

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DA VIGA PRINCIPAL E CABECEIRAS DE UMA PONTE ROLANTE UNIVIGA

Renan Carlos dos Reis Sampaio¹, Carlos Alfredo Gracioli Aita²,
Marcelo André Toso³

Resumo: Máquinas de elevação e transporte de cargas são indispensáveis para o processo fabril nas indústrias, locais de construção e armazenagem. Para espaços delimitados e com processos definidos, torna-se mais coerente a utilização de pontes rolantes, devido ao seu alcance em todos os espaços do local de operação do equipamento. O presente trabalho propõe realizar o dimensionamento de uma ponte rolante univiga para movimentação dos equipamentos de uma hidrelétrica. Foram dimensionados os seguintes componentes estruturais da ponte rolante: viga principal e vigas das cabeceiras. Para o dimensionamento das vigas foram utilizados cálculos analíticos baseados na literatura e nas normas regulamentadoras NBR 8400:2019 e NBR 8800:2008, além do *software* FTOOL®. A ponte rolante operará abrigada, sendo que o vão livre entre os trilhos da ponte será de seis metros, e a massa da carga mais pesada a ser movimentada é de sete toneladas. Para estas condições de carga e operação é prática corrente a utilização de uma ponte rolante univiga, com viga principal e cabeceiras formadas por perfil “I”. Foram selecionados os perfis estruturais tipo “I” W 460x97,0 para a viga principal e o perfil “I” W 200x22,5 para as cabeceiras da ponte rolante. Nas condições apresentadas, os perfis dimensionados atendem aos critérios de deformação máxima e tensões admissíveis estabelecidas pelas normas regulamentadoras do projeto destes equipamentos.

Palavras-chave: ponte rolante; dimensionamento; viga.

1 Engenheiro Mecânico, Instituto Federal de Santa Catarina. renan.sampai077@gmail.com

2 Doutorando em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. carlos.aita@ifsc.edu.br

3 Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. marcelo.toso@ifsc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Máquinas de elevação e transporte de cargas são indispensáveis para o processo fabril nas indústrias, locais de construção e armazenagem. Rudenko (1976) destaca que esse tipo de processo de transporte não se limita em apenas mover cargas de um lugar para outro, mas também alojar mercadorias em armazéns e deslocá-las até os equipamentos de processo, além de assegurar uma constante transferência de cargas entre dois ou vários pontos ligados pelas atividades comuns de processo. Para cada aplicação é utilizado um equipamento de movimentação específico. Sordi (2016) apresenta o dimensionamento e projeto da viga principal de uma ponte rolante para utilização na indústria metal-mecânica, utilizando as normas NBR 8400 e 8800. O autor utiliza o método de elementos finitos para a visualização dos níveis de tensão e deflexão estrutural. Ribeiro (2011) apresenta uma metodologia de dimensionamento de um pórtico rolante, fundamentado em normas europeias. A metodologia do autor contém as definições de solicitações sobre a estrutura; determinação dos esforços mecânicos e verificação da resistência estrutural; especificação dos motorreductores e blocos de rodas; e elaboração dos desenhos de projeto do equipamento. Tamasauskas (2000) cita uma sequência de procedimentos que viabilizam a concepção de um projeto básico de um equipamento de movimentação, no caso, uma ponte rolante de aplicação não-siderúrgica. O autor faz análises sobre a função e classificação do equipamento, sobre o sistema de elevação de cargas, faz proposições referentes ao sistema de translação do carro, proposições para análise estrutural do carro e analisa possíveis maneiras de comando do equipamento. Já Campos (2018) desenvolve o dimensionamento dos componentes básicos de uma ponte rolante. Em sua metodologia são aplicados cálculos analíticos embasados na literatura e em normas vigentes brasileiras. O trabalho apresenta o dimensionamento dos cabos de aço, tambor, rodas, viga principal, moitão, assim como seleção de motores. Por fim, realiza-se o levantamento dos custos do equipamento projetado.

Para espaços bem delimitados e com processos definidos, como edifícios industriais, armazéns e usinas hidrelétricas, por exemplo, torna-se mais coerente a utilização de pontes rolantes, devido a sua capacidade de movimentação de cargas pesadas com alcance em todos os espaços do local em que está instalada. O presente estudo tem como objetivo dimensionar uma ponte rolante univiga que será utilizada na implantação de uma pequena central hidrelétrica localizada no estado de Santa Catarina. São dimensionados os componentes estruturais da ponte rolante: viga principal e vigas das cabeceiras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Equipamentos de movimentação e elevação de cargas

A movimentação de produtos e cargas em geral é parte indispensável dos processos de logística, armazenamento e produção na indústria dos mais variados segmentos. Rudenko (1976) destaca que a grande diversidade de projetos de máquinas de elevação e transporte existente é uma consequência da variedade de espécies e propriedades de cargas a serem movidas, sem as quais a produção moderna seria impossível. Tamasauskas (2000) sugere a classificação dos equipamentos de manuseio de carga como: **Equipamento de manuseio contínuo**: transportadores de correia; transportadores de caneca; transportadores que utilizam fusos. **Equipamento de manuseio descontínuo**: talhas; monovias; equipamento com levantamento de carga e giro; pontes rolantes; guindastes.

