

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE SANTOS CARDOSO

SARAH CELIAC BUENO CARDOSO

**ESTUDO DE VIGAS METÁLICAS DE ROLAMENTO EM
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS**

ANÁPOLIS / GO

2020

ALEXANDRE SANTOS CARDOSO
SARAH CELIAC BUENO CARDOSO

**ESTUDO DE VIGAS METÁLICAS DE ROLAMENTO EM
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: ROGÉRIO SANTOS CARDOSO

ANÁPOLIS / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

CARDOSO, ALEXANDRE SANTOS/ CARDOSO, SARAH CELIAC BUENO

Estudo De Vigas Metálicas de Rolamento Em Edifícios Industriais.

105P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Vigas de Rolamento | 2. Estrutura Metálica |
| 3. Pontes Rolantes | 4. Edifícios Industriais |
| I. ENC/UNI | II. Bacharel |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDOSO, Alexandre Santos; CARDOSO, Sarah Celiac Bueno. **Estudo De Vigas Metálicas de Rolamento Em Edifícios Industriais**. 2020. 105 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis, 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alexandre Santos Cardoso

Sarah Celiac Bueno Cardoso

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo das Vigas Metálicas de Rolamento – Para Edifícios Industriais.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2020

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Alexandre Santos Cardoso
E-mail: alex.7.s.@hotmail.com



Sarah Celiac Bueno Cardoso
E-mail: sarahceliac@gmail.com

ALEXANDRE SANTOS CARDOSO
SARAH CELIAC BUENO CARDOSO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL

APROVADO POR:

ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADOR)

GLEDISTON NEPOMUCENO COSTA, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)

FILIPE FONSECA GARCIA, Especialista (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, \01 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, criador supremo, autor e sustentador de nossas vidas, que nos deu saúde, inteligência e persistência para seguirmos em cada fase do curso, superando todas as dificuldades até chegarmos aqui, na conclusão da nossa graduação.

Aos nossos familiares, que sempre nos incentivaram desde o primeiro momento e que nunca nos faltaram em nenhum momento de nossas fraquezas.

Ao nosso orientador, que se fez presente em todo o processo do trabalho: escolha do tema, orientação, ensino e nas diversas correções.

À instituição UniEVANGÉLICA, na figura de seus todos seus funcionários e colaboradores, que foram sempre pontuais em suas atribuições, nos entregando o melhor de seus conhecimentos e de suas longanimidades. Em toda nossa graduação sempre foi nos dado um canal de comunicação entre nós, alunos, e os docentes, e isso faz total diferença na formação do bom profissional.

Alexandre Santos Cardoso

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e iluminado durante esses cinco anos de faculdade.

Aos meus pais, por sempre terem me apoiado, e por todo o investimento na minha educação.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador Rogério Santos Cardoso, que tenho a honra de chamar de pai. Agradeço pela dedicação e paciência durante este projeto. Serei eternamente grata pelo compartilhamento dos seus conhecimentos, que fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho, e na minha vida acadêmica.

E agradeço também à faculdade Unievangélica, e a todos os professores da Engenharia Civil que sempre proporcionaram um ensino de qualidade.

Sarah Celiac Bueno Cardoso

RESUMO

Vigas de rolamento são responsáveis por sustentarem o caminho de rolamento das pontes rolantes e, além disso, transmitem os esforços por elas causados aos outros elementos estruturais de suporte. Porém, por mais que as vigas de rolamento sejam fundamentais para a sustentação de pontes rolantes em galpões industriais, ainda são poucas as literaturas que se aprofundam neste assunto, e pensando nisso que o presente trabalho foi desenvolvido. Como objetivo deste trabalho, realizou-se um levantamento bibliográfico a respeito das vigas de rolamento, bem como uma análise sobre as mesmas. Tendo como base uma casa de força de uma usina hidrelétrica, projetada e executada pela empresa RC Construções Metálicas, para a empresa Santa Helena Energia S/A. Analisou-se uma viga de rolamento responsável por suportar uma ponte rolante de 40 toneladas presente nesta obra e elaborou-se um roteiro de dimensionamento desta viga. Por fim, confirmou-se que os resultados do dimensionamento, conferem, em sua absoluta maioria, com os dados da viga de rolamento já existente. Mostrou-se no presente trabalho, a necessidade de se ‘contraventar’ a viga de rolamento, como também foi feito pela RC Construções Metálicas.

PALAVRAS-CHAVE:

Vigas de Rolamento. Ponte Rolante. Galpões Industriais. Dimensionamento.

ABSTRACT

Bearing beams are responsible for sustaining the bearing path of the cranes and, in addition, transmit the efforts they have caused to the other structural support elements. However, as much as the bearing beams are fundamental for the support of cranes in industrial sheds, there are still few literatures that deepen in this subject, and thinking about what the present work was developed. As objective of this work, a bibliographic survey was carried out about the bearing beams, as well as an analysis of them. Based on a power house of a hydroelectric plant, designed and executed by the company RC Construções Metálicas, for the company Santa Helena Energia S/A. A bearing beam responsible for supporting a 40-ton crane was built in this work and a roadmap for the dimensioning of this beam was elaborated. Finally, it was confirmed that the results of the dimensioning, give, in its absolute majority, with the data of the existing bearing beam. In the present work, the need to 'brace' the bearing beam was shown, as was also done by RC Construções Metálicas.

KEYWORDS:

Bearing beams. Rolling bridges. Industrial Sheds. Sizing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Principais itens de uma ponte rolante	15
Figura 2-Ponte Rolante Apoiada	16
Figura 3-Ponte Rolante Suspensa	16
Figura 4-Ponte Rolante Univiga	17
Figura 5-Ponte Rolante Biviga	18
Figura 6-Pórtico para pontes rolantes leves	19
Figura 7-Pórtico para pontes rolantes pesadas	19
Figura 8-Tração	23
Figura 9-Espaçamentos s e g	25
Figura 10-Peças de seção simples e múltipla	29
Figura 11-Flambagem Local	31
Figura 12-Flexão Normal	36
Figura 13-Comportamento de vigas com seções compacta, semcompacta e esbelta.	40
Figura 14-Flambagem local da alma devida ao momento fletor: (a) esquema da viga, com o momento solicitante M; (b) seção transversal mostrando a alma após a flambagem; (c) diagramas de tensões elásticas antes e depois da flambagem, mostrando a transferência de tensões da alma para a mesa comprimida.	41
Figura 15-Flambagem local da mesa comprimida em vigas I fletidas no plano da alma. As tensões normais de compressão da mesa (σ_{bc}) variam entre um valor máximo sobre a alma e um valor mínimo na	43
Figura 16-Flambagem lateral de viga biapoiada.	46
Figura 17-Progresso de abertura de fissuras até ruptura	54
Figura 18-Isométrica da estrutura metálica da casa de força auxiliar.....	58
Figura 19-Roldanas do carrinho da ponte rolante.....	59
Figura 20-Perfil W610x101.....	60
Figura 21-Representação do esquema estático da Viga de Rolamento	63
Figura 22-Viga sem contenção Lateral (Vista Superior)	65
Figura 23-Viga sem contenção lateral (Vista lateral)	66
Figura 24-Viga treliçada (Vista Superior).....	66
Figura 25-Esquema estático de um trecho da viga de rolamento	73
Figura 26-Esquema estático de um trecho da viga de rolamento	73
Figura 27-Representação dos enrijecedores de apoio	79

Figura 28-Isométrica (Enrijecedores na região do Apoio).....	79
Figura 29-Casa de Força Coberta	82
Figura 30-Esquema Estrutural que suporta a Ponte Rolante	83
Figura 31-Conjunto de Ponte Rolante com Viga de Rolamento Treliçada.....	84
Figura 32- Enrijecedores na Viga de Rolamento.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Materiais usados em parafusos	26
Quadro 2-Deslocamentos máximos	37
Quadro 3-Características da ponte rolante	59
Quadro 4-Dados do perfil W610x101.....	60
Quadro 5-Considerações para o cálculo.....	61
Quadro 6-Critérios de Norma.....	61
Quadro 7-Resultados mais desfavoráveis	61

LISTA DE TABELA

Tabela 1-Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m	22
Tabela 2-Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas.	25
Tabela 3-Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.	30
Tabela 4-Resultados dos Deslocamentos	83
Tabela 5-Resultados dos Esforços (Cisalhamento e Compressão).....	85
Tabela 6-Resultados dos Momentos Fletores.....	85
Tabela 7-Resultados das Forças Localizadas	86
Tabela 8-Resultados da Flambagem de Alma por Carga Concentrada	86
Tabela 9-Resultados referente ao Efeito Fadiga.....	87

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

AA	Duas Bordas Longitudinais Vinculadas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Apenas uma Borda Longitudinal Vinculada
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ELU	Estado Limite Último
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral de Torção
NBR	Norma Brasileira
SAE	Sistema de Análise Estrutural
STRAP	Structural Analysis Program

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO	13
1.1.1 Galpões industriais	13
1.1.2 Pontes rolantes	14
1.1.3 Vigas de rolamento	18
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo geral	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 METODOLOGIA.....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE AÇO	22
2.1 COEFICIENTES DE SEGURANÇA.....	22
2.2 TRAÇÃO	22
2.3 COMPRESSÃO.....	28
2.3.1 Flambagem Global	28
2.3.2 Flambagem Local	31
2.4 FLEXÃO	36
2.4.1 Flexão Simples	36
2.4.1.1 Deslocamentos.....	36
2.4.1.2 Cisalhamento – Esforço Cortante	37
2.4.1.3 Momento Fletor	39
2.4.1.3.1 <i>Momento fletor resistente de cálculo: Flambagem Local da Alma (FLA):</i>	41
2.4.1.3.2 <i>Momento fletor resistente local: Flambagem Local da Mesa (FLM):</i>	43
2.4.1.3.3 <i>Momento fletor resistente de cálculo: flambagem lateral com torção (FLT)</i> ..	46
2.5 BARRAS SUBMETIDAS A MOMENTOS FLETORES, FORÇA AXIAL E CORTANTES.....	49
2.6 ALMAS E MESAS DE PERFIS I SUBMETIDAS A FORÇAS TRANSVERSAIS LOCALIZADAS	50
2.6.1 Enrugamento da alma	50

2.6.2	Flambagem Lateral da Alma	51
2.6.2.1	Flambagem Lateral da Alma sem possibilidade de ocorrer	52
2.6.3	Escoamento Local da Alma.....	52
2.7	EFEITO FADIGA	53
2.7.1	Faixa Admissível de Variação de Tensões	54
2.7.2	Fadiga ao Cisalhamento.....	55
2.8	ENRIJECEDORES.....	56
2.8.1	Enrijecedores de Apoio	56
2.8.2	Enrijecedores Transversais Intermediários	57
3	ESTUDO DE CASO	58
3.1	VERIFICAÇÃO AO DESLOCAMENTO	62
3.1.1	Descolamento vertical	62
3.1.2	Deslocamento Transversal	62
3.2	VERIFICAÇÃO QUANTO AO CISALHAMENTO	64
3.2.1	Cisalhamento Vertical.....	64
3.2.2	Cisalhamento Transversal	65
3.3	VERIFICAÇÃO QUANTO AO MOMENTO FLETOR	65
3.3.1	Eixo X	65
3.3.1.1	Estabilidade Local	66
3.3.1.2	Estabilidade Global.....	67
3.3.2	Eixo Y	69
3.4	DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO.....	69
3.4.1	Quanto à Flambagem Global.....	70
3.4.2	Quanto à Flambagem Local.....	70
3.4.3	Determinação da Força Resistente	71
3.5	VERIFICAÇÃO DAS CARGAS COMBINADAS (FLEXÃO E COMPRESSÃO).....	72
3.6	VERIFICAÇÃO DAS FORÇAS LOCALIZADAS.....	72
3.6.1	Verificação do Esmagamento da Alma.....	72
3.6.1.1	Quando a força de compressão está a uma distância da extremidade maior que a metade da altura da seção transversal (fora do apoio)	73
3.6.1.2	Quando a força de compressão está a uma distância da extremidade, menor que a metade da altura da seção transversal (no apoio)	73
3.6.2	Flambagem de Alma por Carga Concentrada	74

3.6.3	Verificação do Escoamento Local da Alma.....	75
3.7	ANÁLISE DO EFEITO FADIGA.....	76
3.7.1	Efeito Fadiga no Eixo X	76
3.7.2	Efeito Fadiga no Eixo Y	77
3.7.3	Fadiga ao Cisalhamento.....	77
3.8	DIMENSIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES	78
3.8.1	Enrijecedores de Apoio	78
3.8.2	Dimensionamento dos Enrijecedores Intermediários	80
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	82
4.1	DESLOCAMENTOS.....	83
4.2	ESFORÇOS.....	84
4.3	FORÇAS LOCALIZADAS	85
4.4	OUTROS RESULTADOS.....	86
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO A - TABELA DE BITOLAS DOS PERFIS DA GERDAU AÇOMINAS	92
	ANEXO B – VALORES DE (B/T) LIM.....	95
	ANEXO C– VALOR DE X EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ λ_o	97
	ANEXO D – PARÂMETROS REFERENTES AO MOMENTO FLETOR RESISTENTE	98
	ANEXO E – PARÂMETROS DE FADIGA	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

A engenharia civil está sempre evoluindo, novas técnicas, novos materiais e tecnologias surgem a cada dia propondo resolver questões construtivas com mais qualidade e rapidez. Nessa evolução aparece a figura do material aço, que por suas qualidades contribuiu em avanços estruturais da engenharia.

As estruturas de aço possuem alta resistência nos estados de tensão de diversos tipos (tração, compressão, flexão, etc.). Seus elementos estruturais suportam esforços elevados, vencendo assim grandes vãos, apesar de apresentar uma área de seção transversal relativamente pequena, e por esse motivo esse material é mais leve, apesar de sua alta densidade. (MUKHANOV, 1980).

Outra grande vantagem dessas estruturas é que elas podem ser construídas em uma indústria, e posteriormente levadas para à montagem em canteiro de obras. A velocidade de execução das estruturas de aço é superior as demais. E na busca por sustentabilidade o aço confere a construção um status de material 100% reutilizável. Com tudo isso, cada vez mais esse material construtivo vem ganhando espaço na construção civil mundial e nacional.

O aço já era de conhecimento geral desde a Antiguidade, porém devido à escassez de processo industrial de fabricação, este era um elemento muito caro. Isso mudou quando o inglês Henry Bessemer inventou um forno que possibilitou a produção de aço em grande escala. Em 1864, os irmãos Martin produziram outro forno, com maior capacidade. A partir disso, o aço começou a ganhar espaço.

No Brasil, a indústria siderúrgica teve início após a Segunda Guerra, com a construção da Usina Presidente Vargas, da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional). A partir disso, as estruturas em aço foram ganhando o mercado brasileiro e são grandes símbolos da tecnologia.

1.1.1 Galpões industriais

Edifícios industriais podem ser utilizados para vários fins, como fábricas, oficinas, depósitos etc. Eles são caracterizados por terem um pavimento e cobrirem uma grande área. O material mais utilizado para esses edifícios é o aço. Pelas vantagens já citadas anteriormente.

Para projetar esses edifícios, informações como: tipo de terreno, dimensões e localização de equipamentos, área de circulação e movimentação de carga, iluminação e aeração são de

suma importância. Esses galpões podem ser executados com vãos simples (isolados), ou múltiplos, quando existe a necessidade de se cobrir várias áreas. Existem vários tipos de galpões industriais e é muito comum ver em vários deles as chamadas pontes rolantes. (BELLEI, 2000).

1.1.2 Pontes rolantes

As pontes rolantes consistem em um equipamento para a elevação e deslocamento de cargas, que possuem em sua estrutura uma viga suspensa com carros guinchos que são movidos horizontalmente ao longo do eixo por meio de trilhos (DIAS, 1993).

Sabe-se que a Revolução Industrial foi um período de mudanças que aconteceram na Europa, entre os séculos XVIII e XIX. Estas mudanças dizem respeito à substituição de trabalhos artesanais pelo uso de máquinas. Apenas em 1930 que no Brasil a indústria teve um grande avanço, foi por meio das empresas de processamento alimentício e confecção de tecidos que surgiram as grandes empresas estatais.

Na década de 50, intensificou a industrialização brasileira por meio das indústrias automobilísticas, esta incentivou a criação de indústrias complementares e de matérias primas. O aumento da demanda e a busca de redução de custos com mão de obra resultaram em um aumento de capital investido em equipamentos, e nesse contexto as pontes rolantes passaram a ser usadas, visto que os seus ganhos em produtividade compensavam os custos em sua implantação. As indústrias automobilísticas, navais e siderúrgicas foram as pioneiras no uso das pontes rolantes, e que depois acabaram por ser popularizadas nas demais indústrias (outros segmentos).

Uma ponte rolante é basicamente composta por seis itens: Viga principal, cabeceira, carro trole, caminho de rolamento, talha elétrica e rodas. A viga principal é onde se encontram os principais esforços, por ser a principal estrutura responsável por suportar todo o conjunto do carro trole, com talha e rodas, (Figura 1, item 1.1).

O carro trole é responsável pela locomoção vertical ou horizontal da carga (Figura 1, item 1.2), e possui uma talha que proporciona o içamento do material (Figura 1, item 1.3). Já as cabeceiras é onde ficam as rodas que são responsáveis pela movimentação da viga da ponte rolante. E o caminho de rolamento é onde as cabeceiras se movem.

Figura 1-Principais itens de uma ponte rolante



Fonte: <https://mimanutencao.com.br/>, adaptado pelos autores, 2020.

Existem quatro tipos de pontes rolantes: Ponte rolante apoiada, ponte rolante suspensa, ponte rolante univiga e ponte rolante biviga. A escolha ideal da ponte rolante vai depender da aplicação e do local onde estas serão instaladas. (SORDI, 2016).

a) Ponte Rolante Apoiada

Essa ponte rolante tem vãos que chegam até 30 metros, seus trilhos são suportados pelas vigas ou pilares do próprio local em que serão instaladas. Normalmente as vigas destas pontes fazem a locomoção acima dos trilhos de rolamento e são ideais para lugares com altura reduzida abaixo do caminho de rolamento. A Figura 2 mostra uma ponte rolante apoiada.

Figura 2-Ponte Rolante Apoiada

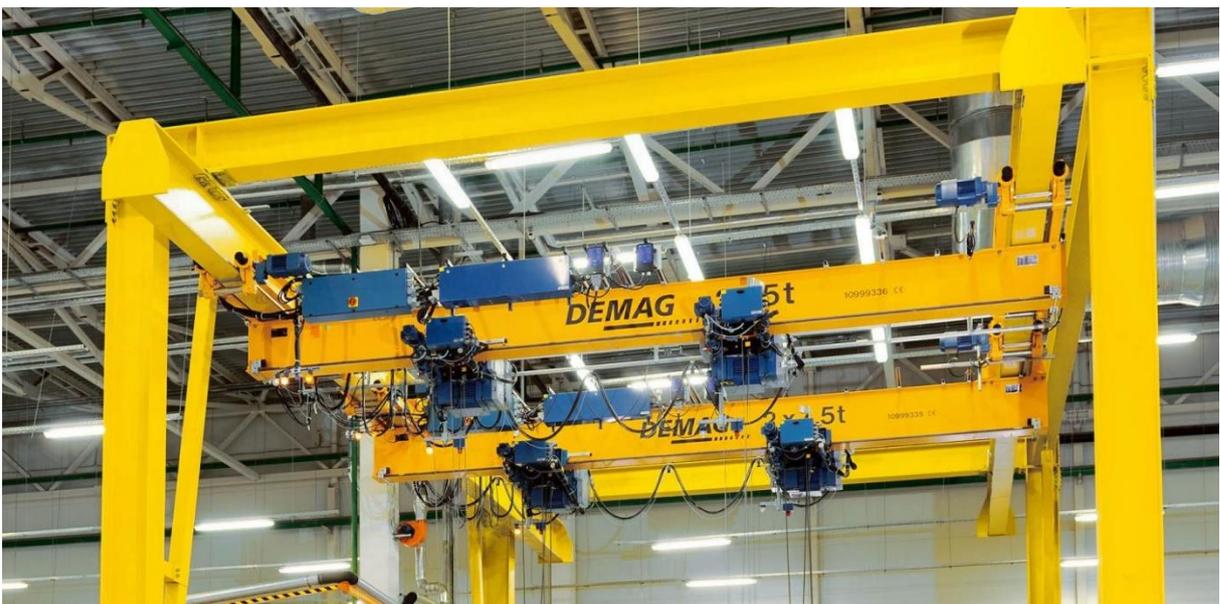


Fonte: <https://www.demagcranes.com>, 2020.

b) Ponte Rolante Suspensa

Nesse caso a viga principal da ponte rolante desloca-se abaixo dos trilhos, sendo assim é uma ótima opção para lugares com um pé direito reduzido. Com estas pontes é possível prolongar o caminho de rolamento para além dos pontos que fixam a estrutura, assim sendo se aproveita melhor a amplitude do local onde a ponte foi instalada. A Figura 3, representa a ponte rolante em questão.

