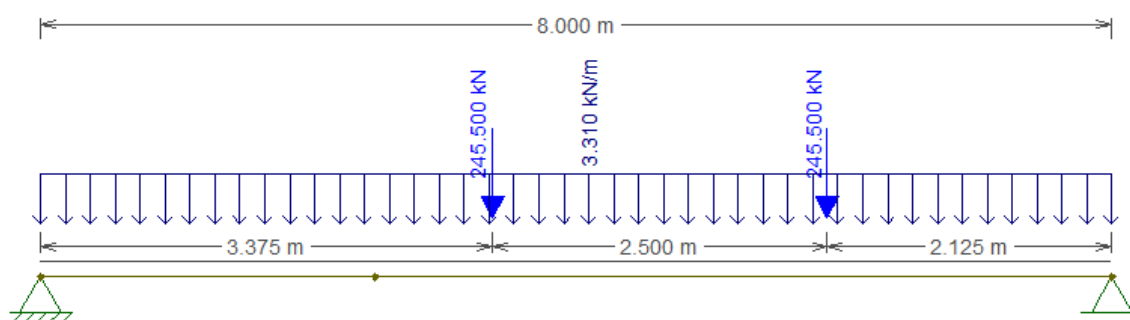


Fonte: Machado, 2014

Após saber o posicionamento das rodas para maior momento fletor, é necessário identificar a distância entre estas. A ponte estudada possui quatro rodas, que são divididas em dois pares. Portanto a distância entre esses pares será utilizada no dimensionamento, de 2,5m (Figura 21).

A viga de rolamento estudada possui 8m, abaixo são mostradas as posições das cargas aplicadas.

Figura 24 – Cargas combinadas aplicadas no Ftool para obtenção do momento fletor máximo



Fonte: Autor

Figura 25 – Valores de momento fletor máximo encontrado no Ftool



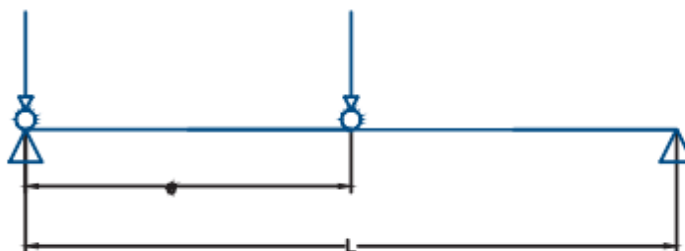
Fonte: Autor

O Momento fletor encontrado no ftool é aproximadamente: $724,95 \text{ kN.m} = 72465 \text{ kN.cm}$ conforme Figura 25.

4.4.2 Esforço cortante solicitante

Para Machado (2014) o esforço cortante solicitante, a configuração de carregamento mais desfavorável ocorre quando uma das rodas do trole está exatamente sobre o apoio, conforme Figura 26.

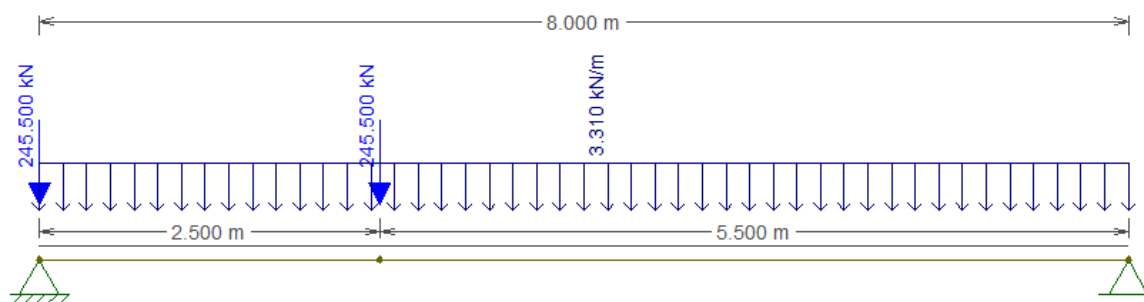
Figura 26 – Posicionamento das rodas do trole no vão da viga de rolamento para maior esforço cortante.



