

ANÁLISE ESTRUTURAL DA VIGA PRINCIPAL DE PONTES ROLANTES BIVIGAS

Douglas Francisco Alves ¹

Jose Luiz Salvador ²

Resumo: As pontes rolantes desempenham um papel crucial em uma ampla gama de setores industriais, devido à sua capacidade de mover cargas pesadas de forma eficiente e segura. Lidando com cargas pesadas, é necessário que sejam dimensionadas adequadamente para garantir a segurança durante a operação. O dimensionamento envolve a consideração de vários fatores, como a capacidade de carga, o alcance da ponte rolante, a altura de elevação e outros parâmetros relevantes. O presente trabalho tem por finalidade realizar uma análise estrutural de pontes rolantes bivigas, com foco na análise da viga principal. Foram empregados cálculos analíticos fundamentado em fórmulas e teorias da mecânica estrutural. Em suma, o objetivo de realizar os cálculos para a análise da viga principal de pontes rolantes foi alcançado com sucesso. Um destaque importante foi a abordagem da verificação da flambagem local. Foi constatado que atender ao critério da flecha admissível demanda o uso de dimensões maiores para a seção. Aumentar a altura da viga principal se mostra a forma mais eficiente de reduzir a flecha máxima e garantir que esteja abaixo do limite admissível. As tensões de cisalhamento obtidas foram consideravelmente inferiores à tensão de cisalhamento admissível, demonstrando que não representam um fator relevante para o dimensionamento.

Palavras-chave: Ponte rolante. Análise viga principal. Flambagem local.

1 INTRODUÇÃO

As pontes rolantes são equipamentos amplamente empregados em diversos setores industriais, tais como metalurgia, mecânica, automotiva, siderurgia, mineração entre outros, para o manuseio de cargas pesadas e volumosas.

O dimensionamento adequado de pontes rolantes é essencial para garantir a segurança da operação e a eficiência do processo de movimentação de cargas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre análise estrutural de pontes rolantes.

A justificativa deste trabalho é fundamentada na necessidade de fornecer análises de dimensionamento estrutural de pontes rolantes, com o intuito de auxiliar acadêmicos interessados no assunto, tanto por motivos acadêmicos quanto

¹ Graduando em curso, 2023. E-mail: douglas.69315@alunosatc.edu.br

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: jose.salvador@satc.edu.br



profissionais. Essas análises servirão como referência para estudos mais abrangentes e aprofundados nessa área específica, impulsionando o avanço do conhecimento e da prática relacionados ao dimensionamento e análise de pontes rolantes.

Para a análise estrutural da ponte rolante, foram empregados cálculos analíticos fundamentados em fórmulas e teorias da mecânica estrutural. O trabalho consistirá na análise estrutural das pontes bivigas, com foco na análise da viga principal. Serão estudados os aspectos relacionados à resistência e estabilidade. O objetivo é garantir a segurança e eficiência estrutural das pontes rolantes bivigas, considerando os esforços e solicitações a que a viga principal está sujeita durante a operação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PONTES ROLANTES

A principal característica das pontes rolantes é a movimentação da carga nos eixos longitudinal, lateral e vertical. Além disso, esses equipamentos apresentam diversas vantagens, tais como baixo custo de manutenção, alta capacidade de carga, versatilidade, controle preciso, segurança e economia de espaço. Existem diversos tipos de pontes rolantes, sendo os mais comuns as monoviga, que possuem uma única viga principal, e as bivigas, compostas por duas vigas principais. As pontes rolantes de monoviga são adequadas para aplicações de menor capacidade de carga, enquanto as bivigas oferecem maior rigidez e capacidade de elevação.

2.3 ANÁLISE DA VIGA PRINCIPAL

2.3.1 Tensão normal devido a flexão (σ)

A tensão normal devido à flexão é resultado da aplicação de uma carga perpendicular a um eixo longitudinal, o que faz com que ocorra uma curvatura na peça. Os momentos fletores geram tensões de tração em uma das metades da seção transversal oposta à atuação da força em relação ao eixo centroidal, e tensões de compressão na outra metade da seção transversal. Por convenção é representado o sinal negativo (-) para a compressão e o sinal positivo (+) para a tração. Quando há



forças atuando em dois ou mais planos, as tensões geradas por essas forças devem ser somadas, (HIBBLER, 2010).

A Eq. 1 apresentada a equação para calcular a tensão normal resultante em um elemento sollicitado por forças verticais e horizontais:

$$\sigma_x = \pm \frac{M_z \cdot y}{I_z} \pm \frac{M_y \cdot z}{I_y} \quad (1)$$

2.3.2 Tensão de cisalhamento em peças longas (τ)

Para a viga em análise existe dois tipos de esforços internos que produzem tensão de cisalhamento. O esforço cortante e o torque causado por forças transversais excêntricas em relação ao eixo centroidal da seção.

O cisalhamento devido ao esforço cortante é resultante da distribuição de tensões cisalhantes que atuam na seção transversal da viga. Devido à propriedade complementar do cisalhamento, as tensões de cisalhamento transversais também agem ao longo dos planos longitudinais da viga, (BEER, JOHNSTON, 2008).

A tensão de cisalhamento devido ao esforço cortante é apresentada pela Eq. 2:

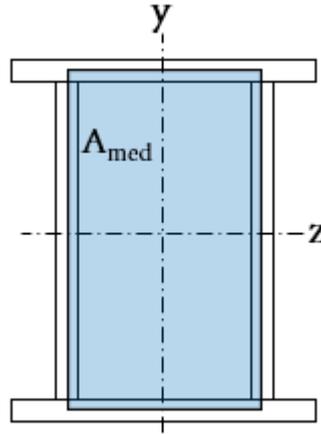
$$\tau_{xy} = \frac{V_y \cdot Q_z}{I_z \cdot e} \quad (2)$$

As equações para o cálculo da tensão de cisalhamento devido ao momento torsor em elementos não circulares são complexas. Por esse motivo, para simplificar os cálculos, será considerada uma seção de perfil retangular vazado, desconsiderando as abas da viga principal. Para este tipo de perfil o livro de Resistencia dos materiais do R. C. Hibbeler descreve uma equação para o cálculo da tensão de cisalhamento devido ao momento torsor conforme a Eq. 3.

$$\tau_t = \frac{T}{2 \cdot t \cdot A_{med}} \quad (3)$$

A área média contida no contorno das linhas centrais das paredes A_{med} está ilustrada pela região sombreada na Fig. 1.

Figura 1: Área média contida no contorno das linhas centrais das paredes



Fonte: Autor, (2023).