Figura 3-Ponte Rolante Suspensa



Fonte: <https://www.demagcranes.com>, 2020.

c) Ponte Rolante Univiga

Basicamente a ponte rolante univiga é composta por uma única viga que vai servir de suporte para um ou dois carros trole. Estas vigas podem ser do tipo I laminada, ou do tipo “caixão” soldada. E o carro trole fica na parte inferior da aba da viga da ponte rolante. A Figura 4 representa uma ponte rolante univiga.

Figura 4-Ponte Rolante Univiga



Fonte: <https://www.demagcranes.com>, 2020.

d) Ponte Rolante Biviga

Diferentemente da ponte rolante univiga, a biviga possui duas vigas para o carro trole percorrer. Em consequência disso, estas pontes suportam cargas bem maiores. A Figura 5 representa este tipo de viga.

Figura 5-Ponte Rolante Biviga

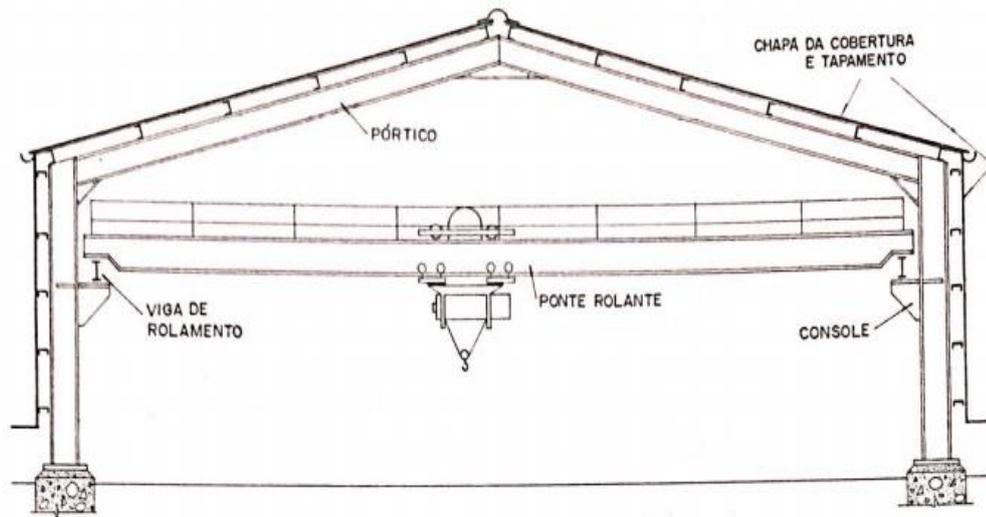
Fonte: <https://www.demagcranes.com>, 2020.

1.1.3 Vigas de rolamento

Para viabilizar a implementação dessas pontes rolantes, a ciência das engenharias Mecânica e Civil compartilharam conhecimentos e buscaram melhoras nas suas respectivas áreas, buscando a excelência de um funcionamento seguro e eficaz. Parte constituinte para a viabilização dessas pontes são as partes estruturais, e é para isso que as vigas de rolamento trabalham.

De acordo com Bellei (2000), as vigas de rolamento sustentam o caminho de rolamento das pontes rolantes e, além disso, são responsáveis por transmitir os esforços por elas causados aos outros elementos estruturais de suporte. Essas vigas estão sujeitas basicamente as seguintes cargas e forças: cargas verticais, forças horizontais transversais e forças horizontais longitudinais. Vale ressaltar que a capacidades máxima para uma viga de rolamento suportar uma ponte rolante leve, suportada por vigas apoiadas em consoles de colunas, é de 15 a 25 toneladas no máximo. A Figura 6 representa o esquema de colunas e vigas de rolamento para uma ponte rolante leve.

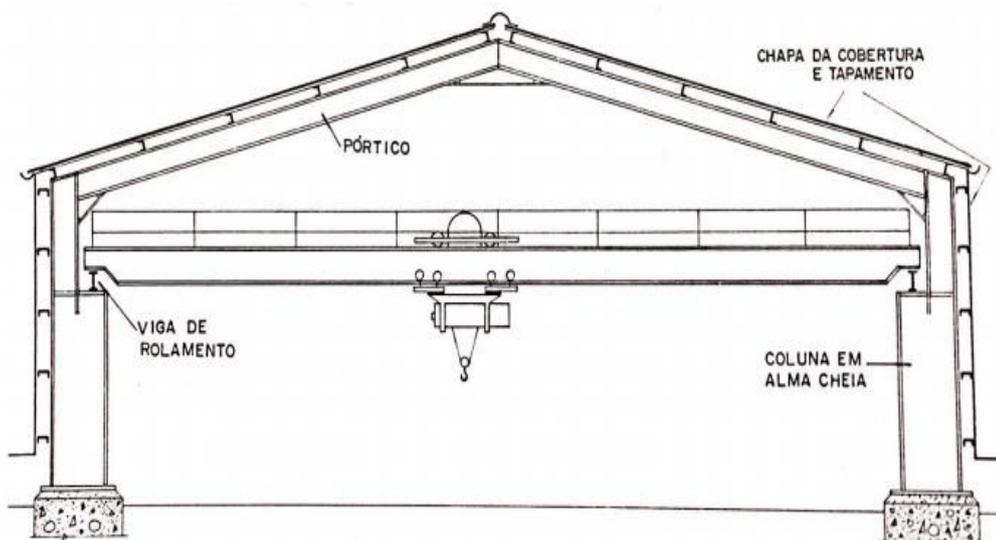
Figura 6-Pórtico para pontes rolantes leves



Fonte: BELLEI, 2000.

Já para pontes rolantes, que provoquem uma reação maior que 15t, é recomendado um esquema estrutural em que a viga de rolamento apoie diretamente sobre o pilar, transmitindo as reações para este, de forma direta, sem console, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7-Pórtico para pontes rolantes pesadas



Fonte: BELLEI, 2000.

1.2 JUSTIFICATIVA

Cada vez mais equipamentos com maior capacidade de içamento de cargas são exigidos na otimização de logística, por isso as pontes rolantes estão se popularizando nas indústrias e até no ambiente agropecuário. Com isso, a engenharia deve dar suporte aos que precisam desse recurso.

Embora, as vigas de rolamento sejam essenciais para a sustentação das pontes rolantes, que como já citado anteriormente são amplamente usadas em instalações industriais, pouco se tem de material bibliográfico para análise e dimensionamento dessas vigas. E ainda esse assunto é pouco ou nada abordado nos cursos de graduação em engenharia civil.

Pelos motivos supracitados, o presente trabalho tem a proposta de apresentar as vigas de rolamento, bem como o seu dimensionamento, de forma a colaborar com a literatura acadêmica sobre o assunto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

A pesquisa teve como objetivo geral fazer um levantamento bibliográfico e apresentar um estudo do comportamento de uma viga de rolamento.

1.3.2 Objetivos específicos

O estudo, que visa precipuamente, o comportamento de vigas de rolamento, possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Calcular e dimensionar uma viga de rolamento.
- b) Analisar a viga de rolamento da casa de força executada na cidade de Santa Helena de Goiás, no ano de 2017, para a empresa Santa Helena Energia S/A.
- c) Fazer uma análise de resultados, traçando um comparativo entre os resultados do trabalho, com a viga de rolamento executada pela empresa RC Construções Metálicas Ltda.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em um estudo sobre vigas de rolamento de aço, especificamente utilizadas em galpões industriais. Nesta pesquisa é analisado o comportamento estrutural dessas vigas, apresentando os resultados do seu cálculo e elaborando um passo a passo do seu dimensionamento.

No estudo em questão utilizou-se a literatura técnica específica sobre o tema, além das prescrições normativas da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Além do embasamento teórico, o qual balisa todo este trabalho, um roteiro de verificação de cálculo e dimensionamento foi elaborado e apresentado por meio de um exemplo numérico.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O corpo deste trabalho de conclusão de curso foi dividido em cinco capítulos. O primeiro descreve um contexto histórico nacional e mundial sobre o aço e também sobre as vigas de rolamento, ressaltando a importância delas. Ainda neste capítulo foram apresentados os objetivos, justificativa e metodologia que deram um escopo para este trabalho.

O capítulo 2 trata do chamado “Embasamento Teórico”, apresenta as orientações da NBR 8800 (ABNT, 2008) quanto ao dimensionamento de peças submetidas aos esforços de tração, compressão, flexão-simples, flexão-composta e verificações mais específicas necessárias às vigas de rolamento. A teoria apresentada neste capítulo decorre de normas e outras literaturas sobre o assunto.

No terceiro capítulo um exemplo numérico de dimensionamento de uma viga de rolamento é apresentado.

Já no quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos no capítulo 3 e a análise destes, de forma que o leitor tenha uma boa compreensão dos resultados obtidos. Também é feito um comparativo, entre os resultados obtidos neste trabalho, com o que foi executado pela empresa RC Construções Metálicas Ltda, na empresa Santa Helena Energia S/A.

2 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE AÇO

Os principais esforços que atuam em uma estrutura podem ser resumidos em três: Tração, compressão e flexão (simples e composta). O dimensionamento de uma estrutura consiste em se projetar elementos estruturais que resistam de forma segura e econômica a estes esforços. Este capítulo, portanto, apresenta as principais prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008) para o dimensionamento de elementos estruturais submetidos às forças supracitadas.

2.1 COEFICIENTES DE SEGURANÇA

A NBR 8800 (ABNT 2008), determina que para o aço estrutural, existem dois coeficientes de ponderação das resistências, γ_{a1} e γ_{a2} , sendo o primeiro para estados – limites últimos relacionados a escoamento, flambagem e instabilidade e o segundo coeficiente se refere à ruptura. Estes fatores de segurança estão definidos na Tabela 1:

Tabela 1-Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

Combinações	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,10	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usada nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.2 TRAÇÃO

As forças de tração são aquelas cargas que atuam sobre uma seção transversal em direção ao exterior da peça, provocando assim um alongamento uniforme, como mostra a Figura 8. Os elementos construtivos, sujeitos a solicitações de tração axial, ou tração simples são denominados de peças tracionadas. Essas peças são empregadas sob diversas formas nas estruturas de aço. Exemplo: Tirantes (ou pendurais), tirantes de vigas armadas,

contraventamentos de torres e travejamentos de vigas ou colunas e barras tracionadas de treliças. Barra redonda, barra chata, perfil laminado simples, perfil laminado composto, são tipos de perfis utilizados em peças tracionadas.

Figura 8-Tração



Fonte: Domínio Público, 2020.

A NBR 8800 (ABNT 2008) determina que para o dimensionamento, a força axial de tração solicitante de cálculo deve ser menor que a força axial de tração resistente de cálculo, como mostra a equação 1.

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (1)$$

Onde:

- $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração, solicitante de cálculo;
- $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo.

De acordo com a norma NBR 8800 (ABNT 2008) a força de tração deve ser o menor valor encontrado para os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida. De acordo com as fórmulas 2 e 3, mostradas a seguir:

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2)$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (3)$$

Sendo:

- A_g é a área bruta da seção transversal da barra;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- f_u é a resistência à ruptura do aço;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na Tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10.
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação do estado limite último da ruptura, considerado o valor de 1,35 como mostrado na Tabela 1.

A norma NBR 8800 (ABNT 2008) determina que para calcular a área líquida efetiva de uma barra, deve ser utilizada a fórmula 4:

$$A_e = C_t A_n \quad (4)$$

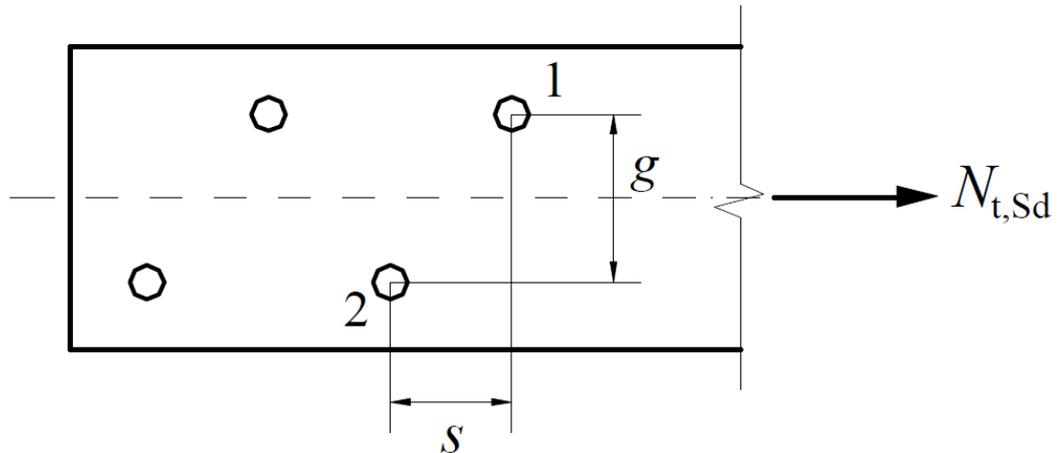
- A_n é a área líquida da barra, determinada na equação 5;
- C_t é um coeficiente de redução da área líquida, sendo um valor que pode ser determinado pelas formulas presentes na NBR 8800 (ABNT 2008), na seção 5.2.5 da norma. Porém usualmente o C_t tem o valor de 1,00 para forças de tração transmitidas diretamente para cada elemento da seção transversal.

Para determinar a área líquida A_n , a NBR 8800 (ABNT 2008), apresenta a equação 5:

$$A_n = [b \sum \frac{s}{4g} - \sum (d + 0,35)]t \quad (5)$$

- b é a largura do elemento;
- s é a distância horizontal dos furos, como mostra a Figura 9;
- g é a distância vertical dos furos, como mostra a Figura 9;
- d é o diâmetro do furo, sendo os valores apresentados na Tabela 2;
- t é a espessura do elemento.

Os elementos s e g da formula, são apresentados na Figura 9:

Figura 9-Espaçamentos s e g 

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Para achar os diâmetros dos parafusos, o d da equação 5, a NBR 8800 (ABNT 2008), disponibiliza a Tabela 2.

Tabela 2-Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas.

	Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
Dimensões	≤ 24	$d_b+1,5$	d_b+5	$(d_b+1,5)(d_b+6)$	$(d_b+1,5)(2,5d_b)$
em	27	28,5	33	28,5(35)	28,5(67,5)
milímetros	≥ 30	$d_b+1,5$	d_b+8	$(d_b+1,5)(d_b+9,5)$	$(d_b+1,5)(2,5d_b)$
Dimensões	$\leq 7/8$	$d_b+1/16$	$d_b+3/16$	$(d_b+1/16)(d_b+1/4)$	$(d_b+1/16)(2,5d_b)$
em	1	11/4	11/4	11/16+15/16	11/16+2(1/2)
polegadas	$\geq 11/8$	$d_b+5/16$	$d_b+5/16$	$(d_b+1/16)(d_b+3/8)$	$(d_b+1/16)(2,5d_b)$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Para calcular a tração resistente de um parafuso que está sendo tracionado, ou então uma barra redonda rosqueada, a NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece a equação 6.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,75 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (6)$$

Onde:

- A_b é a área bruta, sendo que essa área é calculada levando em consideração os diâmetros dos parafusos ou da rosca;
- f_{ub} é a resistência a ruptura, estabelecido no Quadro 1;
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação do estado limite último da ruptura. E como mostra na Tabela 1, este valor deverá ser 1,35.

Segue o Quadro 1 que especifica os valores relacionados à resistência de ruptura:

Quadro 1-Materiais usados em parafusos

Especificação	f_{yb} MPa	f_{ub} MPa	Diâmetro d_b	
			mm	pol
ASTM A307	-	415	-	$1/2 \leq d_b \leq 4$
ISO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A325 ^a	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$	$1/2 \leq d_b \leq 1$
	560	725	$24 < d_b \leq 36$	$1 < d_b \leq 1\frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d_b \leq 36$	$1/2 \leq d_b \leq 1\frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASM A588.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

A maioria dos parafusos, em uma estrutura metálica convencional, trabalha em cisalhamento e a NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece as seguintes equações para o cálculo destes cisalhamentos:

- a) Quando se trata de parafusos estruturais, e o plano de corte passa pela rosca do parafuso, deve-se usar a fórmula 7:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (7)$$

Sendo:

- A_b é a área bruta do parafuso;

- f_{ub} é o valor estabelecido no Quadro 1;
 - γ_{a2} é o coeficiente de ponderação do estado limite último da ruptura, como demonstrado na Tabela 1, considerar 1,35.
- b) E para parafusos estruturais, também conhecidos como de alta resistência, que o plano de corte não passa pelo plano de corte, a equação 8 é dada:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (8)$$

Sendo:

- A_b é a área bruta do parafuso;
- f_{ub} é o valor estabelecido no Quadro 1;
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação do estado limite último da ruptura, como demonstrado na Tabela 1, considerar 1,35.

A NBR 8800 (ABNT, 2008), determina a equação 9 como sendo a fórmula de verificação entre rasgamento entre furos consecutivos, adjacentes, e entre furo extremo e borda da chapa:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

Onde:

- f_u é o valor estabelecido no Quadro 1, sendo esse valor a resistência à ruptura do aço;
- l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente, ou entre a borda do furo com a borda da chapa;
- t é a espessura da chapa;
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação do estado limite último da ruptura, considerar 1,35, como demonstrado na tabela 1.

2.3 COMPRESSÃO

O esforço de compressão ao contrário da tração, tende a acentuar o efeito das curvaturas iniciais existentes nas peças. Pelos deslocamentos laterais produzidos resulta o processo conhecido por flambagem por flexão, que em geral reduz a capacidade de carga da peça, em relação ao caso em que ela é tracionada (PFEIL; PFEIL, 2000).

Vale ressaltar que em peças tracionadas, quanto maior a força aplicada na peça, maior a estabilidade da mesma, até que ela se rompa por escoamento da sua seção. Já em peças submetidas à compressão, onde a força aplicada atua em sentido oposto ao da tração, a perda de estabilidade da peça torna-se mais crítica que o escoamento.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) determina a equação 10, para calcular a força axial de compressão, associada à flambagem global e à flambagem local.

$$N_{c,Rd} = \left(\frac{XQA_gf_y}{\gamma_{a1}} \right) \quad (10)$$

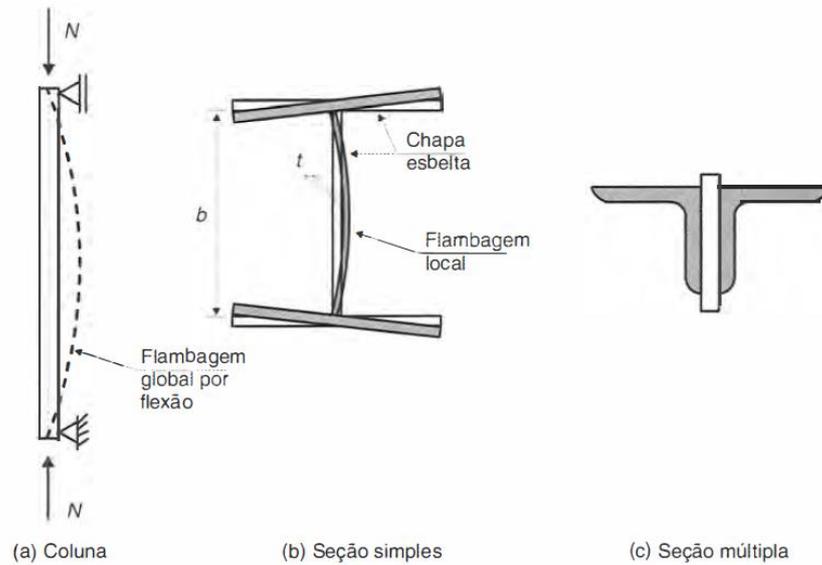
Sendo:

- X o fator de redução associado à resistência à compressão (Anexo C);
- Q o fator de redução total associado à flambagem local (equação 15);
- A_g a área bruta da seção transversal da barra;
- f_y a resistência ao escoamento do aço;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na Tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10.

2.3.1 Flambagem Global

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), flambagem global é um deslocamento lateral ocasionado pelo fenômeno da flexão (Figura 10.a). Essa instabilidade tem a capacidade de deformar um elemento, sem alterar sua seção. Essas peças comprimidas podem se apresentar nas seguintes formas: seção simples ou seção múltipla, conforme a (Figura 10.b e 10.c). Sendo as peças múltiplas classificadas em: justapostas ou afastadas, e ligadas por treliçados ao longo do comprimento.

