

Comparação de três métodos de cálculo para pontes de madeira protendida transversalmente

Jorge Luís Nunes de Góes¹, Antonio Alves Dias²

Trabalho recebido em 05/10/2005 e aprovado para publicação em 17/12/2005.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo teórico e numérico do comportamento estrutural de tabuleiros ortótropos de madeira protendida. Os métodos de placa ortotrópica equivalente, viga equivalente e elementos finitos são apresentados e discutidos. A comparação numérica entre os três métodos de cálculo é realizada em dois tabuleiros de madeira protendida, submetidos ao carregamento estático da Classe 45, conforme especificações da norma brasileira de ações em pontes (NBR7188). Os resultados demonstram que os modelos de placa ortotrópica equivalente e elementos finitos apresentam boa concordância e podem ser empregados para o dimensionamento de tabuleiros ortótropos de madeira protendida. Entretanto, o modelo de viga equivalente não apresentou bons resultados, indicando que o Fator de Distribuição de Carga do método WVU não representa as condições nacionais de solicitação.

Palavras-chave: pontes de madeira, madeira laminada protendida, placa ortotrópica.

¹ Pós-doutorando da Universidade de São Paulo, EESC/SET; Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13560-970, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: jgoes@sc.usp.br.

² Professor Dr. da Universidade de São Paulo, EESC/SET. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13560-970, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: dias@sc.usp.br.

1. Introdução

De suma importância para o desenvolvimento dos municípios do Estado de São Paulo, as estradas e pontes vicinais são importantes meios de escoamento de produtos e transporte de pessoas. Nota-se, entretanto, que o precário estado em que se encontram as pontes de madeira, resultado da ausência de projeto e manutenção, dificulta o trânsito causando desconforto aos usuários, além de elevar os custos de transporte e de manutenção para as prefeituras. Assim, constata-se a necessidade de se implantar avanços tecnológicos atuais para a construção e recuperação das pontes de madeira.

No Brasil, o Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira da Universidade de São Paulo tem atuado na área de educação e pesquisa, com o desenvolvimento de novas tecnologias para o emprego racional da madeira. Uma das atuais linhas de pesquisa é o estudo dos modernos sistemas estruturais para o emprego em pontes de madeira. Dentre os sistemas estruturais pesquisados, a mais recente tecnologia empregada no país é a da madeira laminada protendida.

A tecnologia da madeira laminada protendida surgiu no Canadá como forma de reabilitação de tabuleiros de madeira laminada pregada e logo se alastrou para países como Estados Unidos, Austrália, Japão e países europeus. A madeira laminada protendida consiste de uma série de lâminas de madeira serrada dispostas lado a lado e comprimidas transversalmente por barras de protensão de alta resistência. A força de compressão transversal aplicada pelas barras de protensão atua solidarizando as lâminas.

Em uma recente pesquisa, Góes (2005) realizou o estudo do comportamento estrutural de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido. O sistema consiste de mesas protendidas, superior e inferior, e longarinas, Figura 1. O material das longarinas pode ser MLC (Madeira Laminada Colada) ou LVL (Laminated Veneer Lumber). Nas mesas são usualmente utilizadas peças de madeira serrada com dimensões comerciais. A geometria otimizada da seção transversal aumenta significativamente a rigidez à flexão longitudinal e a rigidez à torção, tornando este tipo de estrutura uma excelente opção para vãos de 10 a 30 metros, segundo Gangarao and Latheef (1991).



Figura 1: Ponte multicelular de madeira protendida. Fonte: Dickson (1995).

As pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido são sistemas tipicamente ortotrópicos, tanto do ponto de vista do material quanto da geometria, e necessitam de modelos analíticos sofisticados para estimar seu comportamento estrutural sob carregamentos de projeto.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivos a apresentação, discussão e comparação dos principais métodos de cálculo para o dimensionamento das pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido, contribuindo para a disseminação desta recente tecnologia.

2. Comportamento estrutural

Quando submetido a um carregamento concentrado qualquer, o tabuleiro multicelular sofre uma deformação como indicado na Figura 2a.

O'Brien e Keogh (1999) indicam a existência de quatro formas principais de deformação associadas aos tabuleiros multicelulares. O primeiro modo de deformação é o de flexão longitudinal, Figura 2b. A rigidez à flexão longitudinal total do tabuleiro pode ser considerada aplicando-se os conceitos básicos da Resistência dos Materiais, desde que haja monolitismo no conjunto (Ação Composta) e possa ser assumida a ausência de deformação cisalhante no plano horizontal do tabuleiro (Shear Lag).