2.2 Pontes rolantes

As pontes rolantes são estruturas horizontais suspensas, geralmente metálicas, que transladam sobre dois ou mais trilhos. Possuem sistemas que possibilitam a elevação e movimentação de cargas. Este tipo de equipamento pode ser utilizado nos mais diversos segmentos industriais auxiliando na movimentação de matéria-prima, cargas e produtos durante todo o processo de fabricação, armazenagem e expedição. Segundo Leite Neto (2018), a capacidade de operação das pontes rolantes pode variar entre 0,5 a 300 toneladas. Sendo que as pequenas podem elevar cargas de até 3 toneladas e as grandes até 120 toneladas. Esses equipamentos geralmente operam desde vãos pequenos de cerca de 5 metros até vãos de 30 metros. As pontes rolantes ainda podem ser classificadas em: ponte rolante apoiada, ponte rolante suspensa e ponte rolante de parede. Dentro dessas categorias ainda podem ser classificadas como: ponte rolante univiga e ponte rolante biviga.

2.2.1 Ponte rolante suspensa e de parede

Na ponte rolante suspensa a viga principal da estrutura do equipamento se desloca por baixo do caminho de rolamento, geralmente apoiada na aba inferior da viga do caminho. Sordi (2016) menciona que este modelo pode ser posicionado mais próximo ao teto do edifício, obtendo-se um melhor aproveitamento da altura física do edifício. Já a ponte rolante de parede caracteriza-se por se manter apoiada em apenas uma de suas extremidades. Passos (2011) explica que este equipamento pode ser alocado em um plano inferior a uma ponte rolante de maior porte. Desta forma, ambas podem operar em conjunto. A Figura 1 apresenta um exemplo de ponte rolante suspensa e de parede, respectivamente.

Figura 1 - Ponte rolante suspensa e de parede



Fonte: Adaptado de Sordi (2016).

2.2.2 Ponte rolante univiga e biviga

Segundo Passos (2011), as pontes rolantes univigas são chamadas desta forma por possuírem uma viga única principal. São de construção mais simples e têm capacidades de carga relativamente baixas, normalmente até 15 toneladas. A viga principal serve de caminho para a talha com *trolley*, item responsável pelo içamento das cargas. Considerando pontes bivigas, Sordi (2016) explica que estas são projetadas para suportarem cargas mais elevadas. Para esse fim, são configuradas com duas vigas principais. As duas vigas servem de caminho para o carro guincho, que tem a mesma função das talhas, ou seja, realizar o levantamento e descida das cargas. Na Figura 2 pode ser visualizado um modelo de ponte rolante univiga e biviga, respectivamente.

Figura 2 - Pontes rolante univiga e biviga



Fonte: www.brevil.ind.br

2.3 Componentes da ponte rolante

As pontes rolantes, como qualquer outro equipamento, são compostas por componentes que possuem diferentes funções no conjunto. Os principais

componentes são a viga principal, cabeceiras, carro guincho, talha e caminho de rolamento.

2.3.1 Viga principal e cabeceira da ponte rolante

Silva (2017) descreve a viga principal como um dos elementos mais importantes da ponte, pois é o elemento que servirá de caminho para o carro guincho, ou *trolley* com talha. Portanto, deverá suportar diretamente as cargas a serem elevadas. A viga estrutural pode ser um perfil "I", viga caixão ou até mesmo treliçada. Segundo Silva (2017), as cabeceiras são estruturas fixadas nas extremidades da viga principal e têm a função de realizar a translação da ponte. Nas cabeceiras encontram-se as rodas, eixos, rolamentos e a motorização que permitem à ponte movimentar-se sobre o caminho de rolamento.

2.3.2 Carro guincho, talha e caminho de rolamento

Sordi (2016) destaca que o carro guincho é um componente que se desloca sobre a viga principal da ponte. Seu movimento ocorre perpendicular ao movimento da ponte rolante. O carro guincho é utilizado em pontes bivigas, devido ao seu formato. Em casos de pontes univigas utiliza-se o *trolley* (SILVA, 2017). O *trolley* tem a mesma função do carro guincho, porém em uma concepção mais simples. Ele é montado sob a viga principal e sustenta a talha da ponte. A talha é responsável pelo içamento das cargas, sendo formada por um tambor onde é enrolado o cabo de aço. O tambor geralmente é acoplado em um motor elétrico. O acionamento do motor elétrico provoca o giro do tambor, enrolando e desenrolando o cabo de aço e assim elevando ou abaixando a carga. Na extremidade do cabo de aço utiliza-se um gancho para facilitar a fixação da carga. Segundo Sordi (2016), o caminho de rolamento é um trilho por onde a ponte se desloca. Rudenko (1976) cita alguns formatos de trilho: barra chata de aço, barra quadrada de aço e trilho especial para ponte rolante.