Fonte: Machado, 2014

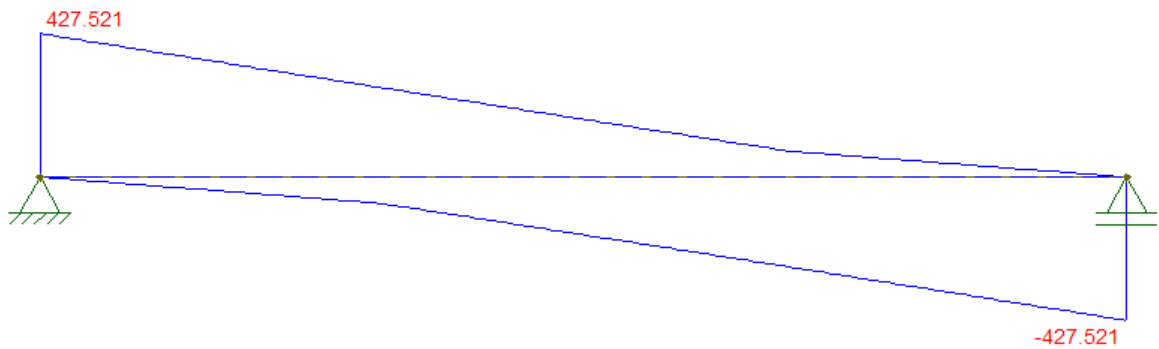
A viga de rolamento estudada possui 8m, abaixo são mostradas as posições das cargas aplicadas.

Figura 27 – Cargas combinadas aplicadas no Ftool para obtenção do esforço cortante máximo valores Ftool



Fonte: Autor

Figura 28 - Valores de esforço cortante máximo encontrado no Ftool



Fonte: Autor

O esforço cortante encontrado no ftool é aproximadamente: 427,52 kN.

4.4.3 Esforço normal solicitante

O esforço normal solicitante, para um trem tipo de n rodas, é dada Equação 2.2:

$$N_{c,Sd} = nF_L$$

$$N_{c,Sd} = 4 \times 22,32 = 89,28 \text{ kN}$$

4.4.4 Tensão normal solicitante

A tensão normal máxima que atua em um ponto da seção transversal da viga de rolamento, é dada pela equação 2.3:

$$\sigma_{sd} = \frac{N_{c,Sd}}{A_g} + \frac{M_{Sd}}{W_x}$$

$$\sigma_{sd} = \frac{89,28}{254} + \frac{724,95 \times 100}{8313,85} = 9,07 \text{ kN/cm}^2$$

4.5 Verificações ELU segundo NBR 8800:2008

4.5.1 Momento fletor resistente

Primeiramente deve verificar a esbeltez segundo a equação 2.56.

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} > 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{2(d - t_{fs} - y_{cg})}{t_w} > 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} =$$

$$\frac{2(103,5 - 1,9 - 57,86)}{0,95} > 5,70 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 92,02 > 161,22$$

O resultado mostra que a viga é não esbelta, portanto, segue procedimento (equação 2.13 e 2.14).

$$\frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9$$

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} = \frac{t_{fs} b_f^3 / 12}{t_{fi} b_i^3 / 12} = \frac{1,9 \times 50^3 / 12}{1,6 \times 40^3 / 12} = 2,32$$

$$A_{fi} + A_w > A_{fs} = b_{fi} t_{fi} + t_w h > b_{fs} t_{fs}$$

$$40 \times 1,6 + 0,95 \times 100 > 50 \times 1,9 = 159 > 95$$

Agora é necessário calcular os momentos resistentes de FLT, FLM e FLA.

a) Estado-Limite Ultimo de flexão Lateral com torção (FLT)

Primeiramente é necessário classificar a viga de acordo com o índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{L_b}{r_{yc}} = \frac{92,5}{12,17} = 7,60$$

$$r_{yc} = \sqrt{I_y^T / A^T} = \sqrt{19794,79 / 133,55} = 12,17$$

$$I_y^T = \frac{t_{fs} b_{fs}^3}{12} + \frac{[d - t_f - y_{cg}] t_w^3}{12} = \frac{1,9 \times 50^3}{12} + \frac{(103,5 - 1,9 - 57,86) \times 0,95^3}{12} = 19794,79$$

$$A^T = b_{fs} t_{fs} + (d - t_f - y_{cg}) t_w = 50 \times 1,9 + (103,5 - 1,9 - 57,86) \times 0,95 = 133,55$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 49,78$$

