



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Sistemas Construtivos para Pontes de Madeira com 8 Metros de Vão: Tabuleiro Protendido, Vigas Treliçadas e Sistema Misto

Lauren Karoline de Sousa¹, Caio Cesar Veloso Acosta², Carlito Calil Junior³

¹ Universidade Federal de Uberlândia / Faculdade de Engenharia Civil / laurenkaroline@yahoo.com.br

² Universidade Estadual de São Paulo / Departamento de Estruturas / k93caio@gmail.com

³ Universidade Estadual de São Paulo / Departamento de Estruturas / calil@sc.usp.br

Resumo

No Brasil, as pontes de madeira perderam a confiança dos usuários por apresentar muitos problemas devido à inexistência de projeto e técnicos habilitados para a construção das mesmas. Atualmente manuais, livros e artigos são publicados para disseminar a utilização da madeira como elemento estrutural em diversos tipos de estruturas e as pontes de madeira vêm ganhando espaço em estradas rurais por todo país. Com este intuito, serão mostrados três sistemas construtivos para pontes de madeira com vãos de oito metros e faixa de rodagem de quatro metros para veículos-tipo classe 45. Os tabuleiros laminados protendidos têm como vantagem a pequena altura e leveza do sistema, e trabalham como uma placa ortotrópica, onde a segurança contra falha estrutural é alta. O sistema treliçado utiliza treliças modulares como vigas principais, reduzindo o peso e aumentando a eficiência do sistema e, por serem modulares, as peças podem ser pré-fabricadas e montadas no local da obra, facilitando o transporte e melhorando a qualidade da estrutura como um todo. Nos sistemas mistos, há um aumento na rigidez geral da estrutura com a utilização de uma laje de concreto acima da estrutura de madeira, podendo-se assim, utilizar peças roliças e postes de madeira. Os três sistemas apresentam vantagens e desvantagens e um estudo da disponibilidade de materiais, transporte e mão-de-obra deve ser feito para aumentar a viabilidade dos projetos.

Palavras-chave

Ponte de Madeira; Viga Treliçada; Tabuleiro Protendido; Estrutura Mista.

1 Introdução

O uso da madeira na construção civil vem buscando seu espaço no Brasil durante os anos, este material apresenta grandes vantagens econômicas e ambientais com relação aos comumente utilizados hoje em dia. Por falta de informações técnicas e por questões culturais, ainda existem equívocos relacionados à vida útil da madeira e suas possibilidades de aplicação como elemento estrutural. (CALIL JUNIOR, 2006; RITTER, 1992). Por isso, pesquisadores estão produzindo materiais técnicos a fim de ampliar o conhecimento sobre a madeira para aplicação em estruturas, por exemplo, as pontes.

As estruturas de pontes com sistema de tabuleiros laminados protendidos (Fig. 1) são compostas por uma placa de madeira laminada protendida apoiada na fundação a partir de um aparelho de apoio. Em função da protensão, o tabuleiro possui comportamento ortotrópico, o que garante a segurança contra falha estrutural (DA FONTE, 2004). São constituídos



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



basicamente por barras de aço Dywidag, cordoalhas de aço ou barras de fibra de carbono (OKIMOTO, 2001).

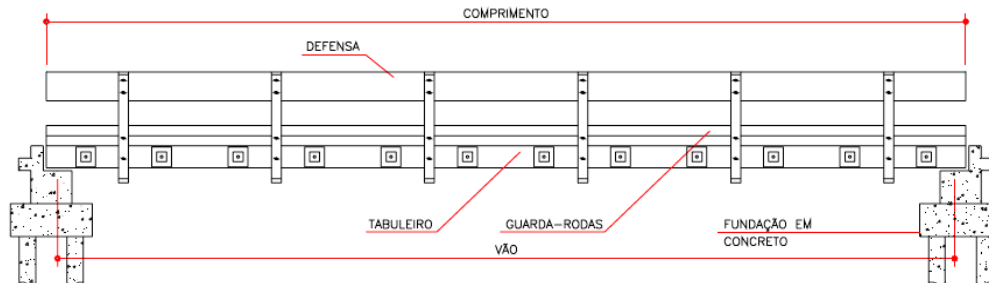


Figura 1 – Exemplo de vista lateral da ponte em placa protendida transversalmente