Figura 10-Peças de seção simples e múltipla



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2009.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), quando se pretende calcular o índice de esbeltez (para eixo x-x e eixo y-y), a fim de encontrar a flambagem global de uma peça comprimida, a fórmula 11 é utilizada:

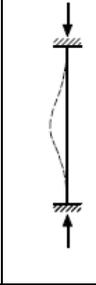
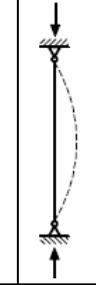
$$\lambda = \frac{Kl}{r} \quad (11)$$

Sendo:

- λ é a esbeltez 'global' da barra;
- K é o coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados. Sendo esses valores encontrados na Tabela 3;
- l é o comprimento da peça destravada;
- r é o raio de giração, (fórmula 12).

Para determinar o coeficiente de flambagem, é necessário que se conheça as reações de apoio que serão usadas para a fixação de uma barra. Para trabalhar a favor da segurança, é importante a utilização dos “Valores Recomendados”, por estes serem majorados.

Tabela 3-Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas.				
		Rotação livre, translação impedida.				
		Rotação impedida, translação livre.				
		Rotação e translação livre.				

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Raio de giração de uma seção transversal, é determinado pela fórmula 12:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (12)$$

Sendo:

- I Igual ao momento de inércia da seção transversal;
- A Igual a área da seção transversal.

Ressalta-se que o raio de giração pode ser encontrado nos catálogos dos fabricantes dos perfis, como no Catálogo Técnico de Perfis Laminados da (Gerdau Açominas), presente no Anexo A, deste trabalho.

Com a finalidade de evitar a grande flexibilidade de peças excessivamente esbeltas, as normas fixaram limites superiores para o coeficiente de esbeltez. O limite de esbeltez adotado na compressão é 200.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), para fator de redução total, associado a flambagem local, igual a 1 ($Q=1$), tem-se as relações 13 e 14.

a. Aço MR250, tem-se:

$$\lambda_0 = 0,0113 \frac{Kl}{r} \quad (13)$$

b. Aço AR350, tem-se:

$$\lambda_0 = 0,0133 \frac{Kl}{r} \quad (14)$$

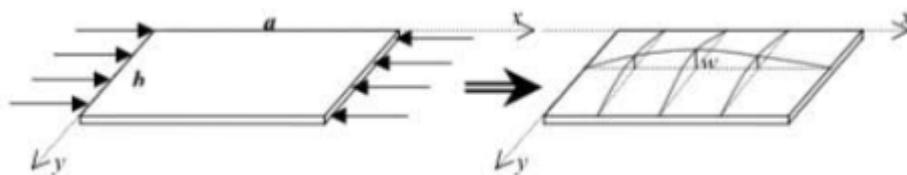
Onde:

- λ_0 é a esbeltez reduzida;
- K é o coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados. Sendo esses valores encontrados na Tabela 3;
- l é o comprimento da peça destravada;
- r é o raio de giração, fórmula 12.

2.3.2 Flambagem Local

Para Santos (2002), o fenômeno da instabilidade nos elementos estruturais bidimensionais (chapas componentes dos pilares metálicos) é chamado de flambagem local. As placas componentes comprimidas apresentam deslocamentos laterais na forma de ondulações, em geral ocorre em pilares curtos comprimidos, fletidos ou flexocomprimidos. Esse fenômeno é mostrado na Figura 11.

Figura 11-Flambagem Local



Fonte: SANTOS, 2002.

A NBR 8800 (ABNT, 2008), determina uma classificação entre os elementos que fazem parte das seções transversais, sujeitos a flambagem local em: elementos AA (duas bordas longitudinais vinculadas), e elementos AL (apenas uma borda longitudinal vinculada). A norma determina a equação 15, para encontrar o fator de redução associado a flambagem.

$$Q = Q_s * Q_a \quad (15)$$

Onde:

- **Q** O fator de redução total associado à flambagem local;
- **Q_s** O fator de redução associado a elementos AL;
- **Q_a** O fator de redução associado a elementos AA.

A norma também determina as seguintes considerações:

- a. Se a seção tiver apenas elementos com uma borda longitudinal vinculada (equação 16):

$$Q = Q_s \quad (16)$$

- b. Se a seção tiver duas bordas longitudinais vinculadas (equação 17):

$$Q = Q_a \quad (17)$$

A NBR 8800 (ABNT, 2008), no seu Anexo F, determina que caso as relações entre largura e espessura (b/t) superem aos valores de $(b/t)_{lim}$, faz-se necessário o cálculo para estipular valores aos índices Q_s e, ou Q_a . E se a relação entre largura e espessura não for superior ao limite, Q_s e, ou Q_a , valem 1. A seguir as expressões relacionadas ao (b/t) , são apresentadas nas equações 18 e 19, e as equações limites estão contidas no Anexo B, do presente trabalho.

a. Para mesa de perfis laminados (AL):

$$\frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} \quad (18)$$

b. Para alma de perfis laminados (AA):

$$\frac{b}{t} = \frac{d'}{t_w} \quad (19)$$

Onde:

- b_f é a largura da mesa retirada do Anexo A;
- t_f é a espessura da mesa retirada do Anexo A;
- d' é a largura da alma retirada do Anexo A;
- t_w é a espessura da alma retirada do Anexo A.

Caso tenha-se que calcular os valores de Q_s e Q_a a NBR 8800 (ABNT, 2008), usa-se das equações 20 a 27 para tal fim. Sendo que para elementos com uma borda longitudinal vinculada, faz-se necessário o conhecimento a respeito dos grupos dos elementos, apresentados no Anexo B.

Para elementos comprimidos AL:

a. Elementos pertencentes ao Grupo 4:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para} \quad 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (20)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (21)$$

b. Elementos pertencentes ao Grupo 5:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \quad \text{para} \quad 0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} < 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (22)$$

$$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (23)$$

Com k_c sendo dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad \text{sendo} \quad 0,35 \leq k_c \leq 0,76 \quad (24)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade;
- k_c é um coeficiente calculado na equação (24);
- t_w é a espessura da alma (Anexo A);
- $\frac{b}{t}$ é a esbeltez do elemento, valor encontrado nas equações (18 e 19);
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- h é a altura da alma.

Para elementos comprimidos AA:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (25)$$

Sendo:

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t \quad (26)$$

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{c_a}{\frac{b}{t}} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad (27)$$

Onde:

- b é a largura de um elemento AA do Anexo A;
- t é a espessura de um elemento AA retirada do Anexo A;
- b_{ef} é a largura efetiva de um elemento comprimido AA (equação 27);
- A_{ef} é a área efetiva, determinada pela (equação 26);
- A_g é a área bruta da sessão transversal, também encontrada no Anexo A;
- c_a é um coeficiente igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

Para encontrar o fator de redução “X”, apresentado na fórmula (10), faz-se necessário os valores de esbeltez encontrados na equação (11), assim como o valor de Q. Com os valores de λ e Q, utiliza-se a equação (28) para determinar a esbeltez reduzida (λ_0), dada pelo livro do Pfeil e Pfeil (2009), e em seguida acha-se o fator de redução ou pelas fórmulas 29 e 30, apresentadas pela NBR 8800 (ABNT,2008), ou pela tabela no (Anexo C).

$$\lambda_0 = \frac{K \cdot L}{r} \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad (28)$$

$$\text{para } \lambda_0 \leq 1,5 : \quad X = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (29)$$

$$\text{para } \lambda_0 > 1,5 : \quad X = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (30)$$

Onde:

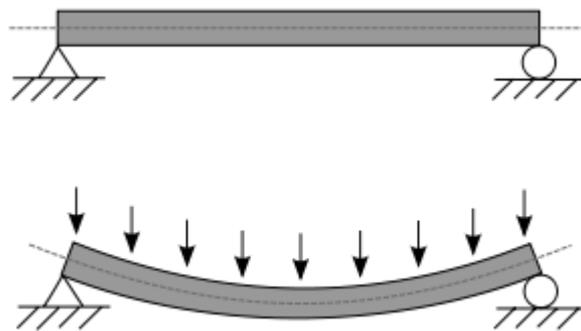
- K é o coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados. Sendo esses valores encontrados na Tabela 3;
- l é o comprimento da peça destravada;
- r é o raio de giração, fórmula 12;

- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- X o fator de redução associado à resistência à compressão (Anexo C);
- Q o fator de redução total associado à flambagem local (equação 15);
- $\frac{Kl}{r}$ o valor da esbeltez (equação 11).

2.4 FLEXÃO

A flexão é uma deformação que ocorre de maneira paralela a uma força atuante, como mostra a Figura 12. Quando se aplica forças em uma viga, seja ela de concreto, aço ou mista, criam-se ações internas, conhecidas como tensões resultantes.

Figura 12-Flexão Normal



Fonte: Domínio Público, 2020.

2.4.1 Flexão Simples

No dimensionamento à flexão simples, os deslocamentos, cisalhamento e momento fletor, precisam ser verificados, conforme NBR 8800 (ABNT, 2008):

2.4.1.1 Deslocamentos

Os deslocamentos devem ser calculados levando em consideração a possibilidade de ter uma deformação plástica no estado-limite de serviço. Quando se tem flechas excessivas oriundas de carregamentos permanentes, isso pode causar desconforto, devido a sensação de insegurança, vibrações, danos a elementos não estruturais (alvenarias, pisos e revestimentos em geral). Afim de se evitar esses problemas, a NBR 8800 (ABNT, 2008) limita as flechas globais,

para que as cargas não excedam um valor limite. Em se tratando de vigas de rolamentos, a verificação de deslocamentos se torna ainda mais importante, pois os deslocamentos excessivos poderão produzir desastres e não apenas problemas relacionados ao conforto e estética, como geralmente ocorre em estruturas convencionais.

O Anexo C da NBR 8800 (ABNT,2008) apresenta uma tabela com os valores limites destes deslocamentos. Como o trabalho em questão é focado em vigas de rolamento, o Quadro 2 mostra esses valores para essas vigas especificamente.

Quadro 2-Deslocamentos máximos

Vigas de rolamento: ^b	
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 KN;	$L/600^a$
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN, exceto pontes siderúrgicas;	$L/800^a$
Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN;	$L/1000^a$
Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas;	$L/400$
Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas.	$L/600$
^a Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.	
^b Considerar combinações raras de serviço.	

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.4.1.2 Cisalhamento – Esforço Cortante

O esforço de cisalhamento é bem conhecido na engenharia de estruturas. Em uma viga metálica esse esforço age tentando provocar um corte ou cisalhamento da seção transversal do perfil. Em flexão simples, percebe-se que à medida que o vão de uma barra aumenta, a importância do cisalhamento, como causador do colapso da peça, diminui. Ou seja, em peças com menores vãos, o cisalhamento torna-se um fenômeno de maior importância no dimensionamento.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT,2008) para o cálculo de seções I, H e U fletidas, a força cortante resistente a cálculo é dada por V_{rd} (equação 31 a 33).

$$\text{Para } \lambda \leq \lambda_p: \quad V_{rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (31)$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r: \quad V_{rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} \quad (32)$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_p: \quad V_{rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (33)$$

Onde:

- λ é o parâmetro de esbeltez (equação 34);
- λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação (equação 35);
- λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura (equação 36);
- V_{pl} é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento (equação 37);
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10.

Pfeil e Pfeil (2009), apresenta as formulas 34 a 36 para os parâmetros de esbeltez:

- a) λ é o parâmetro de esbeltez.

$$\lambda = \frac{d'}{t_w} \quad (34)$$

- b) λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação.

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (35)$$

- c) λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura.

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (36)$$

Onde:

- d' é a largura da alma retirada do Anexo A;
- t_w é a espessura da alma retirada do Anexo A;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- k_v é considerado como sendo um valor igual a 5,0 para almas sem enrijecedores transversais.

Para o cálculo da força resistente de cálculo (cisalhamento), é necessário o conhecimento do valor de V_{pl} (força cortante correspondente à plastificação), calculada pela equação 37, e o A_W , presente no cálculo do V_{pl} , está contido na equação 38.

$$V_{pl} = 0,6 * A_W * f_y \quad (37)$$

$$A_W = d * t_w \quad (38)$$

Onde:

- d é a altura do perfil encontrada no Anexo A;
- t_w é a espessura da alma retirada do Anexo A;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- A_W é a área efetiva de cisalhamento.

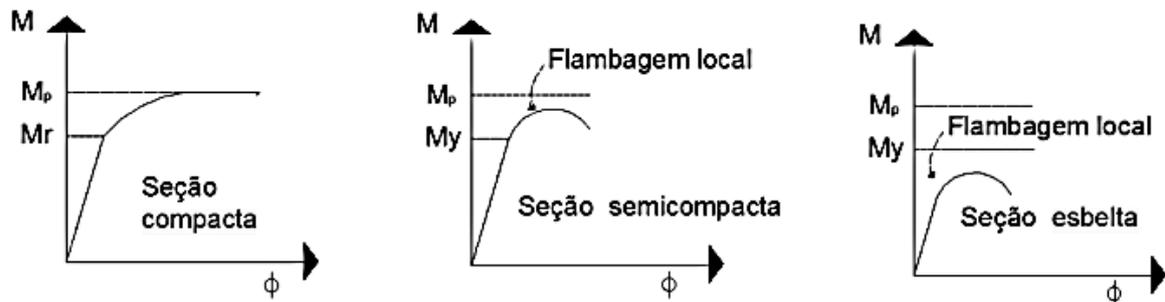
2.4.1.3 Momento Fletor

O Momento Fletor é oriundo da soma dos momentos nas direções X e Y. Quando se aplica uma força perpendicular ao eixo axial de uma peça, gera-se momentos em duas direções. Esse esforço tende a curvar o eixo longitudinalmente e assim provoca-se tensões de tração e compressão nas extremidades (mesa e alma) da seção transversal da peça. Em flexão simples observa-se o oposto do que ocorre em cisalhamento, pois conforme a barra aumenta, maior é a importância da verificação do momento fletor no dimensionamento.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), as seções das vigas, podem ser classificadas, de acordo com a Figura 13, em: seção compacta, seção semicompacta e seção esbelta. Essa classificação está relacionada a flambagem local, sobre os momentos fletores:

- Seção compacta: É a seção que atinge o momento de plastificação total;
- Seção semicompacta: É a seção em que a flambagem local acontece depois da plastificação parcial ser desenvolvida;
- Seção esbelta: É a seção em que a flambagem local impede o momento inicial de plastificação.

Figura 13-Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta.



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2009

De acordo com a NBR 8800 (ABNT,2008), para o dimensionamento de uma viga, de forma segura, deve-se obedecer às inequações 39 e 40.

$$M_{sd} \leq M_{rd} \quad (39)$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} \quad (40)$$

Onde:

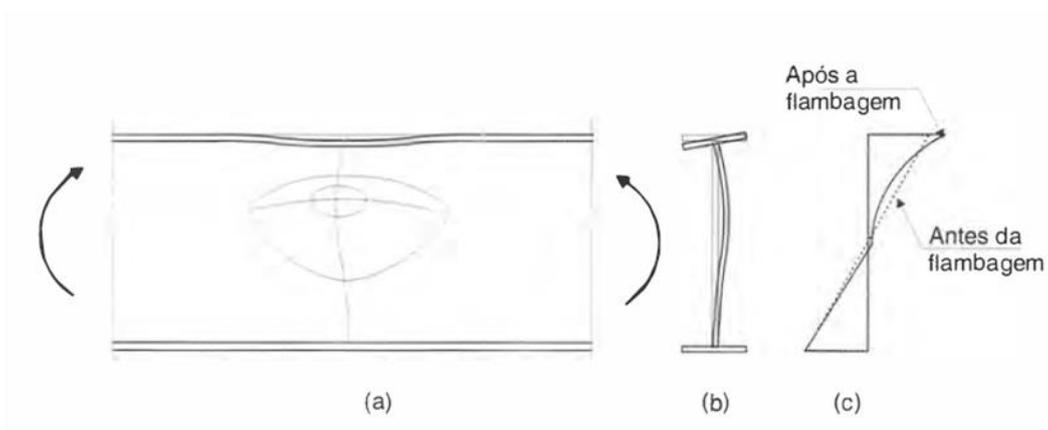
- M_{sd} é o momento fletor solicitante de cálculo;
- V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo;
- M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo, calculado de acordo com a flambagem analisada;
- V_{rd} é a força cortante resistente de cálculo, calculado na fórmula 31, 32 ou 33.

A NBR 8800 (ABNT,2008) possui o Anexo G, para tratar do assunto de momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta, constituídas de seções I, H e U. Sendo que a norma diz que precisam ser feitos três verificações (equações 41 a 65) para o momento fletor (FLA, FLM, FLT) e a resistência a flexão é o menor valor dessas três verificações.

2.4.1.3.1 Momento fletor resistente de cálculo: Flambagem Local da Alma (FLA):

Na Flambagem Local da Alma o momento por ser reduzido devido à perda de estabilidade da alma e assim, a resistência da seção transversal é diminuída, como mostrado na Figura 14.

Figura 14-Flambagem local da alma devida ao momento fletor: (a) esquema da viga, com o momento solicitante M; (b) seção transversal mostrando a alma após a flambagem; (c) diagramas de tensões elásticas antes e depois da flambagem, mostrando a transferência de tensões da alma para a mesa comprimida.



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2009.

Para calcular esses momentos devido à flambagem da alma, deve-se ter conhecimento dos parâmetros de esbeltez, contidas nas equações (41 a 43), para em seguida calcular o momento fletor resistente de cálculo (equações 45 a 47):

- Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (41)$$

- Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (42)$$

- Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (43)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- h é a altura da alma retirada do Anexo A;
- t_w é a espessura da alma retirada do Anexo A.

$$M_{pl} = Z f_y \quad (44)$$

- a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (45)$$

- b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (46)$$

- c) Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ (não aplicável à FLA – ver Anexo H da norma)} \quad (47)$$

Onde:

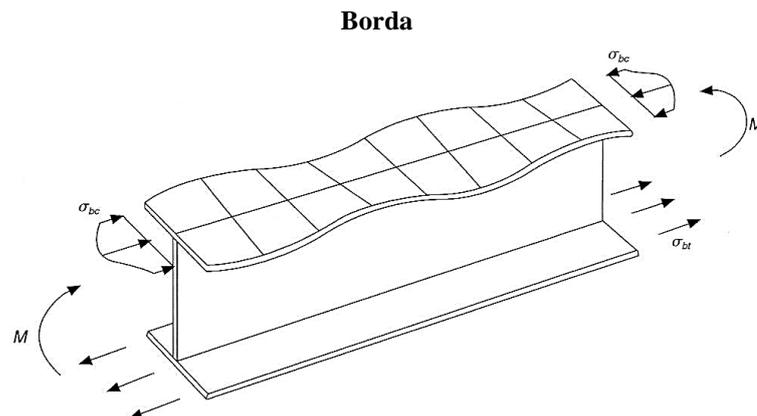
- M_{pl} é o momento fletor plástico (equação 44);
- M_{cr} é o momento fletor crítico;
- M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, calcula-se de acordo com o Anexo D, do presente trabalho;

- Λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação (equação 42);
- Λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura (equação 43);
- Λ é o parâmetro de esbeltez (equação 41);
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10;
- C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme cujo valor é 1,00;
- Z é o módulo de resistência plástica, retirada do Anexo A.

2.4.1.3.2 Momento fletor resistente local: Flambagem Local da Mesa (FLM):

Na Flambagem Local da Mesa, a mesa da viga fica instável, devido a uma diminuição da resistência à flexão, ocasionada pela perda de estabilidade de chapas comprimidas, como mostra na Figura 15. As equações relacionadas à esbeltez estão contidas nas equações 48 a 51, enquanto às destinadas ao momento fletor, resistente de cálculo, nas fórmulas 52 a 54.

Figura 15-Flambagem local da mesa comprimida em vigas I fletidas no plano da alma. As tensões normais de compressão da mesa (σ_{bc}) variam entre um valor máximo sobre a alma e um valor mínimo na



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2009.

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\Lambda = \frac{b}{t} \quad (48)$$

b) Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (49)$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

a. Para perfis laminados:

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (50)$$

b. Para perfis soldados:

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r) / k_c}} \quad (51)$$

Onde:

- σ_r é a tensão residual, também definida como ($f_y * 0,3$);
- k_c é um coeficiente que deve ser calculado de acordo com a equação 24;
- E é o módulo de elasticidade;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço;
- b é a largura do elemento (mesa) retirada do Anexo A;
- t é a espessura do elemento retirada do Anexo A;

a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (52)$$

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

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (53)$$

c) Para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (54)$$

Onde:

- M_{pl} é o momento fletor plástico;
- M_{cr} é o momento fletor crítico; que se calcula de acordo com a equação 55 ou 56;
- λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação (equação 49);
- λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura (equação 50 ou 51);
- λ é o parâmetro de esbeltez (equação 48);
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10
- C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme cujo valor é 1,00;
- M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, calcula-se de acordo com o Anexo D, do presente trabalho;
- Z é o módulo de resistência plástico, retirada do Anexo A.