2.4 Normas de projetos - NBR 8400:2019 e NBR 8800:2008

No Brasil, a norma que define os parâmetros básicos para o dimensionamento estrutural e componentes mecânicos dos equipamentos de levantamento e movimentação de cargas é a norma NBR 8400 (ABNT, 2019). Este trabalho utiliza esta norma regulamentadora para definir o dimensionamento dos componentes da ponte rolante. Já a norma NBR 8800 (ABNT, 2008)⁴ se baseia no método dos estados-limites, e estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Como a NBR 8400 (ABNT, 2019) não impõe limites para a deformação ou deslocamento máximo

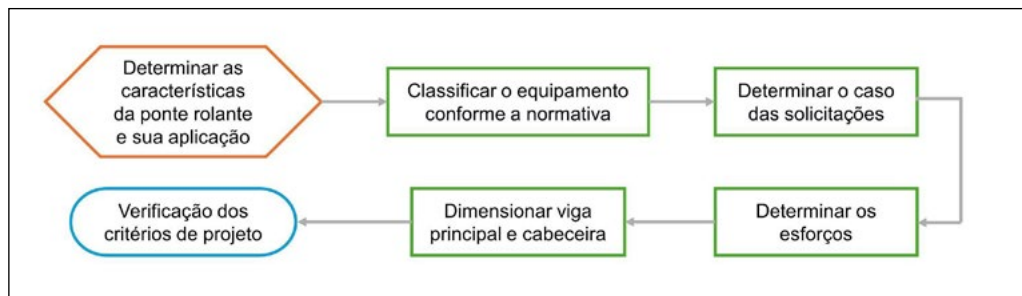
4 No momento do desenvolvimento da pesquisa a norma vigente era do ano 2008.

da estrutura quando submetida a uma carga, utiliza-se a NBR 8800 (ABNT, 2008) para garantir uma maior estabilidade e segurança do equipamento em estudo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho tem como propósito dimensionar os principais componentes estruturais de uma ponte rolante univiga, mais especificamente a viga principal, e a estrutura das cabeceiras. Os cálculos e análises para o dimensionamento são baseados nas normas NBR 8400 (ABNT, 2019) e NBR 8800 (ABNT, 2008) e literaturas complementares. Para a realização do dimensionamento são aplicados cálculos analíticos e utilizado o *software* FTOOL® para auxiliar na obtenção dos valores dos esforços cortantes e momentos fletores presentes na estrutura. A Figura 3 apresenta um fluxograma deste trabalho.

Figura 3 - Fluxograma metodológico deste trabalho



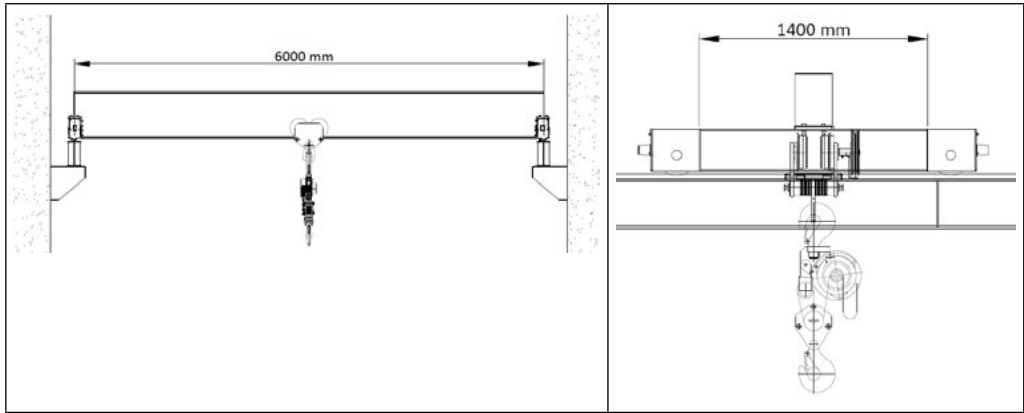
Fonte: Autor.

3.1 Características gerais da ponte rolante

A ponte rolante projetada será utilizada para a movimentação dos equipamentos da casa de força de uma pequena central hidrelétrica localizada em Santa Catarina. A ponte rolante operará abrigada, com temperatura máxima de 40°C. O vão livre entre os trilhos da ponte rolante será de 6 (seis) metros, e a massa da carga mais pesada a ser movimentada é de 7 (sete) toneladas. As características da ponte rolante são as seguintes: carga nominal: 7000 kgf; vão livre: 6 m; altura de elevação: 8 m; velocidade máxima de deslocamento longitudinal: 0,25 m/s; velocidade máxima do *trolley*: 0,25 m/s. Para as condições de carga e operação apresentadas, é prática corrente a utilização de uma ponte rolante univiga, com viga principal formada por perfil "I". As cabeceiras da ponte rolante também são formadas por perfil "I". A ponte rolante tem uma cabeceira de cada lado. Cada cabeceira possui duas rodas em suas

extremidades, uma motora e uma movida. A Figura 4 apresenta um estudo preliminar ilustrando a ponte rolante com as características citadas acima.