O sistema treliçado é outro tipo de sistema em que sua geometria permite maior rigidez e baixo peso para a estrutura final (Figura 2). As treliças modulares utilizadas nas vigas principais são estruturas pré-fabricadas e montadas no local da obra, facilitando o transporte e melhorando a qualidade da estrutura como um todo, que resistem a esforços normais (OKIMOTO, 2001).

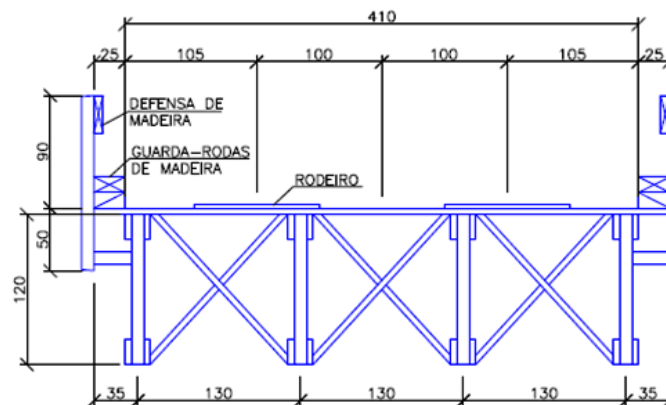


Figura 2 – Exemplo de estrutura de ponte em madeira com sistema treliçado

O sistema de ponte em placa mista é composto por uma laje de concreto armada moldada “in loco”, vigas roliças de madeira e conectores metálicos (Fig. 3). Sua utilização garante maior proteção das madeiras contra intempéries e desgaste superficial por abrasão, redução das vibrações por apresentar maior peso próprio, maior rigidez e resistência, comparada ao sistema unicamente de madeira. Outra vantagem do sistema é seu baixo custo comparado ao sistema estrutural todo em concreto. (CALIL JUNIOR, 2006).

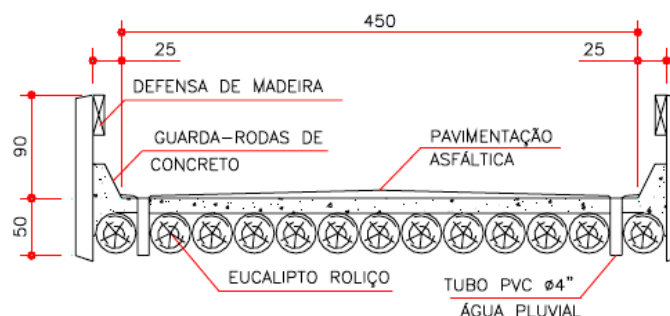


Figura 3 – Exemplo de seção transversal em placa mista de madeira-concreto



O objetivo deste estudo é analisar as vantagens e desvantagens dos três sistemas e fazer um estudo da disponibilidade de materiais, transporte e mão-de-obra para aumentar a viabilidade dos projetos a partir do dimensionamento de pontes de madeira considerando os diferentes sistemas.

2 Resultados e discussões

2.1 Ponte Treliçada

Para o pré-dimensionamento foi considerado madeira C40 utilizando a configuração de 4 vigas treliçadas. A Figura 4, 5, 6 e 7 apresenta a carga acidental para cada treliça, os esforços normais para a carga acidental, o peso próprio por treliça e os esforços normais para a carga permanente, respectivamente, a partir de análise computacional.