Sendo:

a. Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c \quad (55)$$

b. Para perfis soldados:

$$M_{cr} = \frac{0,9Ek_c}{\lambda^2} W_c \quad (56)$$

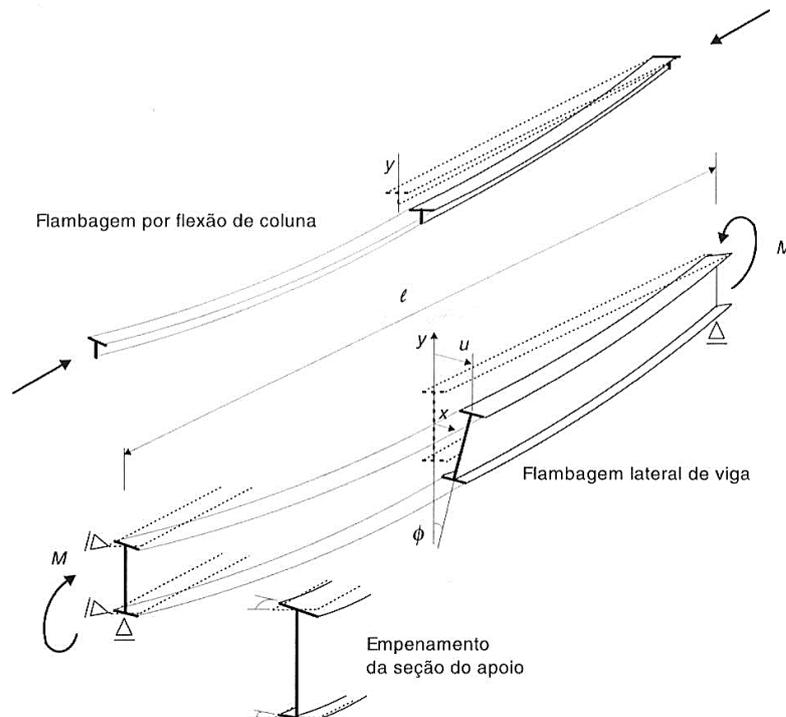
Onde:

- W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;
- E é o módulo de elasticidade;
- λ é o parâmetro de esbeltez que deve ser calculado de acordo com a equação 48;
- k_c é um coeficiente que deve ser calculado de acordo com a equação 24.

2.4.1.3.3 Momento fletor resistente de cálculo: flambagem lateral com torção (FLT)

A Flambagem Lateral com torção refere-se a uma perda de estabilidade no plano principal de flexão, devido à perda de equilíbrio da peça, e tudo isso combinado à rotação da seção, em torno do seu eixo axial, pela instabilidade. Isso gera torções e deslocamentos na seção lateral da peça, como ilustra a Figura 16. Nas equações 57 a 61, estão contidas todas as fórmulas necessárias para se obter os índices de esbeltez, enquanto da 62 a 65, tudo que pode ser usado para o cálculo do momento.

Figura 16-Flambagem lateral de viga biapoiada.



Fonte: PFEIL; PFEIL, 2009.

- Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (57)$$

- Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (58)$$

- Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = \frac{1.38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (59)$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ} \quad (60)$$

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} \quad (61)$$

- a) Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (62)$$

- b) Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (63)$$

c) Para $\lambda > \lambda_p$:

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (64)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_b}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{c_w} \right)} \quad (65)$$

Onde:

- L_b é o comprimento destravado;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação dos estados limites últimos relacionados a escoamento, como já mostrado na tabela 1, o valor considerado deve ser 1,10
- J é a inércia de torção da seção transversal encontrada como I_T no Anexo A;
- W é o módulo de resistência;
- I_y é a inércia em Y da seção transversal encontrada no Anexo A;
- C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme
- M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, calcula-se de acordo com o Anexo D, do presente trabalho;
- M_{pl} é o momento fletor plástico;
- M_{cr} é o momento fletor crítico, que se calcula de acordo com a (equação 65);
- λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação (equação 58);
- λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura (equação 59);
- λ é o parâmetro de esbeltez (equação 57);
- r_y é o raio de giração encontrado no Anexo A;
- d é a altura do perfil encontrada no Anexo A;
- E é o módulo de elasticidade;
- σ_r é a tensão residual, também definida como ($f_y * 0,3$);
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

2.5 BARRAS SUBMETIDAS A MOMENTOS FLETORES, FORÇA AXIAL E CORTANTES COMBINADOS

Pode ocorrer a ação simultânea das forças de tração, compressão e de momentos fletores, diante disso a NBR 8800 (ABNT,2008) estabelece as limitações mostradas nas expressões (66 e 67), que devem ser obedecidas:

a) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (66)$$

b) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (67)$$

Sendo:

- N_{Sd} a força axial de cálculo solicitante de tração ou compressão, dependendo a que for aplicável;
- N_{Rd} a força axial resistente de cálculo de tração ou compressão, dependendo a que for aplicável, de acordo com os itens 2.2 ou 2.3;
- $M_{x,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo, em relação aos eixos x e y da secção transversal, respectivamente;
- $M_{y,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo, em relação aos eixos x e y da secção transversal, respectivamente;
- $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ se trata dos momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, determinados de acordo com o item 2.4.1.3.

2.6 ALMAS E MESAS DE PERFIS I SUBMETIDAS A FORÇAS TRANSVERSAIS LOCALIZADAS

Devido as forças localizadas, que nas seções de perfis I e H são aplicadas na face externa da mesa superior da viga de rolamento, faz-se necessário a verificação/comparação dos valores dos estados-limites de forças resistentes de cálculo com os das forças solicitantes. As forças transversais localizadas, atuando em um perfil, trazem consequências estruturais indesejadas, que para o presente trabalho devem ser verificadas, tais como: Enrugamento da alma, Flambagem Lateral da alma e Escoamento Lateral da alma.

2.6.1 Enrugamento da alma

Quando a alma de uma barra submetida a esforço de compressão, gerada por uma carga aplicada a mesa, deve-se verificar o estado-limite último de enrugamento, como prescreve a NBR 8800 (ABNT,2008), pelas equações (68,69 e 70).

Se a força solicitante de cálculo ultrapassar o valor da força resistente de cálculo, deve-se colocar um enrijecedor transversal, ou um par deles que se estendem, até no mínimo a metade da altura da alma. (PFEIL, PFEIL, 2009).

- a) Quando a distância da força de compressão está a uma extremidade da barra maior ou sendo metade da altura da seção transversal:

$$F_{Rd} = \frac{0,66t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (68)$$

- b) Quando a distância da força de compressão é da extremidade da menor barra que a metade da altura da seção:

- Sendo $\frac{l_n}{d} \leq 0,2$:

$$F_{Rd} = \frac{0,33t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (69)$$

- Sendo $\frac{l_n}{d} > 0,2$:

$$F_{Rd} = \frac{0,33t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + \left(\frac{4l_n}{d} - 0,2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} \quad (70)$$

Onde:

- l_n é o comprimento de atuação da força longitudinal da viga;
- t_f é a espessura da mesa carregada;
- d é a altura da seção transversal da barra;
- t_w é a espessura da alma.

2.6.2 Flambagem Lateral da Alma

A NBR 8800 (ABNT,2008) determina que deve-se verificar o estado-limite último de flambagem lateral quando a alma da barra for solicitada a esforços de compressão, devido a uma força local na mesa comprimida da viga, se o deslocamento lateral entre a mesa da viga comprimida e tracionada não esteja impedindo à aplicação da força. Enfatiza-se que a força resistente de cálculo da alma da viga, dada pelas equações 71 e 72, não pode ser superada pela chamada força solicitante de cálculo.

- a) Caso a rotação da mesa carregada for impedida, para $\left(\frac{h}{t_w}\right) / \frac{l}{b_f} \leq 2,30$

$$F_{Rd} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{\gamma_{a1} h^2} \left[0,94 + 0,37 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (71)$$

- b) Caso a rotação da mesa comprimida não for impedida, para $\left(\frac{h}{t_w}\right) / \frac{l}{b_f} \leq 1,70$

$$F_{Rd} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{\gamma_{a1} h^2} \left[0,37 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (72)$$

Sendo:

- l maior comprimento destravado lateralmente, considerando as duas mesas, onde é a atuação da força concentrada;
- h distância entre as faces internas da mesa, excetuando, em perfis laminados os raios de concordância, ou para perfis soldados as faces internas da mesa;
- C_r quando $M_{sd} < M_r$ vale $32 E$ e $16 E$ quando $M_{sd} \geq M_r$;
- t_w é a espessura da alma.

2.6.2.1 Flambagem Lateral da Alma sem possibilidade de ocorrer

De acordo com a NBR 8800 (ABNT,2008), a flambagem lateral da alma não pode ocorrer em alguns casos. A norma determina que caso $\left(\frac{h}{t_w}\right) / \frac{l}{b_f}$ supere os valores de 2,30 ou 1,70, como foi exposto nas inequações do (item 2.6.2) do presente trabalho, sendo a rotação da mesa carregada impedida, essa Flambagem Lateral em questão não tem possibilidade de ocorrer.

2.6.3 Escoamento Local da Alma

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), quando se aplica cargas concentradas em seções sem enrijecedores, pode-se observar a tração ou a compressão transversal da alma da viga e isso pode levar a um escoamento da mesma.

A NBR 8800 (ABNT,2008) estabelece que se a força solicitante de cálculo superar a força resistente de cálculo, deve-se colocar enrijecedores transversais, dos dois lados da alma. A força resistente de cálculo da alma é dada pelas equações 73 e 74.

- a) Quando a força está a uma distância da extremidade da barra maior que a altura da seção transversal:

$$F_{Rd} = \frac{1,1 (5k + l_n) f_y t_w}{\gamma_{a1}} \quad (73)$$

- b) Quando a força está a uma distância da extremidade da barra inferior ou igual à altura da seção transversal:

$$F_{Rd} = \frac{1,1 (2,5k + l_n) f_y t_w}{\gamma_{a1}} \quad (74)$$

Sendo:

- t_w é a espessura da alma;
- K é a espessura da mesa somada ao raio de concordância com a alma, em perfis laminados;
- l_n comprimento de atuação da força na direção longitudinal da viga.

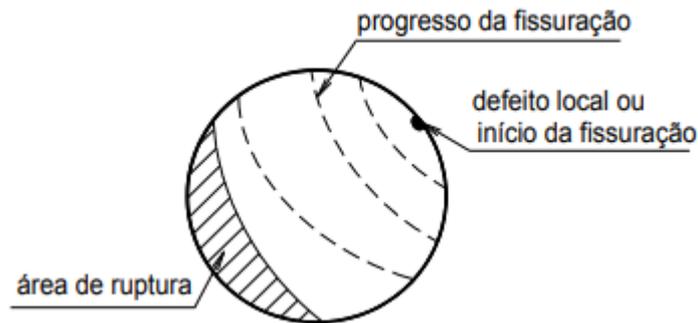
2.7 EFEITO FADIGA

Segundo Cavalcanti (2011), o efeito fadiga começou a ganhar uma maior notoriedade, com o acidente em uma ferrovia em 1842, próximo a Versalhes, que ocasionou várias mortes. A partir disso vários engenheiros começaram a se dedicarem ao estudo da fadiga, visando uma solução para vários problemas que ocorriam tanto em estruturas de aço, quanto de concreto.

Carregamentos cíclicos de amplitude variável, com o tempo podem provocar concentrações locais devido a defeitos como porosidades e trincas, defeitos de soldagem de peças e ainda no processo de fabricação das mesmas, que resultam no processo de fadiga. (VIANA, 2018).

Pfeil e Pfeil (2009), ensina que as fraturas caracterizam à fadiga, sendo que estas fraturas tendem a aumentar à medida que o carregamento aumenta ou se repete. Ou seja, quando um material é submetido a esforços repetidas vezes, isso gera deformações, podendo ainda ocorrer uma ruptura, como mostra a Figura 17.

Figura 17-Progresso de abertura de fissuras até ruptura



Fonte: CAVALCANTI, 2011, *apud* CALLISTER, 2000.

Quando as peças metálicas trabalham sob efeito de esforços repetidos em grande número, pode haver ruptura em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos. Esse efeito denomina-se fadiga do material. A resistência à fadiga das peças é fortemente diminuída nos pontos de concentração de tensões, provocadas, por exemplo, por variações bruscas na forma da seção, indentações devidas à corrosão etc. (PFEIL, PFEIL, 2018, p.17).

A NBR 8800 (ABNT,2008), em seu Anexo K, apresenta a equação 75, para o efeito fadiga em estruturas de aço:

$$F_{d,fad} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \Psi_1 \sum_{j=1}^n F_{Qj,k} \quad (75)$$

Sendo:

- $F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes;
- $F_{Qj,k}$ é o valor das ações variáveis;
- Ψ_1 se trata do fator de redução para ações variáveis, e de acordo com a norma adota-se o valor 1,0.

2.7.1 Faixa Admissível de Variação de Tensões

A NBR 8800 (ABNT,2008) também mostra como verificar se ocorrerá fadiga, levando em consideração a faixa de variação de tensões (equação 76). Para isso deve-se levar em consideração as categorias de tensão (Anexo E). Para as categorias de detalhe A, B, B', C, D, E e E' a norma determina a seguinte equação:

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327C_f}{N} \right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} \quad (76)$$

Onde:

- C_f constante do Anexo E;
- N número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da estrutura;
- σ_{TH} limite admissível da faixa de variação de tensão (Anexo E).

A norma também especifica que as tensões do metal-base não podem ultrapassar $0,66f_y$ ou $0,40f_y$, sendo para tensões normais e de cisalhamento respectivamente.

2.7.2 Fadiga ao Cisalhamento

Para Machado (2020), calcula-se esse tipo de fadiga, que vale ressaltar que é a mais decorrente em estruturas metálicas, pelas fórmulas 77 e 78:

$$Q_{Sd} = V_{Sd} \div 1,5 \quad (77)$$

$$\sigma = Q_{Sd} \div A_w \quad (78)$$

Onde:

- Q_{Sd} é o fator de redução solicitante de cálculo;
- V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo;
- σ é a tensão para cisalhamento;
- A_w é a área efetiva de cisalhamento.

A NBR 8800 (ABNT,2008), determina que o a tensão limite para cisalhamento não pode ultrapassar $0,4 f_y$, como mostra a equação 79 e 80:

$$\sigma_{lim} \leq 0,4f_y \quad (79)$$

$$\sigma < \sigma_{lim} \quad (80)$$

Onde:

- σ_{lim} é a tensão limite;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço.

2.8 ENRIJECEDORES

Enrijecedores tem a função de garantir a estabilidade global do elemento e atuam localmente na alma garantindo que não ocorram flambagens locais de alma (FLA) e instabilidade global da peça. Eles combatem estes efeitos acrescentando resistência aos esforços impostos no elemento.

2.8.1 Enrijecedores de Apoio

Enrijecedores de apoio são necessários para impedir o escoamento, enrugamento da alma e a flambagem, sempre que a carga solicitada seja maior que a resistência em estados limites. Esse tipo específico de enrijecedor é soldado à alma e à mesa, estendendo-se até pelo menos a metade da altura total da alma. Esses enrijecedores são dimensionados como colunas solicitadas à flambagem por flexão. (PFEIL, PFEIL, 2009).

Pfeil e Pfeil (2009), afirma que a relação largura/espessura não deve exceder à seguinte relação $0,56\sqrt{E/f_y}$, a fim de não ocorrer flambagem local do enrijecedor, como mostra a equação 81.

$$b_e/t \leq 0,56\sqrt{E/f_y} \quad (81)$$

Sendo:

- b_e a largura da viga, dada pela seguinte fórmula (82):

$$b_e = \frac{b_f - t_w}{2} \quad (82)$$

Onde:

- t é a espessura da barra;
- b_f largura da mesa;

- t_w espessura da alma.

2.8.2 Enrijecedores Transversais Intermediários

Barbosa (2016) explica que as placas com esbelteza elevada, que por diversas vezes são utilizadas em vigas de pontes e viadutos, apresentam a instabilidade como um dos pontos mais críticos a serem avaliados. Para contornar esse problema, recorre-se à utilização de enrijecedores transversais e longitudinais para o reforço das placas esbeltas, formando os painéis enrijecidos. Dentre as vantagens dos enrijecedores transversais, cita-se o aumento da capacidade resistente ao cisalhamento, a absorção das forças transversais localizadas e a contribuição para a redução de deformações distorcionais da seção transversal. (HELENO; CARVALHO; BARBOSA *et al.*, 2018, p.1).

Na subseção 5.7.9.2 a norma instrui que para enrijecedores que sejam solicitados à forças localizadas, que produzam compressão na alma da viga, para enrugamento da alma (item 2.6.1), é necessário que eles se prolonguem até a metade da altura da alma, no mínimo, sendo que devem ser soldados à mesa e à alma, ou então deve-se ajustar as extremidades destes enrijecedores, a fim de estarem perfeitamente em contato com a mesa carregada.

Enrijecedores Intermediários normalmente são formados por chapas soldadas na alma. Além disso, estes enrijecedores também podem servir de apoio para as mesas. Vale ressaltar que só existe necessidade de se colocar enrijecedores transversais caso, a inequação (83) dada por Pfeil e Pfeil (2009), não seja obedecida.

$$\frac{h_w}{t_0} \leq 2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ ou } \frac{h_w}{t_0} < 260 \quad (83)$$

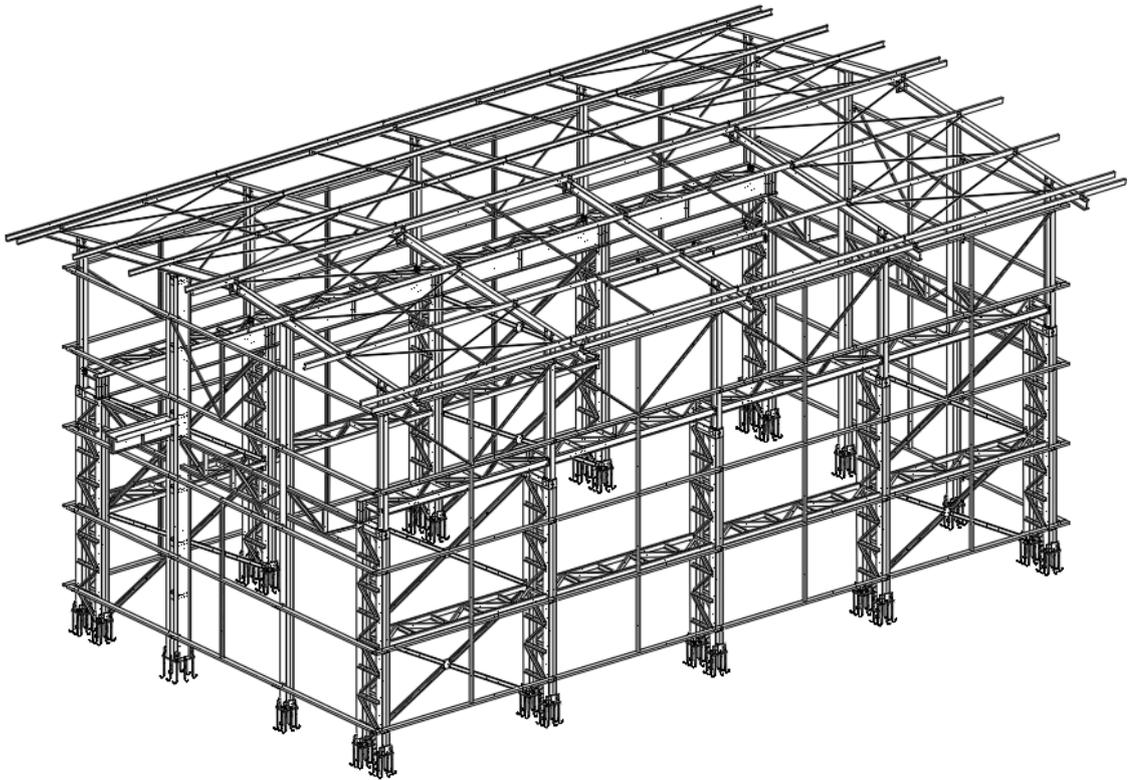
Onde:

- h_w é a altura da alma, distância entre as faces internas das mesas menos os dois raios de concordância entre mesa e alma, para perfis soldados, e para laminados é o comprimento da parte plana nas seções tubulares retangulares;
- t_0 é a espessura da alma.