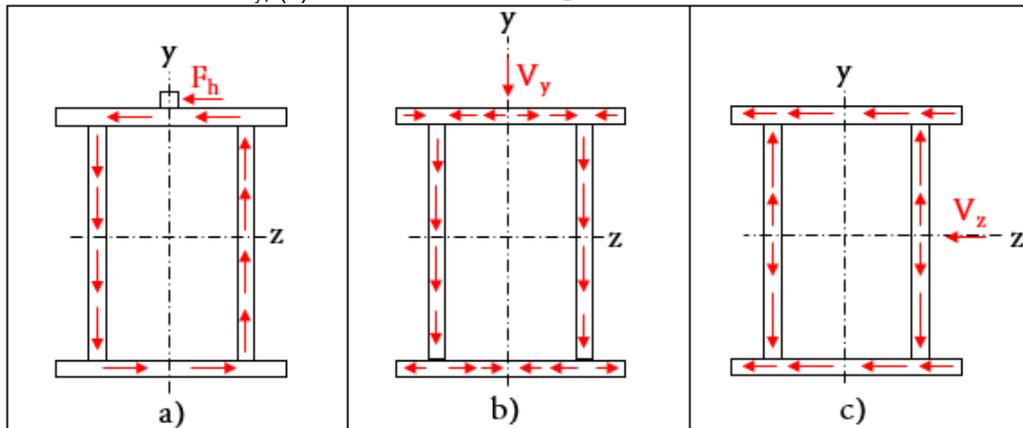
Para o cálculo da tensão de cisalhamento resultante, é necessário somar ou diminuir as tensões geradas conforme os fluxos de cisalhamentos da seção. A Eq. 4 apresenta a expressão para adicionar as intensidades das tensões de cisalhamento resultantes dos esforços cortantes verticais e horizontais, além da tensão de cisalhamento gerada pelo momento torsor:

$$\tau = \pm \frac{V_y \cdot Q_z}{I_z \cdot e} \pm \frac{V_z \cdot Q_y}{I_y \cdot e} \pm \frac{T}{2 \cdot t \cdot A_{med}} \quad (4)$$

2.3.3 Fluxo de cisalhamento

O fluxo de cisalhamento é um fenômeno físico que ocorre em elementos formados por paredes finas quando uma força cortante é aplicada em um elemento. Para a seção de viga principal o fluxo de cisalhamento se desenvolve como ilustrado nas Fig. 2(a) e 2(b).

Figura 2: Desenvolvimento do fluxo de cisalhamentos (a) devido ao momento torsor (b) devido ao cortante V_y , (c) devido ao cortante V_z .



Fonte: Autor, (2023).

No presente trabalho a importância do fluxo de cisalhamento está em determinar, para cada ponto da seção, se as parcelas devem ser somadas ou subtraídas.

2.3.4 Momentos de áreas I e Q

O momento de inércia I é um parâmetro que descreve a resistência de um elemento à mudança em sua rotação em torno de um eixo específico. Quanto maior o momento de inércia de um objeto em relação a um determinado eixo, maior será a resistência do objeto a uma mudança em sua rotação em torno desse eixo. O momento estático Q é uma medida que descreve a distribuição de áreas em relação a um eixo de referência. Ambos são calculados com base na distribuição de área do objeto em relação ao eixo de rotação (MERIAM, KRAIGE, 2011).

2.3.5 Flecha máxima

A flecha máxima é o maior deslocamento vertical que ocorre na viga quando submetida a um carregamento com componente transversal. Vários fatores influenciam a flecha máxima, a carga aplicada, comprimento da viga, propriedades do material e condições de apoio. É importante considerar a flecha máxima no projeto de vigas, pois pode afetar a estabilidade e segurança da estrutura. Existem limites máximos permitidos para a flecha de uma viga, dependendo das normas e regulamentos aplicáveis e do uso pretendido da estrutura.



A curvatura de uma curva em vigas segundo HIBBLER é dada pela Eq. 5:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E \cdot I} \quad (5)$$

A primeira integração da Eq. 5 resultará na equação da declividade da curva, que representa a variação da inclinação ao longo do comprimento da viga. Já a segunda integração resultará na equação da linha elástica, que representa a deformação ao longo da viga. A primeira integração gerará uma constante C1 e a segunda integração gerará a constante C2. Para obter os valores dessas constantes, são utilizadas condições de contorno.

De acordo com a norma americana CMAA 70:2000, a flecha máxima de uma ponte rolante não deve exceder 1/888 do comprimento do vão. Portanto, o limite da flecha máxima é determinado pela relação da Eq. 6:

$$y_{max} \leq y_{adm} = \frac{l}{888} \quad (6)$$

2.3.6 Flambagem local

A flambagem local em vigas, ocorre nas regiões comprimidas, uma vez que a compressão tende a acentuar os defeitos geométricos da peça, levando ao enrugamento dos elementos. Por outro lado, a região tracionada tende a manter os componentes mais retilíneos, o que evita problemas de flambagem por tração.

A NBR 8800:2008 apresenta métodos para análise de alguns perfis com relação a flambagem local. Esse método tem como base encontrar o momento resistente máximo que a os componentes conseguem suportar sem ocorrer a flambagem.

2.3.7 Tensões admissíveis

A norma NBR 8800:2009 estabelece os critérios para determinar a tensão normal admissível e a tensão de cisalhamento admissível. No caso dos aços, a tensão de cisalhamento é aproximadamente 60% da tensão de escoamento. A tensão normal



admissível e a tensão de cisalhamento admissível são dadas pelas Eq. 7 e 8, respectivamente:

$$\sigma_a = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (7)$$

$$\tau_a = \frac{0,6 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

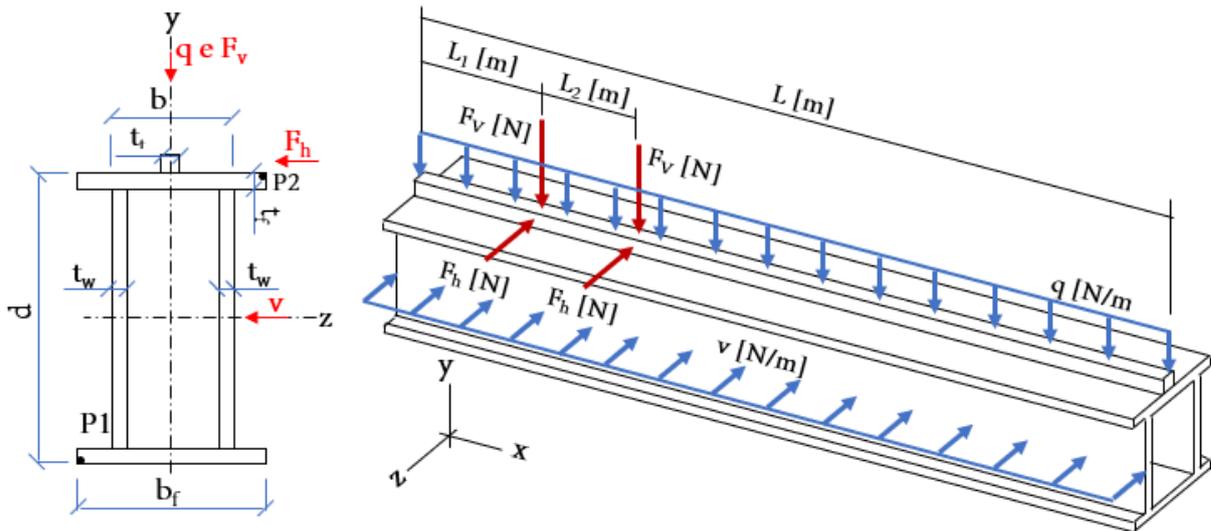
3.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MODELO DA VIGA PRINCIPAL E LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

Por se tratar de uma ponte rolante, as vigas principais têm suas extremidades apoiadas sobre os carros que percorrem o trilho. Esse sistema de movimentação permite considerar os apoios nas extremidades como, simplesmente apoiado para a determinação do momento fletor, do esforço cortante e da flecha, enquanto que para o momento torsor será considerado como engastados.

Na Fig. 3, é apresentada a seção da viga principal, com os esforços solicitantes. A carga q é causada pelo peso próprio da viga. A força gerada pela carga de içamento F_v está localizada no centro da seção sobre o trilho do carro guincho. O esforço v é uma carga distribuída devido ao vento que incide sobre a face do perfil, e se estende ao longo do eixo x . A força horizontal F_h é gerada devido aos efeitos de aceleração (ou desaceleração) causados pela inércia do membro sendo içado, juntamente com a força de vento atuando sobre a carga suspensa. Essa força é aplicada no trilho localizado na parte superior da seção.