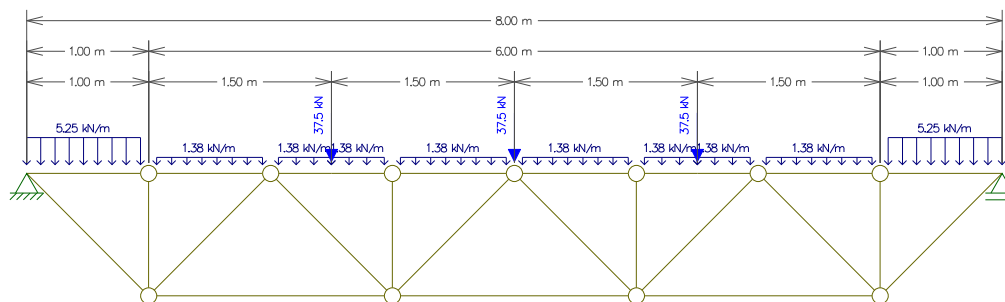


Figura 4 – Carga acidental para cada treliça.

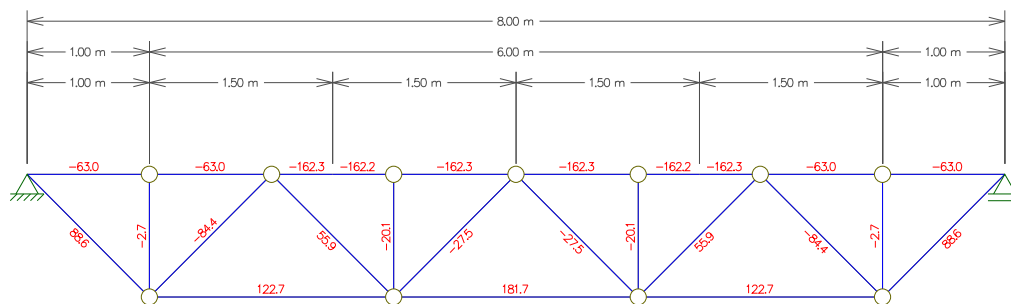


Figura 5 – Esforços normais para a carga acidental.

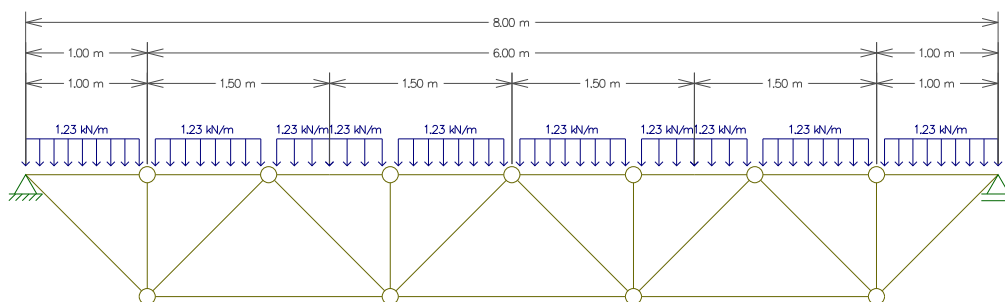


Figura 6 – Carga permanente (peso próprio) por treliça.

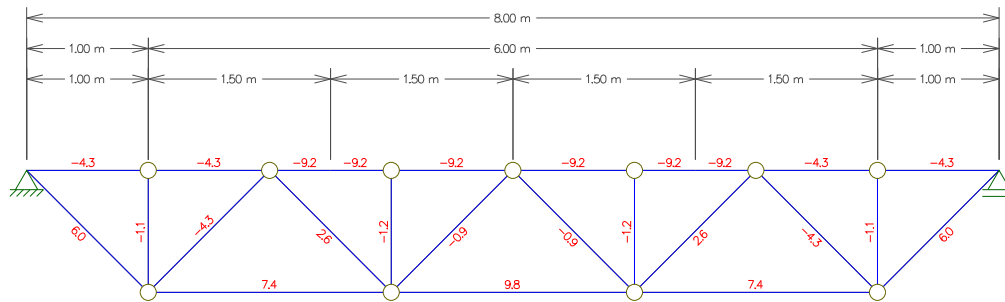


Figura 7 – Esforços normais para a carga permanente.