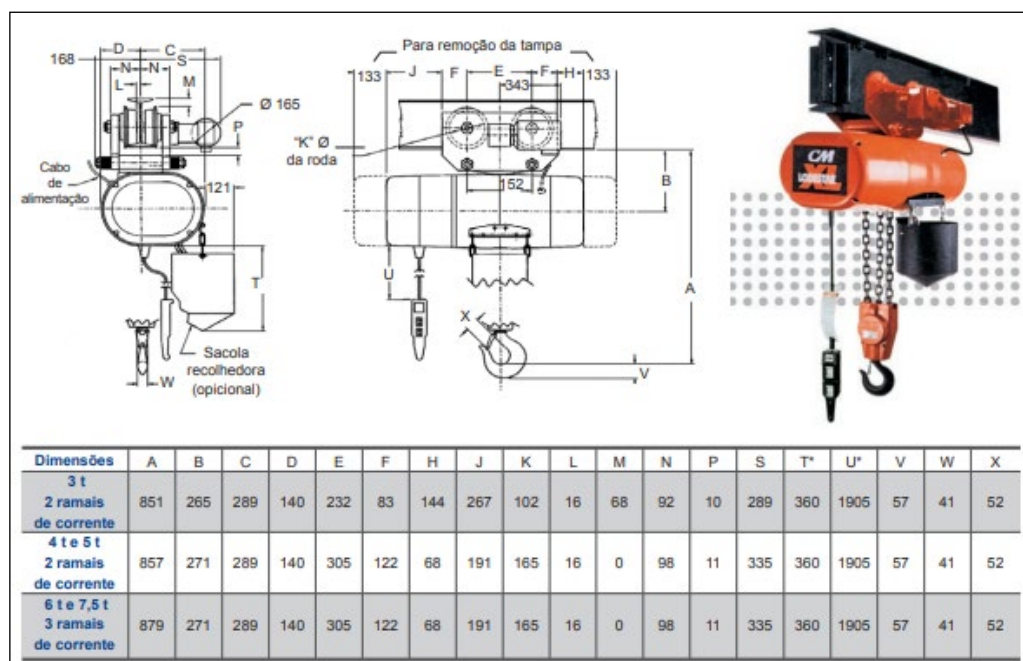
Figura 4 - Estudo da ponte Rolante – vista frontal e vista lateral



Fonte: Autor.

A talha de correntes será acionada por motor elétrico e possuirá *trolley*, também de operação motorizada, para se deslocar sob a viga principal da ponte rolante. A Figura 5 apresenta o dimensional da talha selecionada: talha com três ramais de correntes e capacidade de içamento para cargas de até 7,5 toneladas.

Figura 5 - Catálogo com dimensional da talha elétrica selecionada



Fonte: Columbus McKinnon, adaptado pelo autor.

3.2 Classificação do equipamento

De acordo com a NBR 8400-1 (ABNT, 2019), a classificação do equipamento não requer um alto grau de precisão, sendo mais de natureza de estimativa. Além disso, os números de ciclos de elevação que determinam as classes de utilização do equipamento não constituem valores assegurados. São apenas valores de referência que servem como base para os cálculos de fadiga e correspondem à vida média esperada com um grau de segurança razoável. De acordo com a norma supracitada e, considerando que o equipamento em estudo será aplicado em uma casa de força de uma pequena central hidrelétrica, a ponte rolante irá pertencer ao grupo A3 e classe de elevação HC1 da norma previamente citada.

3.3 Carregamentos considerados no projeto

Devem ser determinadas as tensões desenvolvidas no equipamento durante a sua operação para realizar os cálculos estruturais. Serão consideradas as seguintes cargas: **principais** - exercidas sobre a estrutura do equipamento suposto imóvel, no estado de carga mais desfavorável. Segundo a NBR 8400-1 (ABNT, 2019), as cargas principais são as seguintes: - carga devido ao peso morto dos componentes (peso dos componentes do equipamentos, excluindo

a carga de trabalho); - carga devido à carga de trabalho. Já as **cargas devido ao movimento vertical** são originadas do içamento da carga de trabalho repentinamente, de acelerações ou desacelerações do movimento de elevação e do choque vertical das cargas devido ao deslocamento sobre trilhos. “As oscilações causadas pela elevação da carga devem ser levadas em consideração, multiplicando-se as cargas pelo fator denominado coeficiente dinâmico ψ .” (ABNT, 2019, p. 8). A equação 1 descreve como é obtido o fator ψ :

$$\psi = \psi_{\min} + \beta_2 \cdot V_h \quad (1)$$

Onde: ψ_{\min} e β_2 são parâmetros fornecidos pela norma. Os valores estão em função da classe de elevação *HC1* a *HC4*. A variável V_h é a velocidade de elevação em regime constante, expressa em m/s. Tendo em vista que a classe de elevação da ponte rolante em estudo é *HC1*, pela equação 1, obtém-se o valor de 1,0925 para o coeficiente dinâmico. Neste trabalho será considerado o valor de $\psi = 1,10$.

3.4 Caso de solicitação

Para efeito de dimensionamento, três casos de solicitações devem ser avaliados: **caso I**: serviço normal sem vento; **caso II**: serviço normal com vento limite de serviço (uma vez a ponte rolante está abrigada em um pavilhão onde tem-se apenas uma cobertura) e **caso III**: solicitações excepcionais. Devido às várias cargas a serem determinadas, aumenta-se a probabilidade de imprecisão nos cálculos. Por esse motivo aplica-se um coeficiente de amplificação M_x que varia de acordo com o grupo de classificação do equipamento. Este coeficiente deve ser multiplicado às cargas mencionadas anteriormente.

3.5 Determinação da resistência da estrutura

Neste tópico serão apresentados os cálculos e métodos necessários para verificar a resistência dos elementos em estudo da ponte rolante.