De acordo com os resultados a classificação da viga é: seção compacta ($\lambda \leq \lambda_p$). Portanto o momento resistente para a flexão lateral com torção para vigas monossimétricas é calculado segundo a equação 2.19

$$M_{RD} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}}$$

$$M_{pl} = f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_{x,min} = 25 \times 8492,09 \leq 1,5 \times 25 \times 8313,85 = 212302,03 \leq 311769,38$$

$$M_{RD} = \frac{212302,03}{1,1} = 193001,85 \text{ kN.cm}$$

b) Estado-Limite Ultimo de flexão Local da mesa (FLM)

Como no FLT é necessário classificar a viga de acordo com o índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_{fs}/2}{t_{fs}} = \frac{50/2}{1,9} = 13,16$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 7,92$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{\frac{(f_y - \sigma_{r2})}{K_c}}} = 0,95 \sqrt{\frac{20000}{\frac{(25 - 0,3 \times 25)}{0,39}}} = 21,48$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{\frac{100}{0,95}}} = 0,39$$

$$0,35 \leq 0,39 \leq 0,76$$

De acordo com os resultados a classificação é: seção semi compacta ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$). Portanto o momento resistente para a flexão local da mesa para vigas monossimétricas é calculado segundo a equação 2.37.

$$\begin{aligned} M_{RD} &= \frac{1}{\gamma_{al}} \left[M_{pl2} - (M_{pl2} - M_{r2}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \\ &= \frac{1}{1,1} \left[212302,03 - (212302,03 - 184447,9) \frac{13,16 - 7,92}{21,48 - 7,92} \right] \\ &= 183126,29 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pl2} &= f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_{x,min} = 25 \times 8492,09 \leq 1,5 \times 25 \times 8313,85 \\ &= 212302,03 \text{ kN.cm} \leq 311769,38 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

$$M_{r2} = (f_y - \sigma_{r2}) W_x^{sup} = (25 - 0,3 \times 25) \times 10539,88 = 184447,9 \text{ kN.cm}$$

c) Estado-Limite Ultimo de flexão Local da alma (FLA)

Os momentos resistentes para a flexão local da alma são calculados segundo as equações a seguir.

Sendo:

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} = \frac{2(103,5 - 1,9 - 57,86)}{0,95} = 92,02$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r = \frac{\frac{87,48}{99,7} \sqrt{\frac{20000}{25}}}{\left(0,54 \frac{212302,03}{207846,25} - 0,09\right)^2} = \frac{8721,76}{0,213} = 116,51$$

$$\begin{aligned} M_{pl3} &= f_y Z_x \leq 1,5 f_y W_x = 25 \times 8492,09 \leq 1,5 \times 25 \times 8313,85 \\ &= 212302,03 \text{ kN.cm} \leq 311769,38 \text{ kN.cm} \end{aligned}$$

$$M_{r3} = f_y W_x = 25 \times 8313,85 = 207846,25$$

$$h_c = 2(d - t_{fs} - y_{cg}) = 2 \times (103,5 - 1,9 - 57,86) = 87,42$$

$$h_p = 2(d - t_{fs} - y_p) = 2 \times (103,5 - 1,9 - 51,75) = 99,7$$

Para: $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{RD} = \frac{M_{pl3}}{\gamma_{al}} = \frac{212302,03}{1,1} = 193001,84 \text{ kN.cm}$$

Após calcular o momento fletor resistente de FLT, FLM e FLA, toma-se o maior valor para verificação de ELU.

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} = 72500 \leq 193001,84$$

Portanto, a viga de rolamento atende o ELU de momento fletor.

4.5.2 Esforço Cortante resistente

4.5.2.1 Esforço cortante resistente na alma

Primeiramente calcula-se o índice de esbeltez para encontrar em que intervalo se localiza a viga de rolamento.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{100}{0,95} = 105,26 \leq 260$$

Para encontrar λ_p é necessário encontrar o k_v , que tem como valor de 5 se atender as verificações a seguir.

Verificação 1

$$\frac{a}{h} = \frac{92,5}{100} = 0,925 > 3$$

Não atende.

Verificação 2

$$\frac{a}{h} = \frac{92,5}{100} = 0,925 > \left[\frac{260}{(100/0,95)} \right]^2 = 6,10$$

Não atende.