2.1.1 Banzo Superior

Cálculo da carga crítica de Euler:

$$FE = \frac{\pi^2 \times E_{c0,ef} \times I_{y,ef}}{L^2} \quad (1)$$

Onde:

FE = carga crítica de Euler;

$E_{c0,ef}$ = módulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras;

$I_{y,ef} = 1283,33 \text{ cm}^4$ inércia efetiva em torno do eixo y;

$L = 190 \text{ cm}$ vão de flambagem da peça.

$$FE = \frac{\pi^2 \times 812 \times 1283,33}{190^2} = 284,90 \text{ kN}$$

Cálculo do momento de flambagem:

$$M_d = N_{cd} \times e_{1,ef} \times \left(\frac{FE}{FE - N_{cd}} \right) \quad (2)$$

Onde:

M_d = momento de flambagem de cálculo;

$e_{1,ef} = 0,66 \text{ cm}$ excentricidade de primeira ordem;

N_{cd} = normal de compressão de cálculo.

$$M_d = 171,5 \times 0,66 \times \left(\frac{284,90}{284,90 - 171,5} \right) = 224,88 \text{ kN.cm}$$

Verificação das tensões de compressão

$$\frac{N_{cd}}{A} + \frac{M_d \times I_2}{I_{y,ef} \times W_2} + \frac{M_d}{2 \times a_1 \times A_1} \times \left[1 - \left(n \times \frac{I_2}{I_{y,ef}} \right) \right] \leq f_{c0,d} \quad (3)$$

Onde:



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



N_{cd} = normal de compressão de cálculo;

M_d = momento de flambagem de cálculo;

$I_{y,ef}$ = 1283,33 cm^4 inércia efetiva em torno do eixo y;

A = 200 cm^2 área da seção transversal;

I_2 = 208,33 cm^4 menor inércia de cada lâmina;

W_2 = 83,33 cm^3 menor módulo de resistência à flexão;

a_1 = 7,5 cm distância do centro de gravidade da lâmina ao centro de gravidade da peça composta;

A_1 = 100 cm^2 área da seção transversal da lâmina;

n = 2 número de lâminas que compõem a seção;

f_{cd} = $k_{mod} \times \frac{f_{cd,k}}{\gamma_c}$ resistência à compressão de cálculo.

$$\frac{171,5}{200} + \frac{224,88 \times 208,33}{1283,33 \times 83,33} + \frac{224,88}{2 \times 7,5 \times 100} \times \left[1 - \left(2 \times \frac{208,33}{1283,33} \right) \right] \leq 16 MPa$$

14 MPa ≤ 16 MPa

2.1.2 Banzo Inferior

Para análise do banzo inferior a equação 4 deve ser verificada.

$$\frac{N_{td}}{A} \leq f_{td} \quad (4)$$

Onde:

N_{td} = normal de tração de cálculo;

A = 200 cm^2 área da seção transversal;

f_{td} = $k_{mod} \times \frac{f_{td,k}}{\gamma_c}$ resistência à tração de cálculo.

$$\frac{191,5}{200} \leq 11,2 MPa \therefore 9,58 MPa \leq 11,2 MPa$$

2.1.3 Montantes

Para pontes com madeira C 30 e C 40 deve-se limitar a carga nos montantes, sendo:

$$Nd \leq 50 kN p/ C 30$$

$$Nd \leq 68 kN p/ D 40$$

Isto devido à limitação das ligações.