No caso da deformação devida à flexão transversal, Figura 2c, de modo geral pode-se desprezar a contribuição das almas, considerando apenas a rigidez das mesas.

O terceiro modo é a torção do tabuleiro, como indicado na Figura 2d. Para tabuleiros multicelulares contendo cinco ou mais células, a rigidez à torção total do tabuleiro pode ser tomada considerando apenas a seção externa como se fosse somente uma seção caixão. Esta consideração é justificada pelo fato de que em tabuleiros multicelulares, o fluxo de cisalhamento nas almas interiores é muito pequeno, e somente o fluxo em torno das mesas e almas externas é significativo.

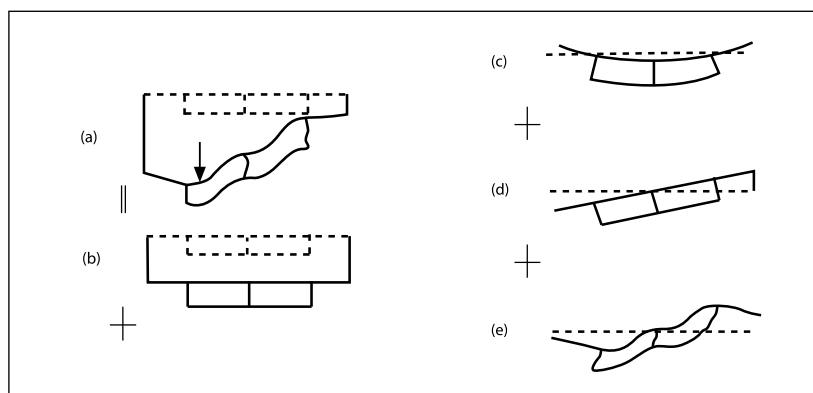


Figura 2: Deformações associadas do sistema com tabuleiro multicelular: (a) total; (b) flexão longitudinal; (c) flexão transversal; (d) torção e (e) distorção. Fonte: Hambly (1991).

Por fim, o quarto modo de deformação, que caracteriza as estruturas com tabuleiro multicelular, é chamado de distorção, Figura 2e. A distorção é causada pela flexão localizada das almas e flanges das células individuais. O comportamento é similar ao observado nas vigas Vierendeel. Os principais fatores que afetam a distorção são as dimensões das células em relação à altura total da seção e a rigidez individual das almas e mesas. Segundo West (1973), apud Cusens e Pama (1975), o efeito da distorção deve ser considerado quando a área vazia das células exceder 60% da seção transversal total. Para os casos usuais de pontes protendidas com tabuleiro multicelular esta relação raramente excede os 50%.

3. Métodos de Cálculo

Existem diversas maneiras de se abordar o cálculo das pontes protendidas transversalmente. A forma mais prática e simples de se considerar uma ponte em placa é fazendo uma analogia à viga. Este método é chamado de Modelo de Viga Equivalente. Neste modelo, a complexidade do tabuleiro da ponte é reduzida para uma viga simplesmente apoiada com determinada largura efetiva, solicitada por uma parcela da ação total. Devido à simplicidade de análise, e razoável aproximação, este modelo é apresentado como um possível modelo de cálculo pelas normas nacionais e internacionais.

Um outro método de cálculo é o Modelo de Placa Ortotrópica Equivalente. Neste modelo, a superestrutura da ponte em placa, com ortotropia física e geométrica, pode ser reduzida para uma placa equivalente com propriedades elásticas em duas direções principais: longitudinal e transversal. Este modelo é reconhecido como um método preciso para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões de placas ortotrópicas.

Por fim, também é apresentada uma análise do sistema pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Este método é considerado como uma das mais poderosas ferramentas de cálculo de estruturas, com a qual pode-se conseguir respostas altamente satisfatórias mesmo para sistemas estruturais complexos. Entretanto, a experiência e a habilidade do usuário são fundamentais, pois de a escolha da discretização (malha) e do tipo de elemento para cada caso for imprópria, os resultados podem ser desastrosos O'Brien e Keogh (1999).

A seguir são apresentados de forma concisa estes três principais métodos de análise para pontes protendidas.

3.1. Método de viga equivalente

Taylor et. al. (2000) apresentam um critério de dimensionamento simplificado baseado na análise da superestrutura da ponte como sendo formada pelo conjunto de vigas I, no qual as vigas de MLC (nervuras) são consideradas como sendo a alma da viga equivalente e o tabuleiro protendido, como sendo as mesas. A Figura 3 ilustra a seção transversal de uma ponte com tabuleiro celular e a respectiva viga equivalente utilizada para o dimensionamento.