Como não foi atendido nenhuma das verificações, será necessário calcular o k_v .

$$k_v = 5,0 + \frac{5}{(a/h)^2} = 5,0 + \frac{5}{(92,5/100)^2} = 10,84$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{10,84 * 20000}{25}} = 102,44$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,37 \sqrt{\frac{10,84 * 20000}{25}} = 127,58$$

Como o intervalo de esbeltez é $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ o esforço cortante é calculado conforme a equação 2.6:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} = \frac{102,44}{105,26} * \frac{1474,88}{1,10} = 1304,88 \text{ kN}$$

$$V_{pl} = 0,60 A_W f_y = 0,60 * 98,32 * 25 = 1474,88 \text{ kN}$$

$$A_W = dt_W = 103,5 * 0,95 = 98,32 \text{ cm}^2$$

4.5.2.2 Esforço cortante resistente na mesa

Primeiramente calcula-se o índice de esbeltez para encontrar em que intervalo se localiza a viga de rolamento.

$$\lambda = \frac{b_{fs}/2}{t_{fs}} = \frac{50/2}{1,9} = 13,16$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{1,2 * 20000}{25}} = 34,08$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,37 \sqrt{\frac{1,2 * 20000}{25}} = 42,44$$

Como o intervalo de esbeltez é $\lambda < \lambda_p$ o esforço cortante é calculado conforme a equação 2.5:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} = \frac{1425}{1,10} = 1295,45 \text{ kN}$$

$$V_{pl} = 0,60 b_{fs} t_{fs} f_y = 0,60 * 50 * 1,9 * 25 = 1425 \text{ kN}$$

Após calcular o esforço cortante resistente é possível verificar se a viga de rolamento atende a equação 2.5.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = 427,52 \leq 1304,88$$

Portanto, a viga de rolamento atende o ELU de esforço cortante.

4.5.3 Tensão normal de cálculo

De acordo com o item 5.5.2.3 da NBR 8800 (ABNT, 2008), a tensão normal resistente de cálculo para o ELU de instabilidade ou flambagem, sob efeito de tensão normal, é dada pela equação 2.77.

$$\sigma_{Rd} = \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}}$$

De acordo com o item 5.3.3.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008) o fator de redução devido a flambagem global (χ) é dado pelas equações 2.78 e 2.79:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658\lambda_0^2 = 0,658^{0,54^2} = 0,893$$

A esbeltez reduzida (λ_0) é dada pela equação 2.80:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{0,80 \times 254 \times 25}{17492,44}} = 0,54 < 1,5$$

Utilizar a equação 2.78 para o cálculo da flambagem global

O fator de redução devido à flambagem local (Q) é calculado de acordo com a equação 2.81, segundo o Anexo F da NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$Q = Q_s Q_a = 1 \times 0,80 = 0,80$$

No caso de viga de rolamento o fator Q_s que consta na equação 2.81 é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da mesa superior desta viga.

Valores de Q_s para perfis laminados

Os valores de Q_s para vigas de rolamento com perfil I ou H laminado é dado pelas equações 2.82, 2.83 e 2.84 e depende da esbeltez local da mesa superior:

Para:

$$\frac{b_{fs}/2}{t_{fs}} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{50}{1,9} \leq 0,56 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 6,58 \leq 15,84$$

$$Q_s = 1$$

Valores de Q_a

No caso de viga de rolamento o fator Q_a que consta na equação 2.81 é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da alma desta viga, sendo dado ou pela equação 2.31, ou pela equação 2.32, a depender da esbelteza da alma.

$$\frac{h}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{100}{0,95} \leq 1,49 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 105,26 \leq 42,14 \text{ não ok!}$$

$$\frac{h}{t_w} > 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{100}{0,95} > 1,49 \sqrt{\frac{20000}{25}} = 105,26 > 42,14$$

Utilizar esta equação

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{203,6}{254} = 0,80$$

$$A_{ef} = A_g - (h - h_{ef})t_w = 254 - (100 - 46,95) \times 0,95 = 203,6$$

$$h_{ef} = 1,92t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{h/t_w} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq h = 1,92 \times 0,95 \sqrt{\frac{20000}{25}} \left[1 - \frac{0,34}{100/0,95} \sqrt{\frac{20000}{25}} \right] \leq h$$

$$1,92 \times 0,95 \sqrt{\frac{20000}{25}} \left[1 - \frac{0,34}{100/0,95} \sqrt{\frac{20000}{25}} \right] \leq h = 46,95 \leq 100$$

O cálculo da carga crítica de flambagem global elástica (N_e) é feito de acordo com o Anexo E da NBR 8800 (ABNT, 2008). No caso de viga de rolamento biapoiada com a mesa superior contida lateralmente por treliça de contenção, considera-se: $K_x = K_y = K_z = 1$; $L_x = L$; $L_y = L_z = L_b$.