3 ESTUDO DE CASO

A viga de rolamento, analisada nesse estudo, faz parte da estrutura metálica da casa de força auxiliar (Figura 18), a qual contém uma ponte rolante de 40 toneladas. Esta casa de força foi executada no município de Santa Helena de Goiás, no ano de 2017, para a empresa Santa Helena Energia S/A. A empresa RC Construções Metálicas Ltda é a responsável pelos estudos de viabilidade, a economia, segurança e concepção da estrutura metálica da casa de força.

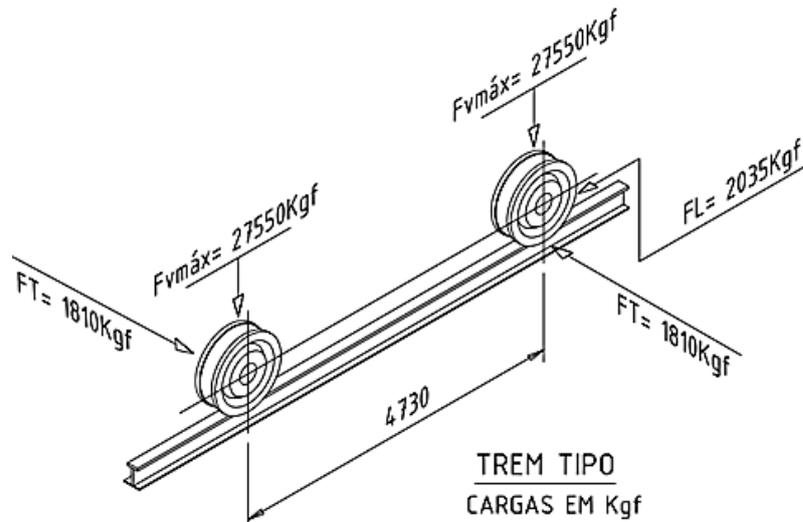
Figura 18-Isométrica da estrutura metálica da casa de força auxiliar



Fonte: RC Construções Metálicas Ltda, 2017

Para dimensionar uma viga de rolamento, se faz necessário o conhecimento dos dados da ponte rolante que vai ser suportada pelas vigas de rolamento. De início, consultou-se a empresa RC Construções Metálicas, que nos forneceu todos os dados da ponte rolante usada na empresa de Santa Helena, esses dados foram obtidos junto à fabricante da ponte rolante (HISA). A Figura 19 é uma representação do carro trole da ponte rolante de 40 toneladas e no Quadro 3 estão contidas as características da ponte em questão.

Figura 19-Roldanas do carrinho da ponte rolante



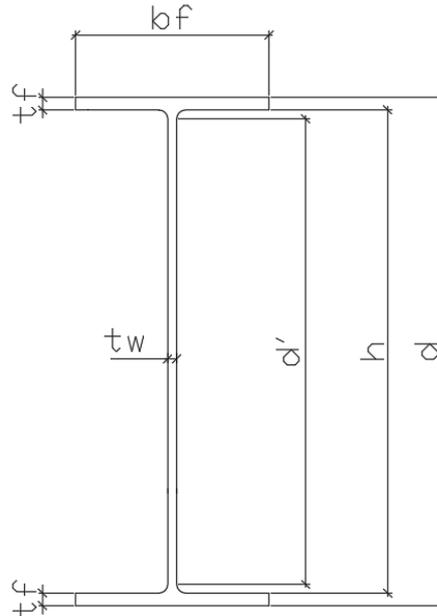
Fonte: HISA,2017.

Quadro 3- Características da ponte rolante

Capacidade da ponte rolante	40 tf
Vão livre da ponte rolante (eixos dos trilhos)	10,85 m
Carga vertical máxima por roda do trole	27,55 tf
Carga transversal máxima por roda do trole	1,81 tf
Força longitudinal de compressão	2,035 tf
Espaçamento entre rodas do trole	4730 mm
Vãos entre pórticos	5,60 m
Número de ciclos	63000 ciclos
Tipo de trilho	TR 37
Altura do trilho	12,2 cm

Fonte: HISA, 2017.

O perfil W610x101 produzido pela (Gerdau Aço Minas), representado pela Figura 20, foi o perfil verificado no dimensionamento deste trabalho, uma vez que foi este o perfil utilizado na viga de rolamento, projetada e executada pela empresa RC Construções Metálicas. No Quadro 4 encontram-se os dados do perfil, extraídos do catálogo da (Gerdau Aço Minas), presente no Anexo A deste trabalho.

Figura 20-Perfil W610x101

Fonte: Domínio Próprio, 2020.

Quadro 4-Dados do perfil W610x101.

M= 101,0 kgf/m	$I_x= 77003 \text{ cm}^4$
A= 130,3 cm ²	$W_x= 2554 \text{ cm}^3$
d= 60,3 cm	$r_x= 24,31 \text{ cm}$
$b_f= 22,8 \text{ cm}$	$Z_x= 2922,7 \text{ cm}^3$
h= 57,3 cm	$I_y= 2951 \text{ cm}^4$
$d'= 54,1 \text{ cm}$	$W_y= 258,8 \text{ cm}^3$
$t_w= 1,05 \text{ cm}$	$r_y= 4,76 \text{ cm}$
$t_f= 1,49 \text{ cm}$	$Z_y= 405 \text{ cm}^3$
$r_t= 5,76 \text{ cm}$	$J= 81,68 \text{ cm}^4$
E= 2000 tf/cm ²	$f_y= 3,45 \text{ tf/cm}^2$

Fonte: GERDAU,2020

De início, se faz necessário algumas considerações para o cálculo, considerações que são apresentadas no Quadro 5 e no Quadro 6, mostra-se alguns critérios prescritos pela NBR 8800:2008 que foram utilizados ao longo do dimensionamento.

Quadro 5-Considerações para o cálculo

Comprimento destravado da viga	$L = 5,6 \text{ m}$
Carregamento vertical permanente	$101 \cdot 1,4 = 141,4 \text{ kgf/m} = 0,001414 \text{ tf/cm}$
Carregamento vertical móvel	$27,55 \cdot 1,5 \cdot 1,25 = 51,66 \text{ tf}$
Carregamento transversal móvel	$1,81 \cdot 1,5 = 2,72 \text{ tf}$

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Quadro 6-Critérios de Norma

Deformação admissível vertical ($P > 20 \text{ tf}$)	$L/800$
Deformação admissível transversal	$L/400$
Coefficiente de impacto vertical da ponte rolante comandada de uma cabine	25%
Coefficiente de ponderação para carregamento permanente	1,4
Coefficiente de ponderação para carregamento móvel	1,5
Coefficiente de ponderação da resistência do aço estrutural para ELU ao escoamento, à flambagem e à instabilidade (γ_{a1})	1,1

Fonte: NBR 8800:2008

Para se calcular as deformações máximas admissíveis considera-se o peso da ponte rolante mais o valor da carga máxima a ser içada, na posição mais desfavorável (trem-tipo) (MACHADO, 2020). Os esforços foram determinados através de um modelo computacional, montado para este fim, com a utilização do software STRAP (Structural Analysis Programs) desenvolvido pela SAE Informática Ltda. Os resultados mais desfavoráveis encontrados, estão contidos no Quadro 7.

Quadro 7-Resultados mais desfavoráveis

Maior reação de apoio	$R = 72 \text{ tf}$
Maior deslocamento vertical	$\Delta = 0,50 \text{ cm}$
Maior deslocamento transversal	$\Delta = 0,82 \text{ cm}$
Maior esforço cortante	$V_S = 52 \text{ tf}$
Maior momento fletor	$M_S = 46 \text{ tfm}$
Maior momento transversal	$M_S = 2,8 \text{ tfm}$

Fonte: Domínio Próprio, 2020

3.1 VERIFICAÇÃO AO DESLOCAMENTO

Primeiramente realizou-se a verificação dos deslocamentos verticais e horizontais, seguindo o que foi mostrado no item 2.4.1.1 deste trabalho, a fim de se verificar se a viga W610x101 atende aos critérios das deformações.

3.1.1 Descolamento vertical

Como apresentado no Quadro 6, do presente trabalho, deve-se adotar $L/800$ para deslocamentos verticais de pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN, exceto pontes siderúrgicas. Vale ressaltar também que como apresentado no Quadro 5, o valor do comprimento destravado da viga é 560cm.

$$\Delta_{limite} = \frac{L}{800} = \frac{560}{800} = 0,7cm$$

$$\Delta_{real} < \Delta_{limite} \rightarrow 0,5 < 0,7 \quad (ok)$$

Sendo o valor do maior deslocamento vertical, representado na equação por Δ_{real} , menor que o deslocamento limite, a viga W610x101 passou na verificação de deslocamento vertical. Para esta verificação, de forma conservadora, a viga foi considerada bi-apoiada, simplificando à sua verificação.

3.1.2 Deslocamento Transversal

Calcula-se o deslocamento limite que, de acordo com o Quadro 6, vale $L/400$, para deslocamentos horizontais. Em seguida, calcula-se o deslocamento da viga simples, considerando a carga transversal máxima por roda do trole como 1,81tf e a inércia em y (I_y) valendo 2951 cm⁴.

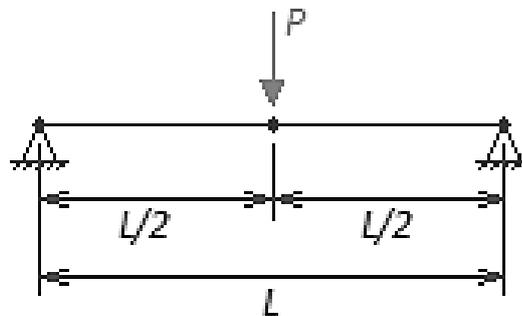
$$\Delta_{limite} = \frac{L}{400} = \frac{560}{400} = 1,4cm$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{F_T L^3}{48E \frac{I_y}{2}} = \frac{1,81.560^3}{48.2000. \frac{2951}{2}} = 2,24 \text{ cm} \quad (84)$$

Sendo:

- P é a carga transversal (horizontal), no ponto mais desfavorável da viga de rolamento, (Figura 21);
- L é o comprimento destravado da viga de rolamento, (Figura 21);
- I_y é a inércia da seção em y ;
- E é o módulo de elasticidade do aço.

Figura 21-Representação do esquema estático da Viga de Rolamento



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

$$\Delta > \Delta_{lim} \rightarrow 2,24 > 1,4 \quad (\text{n\~{a}o ok})$$

Como provado nos cálculos acima, o deslocamento transversal (horizontal) da viga simples ultrapassa o valor limite e por isso há necessidade de se adotar uma treliça (horizontal), com o fim de contraventar a viga de rolamento. Calculando-se o deslocamento transversal com a treliça, por meio do software STRAP (Structural Analysis Programs), obteve-se o valor de 0,82cm.. Assim sendo, a viga W610x101 atende os critérios de deslocamento, como se vê abaixo.

$$\Delta < \Delta_{limite} \rightarrow 0,82 < 1,4 \quad (\text{ok})$$

3.2 VERIFICAÇÃO QUANTO AO CISALHAMENTO

Assim como no item anterior, faz-se necessário verificar a Viga W610x101 quanto ao cisalhamento, vertical e transversal. Para isso é necessário conhecer dois valores: V_s apresentado na Quadro 6, e k_v , que como apresentado no item 2.4.1.2. Para este trabalho, o valor considerado k_v para é 5,0.

3.2.1 Cisalhamento Vertical

É necessário calcular, primeiramente, os parametros de esbeltez contidos nas fórmulas 34,35 e 36, para depois saber qual equação da força cortante resistente de cálculo será necessária, sendo que os valores da largura e espessura da alma e o valor de escoamento do aço, estão contidos na Quadro 4.

$$\lambda = \frac{d'}{t_w} = \frac{541}{10,5} = 51,52$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5.2000}{3,45}} = 59,22$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 1,37 \sqrt{\frac{5.2000}{3,45}} = 73,76$$

Como $\lambda < \lambda_p$, será usada a fórmula 31, para o cálculo da força cortante e o valor de A_w é dado pela equação 38, e de V_{pl} pela 37.

$$V_{pl} = 0,6A_w f_y = 0,6dt_w f_y = 0,60.60,3.1,05.3,45 = 131,06t_f$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{131,06}{1,1} = 119,15t_f$$

$$V_s < V_{Rd} = 52t_f < 119,15t_f \quad (ok)$$

Observou-se que o valor da força cortante não ultrapassou o maior esforço cortante, calculado com o auxílio do software STRAP (Structural Analysis Programs), sendo assim, a viga W610x101 atende aos critérios normativos quanto ao cisalhamento vertical.

3.2.2 Cisalhamento Transversal

No cálculo do cisalhamento transversal, basta calcular a força cortante, alterando os valores do A_w , para o tamanho e espessura da mesa da viga, conforme os dados do Quadro 4.

$$V_{pl} = 0,6A_w f_y = 0,6b_f t_f f_y = 0,60.22,8.1,49.3,45 = 70,32t_f$$

$$V_s < V_{Rd} = 2,32t_f < 70,32t_f \quad (ok)$$

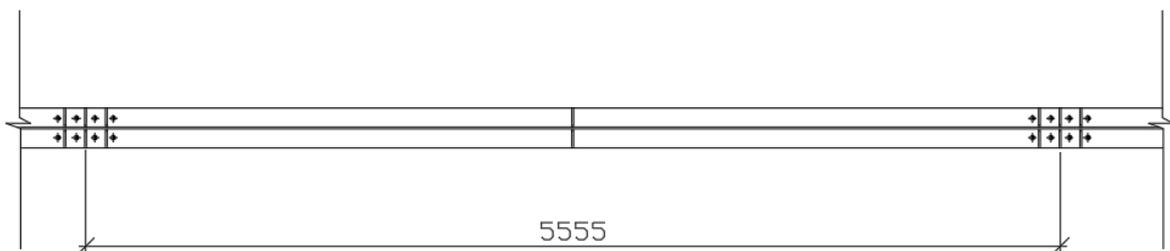
3.3 VERIFICAÇÃO QUANTO AO MOMENTO FLETOR

Para verificar a viga W610x101 quanto ao momento fletor, é necessário o cálculo para os eixos X e Y, foi levado em consideração duas situações, a viga sem contenção lateral e a mesma com contenção lateral intermitente.

3.3.1 Eixo X

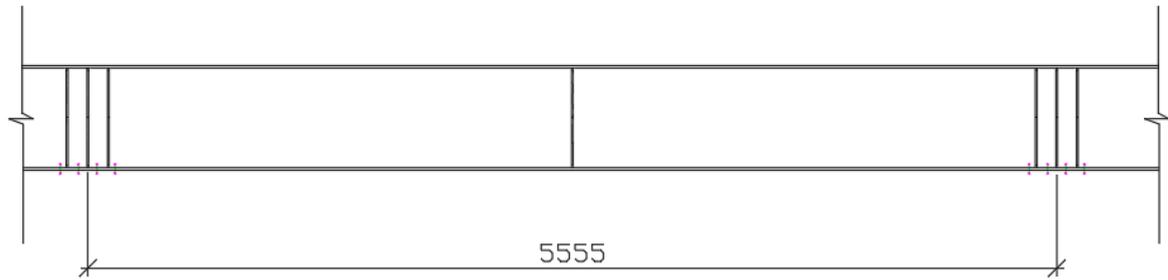
A Figura 22 e 23 mostram as cotas da viga sem contenção, e e a Figura 24, da viga com contenção lateral intermitente, através da treliça.

Figura 22-Viga sem contenção Lateral (Vista Superior)



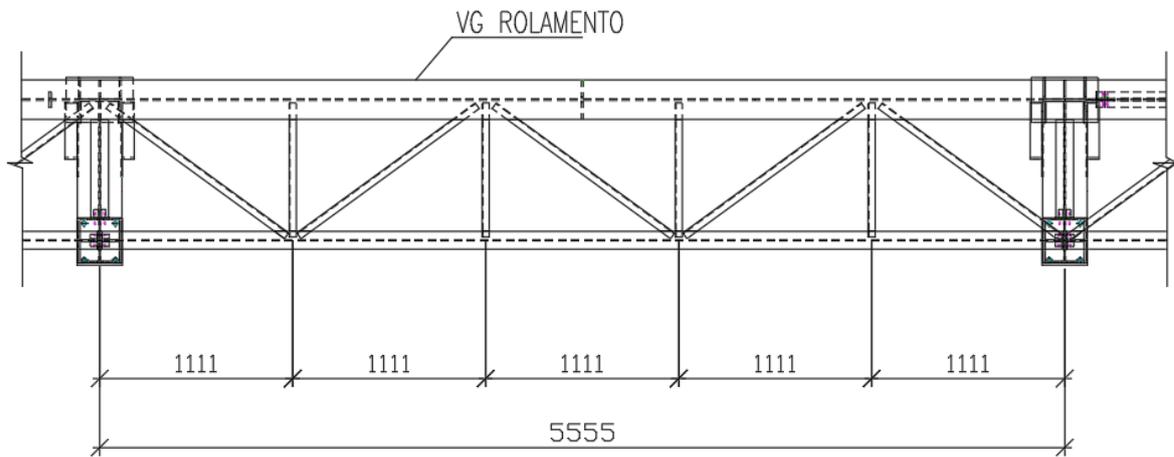
Fonte: RC Construções Metálicas LTDA, 2017.

Figura 23-Viga sem contenção lateral (Vista lateral)



Fonte: RC Construções Metálicas LTDA, 2017

Figura 24-Viga treliçada (Vista Superior)



Fonte: RC Construções Metálicas LTDA, 2017.

3.3.1.1 Estabilidade Local

Para a estabilidade local, é necessário o cálculo dos índices de esbeltez local, dados pelas fórmulas, conforme já mostrado nos itens 2.4.1.3.1 e 2.4.1.3.2, para mesas e almas, e assim em seguida verificar o momento fletor.

- Mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{22,8}{2,149} = 7,6$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 9,2$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - 0,3f_y)}} = 0,83 \sqrt{\frac{2000}{(3,45 - 0,3 \cdot 3,45)}} = 23,9$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow 7,6 < 9,2$$

- Alma (FLA)

$$\lambda = \frac{d'}{t_w} = \frac{54,1}{1,05} = 51,5$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 90,5$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 5,70 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 137,2$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow 51,5 < 90,5$$

Como visto nos resultados acima que $\lambda < \lambda_p$, então, a fórmula usada tanto para FLA quanto FLM, será a mesma, correspondendo as equações 45 e 52, do presente trabalho. Vale ressaltar que o valor de Z_x está contido no Quadro 4.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{2922,7 \cdot 3,45}{1,10} = 9166,65 \text{ t fcm} = 91,7 \text{ t f m}$$

3.3.1.2 Estabilidade Global

Para estabilidade global, foi calculada a flambagem lateral com torção (FLT), de acordo com o item 2.4.1.3.3 do presente trabalho. Para isso, calculou-se os índices de esbeltez para duas situações: viga sem contenção lateral e com contenção lateral intermitente.

- 1º Situação – Viga sem contenção lateral

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{560}{4,76} = 117,64$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 42,38$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y \cdot J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} = \frac{1,38 \sqrt{2951 \cdot 81,68}}{4,76 \cdot 81,68 \cdot 0,0378} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{27 \cdot 2551594 \cdot 0,0378^2}{2951}}} =$$

$$\lambda_r = 120,68$$

$$\beta_1 = \frac{0,7 f_y W_x}{E J} = \frac{0,7 \cdot 3,45 \cdot 2554}{2000 \cdot 81,68} = 0,0378$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} = \frac{2951 (60,3 - 1,49)^2}{4} = 2.551.594$$

- 2º Situação – Com contenção lateral intermitente (treliça)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{111,1}{4,76} = 23,34$$

$$\lambda_p = 42,38$$

$$\lambda_r = 120,68$$

Optou-se, por dimensionar a viga na segunda situação, ou seja, a viga travada lateralmente por uma treliça, conforme adotado pela fabricante da estrutura metálica. A equação usada é a de número 62, afinal $\lambda < \lambda_p$.

- 2º Situação – Com contenção lateral intermitente (treliça)

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{10083,32}{1,1} = 91,7 \text{ tfm}$$

Deve-se comparar os valores obtidos com o maior momento fletor, que é dado no Quadro 7, e estes devem ser maiores que M_S .

$$M_R = 91,7 \text{ tfm} > M_S = 46 \text{ tfm} \quad (ok)$$

3.3.2 Eixo Y

Na verificação do momento em torno do eixo Y (momento transversal), foi considerado apenas a mesa superior da viga para resistir o esforço. Dimensionou-se como seção sólida retangular fletida em relação ao eixo de maior inércia. Neste caso o momento resultante de cálculo deve ser maior que o maior momento transversal (M_S) da viga, que está contido no Quadro 7.