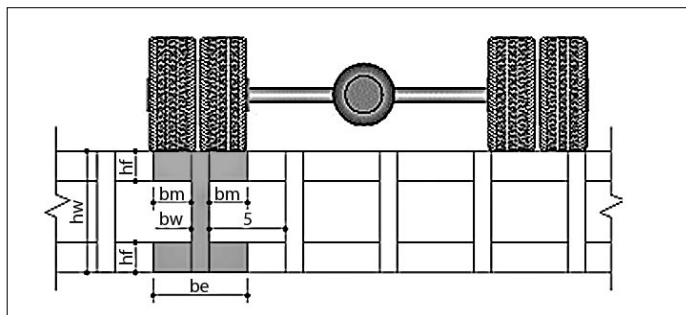


Figura 3: Geometria da viga equivalente.

A largura da mesa colaborante é determinada pela Eq. 1 desenvolvida a partir da análise de placas ortotrópicas, levando em consideração o efeito Shear Lag.

$$b_m = \frac{\frac{S}{2}}{1 + \frac{E_x}{G_{xy}} \left(\frac{S}{L} \right)^2} \quad (1)$$

onde:

b_m = largura da mesa;

b_w = largura da alma;

S = distância livre entre as nervuras;

L = vão da ponte.

Baseado em testes realizados na West Virginia University e no FPL, Taylor et al. (2000) sugerem $E_x/G_{xy} = 60$.

A partir da largura da mesa colaborante (b_m), a largura efetiva da viga equivalente de seção I pode ser estimada como sendo a maior entre as duas equações seguintes:

$$b_e = 2b_m + b_w \quad (2)$$

$$b_e = \frac{2S}{3} + b_w \quad (3)$$

Após a determinação da largura efetiva da viga, calcula-se o momento de inércia da seção modificada.

Para determinar a porção de carga que atua nesta viga equivalente, deve-se multiplicar a carga de uma faixa de tráfego pelo Fator de Distribuição de Carga W_L :

$$W_L = \frac{3N_L}{2,64N_b - 0,64} \quad (4)$$

onde:

N_L = número de faixas de tráfego;

N_b = número de vigas ao longo da seção transversal.

O momento fletor é então calculado, e as tensões normais atuantes na viga equivalente podem ser estimadas. As tensões de cisalhamento na mesa e na alma são determinadas pela teoria elástica linear, tomando a máxima força cortante com uma faixa de tráfego carregada, multiplicada pelo fator de distribuição W_L .

3.2. Método de placa ortotrópica equivalente

O conceito de se considerar a estrutura do tabuleiro de ponte como sendo uma placa ortotrópica equivalente para a determinação dos esforços e deslocamentos vem sendo estudada há muitos anos. Segundo Cusens e Pama (1975), em 1914 Huber utilizou pela primeira vez a teoria de placas ortotrópicas na análise de pontes de concreto nervuradas.

Neste modelo, a superestrutura da ponte em placa com ortotropia física e/ou geométrica, Figura 4, pode ser reduzida para uma placa equivalente com propriedades elásticas em duas direções principais: longitudinal e transversal. Inicialmente, deve-se estimar a rigidez à flexão e à torção da ponte com geometria de acordo com a Figura 4.

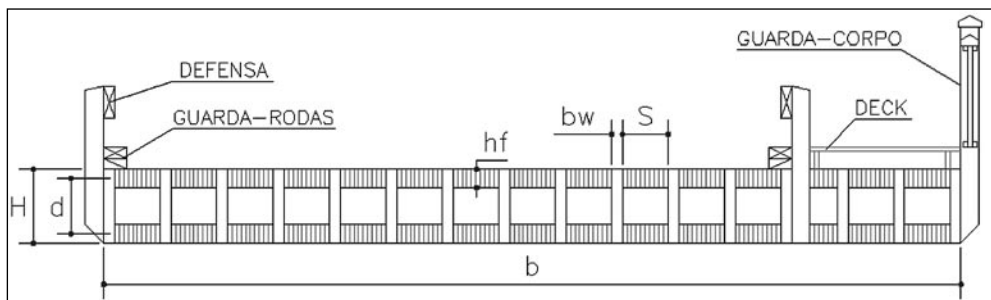


Figura 4: Seção transversal típica de uma ponte com tabuleiro multicelular de madeira protendida.