Figura 3: Dimensões da viga principal e esforços atuantes



Fonte: Autor, (2023).

A norma NBR 8400-2:2019 recomenda que as seguintes relações dimensionais sejam seguidas $L/d \leq 25$ e $L/b_f \leq 65$.

3.2 CARREGAMENTOS ATUANTES

Os carregamentos atuantes são determinados de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 8400-1:2019. A determinação desses carregamentos não será abordada neste contexto. É importante ressaltar que as cargas F_h e F_v devem ser divididas entre as duas vigas principais.

3.3 ESFORÇOS INTERNOS

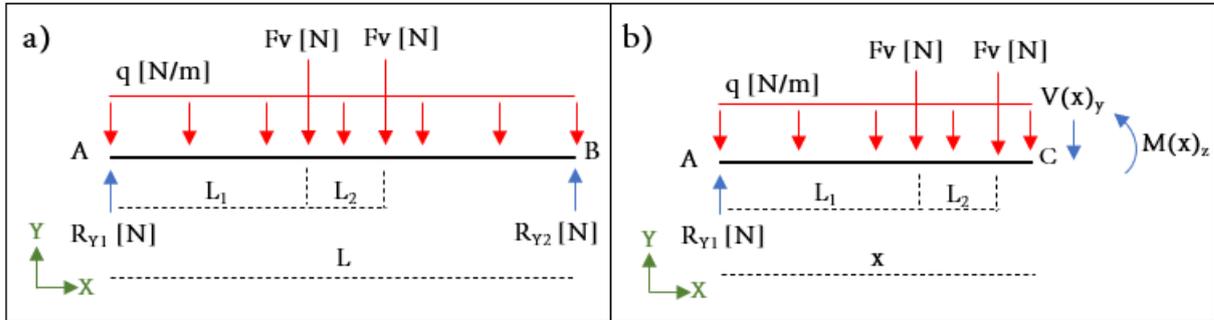
Os esforços internos são as forças e momentos que se desenvolvem dentro de uma estrutura em resposta às cargas aplicadas sobre ela. A análise da viga principal requer a determinação dos momentos fletores máximos, dos esforços cortantes máximos e do momento torsor máximo.

3.3.1 Momentos fletores máximos (M_z) e (M_y)

Os momentos fletores máximos M_z e M_y ocorrem no ponto médio da viga, quando o carregamento for simétrico. As Fig. 4 ilustra o modelo de carregamento e o

diagrama de esforços solicitantes para a carga verticais.

Figura 4: Diagrama de (a) cargas verticais (b) esforços solicitantes.



Fonte: Autor, (2023).

A equação singular do momento fletor que descreve a variação do momento fletor ao longo da viga é dada pela Eq. 9:

$$M(x)_z = R_{y1} \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} - F_v \cdot \langle x - L_1 \rangle - F_v \cdot \langle x - L_1 - L_2 \rangle \quad (9)$$

Obtida a equação para a reação do apoio R_{y1} e substituindo na Eq. 9, juntamente com as variáveis $x = L/2$ e $L_1 = (L - L_2)/2$, é possível obter a Eq. 10, que representa o momento fletor máximo na viga.

$$M_z = q \cdot \frac{L^2}{8} + \frac{F_v}{2} \cdot (L - L_2) \quad (10)$$

As configurações de distribuição das cargas na estrutura são idênticas para as forças verticais e horizontais. Com base nisso, pode-se substituir as variáveis q por v e F_v por F_h na Eq. 10 para obter a equação do momento fletor máximo M_y devido às cargas horizontais, como mostrado na Eq. 11:

$$M_y = v \cdot \frac{L^2}{8} + \frac{F_h}{2} \cdot (L - L_2) \quad (11)$$

3.3.2 Esforços cortantes máximos (V_y) e (V_z)

Os esforços cortantes máximos V_y e V_z ocorreram próximos ao apoio 1

quando L_1 for menor possível, e seus valores serão iguais as intensidades das componentes R_{y1} e R_{z1} , respectivamente.

As reações são determinadas por meio da aplicação das condições de equilíbrio, levando em consideração as Fig. 4. Os esforços cortantes verticais e horizontais são determinadas pelas Eq. 12 e 13, respectivamente:

$$V_y = R_{y1} = q \cdot \frac{L}{2} + F_v \cdot \frac{(2 \cdot L - 2 \cdot L_1 - L_2)}{L} \quad (12)$$

$$V_z = R_{z1} = v \cdot \frac{L}{2} + F_h \cdot \frac{(2 \cdot L - 2 \cdot L_1 - L_2)}{L} \quad (13)$$

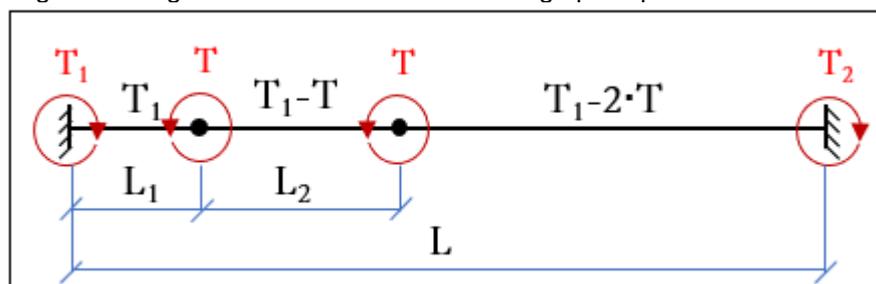
3.3.3 Momento torsor (T)

Analisando a Fig. 3 é possível obter a fórmula específica para o momento torsor T , expressa na Eq. 14:

$$T = F_h \cdot \left(\frac{d + t_t}{2} \right) \quad (14)$$

A Fig. 5 apresenta o diagrama de distribuição do momento torsor que ocorre em cada seção da viga.

Figura 5: Diagrama do momento torsor na viga principal.



Fonte: Autor, (2023).

O momento torsor de interesse ocorre na região L_1 , quando essa região é a menor possível. Para a análise considera-se que as extremidades da viga são engastadas. Isso implica que não ocorre rotação nas extremidades devido ao momento aplicado, ou seja, a soma das variações dos ângulos de torção de uma extremidade a outra é zero.



Com base nessa condição e fazendo uso da fórmula do ângulo de torção descrita em (HIBBLER, 2010), é possível obter o valor do momento torsor T_1 expressa na Eq. 15:

$$T_1 = -T \cdot \left(\frac{L_2 - 2 \cdot L + 2 \cdot L_1}{L} \right) \quad (15)$$

3.4 MOMENTOS DE ÁREAS

Para o cálculo do momento de inércia e do momento estático, o trilho será desconsiderado, uma vez que o mesmo não possui grande influência nesses cálculos e isso pode ser considerado até mesmo como um fator de segurança para a estrutura.