Valor de N_e para perfil I monossimétrico

No caso de viga de rolamento com seção transversal em perfil I monossimétrico, N_e é o menor valor entre os fornecidos pelas equações 2.88 e 2.89.

Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal da viga, é dado na equação 2.89:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 481039,3}{800^2} = 148364,61$$

$$N_{ex} = 148364,61 > N_{eyz} = 17492,44$$

Vai ser usado o valor de $N_{eyz} = 17492,44$ para o da esbelteza reduzida

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{L_b^2} + GJ \right] = \frac{1}{45,93^2} \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 61730871,43}{92,5^2} + 7700 \times 198 \right] = 675.803,56$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 28332,14}{92,5^2} = 653620,48$$

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{\frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{eyz} = \frac{653620,48 + 675805,56}{2[1 - (10,23/45,93)^2]} \left[1 - \sqrt{\frac{4 \times 653620,48 \times 675805,56 \times [1 - (10,23/45,93)^2]}{(653620,48 + 675805,56)^2}} \right]$$

$$N_{eyz} = 17492,44$$

Sendo:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 28332,14}{92,5^2} = 653620,48$$

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + y_0^2)} = \sqrt{(43,52^2 + 10,56^2 + 10,23^2)} = 45,93$$

$$y_0 = \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \frac{b_{fs}^3}{b_{fs}^3 + b_{fi}^3} + \frac{t_{fi}}{2} - y_{cg} = \left(103,5 - \frac{1,9 + 1,6}{2} \right) \frac{50^3}{50^3 + 40^3} + \frac{1,6}{2} - 57,86$$

$$y_0 = 67,29 + 0,8 - 57,86 = 10,23$$

$$J = \frac{[b_{fs}t_{fs}^3 + \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) t_w^3 + b_{fi}t_{fi}^3]}{3}$$

$$= \frac{[50 \times 1,9^3 + \left(103,5 - \frac{1,9 + 1,6}{2} \right) 0,95^3 + 40 \times 1,6^3]}{3} = 198,00$$

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right)^2}{12} \left(\frac{t_{fi}b_{fi}^3 t_{fs}b_{fs}^3}{t_{fi}b_{fi}^3 + t_{fs}b_{fs}^3} \right) = \frac{\left(103,5 - \frac{1,9 + 1,6}{2} \right)^2}{12} \left(\frac{1,6 \times 40^3 \times 1,9 \times 50^3}{1,6 \times 40^3 + 1,9 \times 50^3} \right)$$

$$C_w = 61730871,43$$

Após o encontrar o fator de redução devido a flambagem global, é possível calcular a tensão normal resistente, que é dada pela equação 2.77. Esta tensão resistente deve ser igual ou superior à tensão normal solicitante.

$$\sigma_{Rd} = \frac{\chi f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,893 * 25}{1,1} = 20,29$$

$$\sigma_{sd} \leq \sigma_{Rd} = 9,07 \leq 20,29$$

Portanto, a viga de rolamento atende o ELU de tensão normal.

4.5.4 Verificação ELU Forças transversais localizadas

4.5.4.1 ELU de escoamento local da alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) na verificação do estado limite ultimo de escoamento local a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

$$F_{sd} = 1,5 \times P = 1,5 \times 148,77 = 223,15$$

$$F_{Rd} = \frac{1,10(2,5k + l_n)f_y t_w}{\gamma_{a1}} = \frac{1,10 \times (2,5 \times 2,61 + 32,38) \times 25 \times 0,95}{1,1} = 924 \text{ kN}$$

$$k = d_w + t_{fs} = 0,75 \times t_w + t_{fs} = 0,75 \times 0,95 + 1,9 = 2,61$$

$$l_n = 2x(d_{tr} + t_{fs}) = 2x(14,29 + 1,9) = 32,38$$

$$F_{sd} \leq F_{Rd} = 223,15 \leq 924$$

Portanto, a viga de rolamento atende ELU de escoamento local da alma.