A rigidez à flexão da ponte na direção “x” (longitudinal) é expressa pelo produto “EI” da seção transversal total dividido pela largura da ponte.

$$D_x = \frac{1}{b} \left[\left(n_v \cdot E_{x,w} \cdot \frac{b_w \cdot H^3}{12} \right) + (n_v - 1) \cdot \left(4 \cdot E_{x,f} \cdot \frac{b_m \cdot h_f^3}{12} + h_f \cdot b_m \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

onde:

- $E_{x,w}$ = módulo de elasticidade à flexão na direção “x” das almas (vigas de MLC);
- $E_{x,f}$ = módulo de elasticidade à flexão na direção “x” das mesas (tabuleiro protendido);
- b_w = espessura das vigas;
- h_f = espessura do tabuleiro;
- b_m = largura da aba;
- d = distância entre os centros de gravidade das mesas;
- H = altura das vigas;
- b = largura da ponte;
- n_v = quantidade total de vigas.

Como pode ser observado na Eq. (5), o cálculo da rigidez do tabuleiro à flexão longitudinal, também leva em consideração a perda de rigidez causada pelo efeito Shear Lag. A largura da mesa colaborante (b_m) é determinada pela Eq. (1), da mesma forma que no método de viga equivalente.

A rigidez à flexão da ponte na direção “y” (transversal) é expressa pelo produto “EI”, considerando apenas as mesas, superior e inferior, dividido pelo comprimento da ponte.

$$D_y = \frac{1}{L} \left(2 \cdot E_{y,f} \cdot \frac{L \cdot h_f^3}{12} + h_f \cdot L \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) \quad (6)$$

onde:

$E_{y,f}$ = módulo de elasticidade à flexão na direção “y” das mesas (tabuleiro protendido).

Para o tabuleiro ser tratado como uma placa ortótropa equivalente, a rigidez à torção deve ser considerada nas duas direções ortogonais. Assim a rigidez a torção “ D_{xy} ” pode ser expressa como metade da rigidez à torção total dividida pela largura do tabuleiro conforme Cusens e Pama (1975).

$$D_{xy} = \frac{G \cdot J}{2 \cdot b} \quad (7)$$

A rigidez à torção, GJ, é avaliada pelo fluxo de cisalhamento em torno da seção transversal. Para uma estrutura onde as diagonais são pequenas comparadas às outras dimensões da seção, Cusens e Pama (1975) sugerem que a rigidez a torção seja tomada por:

$$GJ = \frac{4A^2 G_{xy}}{\sum \frac{ds}{t}} + \sum G_{xy} (ds) \frac{t^3}{3} \quad (8)$$

onde:

A = área do tabuleiro contida na linha média dos banzos.

$\sum \frac{ds}{t}$ = representa o perímetro da linha média da seção transversal.

A equação aproximada acima é justificada pelo fato do fluxo de cisalhamento, em tabuleiros com essa geometria, ser considerado somente nos banzos e nas diagonais externas, desprezando-o nas nervuras internas.

Substituindo a Eq. (8) na Eq. (7), tem-se:

$$GJ = \frac{4A^2 G_{xy}}{\sum \frac{ds}{t}} + \sum G_{xy} (ds) \frac{t^3}{3} \quad (9)$$

Com estes valores de rigidez são calculadas as propriedades elásticas $(E_L)_{eq}$, $(E_T)_{eq}$ e $(G_{LT})_{eq}$ da Placa Equivalente.

$$(E_L)_{eq} = 12 \frac{D_x}{t_{eq}^3} (1 - \nu_{xy} \nu_{yx}) \quad (10)$$

$$(E_T)_{eq} = 12 \frac{D_y}{t_{eq}^3} (1 - \nu_{xy} \nu_{yx}) \quad (11)$$

$$(G_{LT})_{eq} = 6 \frac{D_{xy}}{t_{eq}^3} \quad (12)$$

onde:

t_{eq} = espessura da placa equivalente.

De forma geral para as pontes em questão, os coeficientes de Poisson podem ser assumidos nulos, por apresentarem pequena influência no comportamento de placas bi-apoiadas, Crews (2002). Assim, utilizando a Teoria de Placas Ortotrópicas, os esforços internos podem ser calculados com razoável precisão.

Para a praticidade das análises foi criado um programa para o cálculo de esforços e deslocamentos em placas ortotrópicas, denominado OTB (Orthotropic Timber Bridges). Esse programa, desenvolvido por Góes (2005), utiliza a solução da equação de placas ortotrópicas por séries, descrita em Cusens e Pama (1975).