3.4.1 Momentos de inércia I_z e I_y

A seção transversal da viga é constituída por quatro retângulos dispostos simetricamente. Utilizando a fórmula do momento de inércia para seções retangulares e o método das áreas compostas descrita em (HIBBLER, 2010), obtém-se Eq. 16 e 17 para determinar I_z e I_y respectivamente:

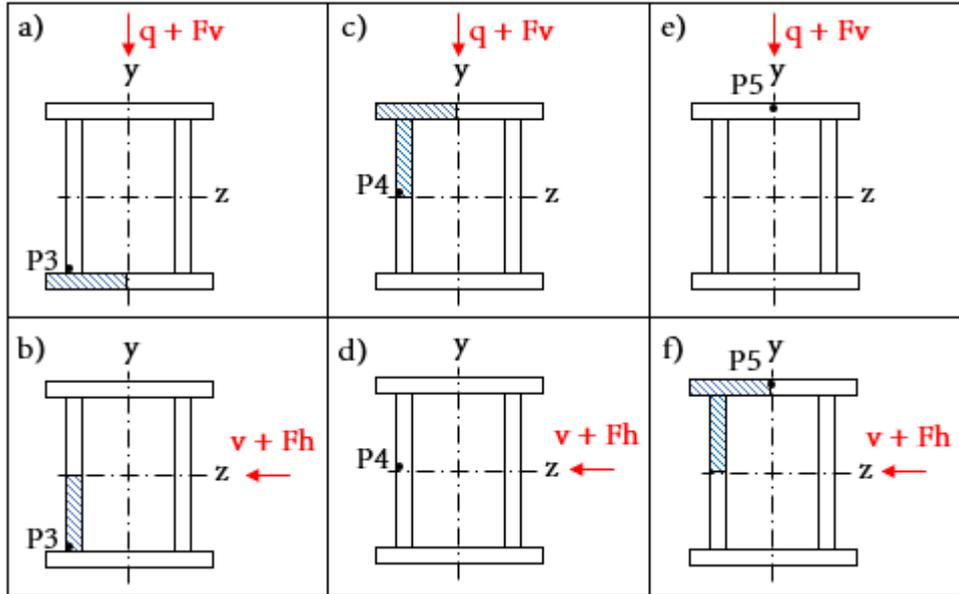
$$I_z = \frac{1}{12} \cdot [b_f \cdot d^3 - (b_f - 2 \cdot t_w) \cdot (d - 2 \cdot t_f)^3] \quad (16)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot [2 \cdot t_f \cdot b_f^3 + (d - 2 \cdot t_f) \cdot (b^3 - (b - 2 \cdot t_w)^3)] \quad (17)$$

3.4.2 Momentos estáticos Q_z e Q_y

O valor de Q_z e Q_y varia para cada ponto que se deseja analisar a tensão de cisalhamento. Os pontos selecionados para análise e as regiões consideradas para os cálculos dos momentos estáticos são mostrados na Fig. 6.

Figura 6: Pontos de análise das tensões de cisalhamento e áreas consideradas para os cálculos dos momentos estáticos.



Fonte: Autor, (2023).

Os pontos 4 e 5 representam as regiões da viga onde ocorrem os momentos estáticos máximos em cada eixo. No ponto 3 ocorre uma combinação dos dois esforços cortantes, esse ponto é importante para avaliar a capacidade de resistência da solda em relação a tensão de cisalhamento.

Abaixo segue as Eq. 18, 19, 20, 21, 22 e 23 dos momentos estáticos para cada ponto:

$$Q_{z_{P3}} = \frac{d - t_f}{4} \cdot b_f \cdot t_f \quad (18)$$

$$Q_{z_{P4}} = \frac{d - t_f}{4} \cdot b_f \cdot t_f + \left(\frac{d}{2} - t_f\right)^2 \cdot \frac{t_w}{2} \quad (19)$$

$$Q_{z_{P5}} = 0 \quad (20)$$

$$Q_{y_{P3}} = \left(\frac{b - t_w}{2}\right) \cdot (d - 2 \cdot t_f) \cdot \frac{t_w}{2} \quad (21)$$

$$Q_{y_{P4}} = 0 \quad (22)$$

$$Q_{y_{P5}} = \left(\frac{b - t_w}{2}\right) \cdot (d - 2 \cdot t_f) \cdot \frac{t_w}{2} + \frac{b_f^2}{8} \cdot t_f \quad (23)$$

3.5 TENSÃO NORMAL E TENSÃO CISALHAMENTO

3.5.1 Tensão normal máxima de serviço (σ)

A tensão normal máxima na seção ocorrerá quando os valores de y e z forem os maiores possíveis, e quando os sinais das tensões devidas a cada um dos momentos fletores forem iguais. Existem dois pontos na seção onde a tensão é máxima, um de tração e outro de compressão. Por conveniência, utiliza-se o ponto tracionado. No caso em questão, o ponto crítico tracionado está localizado no ponto 1, conforme indicado na Fig. 3.

Substituindo na Eq. 1 as variáveis $y = d/2$ e $z = b_f/2$, obtém-se a Eq. 24 para a tensão normal máxima:

$$\sigma_{x1} = \frac{M_z \cdot d}{2 \cdot I_z} + \frac{M_y \cdot b_f}{2 \cdot I_y} \quad (24)$$

3.5.2 Tensão de cisalhamento máxima de serviço (τ)

Para o cálculo da tensão de cisalhamento devido ao momento torsor, é necessário obter a área média limitada pelo contorno da linha central das paredes, representada por A_m dada pela Eq. 25:

$$A_{med} = (d - t_f) \cdot (b - t_w) \quad (25)$$

Para a análise da tensão de cisalhamento nos pontos 3, 4 e 5, substitui-se na Eq. 4 os valores correspondentes de Q_z (Eq. 18, Eq. 19 e Eq. 20), Q_y (Eq. 21, Eq. 22 e Eq. 23), T (Eq. 16), e (t_w) e t (t_w para os pontos 3 e 4, t_f para o ponto 5). Dessa forma, chega-se às Eq. 26, 27 e 28 para cada ponto respectivamente:

$$\tau_{P3} = \frac{V_y \cdot Q_{z_{P3}}}{I_z \cdot t_w} + \frac{V_z \cdot Q_{y_{P3}}}{I_y \cdot t_w} + \frac{T_1}{2 \cdot t_w \cdot A_{med}} \quad (26)$$



$$\tau_{P4} = \frac{V_y \cdot Q_{z,P4}}{I_z \cdot t_w} + \frac{T_1}{2 \cdot t_w \cdot A_{med}} \quad (27)$$

$$\tau_{P5} = \frac{V_z \cdot Q_{y,P5}}{I_y \cdot t_f} + \frac{T_1}{2 \cdot t_f \cdot A_{med}} \quad (28)$$

3.6 FLECHA MÁXIMA

Substituindo a Eq. 9 na Eq. 5 da curvatura da curva, e realizando a primeira e segunda integração obtém-se a equação da declividade e da linha elástica respectivamente. Ao utilizar a condição de contorno $y = 0$ para $x = 0$ na equação da linha elástica, conclui-se que C2 é igual a zero. Já a condição $dy/dx = 0$ para $x = L/2$ é usada na equação da declividade para determinar o valor de C1. Após substituir as equações de R_{y1} e C1, e considerando $x = L/2$, na equação da linha elástica, bem como $L_1 = (L - L_2)/2$, e em seguida simplificar a expressão resultante, obtém-se a Eq. 29 que representa a flecha máxima da viga quando seu carregamento for simétrico:

$$y_{max} = \frac{-1}{384 \cdot E \cdot I_z} \cdot [5 \cdot q \cdot L^4 + 8 \cdot F_V \cdot (2 \cdot L^3 + L_2^3 - 3 \cdot L \cdot L_2^2)] \quad (29)$$