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{pl} = (Z_y/2) \cdot f_y = 202,5 \cdot 3,45 = 698,625 \text{ tpcm}$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{698,625}{1,1} = 635,11 \text{ tpcm} = 6,35 \text{ tfm}$$

$$M_R = 6,35 \text{ tfm} > M_S = 2,8 \text{ tfm} \quad (ok)$$

3.4 DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO

Nesta parte da verificação quanto à compressão, se deve levar em consideração o item 2.3 do trabalho, que informa, que deve-se verificar a compressão quanto a flamabegem local, e global. De início, é necessário multiplicar a força longitudinal de compressão por 1,4, pois este é o coeficiente para carregamento permanente, como indicado no Quadro 6.

$$F_L = 2,035 \cdot 1,4 = 2,85 \text{ tf}$$

3.4.1 Quanto à Flambagem Global

Para se encontrar o índice de esbelteza, a fim de calcular a flambagem global da peça comprimida, usa-se a fórmula 11, já apresentada.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} < 200$$

$$K = 1$$

$$\lambda_x = \frac{L_b}{r_x} = \frac{560}{24,31} = 23 < 200 \quad (ok)$$

$$\lambda_y = \frac{L_b}{r_y} = \frac{111,1}{4,76} = 23,34 < 200 \quad (ok)$$

Vale ressaltar que todos os valores necessários foram retirados dos Quadros 4 e 5.

3.4.2 Quanto à Flambagem Local

Como orientado no item 2.3.2, é necessário calcular a relação entre largura e espessura para a mesa e alma da viga, o $(b/t)_{lim}$, para depois calcular o Q_a e/ou Q_s se houver necessidade. De início, deve-se classificar a viga em questão, nos grupos indicados no Anexo B.

- Mesa (AL – Grupo 4)

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 13,5$$

$$Q_s = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{22,8}{2 \cdot 1,49} = 7,65 < 13,5 \quad (ok) \rightarrow Q_s = 1$$

- Alma (AA – Grupo 2)

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 36$$

$$Q_a = \frac{b}{t} = \frac{d'}{t_w} = \frac{54,1}{1,05} = 51,52 > 36 \quad (\text{n\~{a}o ok}) \rightarrow Q_a \neq 1$$

Como $Q_a \neq 1$, faz-se necessário, como já explicado no item 2.3.2, o cálculo desse valor. E por fim, se multiplica os valores de Q_s e Q_a , para encontrar o fator de redução associado a flambagem local.

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{116,36}{130,3} = 0,89$$

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t = 130,3 - (54,1 - 40,83)1,05 = 116,36$$

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{C_a}{\frac{b}{t}} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b = 1,92 \cdot 1,05 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} \left[1 - \frac{0,34}{\frac{54,1}{1,05}} \sqrt{\frac{2000}{3,45}} \right] = 40,83 < 54,1$$

$$C_a = 0,34$$

$$Q = Q_s \cdot Q_a = 1 \cdot 0,89 = 0,89$$

3.4.3 Determinação da Força Resistente

É necessário verificar se a força longitudinal de compressão é menor ou maior que a força axial de compressão, dada pela equação 10. Para isso, é necessário saber o valor X que é obtido no Anexo C, em função do índice de esbeltez.

$$N = \frac{X \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,965 \cdot 0,89 \cdot 130,3 \cdot 3,45}{1,1} = 350,98tf$$

$$\lambda_0 = \frac{K \cdot L}{r} \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E}} = \frac{1.111,11}{4,76} \sqrt{\frac{0,89 \cdot 3,45}{\pi^2 \cdot 2000}} = 0,2911 \rightarrow X = 0,965$$

$$F_L < N \rightarrow 2,85 < 350,98tf \quad (ok)$$

3.5 VERIFICAÇÃO DAS CARGAS COMBINADAS (FLEXÃO E COMPRESSÃO)

O item 2.5, deste trabalho apresenta as condições que devem ser atendidas por barras submetidas a cargas combinadas, de maneira que não ocorra a torção das barras, que no caso estudado se trata da viga W610x101.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{2,85}{350,98} = 0,00812 < 0,2$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 = \frac{2,85}{2 \cdot 350,98} + \left(\frac{46}{91,7} + \frac{2,8}{6,35} \right) = 0,94 < 1 \quad (ok)$$

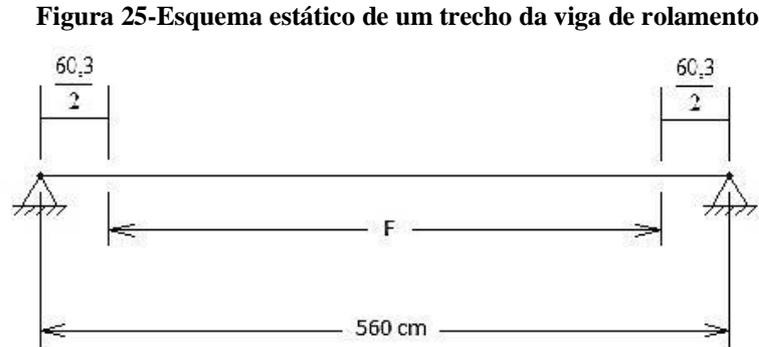
3.6 VERIFICAÇÃO DAS FORÇAS LOCALIZADAS

É necessário como mostrado no item 2.6, verificar a Viga W610x101, quanto ao esmagamento da alma, flambagem da alma, e escoamento local da alma.

3.6.1 Verificação do Esmagamento da Alma

Baseando-se na teoria apresentada no item 2.6.1 e no artigo de Machado (2020), calcula-se o enrugamento da alma, levando em consideração que deve-se verificar quando a força de compressão está a uma distância da extremidade maior que a metade da altura da seção transversal, e quando a força de compressão está a uma distância da extremidade, menor que a metade da altura da seção transversal. Sendo que os valores da força de compressão calculados devem ser maiores que a maior reação de apoio. Nas Figuras 25 e 26, estão representados os esquemas estáticos da viga, com suas respectivas medidas.

3.6.1.1 Quando a força de compressão está a uma distância da extremidade maior que a metade da altura da seção transversal (fora do apoio)



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

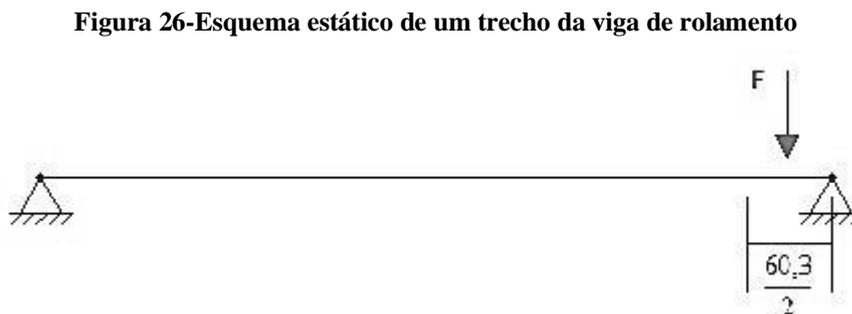
$$F_{Rd} = \frac{0,66t_w^2}{\gamma_{a1}} \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E f_y t_f}{t_w}} =$$

$$F_{Rd} = \frac{0,66 \cdot 1,05^2}{1,1} \left[1 + 3 \left(\frac{13,69}{60,3} \right) \left(\frac{1,05}{1,49} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{2000 \cdot 3,45 \cdot 1,49}{1,05}} = 91,83tf$$

$$l_n = d_{trilho} + t_f = 12,2 + 1,49 = 13,69cm$$

$$F_{Rd} > R \rightarrow 91,83tf > 72tf$$

3.6.1.2 Quando a força de compressão está a uma distância da extremidade, menor que a metade da altura da seção transversal (no apoio)



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

$$\frac{l_n}{d} = \frac{13,69}{60,3} = 0,23 > 0,2$$

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

$$F_{Rd} = \frac{0,33 \cdot 1,05^2}{1,1} \left[1 + \left(\frac{4 \cdot 13,69}{60,3} - 0,2 \right) \left(\frac{1,05}{1,49} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{2000 \cdot 345 \cdot 1,49}{1,05}} = 46,44 tf$$

$$F_{Rd} \geq R \rightarrow 46,44 tf < 72 tf \quad (\text{n\~{a}o ok})$$

Como a reação de apoio é maior que a força de compressão calculada, se faz necessário o uso de enrijecedores transversais.

3.6.2 Flambagem de Alma por Carga Concentrada

Seguindo-se o que foi apresentado no item 2.6.2 assim como os dados do Quadro 4, verificou-se o estado limite ultimo de flambagem lateral, para rotação de mesa impedida, e para rotação não impedida. No primeiro caso, utiliza-se o valor de 111,1cm, pois se trata do comprimento destravado da treliça, enquanto o valor de 560, é o comprimento destravado da viga sem contenção lateral.

- Rotação da mesa impedida

$$h = d' \quad (\text{para perfis laminados})$$

$$\frac{h}{t_w} / \frac{L_b}{b_f} \leq 2,3 \rightarrow \frac{54,1}{1,05} / \frac{111,1}{22,8} = 10,57 > 2,3$$

- Rotação da mesa não impedida

$$\frac{h}{t_w} / \frac{L_b}{b_f} \leq 1,7 \rightarrow \frac{54,1}{1,05} / \frac{560}{22,8} = 2,1 > 1,7$$

O item 2.6.2.1 informa que quando se ultrapassa os valores de 2,3 e 1,7, para mesa impedida e não impedida, respectivamente, não tem possibilidade de ocorrer flambagem lateral de alma.

3.6.3 Verificação do Escoamento Local da Alma

Como indicado no item 2.6.3, a NBR 8800:2008 determina que deve ser verificado o escoamento local da alma, para duas situações: Força a uma distância da extremidade da barra maior que a altura da seção transversal e força a uma distância da extremidade da barra inferior ou igual à altura da seção transversal.

- Força a uma distância da extremidade da barra maior que a altura da seção transversal (fora do apoio)

$$F_{Rd} = \frac{1,1 (5k + l_n) f_y t_w}{\gamma_{a1}} = \frac{1,10 \cdot (5 \cdot 3,09 + 13,69) 3,45 \cdot 1,05}{1,1} = 105,6 \text{ tf}$$

$$k = t_f + R = 1,49 + 1,6 = 3,09 \text{ cm} \quad (\text{para perfis laminados})$$

$$RAIO = \frac{h - d'}{2} = \frac{57,3 - 54,1}{2} = 1,6 \text{ cm}$$

$$F_{Rd} > R \rightarrow 105,6 \text{ tf} > 72 \text{ tf} \quad (\text{ok})$$

- Força a uma distância da extremidade da barra inferior ou igual à altura da seção transversal (no apoio)

$$F_{Rd} = \frac{1,1 (2,5k + l_n) f_y t_w}{\gamma_{a1}} = \frac{1,10 \cdot (2,5 \cdot 3,09 + 13,69) 3,45 \cdot 1,05}{1,1} = 77,6 \text{ tf}$$

$$F_{Rd} > R \rightarrow 77,6 \text{ tf} > 72 \text{ tf} \quad (\text{ok})$$

3.7 ANÁLISE DO EFEITO FADIGA

Conforme o informado no item 2.7, do presente trabalho, primeiramente é necessário para a análise de fadiga, saber a categoria de tensão, e para o estudo em questão, a categoria A é a que deve ser adotada, levando em consideração as informações do Anexo E.

No cálculo de fadiga da viga de rolamento deste trabalho, seguindo a orientação de Machado (2020), estimou-se, a favor da segurança, uma média de 100 aplicações diárias em 50 anos e o impacto não foi considerado.

Para a análise foi necessário fazer a distinção, entre a fadiga no eixo x, no eixo y, além de analisar o efeito fadiga ao cisalhamento, com as orientações do item 2.7.2. Vale ressaltar que o N , se refere ao número de ciclos que a ponte rolante realiza.

$$\text{CATEGORIA DE TENSÃO A} \begin{cases} C_f = 250 \cdot 10^8 \\ \sigma_{TH} = 165 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 C_f}{N} \right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} = \left(\frac{327 \cdot 250 \cdot 10^8}{63000} \right)^{0,333} = 503,13 \text{ MPa} > 165 \text{ MPa} \quad (\text{ok})$$

3.7.1 Efeito Fadiga no Eixo X

Para o cálculo é necessária a determinação da tensão de cisalhamento, assim como a tensão limite, para dividir os dois valores, um pelo outro e verificar se estes são menores que 1. Para isso se faz necessário, dividir o maior momento fletor, pelo coeficiente de ponderação para carregamento móvel, que vale 1,5.

$$M_{Sd} = 46 \text{ tfm} \div 1,5 = 30,67 \text{ tfm} = 3067 \text{ t fcm}$$

$$\sigma = \frac{M_{Sd}}{W_x} = \frac{3067}{2554} = 1,2 \text{ tf/cm}^2 = 120 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{lim} = 0,66 f_y = 0,66 \cdot 3,45 = 2,28 \text{ tf/cm}^2 = 228 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{lim}} = \frac{120}{228} = 0,526 < 1 \quad (\text{ok})$$

3.7.2 Efeito Fadiga no Eixo Y

Para o eixo Y a forma de se calcular as tensões são da mesma forma que em X, a tensão limite por também se tratar de tensões normais, vai valer $0,66 f_y$.

$$M_{sd} = 2,8 \text{ tfm} \div 1,5 = 186,67 \text{ tfcm}$$

$$\sigma = \frac{M_{sd}}{W_Y} = \frac{186,67}{258,8} = 0,72 \text{ tf/cm}^2 = 72,13 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{lim}} = \frac{72,13}{228} = 0,32 < 1 \quad (\text{ok})$$

3.7.3 Fadiga ao Cisalhamento

Para fadiga ao cisalhamento o raciocínio é o mesmo encontrado no item 2.7.2, deste trabalho, e será utilizado o maior esforço de cisalhamento no cálculo do Q_S . Para a equação da tensão limite, deverá ser utilizada a expressão de tensão de cisalhamento, que é $0,4 f_y$.

$$Q_S = 52 \text{ tf} \div 1,5 = 34,67 \text{ tf}$$

$$A_S = d' \cdot t_w = 54,1 \cdot 1,05 = 56,8 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{Q_S}{A_S} = \frac{34,67}{56,8} = 0,610 \text{ tf/cm}^2 = 61 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{lim} = 0,4 f_y = 0,4 \cdot 3,45 = 1,38 \frac{\text{tf}}{\text{cm}^2} = 138 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{lim}} = \frac{61}{138} = 0,442 < 1 \quad (\text{ok})$$

3.8 DIMENSIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES

Neste item, está o dimensionamento dos enrijecedores de apoio e enrijecedores transversais, verificando-se também se existe a necessidade da utilização dos enrijecedores intermediários.

3.8.1 Enrijecedores de Apoio

Como indicado no item 2.8.1, a relação de largura/espessura não pode exceder $0,56\sqrt{E/f_y}$. Foi adotada uma chapa de 0,95 cm, pois a espessura da chapa deve ser próxima a espessura da alma da viga, que no caso estudado é de 1,05 cm, como indicado no Quadro 4.

$$b_e = \frac{b_f - t_w}{2} = \frac{22,8 - 1,05}{2} = 10,87 \approx 10 \text{ cm}$$

$$\frac{b_e}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{10}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = t \geq \frac{10}{13,48} = 0,74 \text{ cm}$$

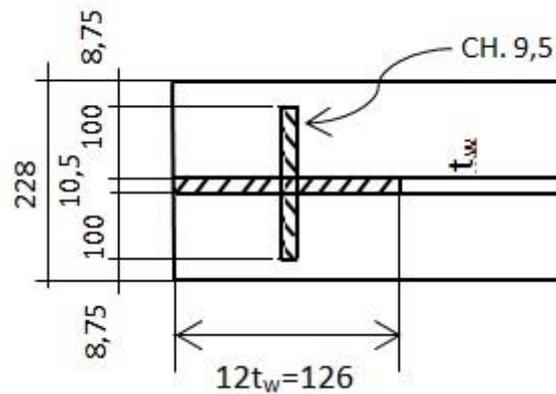
$$t = 9,5 \text{ mm} = 0,95 \text{ cm}$$

A espessura da alma deve ser multiplicada por 12, pois a parte da alma comprimida é de no mínimo 12 vezes a espessura da alma da viga.

$$12t_w = 12 \cdot 1,05 = 12,6 \text{ cm}$$

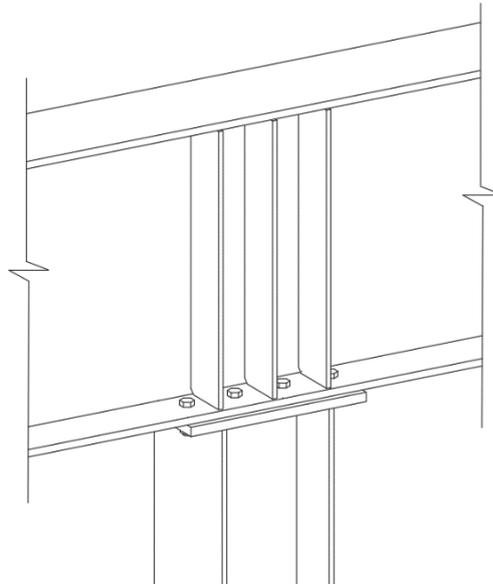
A Figura 27 e 28, representam os enrijecedores de apoio necessários, sendo que a primeira imagem se trata de uma representação, e a segunda de uma isométrica do próprio projeto.

Figura 27-Representação dos enrijecedores de apoio



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

Figura 28-Isométrica (Enrijecedores na região do Apoio)



Fonte: RC Construções Metálicas Ltda, 2017.

O comprimento de flambagem da peça comprimida pode ser considerado igual a 0,75 da altura do enrijecedor. E compara-se o valor da força resistente, com a maior reação de apoio, e a última deve ser menor, afinal deve-se resistir mais do que o valor solicitado.

$$A = 2b_e \cdot t + 12t_w^2 = 2 \cdot 10 \cdot 0,95 + 12 \cdot 1,05^2 = 32,23 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,95 \cdot 21,05^3}{12} = 738,4 \text{ cm}^4$$

$$N = \frac{X \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \begin{cases} Q = 1 \\ X \approx 1 \end{cases}$$

$$N = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{32,23 \cdot 3,45}{1,1} = 101,1 \text{ tf} > 72 \text{ tf} \rightarrow N > R \quad (\text{ok})$$

Por questões comerciais, o projetista adotou o aço A-36 ($f_y = 2,5 \text{ tf/cm}^2$), para os enrijecedores.

$$\frac{b_e}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{10}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{2000}{2,5}} = t \geq \frac{10}{15,84} = 0,63 \text{ cm}$$

$$N = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{32,23 \cdot 2,5}{1,1} = 73,25 \text{ tf} > 72 \text{ tf} \rightarrow N > R \quad (\text{ok})$$

3.8.2 Dimensionamento dos Enrijecedores Intermediários

Verificou-se que não tinha necessidade de enrijecedores intermediários para os aços acima citados, como comprova os cálculos abaixo, baseados no item 2.8.2, e na equação 83 do presente estudo. Se fez essa verificação para os aços A-36 e A 572 G 50.

- Aço A-36

$$\frac{h}{t_w} < 2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ ou } \frac{h_w}{t_w} < 260$$

$$2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 2,46 \sqrt{\frac{2000}{2,5}} = 69,6$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{57,3}{1,05} = 54,57 < 69,6 \quad (\text{ok})$$

- Aço A 572 G 50

$$\frac{h}{t_w} < 2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ ou } \frac{h_w}{t_w} < 260$$

$$2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 2,46 \sqrt{\frac{2000}{3,45}} = 59,22$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{57,3}{1,05} = 54,57 < 59,22 \quad (ok)$$

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar, de forma resumida, os resultados obtidos das verificações realizadas no capítulo anterior. Portanto, para cada verificação realizada serão apresentados os valores encontrados comparando-os com os valores reais da viga estudada.

Vale ressaltar, que a estrutura da casa de força executada pela construtora RC Construções Metálicas Ltda, para a empresa Santa Helena Energia S/A, em 2017 (Figura 29), tinha a necessidade de suportar uma ponte rolante de 40 toneladas.

Figura 29-Casa de Força Coberta



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

E como visto no item 1.1.3, do presente trabalho, pontes rolantes acima de 25 toneladas, necessitam de um esquema estrutural em que se aumente as dimensões das colunas, para diminuir os deslocamentos. E no caso da obra executada em Santa Helena, o projetista ainda optou por pilares ‘treliçados’, conforme a Figura 30.

Percebe-se também na Figura 30, que a ponte rolante em questão é biviga e apoiada, ou seja, são duas vigas principais, apoiadas na estrutura da própria casa de força.