3.3. Método dos elementos finitos (MEF)

A técnica dos Elementos Finitos consiste basicamente em dividir o meio contínuo em uma quantidade finita de elementos discretos que são interligados por pontos conhecidos como nós. O princípio da divisão do meio contínuo em pequenos elementos pode ser aplicado a estruturas de várias formas e complexidade. Conseqüentemente, o MEF é conhecido como o método mais versátil para a análise de estruturas.

Existe uma grande quantidade de tipos de elementos disponíveis para a simulação de estruturas. Para o caso de estruturas de pontes em placas podem ser utilizados os elementos bidimensionais de casca ou os tridimensionais de volume. Para o caso das pontes de madeira, o elemento escolhido deve ser capaz de representar o material com propriedades ortotrópicas.

Para as simulações numéricas realizadas neste trabalho foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS versão 5.7. O elemento utilizado nas simulações numéricas foi o elemento finito tridimensional com propriedades ortotrópicas conhecido como SOLID 64. Este elemento possui 8 nós e 3 graus de liberdade por nó (deslocamentos nas direções x, y e z).

Os elementos utilizados nas simulações possuíam comprimento máximo de 6,7 cm na direção “x”. As seções transversais dos tabuleiros 1 e 2 foram discretizadas conforme mostra a Figura 5.

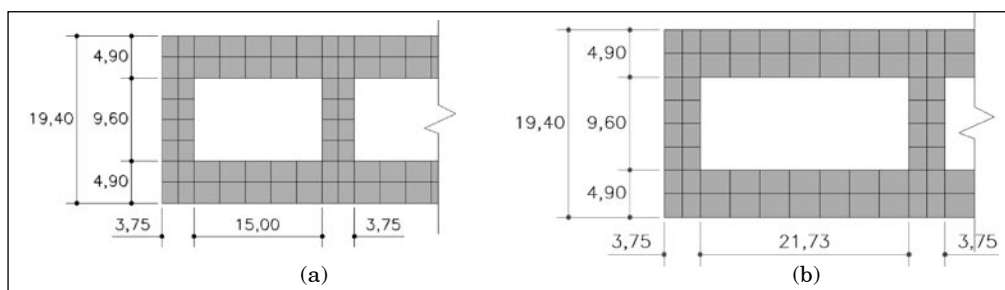


Figura 5: Discretização da seção transversal – (a) Tabuleiro 1 e (b) Tabuleiro 2.

As condições de contorno da estrutura foram aplicadas por meio de restrições nas translações dos nós segundo as três direções “x”, “y” e “z”. As cargas de norma foram aplicadas nos modelos, como pressão na superfície superior dos elementos.

4. Comparação numérica

Neste item é realizada a comparação entre os três modelos de cálculo estudados, Modelo de Viga Equivalente (WVU), Modelo de Placa Ortotrópica Equivalente (OTB) e Modelo em Elementos Finitos (ANSYS).

Para tanto, dois tabuleiros em escala 1:3 foram submetidos ao carregamento estático da Classe 45 conforme especificações da Norma Brasileira (NBR 7188, 1984).

O veículo-tipo da Classe 45 é composto por seis rodas, cada uma com 75 kN, perfazendo um total 450 kN. Em torno do veículo, é aplicada uma carga distribuída de 5 kN/m². As superestruturas em questão possuem as seguintes características:

Tabela 1: Características dos tabuleiros usados nas avaliações.

Características	Tabuleiro 1	Tabuleiro 2
Vão (L)	375,00 cm	
Largura (b)	285,00 cm	
Número de vigas (n_w)	16	12
Altura das vigas (H)	19,40 cm	
Largura das vigas (b_w)	3,75 cm	
Distância livre entre vigas (S)	15,00 cm	21,73 cm
Espessura da mesa superior e inferior (h_f)	4,90 cm	
Módulo de elasticidade à flexão das vigas (E_w)	9504 MPa	
Módulo de elasticidade à flexão longitudinal das mesas ($E_{f,x}$)	8945 MPa	
Módulo de elasticidade à flexão transversal das mesas ($E_{f,y}$)	98 MPa (1,1%)	
Módulo de elasticidade à torção das mesas ($G_{f,xy}$)	304 MPa (3,4%)	

O posicionamento crítico do veículo tipo e da carga distribuída, em relação à seção transversal da ponte, foi determinado a partir da análise do efeito de força unitária com posição variável em relação à seção transversal. No caso do momento fletor e da flecha, a força unitária foi aplicada na seção situada no meio do vão. No caso da força cortante, a força unitária foi aplicada em uma seção distante dos apoios uma distância equivalente a duas vezes a altura da nervura.