3.7 FLAMBAGEM LOCAL

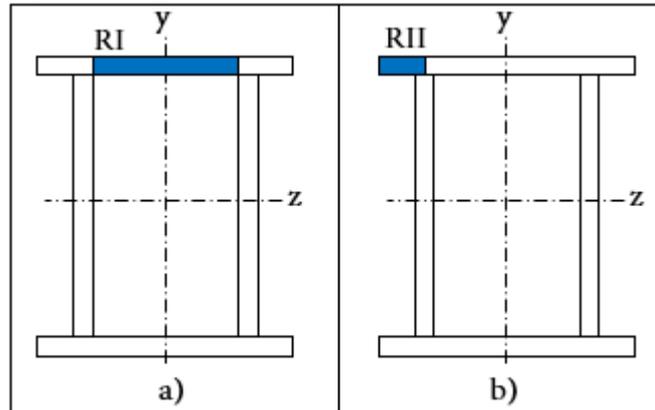
A análise de flambagem será conduzida de acordo com a NBR 8800:2008, com o objetivo de determinar o momento resistente máximo que os componentes podem suportar. O estudo apresentado é para almas não esbeltas, se for esbelta o procedimento é outro. A condição para que a alma seja considerada não esbelta é definida pela norma NBR 8800:2008 e expressa na Eq. 30:

$$\frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} \leq 5,7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (30)$$

A norma NBR 8800:2008 não fornece uma análise específica da mesa para a seção da viga principal em estudo. Por isso para o estudo da flambagem local da

mesa, o momento resistente será analisado considerando a região da mesa localizada entre as almas Fig. 7(a), utilizando os métodos aplicáveis a vigas caixão. E a região correspondente à aba Fig. 7(b), será tratada usando os métodos aplicáveis a vigas I.

Figura 7: Regiões de análise da mesa



Fonte: Autor, (2023).

A análise da alma da viga será realizada exclusivamente utilizando os métodos aplicáveis a vigas caixão.

A determinação do momento resistente envolve a comparação da esbeltez λ do elemento com outros dois parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r . Esses parâmetros são utilizados para classificar o risco de flambagem do elemento. Com base nessa análise, determina-se o risco de flambagem e qual das Eq. 31, 32 e 33 deve ser utilizada para o cálculo do momento resistente:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \rightarrow (\lambda \leq \lambda_p) \quad (31)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \cdot \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \rightarrow (\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r) \quad (32)$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \rightarrow (\lambda > \lambda_r) \quad (33)$$

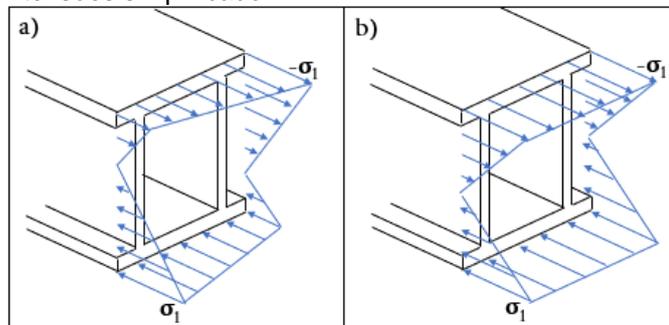
3.7.1 Momento fletor equivalente $M_{z_{eq}}$

O momento fletor equivalente $M_{z_{ef}}$ será determinado em relação ao eixo z e tem como finalidade representar a combinação dos momentos M_z e M_y em um único

valor de momento fletor. Esse valor é utilizado para comparação com os momentos resistentes de flambagem.

A Fig. 8(a) ilustra o diagrama de tensões real que ocorre na viga devido aos momentos M_z e M_y . Por outro lado, a Fig. 8(b) representa um modelo simplificado da distribuição de tensão que será considerado para determinar o momento fletor equivalente. É importante ressaltar que, embora não seja um modelo real, essa abordagem representa a pior situação possível na viga, sendo um modelo conservador que favorece a segurança.

Figura 8: (a) Diagrama de tensões real (a) Diagrama de tensões simplificado



Fonte: Autor, (2023).

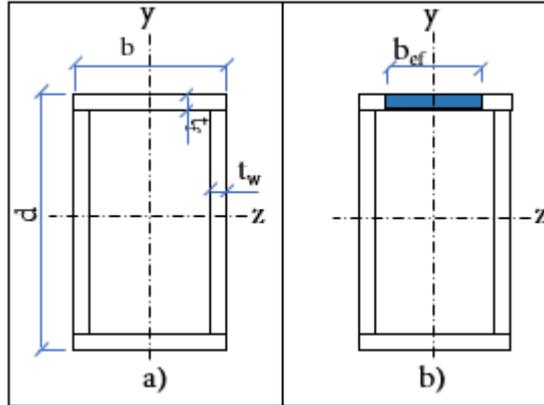
Considerando que apenas o momento fletor equivalente atua na estrutura e que esse momento causa uma tensão máxima σ_1 , pode-se modificar a Eq. 1 para obter Eq. 34 do momento fletor equivalente:

$$M_{zeq} = \frac{\sigma_{x1} \cdot I_z \cdot 2}{d} \quad (34)$$

3.7.2 Verificação do momento resistente da mesa região RI

Para realizar a verificação da flambagem na região RI, as abas laterais da viga principal serão desconsideradas, resultando em uma seção retangular, conforme ilustrado na Fig 10(a).

Figura 9: (a) seção caixão; (b) representação da largura efetiva da mesa



Fonte: Autor, (2023).

Para a seção da Fig. 9(a), é necessário determinar o momento de inércia, módulo elástico e o módulo plástico, todos em relação ao eixo z .

Utilizando a fórmula do momento de inércia para seções retangulares e o método das áreas compostas descrita em (HIBBLER, 2010), obtém-se a seguinte Eq. 35 para o momento de inércia I_{z1} :

$$I_{z1} = \frac{1}{12} \left[b \cdot d^3 - (b - 2 \cdot t_w) \cdot (d - 2 \cdot t_f)^3 \right] \quad (35)$$

O módulo elástico W_1 e o módulo plástico Z_1 são determinados utilizando as Eq. 36 e 37 respectivamente:

$$W_1 = \frac{I_{z1} \cdot 2}{d} \quad (36)$$

$$Z_1 = b \cdot t_f \cdot (d - t_f) + 2 \cdot t_w \cdot \left(\frac{d}{2} - t_f \right)^2 \quad (37)$$

A Fig. 10(b) ilustra a largura efetiva da mesa comprimida b_{ef} , que é a região da mesa suscetível de ocorrer a flambagem. A largura efetiva é dada pela Eq. 38:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t_f \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \cdot \left[1 - \frac{0,38}{(b - 2 \cdot t_w)/t_f} \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b \quad (38)$$



Os coeficientes de esbeltez λ_1 , λ_{1p} e λ_{1r} são utilizados para determinar quais fórmulas devem ser utilizadas no cálculo do momento resistente. Esses coeficientes são descritos pelas Eq. 39, 40 e 41:

$$\lambda_1 = \frac{b - 2 \cdot t_w}{t_f} \quad (39)$$

$$\lambda_{1p} = 1,12 \cdot \sqrt{E/f_y} \quad (40)$$

$$\lambda_{1r} = 1,40 \cdot \sqrt{E/f_y} \quad (41)$$

O cálculo do momento resistente M_{1Rd} é realizado por meio das Eq. 31, 37 ou 38, dependendo das condições de esbeltez e dos parâmetros de flambagem aplicáveis.