2.1.4 Diagonais

Para pontes com madeira C 30 e C 40 deve-se limitar a carga de nas diagonais, sendo:

$$Nd \leq 140 kN p/ C 30$$

$$Nd \leq 170 kN p/ D 40$$

Isto devido à limitação das ligações.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



2.1.5 Deformação por análise computacional no Ftool

$$\delta \leq \delta_{m\acute{a}x} \therefore 1,60 \text{ cm} \leq 2,22 \text{ cm}$$

Portanto uma ponte com uma faixa de rodagem e oito metros de vão para um carregamento classe 45 precisaria de madeira classe C40 e 4 módulos de treliça.

2.2 Ponte Tabuleiro Laminado Protendido

Para o sistema protendido foi considerado para pré-dimensionamento madeira C60, tensão de compressão 700 kPa, $t=30\text{cm}$, juntas de topo a cada 4 vigas e cabos de protensão de 7 fios com aço CP190 RB e diâmetro nominal de 12,7 mm.

2.2.1 Deformação por análise computacional no ATM

$$\delta \leq \delta_{m\acute{a}x} \therefore 2,44 \text{ cm} \geq 2,22 \text{ cm}$$

Portanto será alterada a altura do tabuleiro para 35cm, resultando em:

$$\delta \leq \delta_{m\acute{a}x} \therefore 1,54 \text{ cm} \leq 2,22 \text{ cm}$$

O dimensionamento da ponte será realizado com base nos resultados dos esforços retirados da análise feita no programa ATM (Fig. 8) e seguindo os passos contidos no Manual de Pontes de Madeira.

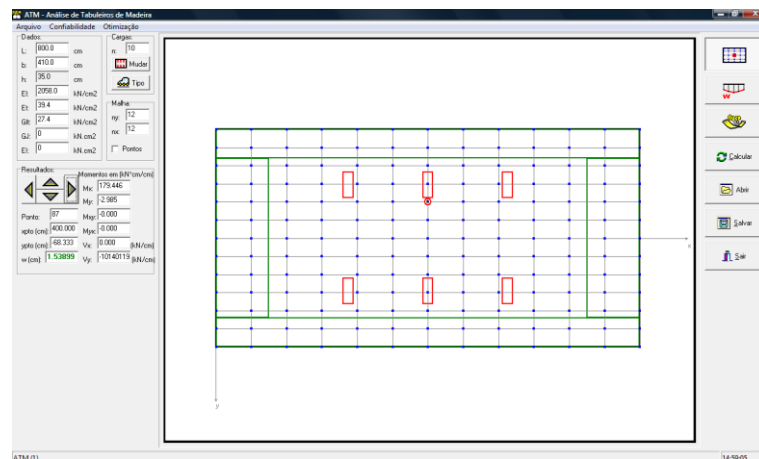


Figura 8 – Lançamento da estrutura no programa ATM.

Os esforços máximos retirado do programa são:

$$M_k = 190,2325 \text{ kN.cm/cm}$$

$$Q_k = 0,87 \text{ kN/cm}$$

2.2.2 Verificação dos estados limites - Momento Fletor



$$t \geq \left(\frac{6 \times M_d}{f_{co,d}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde:

M_d = Momento fletor de cálculo;

$t = 35 \text{ cm}$ espessura do tabuleiro;

$f_{co,d} = k_{mod} \times \frac{f_{co,k}}{\gamma_c}$ resistência à compressão de cálculo.

$$35 \geq \left(\frac{6 \times 190,2325 \times 1,4}{2,4} \right)^{\frac{1}{2}} \therefore 35 \geq 25,8 \text{ cm}$$

2.2.2 Verificação dos estados limites – Cisalhamento

$$t \geq \frac{3 \times Q_d}{2 \times f_{vo,d}} \quad (6)$$

Onde:

Q_d = Cortante de cálculo;

$t = 35 \text{ cm}$ espessura do tabuleiro;

$f_{vo,d} = k_{mod} \times \frac{f_{vo,k}}{\gamma_c}$ resistência ao cisalhamento de cálculo.

$$35 \geq \frac{3 \times 0,87 \times 1,4}{2 \times 0,32} \therefore 35 \geq 5,71 \text{ cm}$$