Para as avaliações de flecha e tensão normal máxima, o veículo tipo foi posicionado na borda esquerda dos tabuleiros, e centralizado em relação ao comprimento. Para a avaliação de tensão cisalhante, o veículo tipo foi posicionado na borda esquerda, com o eixo de extremidade a uma distância de 2h do apoio. As Figuras 6 e 7 ilustram o posicionamento do veículo-tipo sobre o tabuleiro.

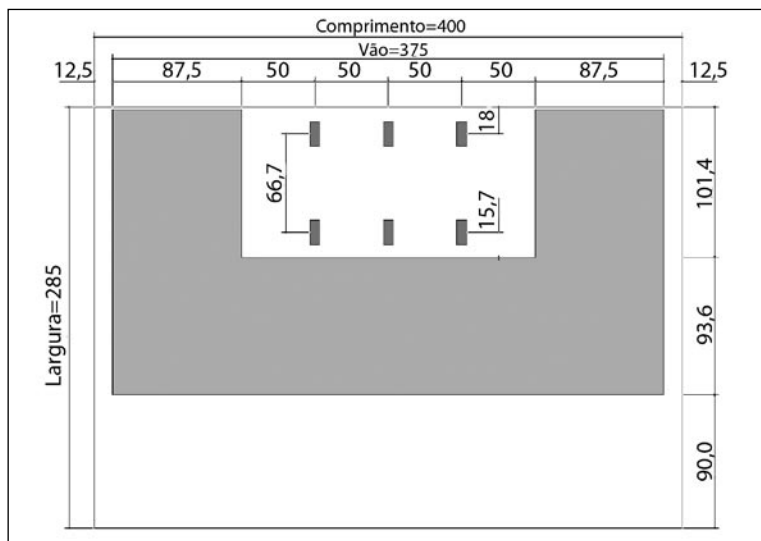


Figura 6: Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão normal e flecha.

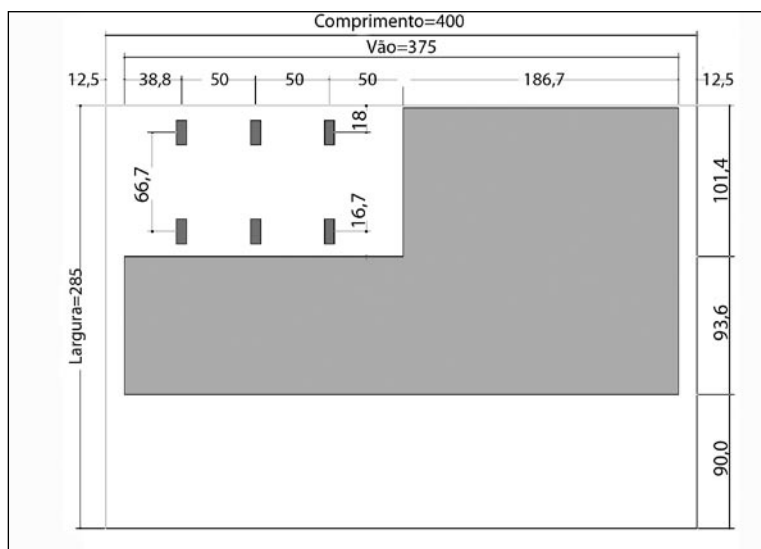


Figura 7: Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão cisalhante.

Para o caso de carregamento com o veículo tipo posicionado no centro do vão, foi simulado apenas meio tabuleiro, utilizando a condição de simetria longitudinal, pou-

pando tempo de processamento. Os resultados são apresentados em forma de tabelas e gráficos de modo a facilitar as comparações entre os métodos de cálculo. Os gráficos das Figuras 8 e 9 mostram os deslocamentos verticais da seção transversal no centro do vão obtidos pelos três métodos avaliados.