Onde M_{1pl} , M_{1r} e M_{1cr} são dados pelas Eq. 42, 43 e 44 respectivamente:

$$M_{1pl} = Z_1 \cdot f_y \quad (42)$$

$$M_{1r} = f_y \cdot W_{1ef} \quad (43)$$

$$M_{1cr} = \frac{W_{1ef}^2}{W_1} f_y \quad (44)$$

O valor mínimo do módulo elástico de resistência W_{1ef} , é dado pela Eq. 45:

$$W_{1ef} = \frac{b_{ef} \cdot d^2}{6} - \frac{(b_{ef} - 2 \cdot t_w) \cdot (d - 2 \cdot t_f)^3}{6 \cdot d} \quad (45)$$

Devido às considerações feitas para a análise do momento resistente M_{1Rd} da mesa na região RI, a parcela do momento equivalente $M_{z_{eq}}$ (descrito na seção 3.8.1) atribuída a essa região é calculada utilizando a Eq. 46:

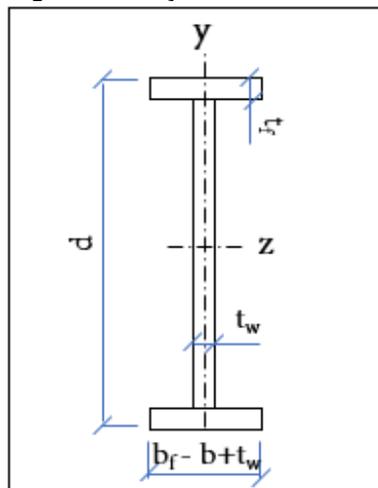
$$M_{z_{eq1}} = M_{z_{eq}} \cdot \frac{I_{z1}}{I_z} \quad (46)$$

Para garantir a devida estabilidade, considerando a região RI, é necessário que a seguinte relação seja obedecida: $M_{z_{eq1}} \leq M_{1Rd}$.

3.7.3 Verificação do momento resistente da mesa região RII

Para realizar a verificação da flambagem na região RII, a seção será tratada como uma viga do tipo I, conforme ilustrado na Fig. 10.

Figura 10: seção I



Fonte: Autor, (2023).

Utilizando a fórmula do momento de inércia para seções retangulares e o método das áreas compostas descrita em (HIBBLER, 2010), obtém-se a Eq. 47 para o momento de inércia I_{z2} :

$$I_{z2} = \frac{1}{12} \left[(b_f - b + t_w) \cdot d^3 - (b_f - b) \cdot (d - 2 \cdot t_f)^3 \right] \quad (47)$$

O módulo elástico W_2 e o módulo plástico Z_2 são determinados utilizando as Eq. 48 e 49 respectivamente:

$$W_2 = \frac{I_{z2} \cdot 2}{d} \quad (48)$$

$$Z_2 = t_f \cdot (b_f - b + t_w) \cdot (d - t_f) + t_w \cdot \left(\frac{d}{2} - t_f \right)^2 \quad (49)$$

Os coeficientes de esbeltez λ_2 , λ_{2p} e λ_{2r} são utilizados para determinar quais fórmulas devem ser utilizadas no cálculo do momento resistente. Esses coeficientes estão descritos pelas Eq. 50, 51 e 52:

$$\lambda_2 = \frac{b_f - b + t_w}{2 \cdot t_f} \quad (50)$$

$$\lambda_{2p} = 0,38 \cdot \sqrt{E/f_y} \quad (51)$$

$$\lambda_{2r} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{E}{(0,7 \cdot f_y)/k_c}} \quad (52)$$

Onde k_c é dado pela Eq. 53:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{(d - 2 \cdot t_f)/t_w}} \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76 \quad (53)$$

O cálculo do momento resistente M_{2Rd} é realizado por meio das Eq. 31, 37 ou 38, dependendo das condições de esbeltez e dos parâmetros de flambagem aplicáveis.

Onde M_{2pl} , M_{2r} e M_{2cr} são dados pelas Eq. 53, 54 e 55 respectivamente

$$M_{2pl} = Z_2 \cdot f_y \quad (53)$$

$$M_{2r} = 0,7 \cdot f_y \cdot W_2 \quad (54)$$

$$M_{2cr} = \frac{0,9 \cdot E \cdot k_c}{\lambda_2^2} W_2 \quad (55)$$

Devido às considerações feitas para a análise do momento resistente M_{2Rd} da mesa na região RII, a parcela do momento equivalente M_{z_eq} (descrito na seção 3.8.1) atribuída a essa região é calculada utilizando a Eq. 56:

$$M_{z_eq2} = M_{z_eq} \cdot \frac{I_{z2}}{I_z} \quad (56)$$

Para garantir a devida estabilidade, considerando a região RI, é necessário que a seguinte relação seja obedecida: $M_{zeq2} \leq M_{2Rd}$.

3.7.4 Verificação do momento resistente da alma

Os coeficientes de esbeltez λ_a e λ_{ap} são utilizados para determinar quais fórmulas devem ser utilizadas no cálculo do momento resistente da alma. Esses coeficientes estão descritos pelas Eq. 57 e 58:

$$\lambda_a = \frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} \quad (57)$$

$$\lambda_{ap} = 3,76 \cdot \sqrt{E/f_y} \quad (58)$$

O cálculo do momento resistente da alma M_{aRd} , é realizado exclusivamente através das Eq. 31 e 37. A condição ($\lambda_a > \lambda_{ar}$) indica que a alma do elemento está em uma faixa de esbeltez que não é adequada descartando a Eq. 33.

Considerando $M_{pl} = M_{1pl}$, e o momento resistente M_{ar} é dado pela Eq. 59:

$$M_{ar} = f_y \cdot W_1 \quad (59)$$

Para garantir estabilidade da alma, é necessário que a seguinte relação seja obedecida: $M_{zeq1} \leq M_{aRd}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Nas Tab. 1, 2 e 3 estão apresentados valores utilizados para a demonstração dos cálculos e exemplificação do processo de verificação. Esses valores são utilizados como exemplos para ilustrar como os cálculos são realizados, mas não representam necessariamente valores reais de uma aplicação específica. É importante utilizar dados adequados e atualizados para cada caso de análise.

Tabela 1: Requisitos da ponte rolante in-loco

Descrição	Valor	Unidade
*Carga de serviço - m_1	30 000	kg
Comprimento do vão - L	15	m
*Altura máxima de elevação da carga transportada - H	15	m
*Carga devido ao peso próprio “carro guincho” - m_2	1 500	kg
*Velocidade de elevação - V_h	9,6	m/min
*Velocidade de translação - V_t	24	m/min
Distância entre rodas do carro guincho - L_2	1,5	m
Distância mínima - L_1	0,5	m

Fonte: Autor, (2023).

O coeficiente de segurança γ_{a1} , mencionado na Tab. 2, foi obtido da NBR 8400-2:2009 para caso de solicitação descrito no item 6.3 da NBR 8400-1:2019, como Caso II: serviço normal com vento limite de serviço.

Tabela 2: Propriedades do aço ASTM A-36

Descrição	Valor	Unidade
Modulo de elasticidade - E	200	GPa
Tensão de escoamento - f_y	250	MPa
Coeficiente de segurança - γ_{a1}	1,33	---

Fonte: Autor, (2023).

A Tab. 3 apresenta as dimensões da seção da viga principal utilizado para a exemplificação.