2.2.3 Espaçamento das cordoalhas

O Eurocode 5 prevê uma tensão inicial mínima de **1 MPa**, que será adotada para este estudo.

$$S_p = \frac{\sigma_s \times A_s}{\sigma_{Ni} \times t} \quad (7)$$

Onde:

S_p = Espaçamento;

$t = 35 \text{ cm}$ espessura do tabuleiro;

σ_s = Tensão da cordoalha de protensão;

$\sigma_{Ni} = 1 \text{ MPa}$ tensão inicial adotada;

$A_s = 1 \text{ cm}^2$ área de aço da cordoalha.

$$S_p = \frac{1530 \times 1}{1 \times 35} \therefore S_p = 43,71 \text{ cm}$$

Adota-se, portanto, **40 cm**.



Sendo assim, uma ponte com tabuleiro laminado protendido utilizando madeira C60 necessita de 35 cm de espessura e uma cordoalha de CP190 RB $\phi 12,7$ mm a cada 40 cm.

2.3 Ponte Mista

No pré-dimensionamento considerou-se madeira C40 roliça com 35 cm de diâmetro, capa de concreto C25 com altura de 12 cm e conectores metálicos de $\frac{1}{2}$ " , espaçados a cada 25 cm.

2.3.2 Deformação por análise computacional no ATM.

$$\delta \leq \delta_{m\acute{a}x} \therefore 1,69 \text{ cm} \geq 2,22 \text{ cm}$$

O dimensionamento da ponte será realizado com base nos resultados dos esforços retirados da análise feita no programa ATM (semelhante a Fig. 8) e seguindo os passos contidos no Manual de Pontes de Madeira.

Os esforços máximos retirados do programa são:

$$M_k = 184,1920 \text{ kN.cm/cm}$$

$$Q_k = 0,80 \text{ kN/cm}$$

2.3.3 Determinação das características de rigidez do tabuleiro.

$$(EI)_{sf} = D_x \times b \quad (8)$$

$$D_x = \frac{1}{h} (E_c I_c + \gamma_c E_c A_c a_c^2 + E_w I_w + \gamma_w E_w A_w a_w^2) \quad (9)$$

$$I_c = \frac{b \times h^3}{12}; A_c = b \times h_c \quad (10)$$

$$I_w = n_v \frac{\pi D_w^4}{64}; A_w = \frac{\pi D_w^2}{4} \quad (11)$$

$$\gamma_w = 1; \gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 E_c A_c s}{K \times L^2} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$a_w = \frac{\gamma_c E_c A_c (h_c + h_w)}{2(\gamma_c E_c A_c + \gamma_w E_w A_w)}; a_c = \left(\frac{h_c + h_w}{2} \right) - a_w \quad (13)$$

Onde:

D_x = rigidez à flexão da ponte na direção longitudinal;

n_v = número de vigas de madeira roliça;

E_w = módulo de elasticidade à flexão efetivo da madeira;

I_w = momento de inércia das peças de madeira;

A_w = área da seção transversal das peças de madeira;

D_w = diâmetro das peças de madeira roliça;

h_w = altura das peças de madeira roliça;



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



E_c = módulo de elasticidade secante à compressão do concreto;

I_c = momento de inércia da laje de concreto;

A_c = área da seção transversal da laje de concreto;

h_c = altura da laje de concreto;

s = espaçamento dos conectores metálicos;

K = módulo de deslizamento das conexões metálicas;

L = vão da ponte em *cm*;

b = largura da ponte em *cm*.