4.5.4.2 ELU de enrugamento da alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) na verificação do estado limite ultimo de enrugamento a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

$$\text{Para } l_n/d > 0,2 = 32,38/93,5 > 0,20 = 0,35 > 0,20$$

$$\begin{aligned} F_{Rd} &= \frac{0,33t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + \left(\frac{4l_n}{d} - 0,2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \\ &= \frac{0,33 \times 0,95^2}{1,1} \times \left[1 + \left(\frac{4 \times 32,38}{93,5} - 0,2 \right) \times \left(\frac{0,95}{1,9} \right)^{1,5} \right] \times \sqrt{\frac{20000 \times 25 \times 1,9}{0,95}} \end{aligned}$$

$$= 384,20 \text{ kN}$$

$$F_{Sd} \leq F_{Rd} = 223,15 \leq 384,20$$

Portanto, a viga de rolamento atende ELU de enrugamento da alma.

4.5.4.3 ELU de flambagem lateral da alma

Segundo a NBR 8800 (ABNT,2008) a força solicitante de cálculo não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada por:

$$(100/0,95)/(92,5/50) = 56,90 > 2,30$$

flambagem lateral da alma não tem possibilidade de acontecer.

4.5.4.4 ELU de flambagem da alma por compressão

Segundo NBR 8800 (ABNT,2008) a força solicitante de cálculo (valor de cada força do par) não pode superar a força resistente de cálculo da alma da barra, dada pela equação 2.101:

$$F_{Rd} = \frac{24t_w^3 \sqrt{E f_y}}{\gamma_{a1} h} = \frac{24 \times 0,95^3 \sqrt{20000 \times 25}}{1,10 \times 100} = 132,27 \text{ kN}$$

Quando o par de forças concentradas se encontra a uma distância da extremidade da viga menor que metade da altura da seção transversal, a força resistente dada em deve ser reduzida à metade.

4.6.1 Enrijecedores transversais intermediários

Em relação ao enrijecedores será apenas avaliada a relação entre largura e espessura dos elementos que formam os enrijecedores não pode ultrapassar:

$$\frac{b_e}{t_e} \leq 0,56 \sqrt{E/f_y}$$

$$= \frac{120}{9,5} \leq 0,56 \sqrt{20000/25} = 12,63 \leq 15,84$$

Relação foi atendida.

O momento de inércia da seção de um enrijecedor singular ou de um par de enrijecedores (um de cada lado da alma) em relação ao eixo no plano médio da alma não pode ser inferior a 2.103:

$$I \geq at_w^3 \left[\frac{2,5}{(a/h_w)^2} - 2 \right] \geq 0,5at_w^3 = 950x9,5^3 \left[\frac{2,5}{(950/1000)^2} - 2 \right] \geq 0,5x950x9,5^3$$

$$= 627237,50 \geq 407253,13$$

Relação foi atendida.

4.6.2 Enrijecedores de apoio à viga

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) para evitar a flambagem local do enrijecedor, recomenda-se que a relação largura-espessura do mesmo não exceda:

$$\frac{b_e}{t_e} \leq 0,56 \sqrt{E/f_y}$$

$$= \frac{185}{16} \leq 0,56 \sqrt{20000/25} = 11,56 \leq 15,84$$

Relação foi atendida.

4.7 Verificações ELS segundo NBR 8800:2008

4.7.1 Fadiga

A verificação da fadiga é realizada comparando a tensão solicitante (equação 3.1) na seção crítica da viga de rolamento com a faixa admissível de variação de tensões recomendada pela NBR 8800 (ABNT, 2008), equação 2.106.

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} \cdot y = \frac{72495}{481039,3} \cdot 46,35 = 69,85 \text{ MPa}$$

$$y = \frac{d}{2} - t_f - 4xt_w = \frac{103,5}{2} - 1,6 - 4 \times 0,95 = 46,35$$

A faixa admissível de variação de tensões é calculado segundo a equação 2.106.

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{182500} \right)^{0,333} = 197,97$$

$$\sigma_{SR} \geq \sigma_{TH} = 197,97 \geq 69$$

Como a tensão calculada está abaixo da faixa de variação de tensão, conclui-se que a região analisada não está susceptível a ocorrência do problema de fadiga.

O C_f a constante dada na tabela K.1 da NBR 8800:2008, para o caso é:

$$C_f = 44 \times 10^8$$

N que é o número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da ponte rolante, para o caso em questão, utilizaremos um valor de 10 ciclos por dia durante 50 anos de vida útil, totalizando $N = 182.500$ ciclos.