Figura 30-Esquema Estrutural que suporta a Ponte Rolante



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

4.1 DESLOCAMENTOS

O controle de deslocamentos em peças estruturais é de suma importância no cálculo estrutural de uma estrutura, especialmente quando esta se destina à indústria. Em se tratando de uma viga de rolamento que sustentará um equipamento móvel de içamento de cargas, a verificação dos deslocamentos se torna ainda mais importante.

Foram verificados os deslocamentos verticais e transversais para a viga estudada, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4

Tabela 4-Resultados dos Deslocamentos

	Δ_{limite}	Δ_{real}	Verificação
Deslocamento Vertical	0,7cm	0,5cm	OK
Deslocamento Transversal	1,4cm	0,82cm	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Observa-se que os deslocamentos calculados estão dentro dos limites normativos. Isto garante não apenas a segurança da estrutura em questão, mas também o bom funcionamento da ponte rolante. Ressalta-se que, para que o valor do deslocamento transversal ficasse abaixo do limite permitido foi necessário a utilização da treliça horizontal, conforme citado no item 3.1.

A Figura 31 apresenta a viga de rolamento, executada pela empresa RC Construções Metálicas Ltda, sobre a viga de rolamento sendo que esta última está contraventada por uma treliça horizontal.

Figura 31-Conjunto de Ponte Rolante com Viga de Rolamento Treliçada



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

4.2 ESFORÇOS

Este item apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos dos esforços calculados para a viga de rolamento. Esses esforços foram essenciais para que se realizassem todas as verificações normativas, as quais certificam a segurança da estrutura.

Na Tabela 5, os resultados referentes aos esforços de cisalhamento e compressão no eixo axial são mostrados.

Tabela 5-Resultados dos Esforços (Cisalhamento e Compressão)

	Calculado	Solicitado	Verificação
Cisalhamento Vertical (V_{Rd})	119,15 <i>tf</i>	52 <i>tf</i>	OK
Cisalhamento Transversal (V_{pl})	70,32 <i>tf</i>	2,32 <i>tf</i>	OK
Força Resistente (N)	350,98 <i>tf</i>	2,85 <i>tf</i>	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Observa-se que o perfil utilizado na viga de rolamento é o perfil W610x101, o qual conforme a Tabela 5, resiste satisfatoriamente os esforços solicitados. Os valores resistentes são bem superiores aos solicitados. Isso deve-se ao fato da viga de rolamento estudada possuir como esforço principal o momento fletor, uma vez que o principal fenômeno físico, que atua nesta situação, é a flexão. A Tabela 6 apresenta os resultados referentes a verificação da resistência da viga ao momento fletor.

Tabela 6-Resultados dos Momentos Fletores

	M_{Rd}	M_s	Verificação
Eixo X	91,7 <i>tfm</i>	46 <i>tfm</i>	OK
Eixo Y	6,35 <i>tfm</i>	2,8 <i>tfm</i>	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Em relação ao momento fletor, a resistência da viga é satisfatório, pois os valores resistentes superam os solicitantes.

4.3 FORÇAS LOCALIZADAS

Os resultados, constantes neste item, são oriundos das verificações peculiares de vigas de rolamento, ou seja, são verificações incomuns às estruturas metálicas convencionais. Esmagamento e Escoamento Local da Alma estão relacionados aos esforços provenientes da aplicação de cargas concentradas, pelas rodas do carro trole da ponte rolante. Estes resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7-Resultados das Forças Localizadas

	Fora do Apoio		Verificação	No Apoio		Verificação
	F_{Rd}	R		F_{Rd}	R	
Esmagamento Local da Alma	91,83 <i>tf</i>	72 <i>tf</i>	OK	46,44 <i>tf</i>	72 <i>tf</i>	NÃO OK
Escoamento Local da Alma	105,6 <i>tf</i>	72 <i>tf</i>	OK	77,6 <i>tf</i>	72 <i>tf</i>	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Nota-se que a seção transversal da viga de rolamento (W610x101), passou em três das quatro verificações da Tabela 7. Somente, em relação a verificação do Esmagamento Local da Alma no apoio, a seção da viga não atendeu aos requisitos normativos, havendo portanto necessidade do uso de enrijecedores transversais.

Quanto à Flambagem de Alma por Carga Concentrada, os resultados da Tabela 8 mostraram que não há possibilidade da ocorrência deste fenômeno.

Tabela 8-Resultados da Flambagem de Alma por Carga Concentrada

	Calculado	Limite	Verificação
Rotação da Mesa impedida	10,57	2,3	OK
Rotação da Mesa não impedida	2,1	1,7	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

4.4 OUTROS RESULTADOS

Os resultados, aqui apresentados, referem-se à verificação da fadiga na viga de rolamento. Foram analisadas as possibilidades de ocorrência de fadiga em três situações distintas, causada por momentos no eixo x e no eixo y e ainda, fadiga por cisalhamento.

Tabela 9-Resultados referente ao Efeito Fadiga

	$\frac{\sigma}{\sigma_{lim}}$	Limite	Verificação
Fadiga Eixo X	0,526	1	OK
Fadiga Eixo Y	0,32	1	OK
Fadiga ao Cisalhamento	0,442	1	OK

Fonte: Domínio Próprio, 2020

Todos os resultados, obtidos na verificação da fadiga, são satisfatórios; assim sendo conclui-se que a viga de rolamento atende às exigências constantes no Anexo K da NBR 8800 (ABNT,2008).

No item 3.8, foi feito o dimensionamento dos enrijecedores, sendo que encontrou-se o valor de 9,5mm para a espessura da chapa, do enrijecedor de apoio. Vale ressaltar que foi comprovado no item 3.8.2, por meio dos cálculos matemáticos, que não havia necessidade do uso de enrijecedores intermediários, contrastando com a execução realizada pela RC Construções Metálicas, que utilizou enrijecedores intermediários na viga de rolamento. Pode-se observar os enrijecedores, de apoio e intermediários na Figura 32.

Figura 32- Enrijecedores na Viga de Rolamento



Fonte: Domínio Próprio, 2020.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa científica abordou as vigas de rolamento. Buscou-se através de uma pesquisa bibliográfica, um melhor conhecimento destas vigas, além de propor um roteiro para o seu dimensionamento.

Com o fim de alcançar os objetivos geral e específico, foi feito um levantamento de dados junto à RC Construções Metálicas, que é a empresa responsável pela estrutura, da casa de força executada na cidade de Santa Helena de Goiás, aonde está instalada uma viga de rolamento para uma ponte rolante de 40 toneladas, viga estudada neste trabalho. Esta estrutura metálica foi executada no ano de 2017, para a empresa Santa Helena Energia S/A.

Através de um modelo computacional, obteve-se os esforços que atuam na viga de rolamento. Utilizou-se para este fim o software STRAP (Structural Analysis Programs) desenvolvido pela SAE Informática Ltda. De posse de todas essas informações, realizou-se o dimensionamento de uma viga de rolamento, de acordo com as prescrições da NBR 8800 (ABNT,2008) e literatura pertinente. Estabeleceu-se um comparativo entre os resultados obtidos no dimensionamento e a viga de rolamento executada em Santa Helena de Goiás.

Constatou-se uma similaridade entre os resultados esperados, baseados na viga existente, e os obtidos. A viga estudada (casa de força de Santa Helena) atendeu todas às verificações de dimensionamento realizadas. Com isso, o principal objetivo deste trabalho foi alcançado, ou seja, um roteiro de dimensionamento foi proposto.

Devido à importância deste tema, este trabalho contribui, sensivelmente, com a literatura acadêmica sobre o assunto. Afinal, muitas são as indústrias que necessitam das pontes rolantes. Assim sendo é papel da engenharia civil dar suporte aos que precisam desse recurso.

Outras pesquisas nessa área deveriam ser desenvolvidas e incentivadas, possibilitando um maior conhecimento sobre viga de rolamento e conseqüentemente, popularizando seu uso. Tornar essas peças estruturais mais eficientes e econômicas, é um desafio para a engenharia nacional e, em se obtendo sucesso, seria um grande benefício para à indústria em geral.

Alguns temas pertinentes ao assunto tratado são possíveis sugerir:

- Utilização de perfis soldados, tipo VS e CVS, nas vigas de rolamento;
- Viabilidade do uso de perfis formados à frio (perfis leves), na fabricação de vigas de rolamento para pontes rolantes com baixa capacidade de içamento de cargas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. NBR 8800.2008.

AKBAR, Tamboli. **Handbook Of Structural Steel Connection Design And Details**. New York: McGraw-Hill, 1999.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção 1**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1987.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel. **Resistência Dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel. **Resistência Dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

BELLEI, Ildony H.. **Edifícios Industriais Projeto e Cálculo em Aço**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2000.

BRITO, André Luis dos Santos; COSTA, João Victor; NASCIMENTO, Leonardo Simões; LEMOS, Lucas de Souza. **Projeto: Ponte Rolante Univiga**. 2017. 45 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos, 2017.

CARLI, Arthur de; PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. Dimensionamento de Vigas Mistas Esbeltas. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2016, São Paulo. **ANAIS ABCEM**. São Paulo: Abcem, 2016. p. 1-17.

CAVALCANTI, Paulo de Sá Pereira. **Investigação experimental da fadiga ao cisalhamento em lajes de pontes com pré-lajes**. 2011. 209 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DIAS, Marco Aurélio P.. **Administração de Materiais: Uma Abordagem Logística**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1993.

FAUSTO, Boris. **História Concisa do Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, Imprensa Oficial do Estado, 2001.

GORFIN, Bernardo; OLIVEIRA, Myriam Marques de. **Estruturas Isostáticas**. São Paulo: Ltda, 1982.

HELENO, Raphael Pedrosa; CARVALHO, Hermes; BARBOSA, Denise Aparecida. Estudo do Dimensionamento de Enrijecedores Transversais em Almas de Perfis de Longarinas. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2018, Rio de Janeiro. **Anais ABPE**. Rio de Janeiro: Xcbpe, 2018. p. 1-10.

JAVARONI, Carlos Eduardo. **Estruturas De Aço: dimensionamento de perfis formados frio**. Rio de Janeiro: Campus, 2015.

LANGUI, Cláudio Alberto. **Pontes Rolantes: a importância do equipamento nas áreas de produção industrial**. A importância do equipamento nas áreas de produção industrial. 2001. 39 p. TCC (Graduação) - Curso de Gerência Empresarial, Mba, Taubaté, 2001.

MACHADO, Camila de Silveira. **Vigas de Rolamento com Perfis Estruturais Gerdau**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>. Acesso em: 05 ago. 2020.

MENDES, Thales José. **Análise da Flambagem Local da Alma em Longarinas no Sistema Misto Aço e Concreto de Pontes Rodoviárias**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MINCHILLO, Daniela Grintaci Vasconcellos. A INFLUÊNCIA DOS ENRIJECEDORES NAS TENSÕES DAS PLACAS DE BASES DE PILARES METÁLICOS TUBULARES. In: XXXI JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza, Argentina. **Anais Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural**. São Paulo: Mendoza 2004, 2004. p. 1-13.

MOTTA, Álvaro Façanha de Almeida. **Locais em Vigas de Rolamento de Instalações Siderúrgicas**. 1981. 244 p. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

MUKHANOV, K.. **Estruturas Metálicas**. Moscou: Mir, 1980. 519 p. Traduzido do russo por K. ASRYANTZ, engenheiro.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas De Aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas De Aço**. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

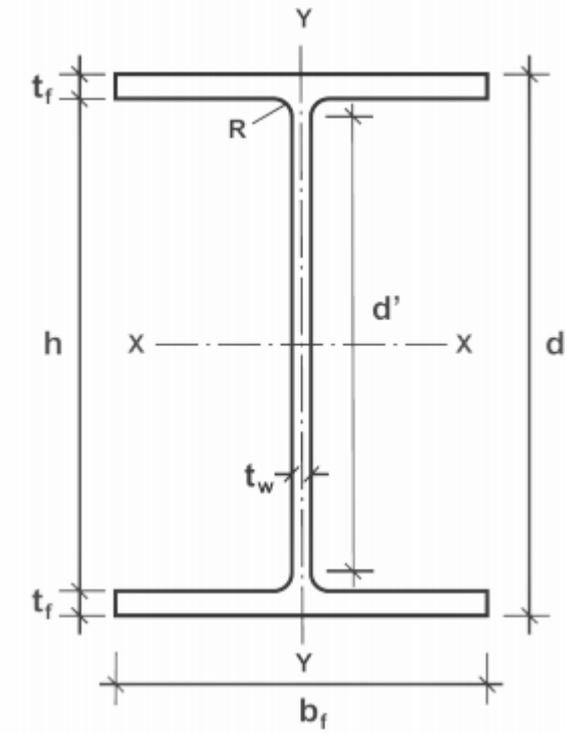
PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. **Fundamentos De Resistência De Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

SANTOS, Warley Soares. **Interação Flambagem Global: flambagem local em pilares metálicos de seção i duplamente simétricos sob compressão uniforme**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

SENA, Larissa Veras Torquato. **Contribuições ao Dimensionamento de Vigas de Rolamento em Aço com Contenção Lateral entre os Apoios**. 2017. 228 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, 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, Univates, Lajeado, 2016.

VIANA, Carlos Henrique Leal. Estudo do Efeito da Fadiga e Recomendações para o Projeto de Pontes Rodoviárias em Estrutura Metálica. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 10., 2018, Rio de Janeiro. **Anais ABPE**. Rio de Janeiro: Xcbpe, 2018. p. 1-8.

ANEXO A - TABELA DE BITOLAS DOS PERFIS DA GERDAU AÇOMINAS

Fonte: Gerdau S. A., adaptado pelos autores, 2014.

(continua)

Bitola (mm x kg/m)	Massa Linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	h (mm)	d' (mm)	Area (cm ²)	Ix (cm ⁴)	Wx (cm ³)	rx (cm)	Zx (cm ³)	Iy (cm ⁴)	Wy (cm ³)	ry (cm)	Zy (cm ³)	rt (cm)	It (cm ⁴)	Esbeltes Mesa Alma bf/2tf d/rw		Cw (cm ⁴)	u (m ² /m)
W 150 x 13,0	13	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,6	1,72	10,2	27,49	4,181	0,67
W 150 x 18,0	18	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48	6,683	0,69
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29	1.229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,1	4,75	11,52	20,48	20,417	0,88
W 150 x 24,0	24	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173	6,63	197,6	183	35,9	2,41	35,8	2,73	11,08	4,95	17,48	10,206	0,69
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,8	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94	30,277	0,9
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67	39,930	0,91
W 200 x 15,0	15	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,2	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44	8,222	0,77
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31	11,098	0,79
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8	190	170	29	2.029	197	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42	13,868	0,79
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2.611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,1	76,3	3,54	7,65	7,92	29,34	32,477	0,92
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94	3,6	12,59	6,57	26,5	40,822	0,93
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3.437	342	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141	4,5	14,51	8,09	23,9	69,502	1,03
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	161	53,5	4.114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,1	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86	83,948	1,04
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11	181	161	58,6	4.543	447,6	8,81	495,3	1.335	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36	141,342	1,19
W 200 x 52,0 (H)	52	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,9	572,5	1.784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,1	19,85	166,710	1,19
HP 200 x 53,0 (H)	53	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4.977	488	8,55	531,3	1.673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28	155,075	1,2
W 200 x 59,0 (H)	59	210	205	9,1	14,2	182	158	76	6.140	584,8	8,99	655,9	2.041	199,1	5,18	303	5,64	47,69	7,22	17,32	195,418	1,2
W 200 x 71,0 (H)	71	216	206	10,2	17,4	181	161	91	7.660	709,2	9,17	803,2	2.337	248,3	5,28	374,5	5,7	81,66	5,92	15,8	249,976	1,22
W 200 x 86,0 (H)	86	222	209	13	20,6	181	157	110,9	9.498	855,7	9,26	984,2	3.139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06	317,844	1,23
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2.291	182,6	9,96	211	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,33	45,92	13,735	0,88
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2.939	231,4	10,09	267,7	133	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97	18,629	0,89
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3.473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,1	22,955	0,89
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10	240	220	36,6	4.046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,2	54,9	2,62	10,34	5,1	34,38	27,636	0,9
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4.937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	98,7	3,86	17,43	8,02	36,03	73,104	1,07
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6.037	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	35,27	93,242	1,08
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13	240	220	57,6	7.138	538,2	11,15	606,3	704	95,1	3,5	146,4	3,96	27,14	5,69	28,95	112,398	1,09
HP 250 x 62,0 (H)	62	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8.738	709,6	10,47	790,5	2.995	234	6,13	357,8	6,89	33,46	11,96	19,1	417,130	1,47
W 250 x 73,0 (H)	73	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11.257	889,9	11,02	983,3	3.880	305,5	6,47	463,1	7,01	56,94	8,94	23,53	552,900	1,48
W 250 x 80,0 (H)	80	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12.550	980,5	11,1	1.088,70	4.313	338,3	6,51	513,1	7,04	75,02	8,17	21,56	622,878	1,49
HP 250 x 85,0 (H)	85	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	12.280	966,9	10,64	1.083,20	4.225	325	6,24	499,6	7	82,07	9,03	13,97	605,403	1,5
W 250 x 89,0 (H)	89	260	256	10,7	17,3	225	201	113,9	14.237	1.095,10	11,18	1.224,40	4.841	378,2	6,52	574,3	7,06	102,81	7,4	18,82	712,351	1,5
W 250 x 101,0 (H)	101	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16.352	1.238,80	11,27	1.395,00	5.549	431,8	6,57	656,3	7,1	147,7	6,56	16,87	828,031	1,51
W 250 x 115,0 (H)	115	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18.920	1.406,70	11,38	1.597,40	6.405	494,6	6,62	752,7	7,16	212	5,86	14,87	975,265	1,53
W 310 x 21,0	21	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3.776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,9	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21,628	0,98
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4.346	285	11,89	333,2	116	22,9	1,94	36,9	2,45	4,65	7,54	48,5	25,594	0,99
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6	8,9	291	271	36,5	5.500	356	12,28	412	158	31	2,08	49,4	2,55	8,14	5,73	45,2	35,441	1
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6.570	419,8	12,49	485,3	192	37,6	2,13	59,8	2,58	12,91	4,72	41,12	43,612	1
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8.581	553,6	13,14	615,4	727	88,1	3,82	134,9	4,38	13,2	8,51	46,66	163,728	1,25
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9.997	638,8	13,22	712,8	855	103	3,87	158	4,41	19,9	7,41	41	194,433	1,26
W 310 x 52,0	52	317	167	7,6	13,2	291	271	67	11.909	751,4	13,33	842,5	1.026	122,9	3,91	188,8	4,45	31,81	6,33	35,61	236,422	1,27
HP 310 x 79,0 (H)	79	299	306	11	11	277	245	100	16.316	1.091,30	12,77	1.210,10	5.258	343,7	7,25	525,4	8,2	46,72	13,91	22,27	1.089,258	1,77
HP 310 x 93,0 (H)	93	303	308	13,1	13,1	277	245	119,2	19.682	1.399,10	12,85	1.430,30	6.387	414,7	7,32	635,5	8,26	77,33	11,76	18,69	1.340,320	1,78
W 310 x 97,0 (H)	97	308	305	9,9	15,4	277	245	123,6	22.284	1.447,00	13,49	1.594,20	7.286	470,8	7,68	725	8,38	92,12	9,9	24,77	1.558,682	1,79
W 310 x 107,0 (H)	107	311	306	10,9	17	277	245	136,4	24.839	1.497,30	13,49	1.768,20	8.123	539,9	7,72	806,1	8,41	122,86	9	22,48	1.754,271	1,8
HP 310 x 110,0	110	308	310	15,4	15,5	277	245	141	23.703	1.539,10	12,97	1.730,60	7.707	497,3	7,39	763,7	8,33	125,66	10	15,91	1.646,104	1,8
W 310 x 117,0 (H)	117	314	307	11,9	18,7	277	245	149,9	27.563	1.755,60	13,56	1.952,60	9.024	587,9	7,76	893,1	8,44	161,61	8,21	20,55	1.965,950	1,8

(conclusão)