Substituindo os valores nas equações, encontraremos:

$$I_c = 59040 \text{ cm}^4; A_c = 4920 \text{ cm}^2$$

$$I_w = 883941 \text{ cm}^4; A_w = 11545 \text{ cm}^2$$

$$\gamma_w = 1; \gamma_c = 0,15$$

$$a_w = 2,86 \text{ cm}; a_c = 20,64 \text{ cm};$$

$$D_x = 15837068 \text{ kN.cm}^3$$

$$(EI)_{ef} = 6493197957 \text{ kN.cm}^2$$

2.3.4 Verificação das tensões.

$$\sigma_{1c,d} = \frac{M_d \times b \times E_c}{(EI)_{ef}} (\gamma_c a_c + 0,5h_c) \leq f_{c,d} \quad (14)$$

$$\sigma_{2c,d} = \frac{M_d \times b \times E_c}{(EI)_{ef}} (\gamma_c a_c - 0,5h_c) \leq f_{t,d} \quad (15)$$

$$\sigma_{1w,d} = \frac{M_d \times b \times E_w}{(EI)_{ef}} (\gamma_w a_w + 0,5h_w) \leq f_{t0,d} \quad (16)$$

$$\sigma_{2w,d} = \frac{M_d \times b \times E_w}{(EI)_{ef}} (\gamma_w a_w - 0,5h_w) \leq f_{c0,d} \quad (17)$$

$$\tau_{w,d} = 0,5E_w b_w h_w^2 \frac{V_d}{b_w (EI)_{ef}} \leq f_{v0,d} \quad (18)$$

$$F_d = \gamma_w E_w A_w a_w s \frac{V_d}{(EI)_{ef}} \leq R_d \quad (19)$$



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Realizando os cálculos, as tensões são mostradas abaixo:

$$\sigma_{1c,d} = 3,51 \text{ MPa} \leq 15,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2c,d} = |-1,13 \text{ MPa}| \leq 2,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1w,d} = |-2,60 \text{ MPa}| \leq 11,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2w,d} = 3,61 \text{ MPa} \leq 16,0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{w,d} = 0,47 \text{ MPa} \leq 1,68 \text{ MPa}$$

$$F_d = 5,30 \text{ kN} \leq 60 \text{ kN}$$

Portanto, a configuração da ponte mista para um vão de oito metros passa tranquilamente com uma laje 12 cm com concreto C25, peças de madeira roliça C40 com diâmetro de 35 cm e conectores metálicos de 1/2" espaçados a cada 25 cm.

Conclusões

O trabalho realizou o dimensionamento de três diferentes sistemas para estruturas de pontes de madeira que permitiu observar que ambos os sistemas são funcionais, no entanto a viabilidade de cada um deles depende também da forma como será realizado o transporte, da disponibilidade dos materiais e da mão-de-obra de cada região. A partir do dimensionamento para o sistema treliçado, observou-se que para uma ponte com uma faixa de rodagem e oito metros de vão para um carregamento classe 45 precisaria de madeira classe C40 e 4 módulos de treliça. Para o sistema de tabuleiro laminado protendido utilizando madeira C60 são necessários 35 cm de espessura e uma cordoalha de CP190 RB $\phi 12,7$ mm a cada 40 cm. A ponte mista com oito metros de vão passa tranquilamente utilizando uma laje de 12 cm com concreto C25, peças de madeira roliça C40 com diâmetro de 35 cm e conectores metálicos de 1/2" espaçados a cada 25 cm.

Referências

- CALIL JUNIOR, C., DIAS, A.A., GOÉS, J.L.N., CHEUNG, A.B., STAMATO, G.C., PIGOZZO, J.C., OKIMOTO, S.F., LOGSDON, N.B., BRAZOLIN, S., LANA, E.L., Manual de projeto e construção de pontes de madeira. São Carlos, São Paulo, 2006.
- DA FONTE, T. F. Pontes protendidas de Eucalipto Citriodora. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- OKIMOTO, F. S. Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira. 215 p. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- RITTER, M.A. (1992). Timber bridges - design, construction, inspection, and maintenance, Chapter 9: Design of longitudinal stress-laminated deck superstructures. Madison, Wisconsin. Agosto 1992. USDA-FS-FPL, Engineering Staff, EM-7700-8.