Tabela 3: Dimensões da viga principal

Descrição	Valor	Unidade
Altura da viga principal - d	850	mm
Distância externa entre as almas - b	300	mm
Largura da mesa - b_f	400	mm
Espessura da mesa - t_f	22,5	mm
Espessura das almas - t_w	9,5	mm
Bitola barra quadrada - t_t	25,4	mm

Fonte: Autor, (2023).

Utilizando os dados da Tab. 1, verifica-se que as relações dimensionais estabelecidas na seção 3.1 são satisfeitas, como demonstrado a seguir:

* Informações relevantes para determinação das cargas atuantes na viga, segundo a norma NBR 8400-1:2019

$$\frac{15}{0,85} = 17,64 \leq 25 \quad e \quad \frac{15}{0,4} = 37,5 \leq 65$$

A Tab. 4 apresenta os valores das cargas atuantes na viga, calculados de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 8400.

Tabela 4: Determinação dos carregamentos atuantes.

-	Simb.	Valor	Unidade
NBR 8400-1:2009	q	2 607,81	N/m
NBR 8400-1:2009	F_v	81 707,49	N
NBR 8400-1:2009	F_h	5 975,55	N
NBR 8400-1:2009	v	796,58	N/m

Fonte: Autor, (2023).

A Tab. 5 apresenta os resultados dos cálculos dos esforços internos desenvolvido na seção 3.3.

Tabela 5: Determinação dos esforços internos.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 10	M_z	624 870	N·m
Eq. 11	M_y	62 739	N·m
Eq. 12	V_y	169 356	N
Eq. 13	V_z	16 930	N
Eq. 14	T	2 616	N·m
Eq. 15	T_1	4 795	N·m

Fonte: Autor, (2023).

A Tab. 6 apresenta os resultados dos momentos de áreas, desenvolvido na seção 3.4.

Tabela 6: Determinação dos momentos de áreas.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 16	I_z	$3,91 \times 10^9$	mm ⁴
Eq. 17	I_y	$5,63 \times 10^8$	mm ⁴
Eq. 19	$Q_{z,P3}$	$1,86 \times 10^6$	mm ³
Eq. 20	$Q_{z,P4}$	$2,63 \times 10^6$	mm ³
Eq. 22	$Q_{y,P3}$	$5,55 \times 10^5$	mm ³
Eq. 24	$Q_{y,P5}$	$1,01 \times 10^6$	mm ³

Fonte: Autor, (2023).

O valor da área média A_{med} , conforme a Eq. 25, é de 0,2404 m².

Na Tab. 7 estão descritas, a tensão normal máxima e as tensões de cisalhamentos nos pontos 3, 4 e 5 da seção. Os momentos de área foram calculados em mm⁴ e mm³, no entanto, para utilizá-los nos cálculos das tensões, é necessário converter para m⁴ e m³. Além disso, é importante garantir que as dimensões lineares, como comprimento e altura, estejam expressas em metros.

Tabela 7: Determinação das tensões.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 24	σ_{x1}	90,50	MPa
Eq. 26	τ_{p3}	11,29	MPa
Eq. 27	τ_{p4}	13,06	MPa
Eq. 28	τ_{p5}	1,80	MPa

Fonte: Autor, (2023).

Verifica-se que a tensão normal máxima σ_{x1} é menor do que a tensão admissível σ_a estabelecida pela Eq. 7, como pode ser observado na demonstração abaixo:

$$\sigma_{x1} \leq \sigma_a = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{250}{1,33} = 187,97 \text{ MPa}$$

Também é confirmado que todas as tensões de cisalhamento são inferiores à tensão de cisalhamento admissível, conforme calculado pela Eq. 8 a seguir:

$$\tau \leq \tau_a = \frac{0,6 \cdot 250}{1,33} = 112,78 \text{ MPa}$$

Tab. 8 apresenta os valores de flecha máxima da viga y_{max} , bem como a flecha admissível y_a estabelecida pela norma CMAA 70:2000. É constatado que a flecha máxima é inferior à flecha admissível.

Tabela 8: Determinação da flecha máxima.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 34	y_{max}	16,87	mm
Eq. 6	y_{adm}	16,89	mm

Fonte: Autor, (2023).

A verificação da flambagem apresentada na seção 3.7 é válida para almas não esbeltas, de acordo com o critério estabelecido na Eq. 29, conforme mostrado abaixo:

$$\frac{d - 2 \cdot t_f}{t_w} \leq 5,7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \rightarrow 84,76 \leq 161,22$$

A Tab. 9 apresenta os resultados das equações para determinação do momento resistente da mesa, que é analisado em duas regiões distintas, conforme descrito na seção 3.7.

Na análise das regiões RI e RII da mesa, observa-se que ambas apresentam índices de esbeltez inferiores aos parâmetros λ_{1p} e λ_{2p} respectivamente, e para os dois casos, o momento resistente é dada pela Eq. 31.

Tabela 9: Determinação do momento resistente da mesa.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 34	M_{zeq}	829 598	N·m
Eq. 35	I_{z1}	$3,13 \times 10^{-3}$	m ⁴
Eq. 36	W_1	$7,36 \times 10^{-3}$	m ³
Eq. 37	Z_1	$8,64 \times 10^{-3}$	m ⁴
Eq. 39	λ_1	12,54	---
Eq. 40	λ_{1p}	31,68	---
Eq. 47	M_{1pl}	2 160 280	N·m
Eq. 31	M_{1Rd}	1 624 271	N·m
Eq. 46	M_{zeq1}	666 203	N·m
Eq. 47	I_{z2}	$1,25 \times 10^{-3}$	m ⁴
Eq. 48	W_2	$2,95 \times 10^{-3}$	m ³
Eq. 49	Z_2	$3,57 \times 10^{-3}$	m ⁴
Eq. 50	λ_2	2,44	---
Eq. 51	λ_{2p}	10,75	---
Eq. 53	M_{2pl}	892 440	N·m
Eq. 31	M_{2Rd}	671 008	N·m
Eq. 56	M_{zeq2}	266 927	N·m

Fonte: Autor, (2023).

Conforme observado na Tab. 9, verifica-se que tanto para a região RI como para a região RII, o momento equivalente de cada região é inferior ao momento

resistente correspondente. Ou seja ($M_{z_{eq1}} = 666\,203 < M_{1Rd} = 1\,624\,271$) para a região RI e ($M_{z_{eq2}} = 266\,927 < M_{2Rd} = 671\,008$) para a região RII.

A Tab. 10 apresenta os resultados dos cálculos para determinação do momento resistente da alma. Sendo λ_a , menor que o parâmetro de esbeltez λ_{ap} . Utiliza-se a Eq. 31 para o cálculo do momento resistente da alma.

Tabela 10: Determinação do momento resistente da alma.

-	Simb.	Valor	Unidade
Eq. 57	λ_a	84,76	---
Eq. 58	λ_{ap}	106,35	---
Eq. 31	M_{aRd}	1 624 271	N·m

Fonte: Autor, (2023).

Constatou-se que o momento fletor equivalente $M_{z_{eq}}$ obtido na Tab.9 é inferior ao momento resistente da alma, ou seja ($M_{z_{eq}} = 829\,598 < M_{aRd} = 1\,624\,271$). Com isso, pode-se concluir que todas as verificações necessárias foram satisfeitas.

4.2 OBSERVAÇÕES REALIZADAS

Conforme observado na Tab. 7, a tensão máxima na viga é de 90,5 MPa, enquanto a tensão admissível, considerando o coeficiente de segurança estabelecido pela NBR 8440 de 1,33, é de 187,97 MPa. No entanto, é importante ressaltar que o coeficiente de segurança real obtido foi em torno de 2,76 o que indica uma margem de segurança ainda maior em relação à tensão.