σ_{TH} é o limite admissível da faixa de variação de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, dado na tabela K.1, sendo $\sigma_{TH} = 69$ Mpa.

4.7.2 Deslocamento

4.7.2.1 Deslocamento vertical referente ao peso próprio

O deslocamento vertical referente ao peso próprio pode ser encontrado de acordo com a equação 2.107.

$$\delta = \frac{5 \times PP \times L^4}{384 \times E \times I_x} = \frac{5 \times 22,562 \times 800^4}{384 \times 20000000 \times 481039,3} = 0,0125 \text{ cm}$$

4.7.2.2 Deslocamento vertical referente à carga vertical por roda

$$\delta = \frac{C_{MV} \times a}{24 \times E \times I_x} \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2) = \frac{148770 \times 275}{24 \times 20000000 \times 481039,3} \times (3 \times 800^2 - 4 \times 275^2) = 0,05 \text{ cm}$$

$$C_{MV} = 148,77 \text{ kN} = 148770 \text{ N}$$

$$a = \frac{800 - 250}{2} = 275 \text{ cm}$$

Deslocamento vertical total:

$$\delta_{VT} = 0,0125 + 0,05 = 0,0625 \text{ cm}$$

Verificação:

$$0,0625 < \frac{L}{800} = 0,0625 < 1$$

Portanto, a viga de rolamento não possui deslocamento vertical.

4.7.2.3 Deslocamento horizontal referente à frenagem do trole por roda

$$\delta = \frac{H_T \times a}{24 \times E \times I_y} \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2) = \frac{23900 \times 275}{24 \times 20000000 \times 28332,14} \times (3 \times 800^2 - 4 \times 275^2)$$

$$= ,146\text{cm}$$

Verificação:

$$0,0625 < \frac{L}{600} = 0,146 < 1,33$$

Portanto, a viga de rolamento não possui deslocamento horizontal.

4.7.3 Estudo da Fadiga

Este item será um estudo científico referente a fadiga nas vigas de rolamento. O estudo vai consistir em uma análise gráfica da variação do número de ciclos (N) de uma ponte rolante e no que isso irá implicar na faixa de variação de tensões (σ_{SR}).

No total será considerado 5 ciclos diferentes, o C_f a constante dada na tabela K.1 da NBR 8800:2008, para o caso é: $C_f = 44 \times 10^8$, como no item 4.7.1.

- $N = 10 \times 365 \times 50 = 182.500$ ciclos
- $N = 25 \times 365 \times 50 = 456.250$ ciclos
- $N = 50 \times 365 \times 50 = 912.500$ ciclos
- $N = 75 \times 365 \times 50 = 1.368.750$ ciclos
- $N = 100 \times 365 \times 50 = 1.825.000$ ciclos

Onde:

N = ciclos por dia x dias no ano (365 dias) x vida útil da viga de rolamento (50 anos)

A seguir será calculado da faixa de variação de tensões (σ_{SR}) para cada caso.

$$\sigma_{SR1} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{182500} \right)^{0,333} = 197,97$$

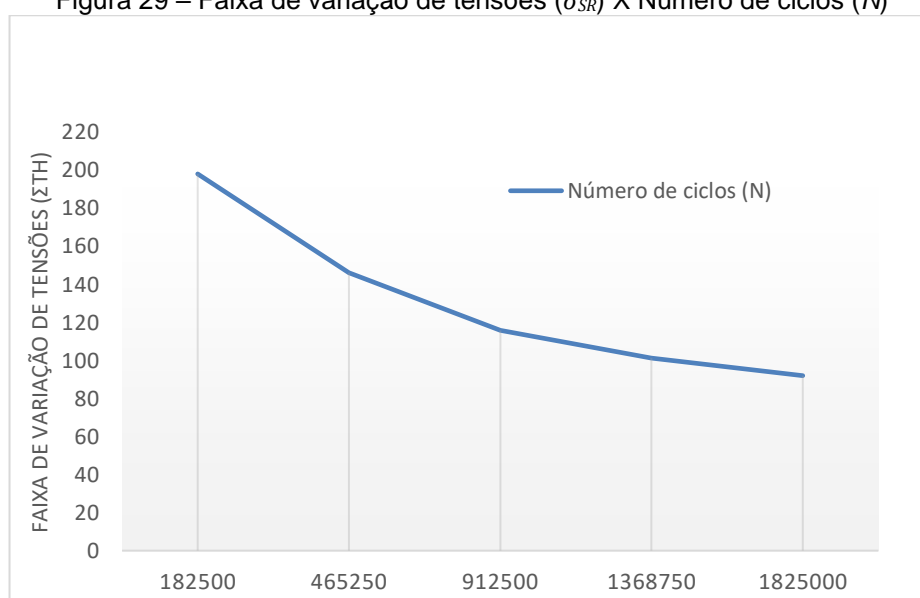
$$\sigma_{SR2} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{456250} \right)^{0,333} = 145,91$$