3.5.1 Coeficiente de segurança

A NBR 8400-2 (ABNT, 2019) estabelece que a tensão calculada na estrutura não pode exceder a tensão admissível σ_a . Ao dividir a tensão de limite de escoamento σ_E pelo coeficiente v_E , que depende do caso de solicitação, obtém-se o valor da tensão admissível. A ponte em estudo classifica-se no caso I, onde: v_E é 1,5; e $\sigma_a = \sigma_E/1,5$. Já a tensão admissível ao cisalhamento τ_a , é definida por meio da equação 2:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Onde: σ_a é a tensão admissível à tração. O material dos perfis estruturais será o aço de alta resistência mecânica ASTM A 572 Grau 50. Sua tensão de resistência ao escoamento é de 345 MPa. Portanto, resolvendo-se as razões apresentadas para o caso I, tem-se que a tensão admissível é $\sigma_a = 230$ MPa. Logo, resolvendo-se a equação 2 obtém-se a tensão admissível ao cisalhamento, $\tau_a = 132,8$ MPa.

3.5.2 Tensão devido ao cisalhamento, a flexão normal e combinadas

Para elementos sujeitos a esforços de cisalhamento, Hibbeler (2010) descreve que o valor de tensão para esse caso pode ser obtido pela equação 3.

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (3)$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento na seção; V = força de cisalhamento interna resultante na seção determinada pelas equações de equilíbrio e; A = área da seção. Noton (2013) descreve que o valor tensão para elementos sujeitos a esforços de flexão pode ser obtido pela equação 4.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

Onde: σ = tensão normal; M = momento fletor; I = momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro; c = distância do plano neutro até a face mais externa da viga (ponto de maior tensão normal).

Segundo a NBR 8400-2 (ABNT, 2019), em casos de tensões normais combinadas a tensões de cisalhamento, a equação 5 deve ser verificada:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_c \quad (5)$$

Onde: σ = tensão normal; σ_c = tensão combinada; τ = tensão de cisalhamento.

3.5.3 Verificação da resistência da aba inferior do perfil estrutural

Para Rudenko (1976), é necessário realizar uma verificação da resistência da aba inferior da viga, devido ao esforço vertical para baixo advindo das rodas da talha em operação, sendo que a tensão na aba pode ser obtida pela equação 6.

$$\sigma_L = 3,05 \frac{P}{t^2} \quad (6)$$

Onde: σ_L = tensão na aba; P = força exercida por uma roda; t = espessura da aba.

3.5.4 Deslocamento estrutural máximo

Para Hibbler (2010), a equação 7 pode ser utilizada para obter-se analiticamente a deflexão máxima em uma viga biapoiada com carga concentrada e centralizada.

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (7)$$

Onde: δ = Deflexão máxima; P = Carga concentrada; L = Comprimento entre apoios da viga; E = Módulo de elasticidade do material da viga; I = momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa são definidos os perfis “I” que irão compor a viga principal e as cabeceiras da ponte rolante garantindo a estabilidade e segurança necessária para a operação do equipamento. Os critérios utilizados para especificar os perfis estruturais são: *i*) as tensões máximas devido aos esforços devem ficar abaixo da tensão admissível estabelecida pela NBR 8400 (ABNT, 2019); *ii*) a deflexão estrutural máxima deve ficar abaixo do valor estabelecido pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

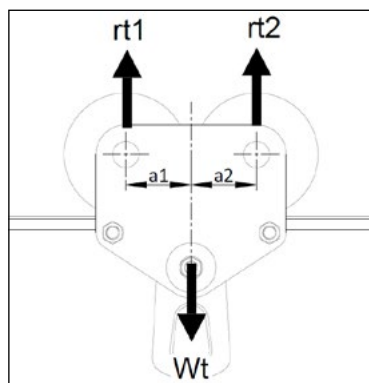
4.1 Determinação das cargas presentes no equipamento

A NBR 8400-5 (ABNT, 2019) estabelece que os equipamentos de movimentação devem ser submetidos a uma condição de sobrecarga em testes dinâmicos antes de entrarem em operação. Para a ponte rolante em estudo, a carga para testes deve ser 20% maior que a carga nominal. Portanto, para o dimensionamento, considera-se a carga de testes multiplicada pelo coeficiente dinâmico encontrado em 3.3. Esta carga é somada à massa do conjunto da talha (352 kg). A resultante desta carga total será denominada de Wt . A equação 8 mostra como obter o valor de Wt , em Newtons.

$$Wt = ((7000kg \cdot 1,2 \cdot \psi) + 352kg) \cdot g \quad (8)$$

Sendo: g o valor da aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$). Logo, $Wt = 94097,52 \text{ N}$. A Figura 6 mostra as reações nas rodas do *trolley*. Onde $a1$ e $a2$ são as distâncias entre o centro das rodas e o centro do *trolley*, $rt1$ e $rt2$ são as reações em cada par de rodas.

Figura 6 - Representação do *trolley*



Fonte: Autor.

Como os valores de $a1$ e $a2$ são iguais a 152,5 mm, logo, obtém-se que:

$$rt1 = rt2 = \frac{Wt}{2} \quad (9)$$

Portanto, $rt1 = rt2 = 47048,76$ N. Além da carga pontual na viga proveniente do içamento das cargas, deve-se considerar também a carga distribuída em virtude do peso próprio da viga. Como as dimensões da viga ainda não foram definidas, nesta etapa considera-se uma massa de 100kg/m distribuída ao longo da estrutura. Esse valor pode ser verificado em uma próxima iteração, caso esteja muito distante do valor real, quando definidas as dimensões estruturais da viga selecionada.