Essa margem de segurança adicional é atribuída principalmente ao limite de flecha máxima admissível estabelecido pela CMAA 70. Isso ocorre porque, devido à grande carga aplicada e ao comprimento da viga, a flecha tende a ser significativa. No entanto, é fundamental compreender que uma flecha elevada não implica automaticamente na perda de estabilidade da estrutura, desde que os demais critérios tenham sido atendidos, a viga estará trabalhando dentro do seu regime elástico, o que significa que, quando a carga é cessada, a viga retornaria ao seu estado original. Para reduzir a flecha máxima, é necessário aumentar o momento de inércia da viga. Uma forma vantajosa de alcançar isso é aumentar a altura do perfil da viga (dimensão d). O aumento da altura do perfil resulta em um aumento significativo do momento de



inércia, o que melhora a capacidade da viga de resistir à deformação sob as cargas aplicadas.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o objetivo de realizar os cálculos para a análise da viga principal de pontes rolantes foi alcançado com sucesso.

Observou-se que a flecha máxima admissível, que é o critério que demanda maiores dimensões da seção, desempenha um papel significativo no aumento do fator de segurança da viga principal. No entanto, é importante ressaltar que o cumprimento desse critério pode resultar em um aumento no custo de fabricação do equipamento. A maneira mais eficiente de reduzir a flecha máxima é aumentando a altura da viga (dimensão d).

Como evidenciado na Tab. 7, a tensão de cisalhamento não foi um fator significativo para o dimensionamento, uma vez que os valores são consideravelmente inferiores à tensão admissível.

Com relação a flambagem local, todos os momentos resistentes calculados foram superiores aos momentos resistentes que atuam na porção da viga, o que indica que tanto a mesa como a alma da seção não correm risco de sofrer flambagem.

Como sugestão para próximos trabalhos, sugere-se executar o dimensionamento da viga utilizando a tensão equivalente de Von Mises, o que exigirá uma pesquisa do local da viga em que a combinação das tensões normal e de cisalhamento se apresenta mais desfavorável.

REFERÊNCIAS

ABNT - NBR 8400-1. **Equipamentos de elevação e movimentação de carga - Regras para projeto Parte 1: Classificação e cargas sobre as estruturas e mecanismos.** Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ABNT - NBR 8400-2. **Equipamentos de elevação e movimentação de carga - Regras para projeto Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade.** Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ABNT - NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, RJ, 2008.



ALVES Filho, Avelino. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 1. ed. – São Paulo, Érica, 2000.

BEER, Ferdinand P.; JOHSTON, E. Russell. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. – São Paulo, Makron Books, 1995.

BRITO, André Luis dos Santos; COSTA, João Victor; NASCIMENTO, Leonardo Simões; LEMOS Lucas de Souza. Projeto: **Ponte Rolante Univiga**. Trabalho Acadêmico Integrador do curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Minas Gerais IFMG, Arcos/MG.

CMAA 70, **Specification for Electric Overhead Traveling Cranes**, The Crane Manufacturers Association of America, Pittsburg, 2000.

HIBELLER, R. C. **Estática mecânica para engenharia**. 10. ed. – São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2005.

HIBELLER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. – São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010.

Neto, A. L. L., 2018, **Projeto detalhado de uma ponte rolante para uma empresa metal mecânica**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Da Paraíba – UFPB, João Pessoa /PB, Brasil.

Rudenko, N, 1973, **Máquinas de Elevação e Transporte**, Ed. S.A, Rio de Janeiro.

TAMASAUSKAS, Arthur. **Metodologia do Projeto Básico de Equipamento de Manuseio e Transporte de Cargas – Ponte Rolante – Aplicação Não Siderúrgica**

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_x = tensão normal em um ponto da seção (Pa);

M_z = momento fletor em relação ao eixo z (N·m);

y = distância perpendicular do eixo x a um ponto em análise da seção (m);

I_z = momento de inércia em relação ao eixo z (m⁴);

M_y = momento fletor em relação ao eixo y (N·m);

z = distância perpendicular do eixo y a um ponto em análise da seção (m);

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y (m⁴);

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

V_y = esforço cortante (N);

Q_z = momento estático (m³);

e = espessura da parede da seção transversal do elemento (m);



T = momento torsor (N·m);

t = espessura da parede do ponto em análise da seção (m);

A_{med} = área média contida no contorno das linhas centrais das paredes (m²);

$M(x)$ = equação singular do momento fletor (N·m);

E = módulo de elasticidade (Pa);

y_{max} = Flecha máxima (m);

y_{adm} = Flecha admissível (m);

σ_a = tensão normal admissível (Pa);

f_y = tensão de escoamento (Pa);

γ_{a1} = fator de segurança (---);

τ_a = tensão de cisalhamento admissível (Pa);

d = altura da viga principal (mm);

b = distância externa entre as almas (mm);

b_f = largura da mesa (mm);

t_f = espessura da mesa (mm);

t_w = espessura das almas (mm);

t_t = bitola barra quadrada (mm);

L = comprimento do vão (m);

L_1 = distância (m);

L_2 = distância entre rodas do carro guincho (m);

F_v = carga vertical (N);

q = carga devido ao peso próprio (N/m);

F_h = carga horizontal (N);

v = carga de vento (N/m)

R_{y1} = reação (N);

$M(x)_z$ = equação singular do momento fletor devido as cargas verticais (N·m);

x = distância arbitrária (m);

T_1 = momento torsor (N·m);

$C1$ = coeficiente de integração (---);

$C2$ = coeficiente de integração (---);

M_{Rd} = momento resistente do elemento (N·m);

M_{zeq} = momento fletor equivalente (N·m);



I_{z1} = momento de inércia da seção RI (m^4);

W_1 = módulo elástico de resistência da seção RI (m^3);

Z_1 = módulo plástico da seção RI (m^3);

b_{ef} = largura efetiva (m);

λ_1 = parâmetro de esbeltez da mesa RI (---);

λ_{1p} = parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação RI (---);

λ_{1r} = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento RI (---);

M_{1pl} = momento resistente de plastificação da região RI ($N\cdot m$);

M_{1r} = momento resistente correspondente ao início do escoamento da região RI ($N\cdot m$);

M_{1cr} = momento resistente de flambagem elástica da região RI ($N\cdot m$);

W_{1ef} = módulo elástico de resistência mínimo (m^3);

M_{zeq1} = momento fletor equivalente RI ($N\cdot m$);

I_{z2} = momento de inércia da seção RII (m^4);

W_2 = módulo elástico de resistência da seção RII (m^3);

Z_2 = módulo plástico da seção RII (m^3);

λ_2 = parâmetro de esbeltez da mesa RII (---);

λ_{2p} = parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação RII (---);

λ_{2r} = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento RII (---);

k_c = coeficiente de flambagem (---);

M_{2pl} = momento resistente de plastificação da região RII ($N\cdot m$);

M_{2r} = momento resistente correspondente ao início do escoamento da região RII ($N\cdot m$);

M_{2cr} = momento resistente de flambagem elástica da região RII ($N\cdot m$);

M_{zeq2} = momento fletor equivalente RII ($N\cdot m$);

λ_a = parâmetro de esbeltez da alma (---);

λ_{ap} = parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação da alma (---);

λ_{ar} = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento alma (---);

M_{ar} = momento resistente correspondente ao início do escoamento da alma ($N\cdot m$);