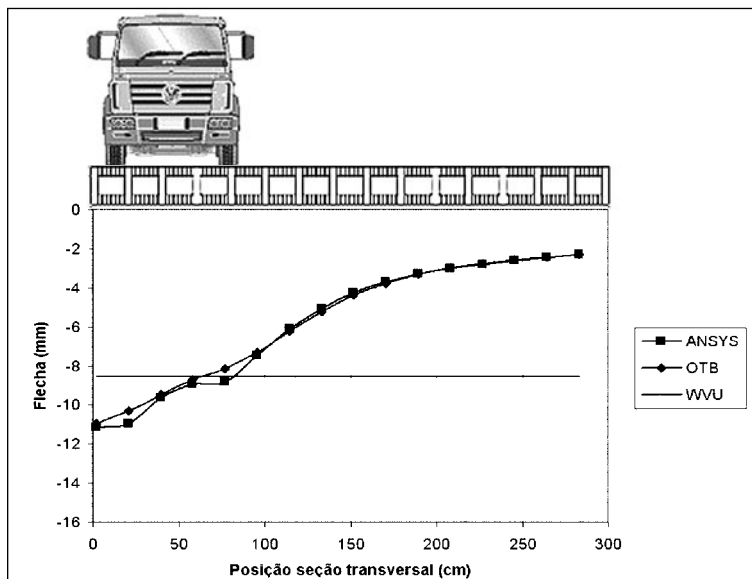


Figura 8: Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 1.

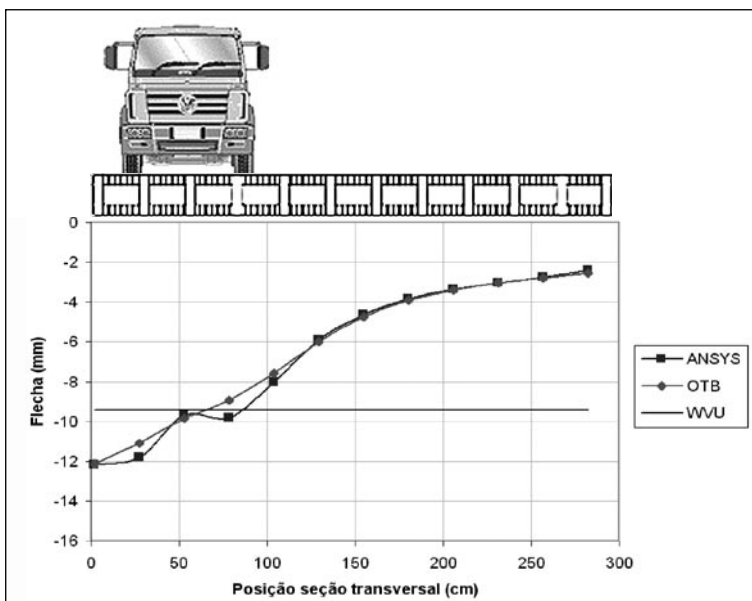


Figura 9: Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 2.

Analisando os gráficos anteriores, pode-se notar uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo ANSYS e pelo OTB, comprovando a eficiência do Método de Placa Ortotrópica Equivalente. A pequena divergência localizada sob a carga das rodas tem justificativa no fato de o Método de Placa Ortotrópica não levar em consideração o efeito da distorção celular. Todavia, esta perturbação localizada não compromete a estimativa do comportamento global da estrutura.

Ainda em relação às figuras anteriores, é possível notar que o valor de flecha máxima obtida pelo Método WVU diverge consideravelmente dos outros.

A Tabela 2 mostra os valores máximos da flecha, tensão normal e cisalhante, obtidos pelos três métodos, para os dois tabuleiros.

Tabela 2: Valores máximos de flecha, tensão normal e cisalhante.

Método	Flecha (mm)		Tensão Normal (MPa)		Tensão Cisalhante (MPa)	
	Tabuleiro 1	Tabuleiro 2	Tabuleiro 1	Tabuleiro 2	Tabuleiro 1	Tabuleiro 2
ANSYS	11,16	12,15	7,82	8,33	1,41	1,78
OTB	10,95	12,11	7,54	8,34	1,58	1,89
WVU	8,55	9,40	6,14	6,45	1,12	1,42

Novamente, a boa concordância dos resultados obtidos pelos métodos OTB e ANSYS fica evidenciada.

A principal diferença entre o Método de Placa Ortotrópica Equivalente e o Método de Viga Equivalente é que, no primeiro, os esforços são obtidos pela solução da equação de placas ortotrópicas (Equação de Huber). No segundo, os esforços são obtidos pela solução de uma viga isolada sujeita a uma porcentagem do carregamento de uma faixa de tráfego, porcentagem esta definida pelo Fator de Distribuição de Carga (W_L).

6. Conclusões

A comparação entre os modelos de cálculo mostrou que os modelos de Placa Ortotrópica Equivalente e Elementos Finitos (ANSYS) podem ser empregados com sucesso para prever o comportamento estrutural das pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido.