$$\sigma_{SR3} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{912500} \right)^{0,333} = 115,84$$

$$\sigma_{SR4} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{1368750} \right)^{0,333} = 101,21$$

$$\sigma_{SR5} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327,44 \times 10^8}{1825000} \right)^{0,333} = 91,96$$

Figura 29 – Faixa de variação de tensões (σ_{SR}) X Número de ciclos (N)



Fonte: autor

O gráfico (figura 29) analisa a relação de ciclos e suas variações. Após os cálculos aplicados deu-se como resultado que quanto maior o número de ciclos, menor será a faixa de variação.

5 CONCLUSÕES

Através desse trabalho, pode-se concluir que a viga de rolamento possui um dimensionamento diferente de uma viga comum, existe dois fatores que as diferenciam, o primeiro é que a viga de rolamento há um passo a mais para encontrar os esforços solicitantes. Por ser utilizada no deslocamento de pontes rolantes, possui um carregamento dinâmico, o qual se faz necessário a utilização de um trem-tipo, em que este fornece linhas de influência que possibilitam encontrar-se os esforços solicitantes.

Outro fator é sobre seu carregamento ser cíclico, essa característica permite que a viga sofra um fenômeno chamado de fadiga. Os estudos da fadiga apresentados neste trabalho, mostram que a variação do número de ciclos de uma ponte rolante pode implicar na faixa de variação de tensões, a Figura 29 mostra que apenas valores fora dos padrões de utilização podem ocasionar um risco a durabilidade da viga de rolamento.

Outro item abordado no projeto é em relação as verificações de Estado Limite Último (ELU), os resultados apontaram que os valores estão muito abaixo aos esforços solicitantes, logo assim a viga de rolamento não sofrerá ruptura.

Os estudos realizados para o desenvolvimento do projeto de conclusão de curso foram imensamente enriquecedores, pois se fez necessário um grande aprofundamento teórico e prático que envolvem os processos de dimensionamento. O projeto também demonstrou ser de grande relevância para estudantes e profissionais que possuam interesse em se aprofundar no ramo de dimensionamento de pontes rolantes, servindo de apoio e guia teórico para aplicação de cálculos e afins.

6 REFERÊNCIAS

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.

SENA, Larissa Veras Torquato. **Contribuições ao dimensionamento de vigas de rolamento em aço com contenção lateral entre os apoios**. 2017. 227f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SORDI, Giovani. **DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRINCIPAL DE UMA PONTE ROLANTE**. 2016. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

CASTRO, Igor Lopes de. **CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E CONTÍNUOS EMBARCADOS EM CLP PARA ACIONAMENTO DE PONTES ROLANTES**. 2017. 113 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luiz, 2017.

LEITE, L. R. S. **Análise numérica de vigas de rolamento de aço sem contenção lateral entre apoios**. 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2017.

SALGADO, R. A.; Calenzani, A. F. G.; Ferreira, W. G. **Análise estrutural e dimensionamento de vigas de rolamento de aço de acordo com a NBR 8800:2008**. XXXIV CILAMCE, 2013. Pirenópolis, Goiás.

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

BELLEI, I. H., 2010. Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo. São Paulo: PINI.

PFEIL, W. PFEIL, M. **Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático**. 9° ed. Rio de Janeiro, 2009.

PINHO, F. O. **Galpões em Pórticos de Aço**. *Construção Metálica*, n.70, Mai-Jun, 2005.

FABEANE, Ricardo; FICANHA, Ricardo A.; PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. VERIFICAÇÃO A FADIGA DE VIGAS DE ROLAMENTO DE PONTES ROLANTES INDUSTRIAIS. **Congresso Latinoamericano da Construção Metálica**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 10-14, ago. 2012.