4.2 Cálculo das reações estruturais e momentos fletores

Considerando as cargas atuantes na estrutura, o próximo passo é obter os valores dos esforços cisalhantes e momentos fletores mais críticos envolvidos no projeto. Para isso, foram simuladas através do *software* FTOOL® as condições de carga na viga principal com a talha em duas posições: *a*) talha operando na posição central da viga principal, onde ocorre o momento fletor máximo; *b*) talha operando o mais próximo possível das laterais, onde a viga principal está sujeita a uma condição de esforço cortante máximo.

4.2.1 Viga principal e viga das cabeceiras

Considerando a viga principal com a aplicação dos esforços obtidos na seção 4.1 e realizando a análise estrutural no *software* FTOOL®, obtém-se, para a primeira posição da talha: esforço cisalhante máximo $V1_{máx} = 50,023$ kN e; momento fletor máximo $M1_{máx} = 138,316$ kNm. Estes valores devem ser multiplicados pelo coeficiente de amplificação (M_x). Para o caso em estudo,

$M_x = 1,050$. Portanto, os valores a serem considerados para o dimensionamento estrutural são: esforço cisalhante máximo $V1_{máx} = 52,524$ kN e; momento fletor máximo $M1_{máx} = 145,232$ kNm. Já considerando a aplicação dos esforços para a talha posicionada em uma das extremidades da viga, obtêm-se os seguintes valores (já multiplicados por $M_x = 1,05$): esforço cisalhante máximo $V2_{máx} = 92,960$ kN e; momento fletor máximo $M2_{máx} = 49,290$ kNm.

Para a viga das cabeceiras a carga central é o esforço $V2_{máx}$ obtido previamente, quando a talha está toda deslocada para uma das laterais da ponte rolante. Neste caso, a massa da viga será desconsiderada, tendo em vista que se trata de um comprimento pequeno, e estima-se um perfil de dimensões bem inferiores ao da viga principal. Para esta análise, os esforços estruturais obtidos no software FTOOL® são: esforço cisalhante máximo $Vc_{máx} = 46,480$ kN e; momento fletor máximo $Mc_{máx} = 32,536$ kNm;

4.3 Definição do perfil estrutural da viga principal da ponte rolante

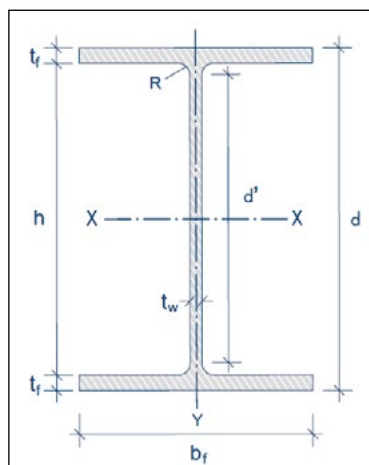
Inicialmente resolve-se a equação 10, para obter-se o valor de w_x (módulo de resistência elástico em torno do eixo x-x). Utiliza-se o momento fletor mais crítico, $M = M1_{máx} = 145,232$ kNm, e substitui-se σ pela tensão admissível $\sigma_a = 230$ MPa, conforme apresentado na seção 3.5.1. Resolvendo a equação 10, obtém-se que w_x deve ser maior que $631,44$ cm³.

$$\sigma = M \cdot \frac{10^3}{w_x} \quad (10)$$

Em seguida, resolve-se a equação 6 a fim de encontrar um valor mínimo para a espessura da aba “t”. Considera-se $\sigma = \sigma_a = 230$ MPa; $P = Wt/4 = 23524,38$ N. A partir da equação 6 conclui-se que a espessura “t” não deve ser menor que $17,66$ mm. Por sua vez, resolvendo-se a equação 7, obtém-se um valor para I (momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro). Conforme apresentado na seção 2.4 a deflexão máxima aceitável é igual a $L/600$. Portanto, para $\delta = L/600 = 10$ mm; $P = Wt = 94097,52$ N; $E = 200000$ MPa; $L = 6000$ mm, conclui-se que I deve ser maior que $2,117 \times 10^8$ mm⁴.

Na etapa seguinte do dimensionamento estrutural, utilizou-se um catálogo de perfis comerciais da fornecedora GERDAU® para especificar o perfil “I”. A partir desse princípio foi selecionado o perfil “I” W 460 x 97 para a viga principal. A Figura 7 e a Tabela 1 apresentam os dados da seção transversal do perfil estrutural selecionado.

Figura 7 - Representação da seção de um perfil "I"



Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

Tabela 1 - Dados da seção transversal do perfil - viga principal

Tipo	d(mm)	bf(mm)	tw(mm)	tf(mm)	kg/m	A(mm ²)	I(mm ⁴)	W _x (cm ³)
W 460X97	466	193	11,4	19	97	1,23x10 ⁴	4,47x10 ⁸	1916,7

Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

4.4 Definição do perfil estrutural das cabeceiras da ponte rolante

Assim como na definição da viga principal, resolvendo-se a equação 10 encontra-se um valor mínimo para w_x . Em vista disso, considera-se $M = Mc_{máx} = 32,536 \text{ kNm}$ e considera-se $\sigma = \sigma_a = 230 \text{ MPa}$. Resolvendo-se a equação 10, obtém-se que w_x deve ser maior que $141,46 \text{ cm}^3$. Resolvendo-se a equação 3, encontra-se um valor mínimo para a área A da seção transversal do perfil estrutural. Considera-se $\tau = \tau_a = 132,8 \text{ MPa}$; $V = Vc_{máx} = 46,480 \text{ kN}$. Resolvendo-se a equação 3 conclui-se que a área da seção transversal do perfil não deve ser menor que $3,5 \times 10^2 \text{ mm}^2$. Por sua vez, resolvendo-se a equação 7, obtém-se o valor para I (momento de inércia da área da seção transversal do elemento em relação ao plano neutro). Destaca-se que, a deflexão máxima aceitável é igual a $L/600$. Portanto, para $\delta = L/600 = 2,33 \text{ mm}$; $P = V2_{máx} = 92960 \text{ N}$; $E = 200000 \text{ MPa}$; $L = 1400 \text{ mm}$, conclui-se que I deve ser maior que $1,14 \times 10^7 \text{ mm}^4$. Através das informações obtidas nesta seção e utilizando novamente um catálogo de perfis comerciais, seleciona-se o perfil "I" W 200 x 22,5 para as cabeceiras da ponte rolante. A Tabela 2 apresenta os dados da seção transversal do perfil selecionado, sendo que cada variável corresponde a uma respectiva dimensão da Figura 7.

Tabela 2 - Dados da seção transversal do perfil - cabeceiras

Tipo	d(mm)	bf(mm)	tw(mm)	tf(mm)	kg/m	A(mm ²)	I(mm ⁴)	W _x (cm ³)
W 200X22,5	206	102	6,2	8	22,5	2,9x10 ³	2,03x10 ⁷	197,0

Fonte: GERDAU, adaptado pelo autor.

4.5 Verificações e análises complementares

Com os perfis estruturais especificados, resta verificar se todos os critérios de dimensionamento estão sendo atendidos, e realizar uma análise para definir se estes serão os perfis aplicados no equipamento ou serão substituídos por outros. Considerou-se inicialmente a condição de carga centralizada na viga. Para encontrar a tensão resultante do momento fletor máximo, deve-se resolver a equação 4. Portanto, substituindo M por $M1_{máx} = 145232$ Nm, e sendo $I = 4,47 \times 10^8 \text{ mm}^4$, e c igual à metade da altura total da viga ($c = 233$ mm). Logo, tem-se que $\sigma_{flexão} = 75,70$ MPa. A tensão devido ao esforço cisalhante é obtida resolvendo a equação 3. Então, substituindo V por $V1_{máx} = 52524$ N e sendo $A = 1,23 \times 10^4 \text{ mm}^2$, temos que $\tau = 4,27$ MPa. Neste ponto é possível encontrar a tensão combinada para este estado de solitação. Para isso, resolve-se a equação 5, sendo $\sigma = 75,70$ MPa e $\tau = 4,27$ MPa, obtendo-se $\sigma_c = 76,06$ MPa.

Para obter-se a deflexão estrutural máxima, utiliza-se a equação 7. Substitui-se P por Wt somado ao peso da viga, portanto $P = 99807$ N. Sendo $L = 6000$ mm, $I = 4,47 \times 10^8 \text{ mm}^4$ e $E = 200000$ MPa, obtém-se $\delta = 5$ mm. Já a verificação da tensão na aba inferior é realizada através da equação 6. Sendo $t = 19$ mm, e $P = Wt/4 = 23524$ N. Logo, tem-se $\sigma_l = 198,75$ MPa.

De forma análoga, foram realizadas as verificações para a viga principal com a aplicação do esforço próximo às laterais, e para as cabeceiras da ponte rolante. Os resultados das verificações da viga principal podem ser visualizados na Tabela 3. Já as verificações das cabeceiras são apresentadas na Tabela 4. Os coeficientes de segurança são calculados levando em consideração as tensões de resistência ao escoamento do material, $\sigma_e = 345$ MPa, $\tau_e = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} = 199$ MPa.

Tabela 3 - Resultados das verificações estruturais – viga principal

Viga principal - esforço no centro da viga			
Resultados obtidos		Admissíveis	Coefficiente de segurança
$\sigma_{flexão}$	75,70 MPa	230 MPa	4,6
$\tau_{cisalhante}$	4,27 MPa	132,8 MPa	46,6
$\sigma_{combinada}$	76,06 MPa	230 MPa	4,5

Viga principal - esforço no centro da viga			
Resultados obtidos		Admissíveis	Coefficiente de segurança
σ_{aba}	198,75 MPa	230 MPa	1,7
$\delta_{deflexão}$	5 mm	10 mm	2,0
Viga principal - esforço na extremidade da viga			
$\sigma_{flexão}$	25,72 MPa	230 MPa	13,4
$\tau_{cisalhante}$	7,53 MPa	132,8 MPa	26,4
$\sigma_{combinada}$	28,84 MPa	230 MPa	11,9

Fonte: Autor.