Bihola (mm x kg/m)	Massa Linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	h (mm)	d' (mm)	Área (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	Z _x (cm ³)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)	r _y (cm)	Z _y (cm ³)	rt (cm)	It (cm ⁴)	Esbeltez Alma d/tw	C _w (cm ⁶)	u (m ² /m)	
HP 310 x 125,0	125	312	312	17,4	17,4	277	245	159	27.076	1.735,60	13,05	1.963,30	8.823	565,6	7,45	870,6	8,38	177,98	8,97	14,09	1.911,029	1,81
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8.358	479	14,09	547,6	291	45,9	2,63	72	3,2	9,15	7,47	53,1	84,111	1,17
W 360 x 39,0	39	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	585,3	14,55	667,7	375	58,6	2,73	91,9	3,27	15,83	5,98	47,32	109,551	1,18
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12.238	696,5	14,58	784,3	388	95,7	3,77	148	4,43	16,7	8,72	44,7	239,091	1,35
W 360 x 51,0	51	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,87	174,7	4,49	24,65	7,37	42,75	284,984	1,36
W 360 x 58,0	58	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16.143	901,8	14,92	1.014,80	1.113	129,4	3,92	199,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330,384	1,37
W 360 x 64,0	64	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,10	14,8	1.145,50	1.185	185,7	4,8	284,5	5,44	44,57	7,52	37,4	523,362	1,46
W 360 x 72,0	72	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20.169	1.152,30	14,86	1.285,9	2.140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599,082	1,47
W 360 x 79,0	79	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,20	14,98	1.437,00	2.416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,1	30,68	695,701	1,48
W 360 x 91,0 (H)	91	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26.755	1.515,90	15,19	1.680,10	4.483	353	6,22	538,1	6,9	92,61	7,74	30,34	1.268,709	1,68
W 360 x 110,0	110	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33.155	1.841,90	15,36	2.059,30	5.570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	25,28	1.609,070	1,69
W 360 x 122,0	122	363	257	13	21,7	320	288	153,3	36.599	2.016,30	15,35	2.269,80	6.147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,7	5,92	22,12	1.787,806	1,7
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153,190	1,32
W 410 x 46,1	46,1	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,35	1.052,20	1.009	114	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387,194	1,48
W 410 x 53,0	53	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,35	1.052,20	1.009	114	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387,194	1,48
W 410 x 60,0	60	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21.707	1.066,70	16,88	1.201,50	1.205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467,404	1,49
W 410 x 67,0	67	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.203,80	16,91	1.362,70	1.379	154,1	4	239	4,67	48,11	6,22	40,59	538,546	1,5
W 410 x 75,0	75	413	180	9,7	16	381	357	95,8	27.616	1.337,40	16,98	1.518,60	1.539	173,2	4,03	269,1	4,7	65,21	5,63	36,8	612,784	1,51
W 410 x 85,0	85	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31.638	1.518,40	17,07	1.731,60	1.804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715,165	1,52
W 460 x 52,0	52	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21.370	949,8	17,91	1.095,90	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304,837	1,47
W 460 x 60,0	60	455	153	8	13,3	428	404	76,2	25.652	1.127,60	18,35	1.292,10	796	104,1	3,23	163,4	3,89	34,6	5,75	50,55	387,230	1,49
W 460 x 68,0	68	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29.851	1.300,70	18,46	1.495,40	941	122,2	3,28	192,4	3,93	52,29	5	44,42	461,163	1,5
W 460 x 74,0	74	457	190	9	14,5	428	404	94,9	33.415	1.462,40	18,77	1.657,40	1.061	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811,417	1,64
W 460 x 82,0	82	460	191	9,9	16	428	404	104,7	37.157	1.615,50	18,84	1.836,40	1.862	195	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915,745	1,64
W 460 x 89,0	89	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41.105	1.775,60	18,98	2.019,40	2.093	218	4,28	339	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035,073	1,65
W 460 x 97,0	97	466	193	11,4	19	428	404	123,4	44.638	1.916,70	19,03	2.187,40	2.283	236,6	4,3	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137,180	1,66
W 460 x 106,0	106	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48.978	2.088,60	19,04	2.394,60	2.515	259,3	4,32	403,7	5,05	148,19	4,71	32,05	1.260,063	1,67
W 530 x 66,0	66	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	34.971	1.332,20	20,46	1.558,00	857	103,9	3,2	166	4,02	31,52	7,24	53,73	562,854	1,67
W 530 x 72,0	72	524	207	9	10,9	502	478	91,6	39.969	1.525,50	20,89	1.755,90	1.615	156	4,2	244,6	5,16	33,41	9,5	53,13	1.060,548	1,84
W 530 x 74,0	74	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	40.969	1.548,90	20,76	1.804,90	1.041	125,5	3,31	200,1	4,1	47,39	6,1	49,26	688,558	1,68
W 530 x 82,0	82	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	47.569	1.801,80	21,34	2.058,50	2.028	194,1	4,41	302,7	5,31	51,23	7,86	50,25	1.340,255	1,85
W 530 x 85,0	85	535	166	10,3	16,5	502	478	107,7	48.453	1.811,30	21,21	2.099,80	1.263	152,2	3,42	241,6	4,17	72,93	5,03	46,41	845,463	1,69
W 530 x 92,0	92	533	209	10,2	15,6	502	478	117,6	55.157	2.069,70	21,65	2.359,80	2.379	227,6	4,5	354,7	5,36	75,5	6,7	46,84	1.388,565	1,86
W 530 x 101,0	101	537	210	10,9	17,4	502	470	130	62.198	2.316,50	21,87	2.640,40	2.693	256,5	4,55	400,6	5,4	105,04	6,03	43,14	1.812,734	1,86
W 530 x 109,0	109	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	67.226	2.494,30	21,84	2.847,00	2.952	279,8	4,6	437,4	5,44	131,58	5,61	40,47	1.991,291	1,87
W 610 x 101,0	101	603	228	10,5	14,9	573	541	130,3	77.003	2.554,00	24,31	3.222,70	2.951	258,8	4,76	465	5,76	81,68	7,65	51,54	2.544,966	2,07
W 610 x 113,0	113	608	228	11,2	17,3	573	541	145,3	88.196	2.901,20	24,64	3.312,90	3.426	300,5	4,86	469,7	5,82	116,5	6,59	48,34	2.981,078	2,08
W 610 x 125,0	125	612	229	11,9	19,6	573	541	160,1	99.184	3.241,30	24,89	3.697,30	3.933	343,5	4,96	536,3	5,89	159,5	5,84	45,45	3.441,766	2,09
W 610 x 140,0	140	617	230	13,1	22,2	573	541	179,3	112.619	3.650,50	25,06	4.173,10	4.515	392,6	5,02	614	5,94	225,01	5,18	41,27	3.981,687	2,1
W 610 x 155,0	155	611	324	12,7	19	573	541	198,1	129.383	4.241,70	25,38	4.749,10	10.783	665,6	7,38	1022,6	8,53	209,77	8,53	42,6	9.436,714	2,47

ANEXO B – VALORES DE (B/T) LIM.

(Continua)

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicações de b e t	(b/t)lim
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> — Mesas ou almas de seções tubulares retangulares; — Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas. 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{fy}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> — Almas de seções I, H ou U; — Mesas ou almas de seção-caixão; — Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1. 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{fy}}$
AL	3	<ul style="list-style-type: none"> — Abas ou cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travamento. 		$0,45 \sqrt{\frac{E}{fy}}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicações de b e t	(conclusão) (b/t) _{lim}
AL	4	<ul style="list-style-type: none"> — Mesas de seções I, H, T ou U laminadas; — Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas — Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas. 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	<ul style="list-style-type: none"> — Mesas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas^a. 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}}$
AL	6	<ul style="list-style-type: none"> — Almas de seções T. 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente K_c é dado na equação 29.

ANEXO C – VALOR DE X EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ λ_s

λ_s	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_s
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

**ANEXO D – PARÂMETROS REFERENTES AO MOMENTO FLETOR
RESISTENTE**

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_1$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pt}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

ANEXO E – PARÂMETROS DE FADIGA

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
Seção 1 – Material-base afastado de qualquer solda				
1.1 Metal-base, exceto aços resistentes à corrosão atmosférica não pintados, com superfícies laminadas, sujeitas ou não à limpeza superficial. Bordas cortadas a maçarico com rugosidade superficial não superior a 25 μm , mas sem cantos reentrantes.	A	250×10^8	165	Afastado de qualquer solda ou ligação estrutural.
1.2 Metal-base de aço resistente à corrosão atmosférica não pintado, com superfícies laminadas, sujeitas ou não à limpeza superficial. Bordas cortadas a maçarico com rugosidade superficial não superior a 25 μm , mas sem cantos reentrantes.	B	120×10^8	110	Afastado de qualquer solda ou ligação estrutural.
1.3 Peças com furos broqueados ou alargados. Peças com cantos reentrantes em recortes ou outras descontinuidades geométricas obedecendo aos requisitos de K.6, exceto aberturas para acesso de soldagem.	B	120×10^8	110	Em qualquer borda externa ou perímetro de abertura.
1.4 Seções transversais laminadas com aberturas para acesso de soldagem obedecendo aos requisitos de 6.1.14 e K.6. Peças com furos broqueados ou alargados contendo parafusos para ligação de contraventamentos leves, com pequena solitação.	C	44×10^8	69	Em cantos reentrantes de aberturas para acesso de soldagem ou qualquer furo pequeno (podendo conter parafusos para ligações pouco importantes).
Seção 2 - Materiais ligados em ligações parafusadas				
2.1 Seção bruta do metal-base em juntas por sobreposição com parafusos de alta resistência satisfazendo todos os requisitos aplicáveis a ligações por atrito.	B	120×10^8	110	Através da seção bruta próxima ao furo.
2.2 Metal-base na seção líquida em juntas com parafusos de alta resistência calculados com base em resistência por contato, porém, com fabricação e instalação atendendo a todos os requisitos aplicáveis a ligações por atrito.	B	120×10^8	110	Na seção líquida com origem na borda do furo.
2.3 Metal-base na seção líquida de outras ligações parafusadas, exceto chapas ligadas por pino.	D	22×10^8	48	Na seção líquida com origem na borda do furo.
2.4 Metal-base na seção líquida de chapas ligadas por pino.	E	11×10^8	31	Na seção líquida com origem na borda do furo.

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
Seção 3 - Ligações soldadas dos componentes de barras compostas de chapas ou perfis				
3.1 Metal-base e metal da solda em barras sem acessórios, compostas de chapas ou perfis ligados por soldas longitudinais contínuas de penetração total, com extração de raiz e contra-solda, ou por soldas contínuas de filete.	B	120×10^8	110	A partir da superfície ou de descontinuidades internas da solda, em pontos afastados da extremidade da solda.
3.2 Metal-base e metal da solda em barras sem acessórios, compostas de chapas ou perfis ligados por soldas longitudinais contínuas de penetração total, com chapas de espera não removidas, ou por soldas contínuas de filete.	B'	61×10^8	83	A partir da superfície ou de descontinuidades internas da solda, incluindo a solda de ligação da chapa de espera.
3.3 Metal-base e metal da solda nas extremidades de soldas longitudinais das aberturas de acesso para soldagem em barras compostas.	D	22×10^8	48	A partir da extremidade da solda, penetrando na alma ou na mesa.
3.4 Metal-base nas extremidades de segmentos longitudinais de soldas intermitentes de filete.	E	11×10^8	31	No material ligado, em locais de começo e fim de deposição de solda.
3.5 Metal-base nas extremidades de lamelas soldadas de comprimento parcial, mais estreitas que a mesa, tendo extremidades esquadrejadas ou com redução gradual de largura, com ou sem soldas transversais nas extremidades, ou lamelas mais largas que a mesa com soldas transversais nas extremidades.				Na mesa junto ao pé da solda transversal da extremidade, na mesa junto ao término da solda longitudinal, ou ainda na borda da mesa com lamela mais larga.
Espessura da mesa ≤ 20 mm	E	11×10^8	31	
Espessura da mesa > 20 mm	E'	$3,9 \times 10^8$	18	
3.6 Metal-base nas extremidades de lamelas soldadas de comprimento parcial, mais largas que a mesa, sem soldas transversais nas extremidades.	E'	$3,9 \times 10^8$	18	Na borda da mesa junto à extremidade da solda da lamela.

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Límite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
Seção 4 - Ligações de extremidade com soldas de filete longitudinais				
4.1 Metal-base na junção de barras solicitadas axialmente com ligações de extremidade soldadas longitudinalmente. As soldas devem ficar de cada lado do eixo da barra, de forma a equilibrar as tensões na solda.				Iniciando a partir de qualquer extremidade de solda, estendendo-se no metal-base.
espessura ≤ 13 mm	E	11×10^8	31	
espessura > 13 mm	E'	$3,9 \times 10^8$	18	
Seção 5 - Ligações soldadas transversais à direção das tensões				
5.1 Metal-base e metal da solda em emendas de perfis laminados ou soldados de seção transversal similar, feitas com soldas de penetração total, devendo tais soldas ser niveladas com o metal-base por meio de esmerilhamento na direção das tensões aplicadas.	B	120×10^8	110	A partir de descontinuidades internas no metal da solda ou ao longo da face de fusão.
5.2 Metal-base e metal da solda em emendas com soldas de penetração total, havendo transições de largura ou de espessura com inclinação entre 8 % e 20 %; as soldas devem ser niveladas com o metal-base por meio de esmerilhamento na direção das tensões aplicadas.	B	120×10^8	110	A partir de descontinuidades internas no metal da solda ou ao longo da face de fusão.
5.3 Metal-base e metal da solda em emendas com soldas de penetração total, havendo transição de largura feita com raio igual ou superior a 600 mm, com o ponto de tangência na extremidade da solda de penetração; as soldas devem ser niveladas com o metal-base por meio de esmerilhamento na direção das tensões aplicadas.	B	120×10^8	110	A partir de descontinuidades internas no metal da solda ou ao longo da face de fusão.
5.4 Metal-base e metal da solda em emendas, juntas em T ou juntas de canto, com soldas de penetração total, havendo transição de espessura com inclinação entre 8 % e 20 %, ou sem transição de espessura, quando o excesso de solda não for removido.	C	44×10^8	69	A partir de descontinuidades superficiais na transição entre a solda e o metal-base, estendendo-se no metal-base, ou ao longo da face de fusão.

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
<p>5.5 Metal-base e metal da solda em ligações transversais de topo ou em T ou de canto, nas extremidades de elementos de chapa tracionados, feitas com soldas de penetração parcial, complementadas com solda de filete de reforço ou contorno; σ_{SR} deve ser o menor dos dois valores a seguir:</p> <p>Início de fissura a partir da transição entre a solda e o metal-base.</p> <p>Início de fissura na raiz da solda.</p>	<p>C</p> <p>C'</p>	<p>44×10^8</p> <p>$\sigma_{SR} = 1,72 R_{FP} \left(\frac{14,4 \times 10^{11}}{N} \right)^{0,333}$</p>	<p>69</p> <p>Não previsto.</p>	<p>A partir de descontinuidades geométricas na transição entre a solda e o metal-base, estendendo-se no metal-base, ou a partir da raiz da solda sujeita à tração, estendendo-se através da solda.</p>
<p>5.6 Metal-base e metal da solda em ligações transversais nas extremidades de elementos de chapa tracionados, feitas com dois filetes de solda em lados opostos da chapa; σ_{SR} deve ser o menor dos dois valores a seguir:</p> <p>Início de fissura a partir da transição entre a solda e o metal-base.</p> <p>Início de fissura na raiz da solda.</p>	<p>C</p> <p>C''</p>	<p>44×10^8</p> <p>$\sigma_{SR} = 1,72 R_{FIL} \left(\frac{14,4 \times 10^{11}}{N} \right)^{0,333}$</p>	<p>69</p> <p>Não previsto.</p>	<p>A partir de descontinuidades geométricas na transição entre a solda e o metal-base, estendendo-se no metal-base, ou a partir da raiz da solda sujeita à tração, estendendo-se através da solda.</p>
<p>5.7 Metal-base em elementos de chapa tracionados e metal-base em almas ou mesas de vigas, no pé de filetes de solda adjacentes a enrijecedores transversais soldados.</p>	C	44×10^8	69	<p>A partir de descontinuidades geométricas no pé do filete de solda, estendendo-se no metal-base.</p>
Seção 6 - Metal-base em ligações transversais soldadas de barras				
<p>6.1 Metal-base na ligação de um acessório feita com solda longitudinal de penetração total, sujeito a solicitação longitudinal, quando o detalhe de transição do acessório for feito com um raio R e a solda esmerilhada nos pontos terminais para obter concordância:</p> <p>$R \geq 600$ mm</p> <p>600 mm $> R \geq 150$ mm</p> <p>150 mm $> R \geq 50$ mm</p> <p>50 mm $> R$</p>	<p>B</p> <p>C</p> <p>D</p> <p>E</p>	<p>120×10^8</p> <p>44×10^8</p> <p>22×10^8</p> <p>11×10^8</p>	<p>110</p> <p>69</p> <p>48</p> <p>31</p>	<p>Próximo ao ponto de tangência na extremidade do acessório.</p>

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_t	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
<p>6.3 Metal-base na ligação de um acessório coplanar de espessura diferente, feita com solda longitudinal de penetração total sujeita a solicitação transversal, com ou sem solicitação longitudinal, quando o detalhe de transição do acessório for feito com um raio R e a solda esmerilhada nos pontos terminais para obter concordância:</p> <p>Quando o excesso de solda for removido:</p> <p>$R > 50$ mm</p> <p>$R \leq 50$ mm</p> <p>Quando o excesso de solda não for removido:</p> <p>Qualquer raio</p>	<p>D</p> <p>E</p> <p>E</p>	<p>22×10^8</p> <p>11×10^8</p> <p>11×10^8</p>	<p>48</p> <p>31</p> <p>31</p>	<p>Na transição entre a solda e o metal-base na borda do material menos espesso.</p> <p>A partir da extremidade da solda.</p> <p>Na transição entre a solda e o metal-base na borda do material menos espesso.</p>
<p>6.4 Metal-base sujeito a tensões longitudinais junto a ligações de barras transversais, com ou sem tensões transversais, ligados por soldas longitudinais de filete ou de penetração parcial, quando o detalhe de transição do acessório for feito com um raio R e a solda esmerilhada nos pontos terminais para obter concordância:</p> <p>$R > 50$ mm</p> <p>$R \leq 50$ mm</p>	<p>D</p> <p>E</p>	<p>22×10^8</p> <p>11×10^8</p>	<p>48</p> <p>31</p>	<p>Na extremidade da solda ou a partir da transição entre a solda e o metal-base, estendendo-se no metal-base ou no acessório.</p>

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
Seção 7 - Metal-base junto a acessórios curtos				
<p>7.1 Metal-base sujeito a solicitação longitudinal, junto a acessórios ligados por soldas longitudinais de penetração total, quando o detalhe de transição do acessório for feito com um raio R menor que 50 mm, com comprimento do acessório na direção longitudinal igual a a e altura normal à superfície da barra igual a b:</p> <p>$a < 50$ mm</p> <p>$50 \text{ mm} \leq 12b$ ou 100 mm</p> <p>$a > 12b$ ou 100 mm quando $b \leq 25$ mm</p> <p>$a > 12b$ ou 100 mm quando $b > 25$ mm</p>	<p>C</p> <p>D</p> <p>E</p> <p>E'</p>	<p>44×10^8</p> <p>22×10^8</p> <p>11×10^8</p> <p>$3,9 \times 10^8$</p>	<p>69</p> <p>48</p> <p>31</p> <p>18</p>	<p>No metal-base, junto à extremidade da solda.</p>
<p>7.2 Metal-base sujeito a tensões longitudinais junto a acessórios, com ou sem tensões transversais, ligados por soldas longitudinais de filete ou de penetração parcial, quando o detalhe de transição do acessório for feito com um raio R e a solda esmerilhada nos pontos terminais para obter concordância:</p> <p>$R > 50$ mm</p> <p>$R \leq 50$ mm</p>	<p>D</p> <p>E</p>	<p>22×10^8</p> <p>11×10^8</p>	<p>48</p> <p>31</p>	<p>Na extremidade da solda, estendendo-se no metal-base.</p>

Descrição	Categoria de tensão	Constante C_f	Limite σ_{TH} MPa	Ponto de início potencial de fissura
Seção 8 - Miscelânea				
8.1 Metal-base junto a conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, ligados por solda de filete ou eletrofusão.	C	44×10^8	69	Na transição entre a solda e o metal-base.
8.2 Cisalhamento na garganta de filetes de soldas transversais ou longitudinais contínuos ou intermitentes.	F	150×10^{10} $\sigma_{SR} = \left(\frac{11 \times 10^4 C_f}{N} \right)^{0,167} \geq \sigma_{TH}$	55	Na garganta da solda.
8.3 Metal-base junto a soldas de tampão em furos ou rasgos.	E	11×10^8	31	Na extremidade da solda no metal-base.
8.4 Cisalhamento em soldas de tampão em furos ou rasgos.	F	150×10^{10} $\sigma_{SR} = \left(\frac{11 \times 10^4 C_f}{N} \right)^{0,167} \geq \sigma_{TH}$	55	Na transição plana entre a solda e o metal-base.
8.5 Parafusos de alta resistência instalados sem protensão total, parafusos comuns e barras redondas rosqueadas com rosca laminada, cortada ou usinada. Faixa de variação das tensões de tração calculadas com base na área líquida, incluindo efeito de alavanca, quando aplicável.	E'	$3,9 \times 10^8$	48	Na raiz da rosca, estendendo-se pela seção líquida.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).