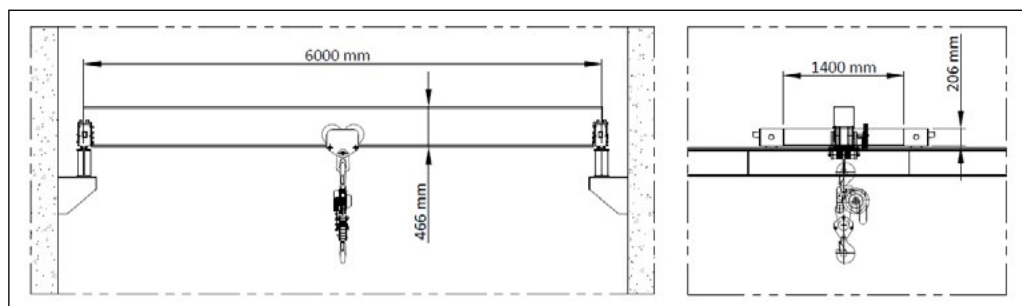
Tabela 4 - Resultados das verificações estruturais – cabeceiras

Cabeceiras			
Resultados obtidos		Admissíveis	Coefficiente de segurança
$\sigma_{flexão}$	165,17 MPa	230 MPa	2,1
$\tau_{cisalhante}$	16,03 MPa	132,8 MPa	12,4
$\sigma_{combinada}$	167,48 MPa	230 MPa	2,0
$\delta_{deflexão}$	1,3 mm	2,33 mm	1,8

Fonte: Autor.

Os resultados da Tabela 4 mostram que o perfil selecionado para as cabeceiras atende aos limites impostos pelas normas de projeto. Levando-se em conta que existe uma diferença considerável entre as tensões das solicitações e as admissíveis, poderia ser escolhido um perfil mais leve. No entanto, com um coeficiente de segurança próximo de 2, o perfil escolhido atende ao contexto de aplicação do equipamento, sem estar superdimensionado. Concernente a viga principal, observa-se na Tabela 3, que no geral as tensões ficaram abaixo das admissíveis, exceto pela tensão na aba onde o coeficiente de segurança ficou em 1,7. Já a deflexão obtida analiticamente com magnitude de 5 mm é adequada para o vão livre e para a aplicação do equipamento. Este valor de deflexão indica que o componente tem uma boa rigidez e contribuirá para a ponte rolante operar com segurança. A Figura 8 apresenta uma representação da ponte rolante com as dimensões atuais.

Figura 8 - Vista frontal e lateral da ponte rolante com dimensões definitivas



Fonte: Autor.

Em suma, os perfis especificados apresentam segurança e estabilidade estrutural, o que condiz com a responsabilidade do equipamento, neste caso, a movimentação de equipamentos fundamentais da casa de força de uma hidrelétrica. Destaca-se que os coeficientes de segurança obtidos consideram o equipamento em condição de teste, portanto, com cargas 20% acima das cargas nominais. Sendo assim, evidencia-se uma maior confiabilidade na integridade dos componentes dimensionados quando em operação.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo dimensionar a viga principal e as cabeceiras de uma ponte rolante através de cálculos analíticos baseados nas normas NBR 8400 e NBR 8800. Ao longo do trabalho foi destacada a importância deste equipamento de movimentação considerando diferentes aplicações. Entre suas principais características, pode-se citar o alcance em todos os pontos da sua zona de operação. A ponte rolante projetada tem como função movimentar equipamentos da casa de força de uma pequena central hidrelétrica. O dimensionamento estrutural deste estudo baseia-se no método dos estados limites. Portanto, as tensões e deflexões obtidas pelos cálculos não podem ser superiores às tensões e deflexões admissíveis estabelecidas pelas normas vigentes.

Para a viga principal foi selecionado o perfil estrutural "I" W460x97. Depois de realizadas as verificações, constatou-se, que a tensão mais crítica foi a tensão fletora na aba do perfil estrutural, de magnitude igual a 198,75 MPa. Neste caso o coeficiente de segurança é igual a 1,7. Por sua vez, a deflexão calculada é 5 mm, valor abaixo do limite de 10 mm estabelecido pela norma regulamentadora. Já para as cabeceiras da ponte rolante foi selecionado o perfil estrutural "I" W200x22,5. Neste caso, a tensão mais crítica foi a tensão combinada, de magnitude igual a 167,48 MPa. Logo o coeficiente de segurança é igual a 2,0. Por sua vez, a deflexão calculada é 1,3 mm, valor abaixo do limite de 2,33 mm estabelecido pela NBR 8800. Uma vez que, para o caso em estudo,

a norma estabelece o coeficiente de segurança mínimo em 1,5, conclui-se que os componentes especificados são seguros e aptos para o pleno funcionamento da ponte rolante.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8400:2019. **Equipamentos de elevação e movimentação de carga ▯ Regras para projeto**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT NBR 8800:2008. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

CAMPOS, A. P. M. **Projeto de Ponte Rolante**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7 ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.

LEITE NETO, A. L. L. **Projeto detalhado de uma ponte rolante para uma empresa metal mecânica**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PASSOS, L. C. **Pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de cargas**. Brasil, 2011.

RIBEIRO, F. J. G. **Dimensionamento de um pórtico rolante**. Porto, Portugal. 2011.

RUDENKO, N. **Máquinas de Elevação e Transporte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1976.

SILVA, J. P. W. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2017.

SORDI, G. **Dimensionamento da Viga principal de Uma Ponte Rolante**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2016.

TAMASAUSKAS, A. **Metodologia do Projeto Básico de Equipamento de Manuseio e Transporte de Cargas - Ponte Rolante - Aplicação Não-Siderúrgica**. Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.