A perturbação localizada causada pelo efeito da distorção celular tem pouca influência no comportamento global e é menor quanto menos espaçadas são as nervuras (tabuleiro 1).

O Método de Viga Equivalente, apesar de prático, depende do correto Fator de Distribuição de Carga. No caso deste trabalho, o Fator de Distribuição de Carga empregado no método WVU não apresentou uma boa concordância com os valores encontrados nas simulações. Para a determinação do correto valores deste Fator, deveriam ser

realizadas simulações numéricas e ensaios experimentais, com variações da geometria e número de nervuras, para obter uma nova equação para o Fator de Distribuição de Carga que represente as condições nacionais de solicitação. Entretanto, como toda generalização, este coeficiente ainda não seria tão preciso quanto uma análise teórica de placa, para o dimensionamento de uma estrutura específica. Assim, recomenda-se que o projeto seja desenvolvido utilizando-se as ferramentas computacionais descritas neste trabalho. Como o programa OTB forneceu resultados equivalentes aos do ANSYS, sugere-se a sua utilização, pois sendo específico para a finalidade de análise de placas, torna-se mais prático.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP – “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo” pela concessão da bolsa de estudos e suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias e Passagens de Pedestres*. NBR 7188. ABNT, Rio de Janeiro.
- Crews, I. K. (2002). *Behaviour and Critical Limit States of Transversely Laminated Timber Cellular Bridge Decks*. PhD Thesis, Faculty of Engineering - University of Technology, Sydney, AU.
- Cusens, A. R. and Pama, R. P. (1975). *Bridge Deck Analysis*. Editora John Wiley Sons. London, UK. 278 p.
- Dickson, B. (1995). *Modern Timber Bridges of West Virginia – Volume I e II*. Constructed Facilities Center, West Virginia University, US.
- Gangarao, H. V. S. and Latheef, I. (1991). *System Innovation an Experimental Evaluation of Stressed Timber Bridges*. In Transportation Research Records 1275. TRB, National Research Council, Washington D.C., v.2, p.293-305. Proceedings of the fifth international conference on low-volume roads.
- Góes, J. L. N. (2005). *Estudo de Pontes de Madeira com Tabuleiro Multicelular Protendido*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, BR.
- Hambly, E. C. (1991). *Bridge Deck Behaviour*. 2nd Edition. E & FN SPON Publishers – Chapman & Hall. London. 313 p.
- O'Brien, E. J. and Keogh, D. L. (1999). *Bridge Deck Analysis*. Routledge, New York, US. 278 p.
- Taylor, S. E. et. al. (2000). *Evaluation of Stress-Laminated Wood T-Beam and Box-Beam Bridge Superstructures*. Final Report. Auburn University, US, 104 p.

Design methods for prestressed timber bridges

Abstract

This paper presents a theoretical and numerical study of structural behavior of orthotropic stressed timber decks. The Orthotropic Equivalent Plate Method, the Equivalent Beam method and the Finite Element Method are presented and discussed. A numerical comparison among the three design methods is accomplished in two stressed timber decks, under Class 45 standard static load, according to specifications of the Brazilian Code (NBR7188). The results show that the Orthotropic Equivalent Plate Method and Finite Element Method indicate good agreement and can be applied in the orthotropic prestressed timber decks design. However, the Equivalent Beam Method has not reached good agreement with the other ones, indicating that WVU Load Factor does not represent national traffic loads.

Keywords: timber bridges, stress laminated timber, orthotropic plate.

1. Introduction

In Brazil, the Laboratory of Wood and Timber Structures of the São Paulo University, concentrated the research efforts in education programs and technology transfer, developing new technologies for the rational use of wood. One of the current research themes in the laboratory is the study of modern timber bridges structural systems.

The stress laminated timber bridges are one of the most recent technologies used in the country. The system consists of stress-laminated top and bottom flanges connected with continuous webs, Fig. 1. Flange material was assumed to be sawn lumber while the webs could be constructed of glulam beams, laminated-veneer lumber (LVL), parallel-strand lumber (PSL), or other non-wood structural products.

Stress laminated timber decks are typically orthotropic systems and sophisticated design methods are required.

The objective of this paper is the presentation, discussion and comparison of the mainly design methods for multicellular stress laminated timber bridges decks.

2. Structural behavior and design methods

O'Brien and Keogh (1999) indicate the existence of four principal associated modes of deformation. The first two of these are longitudinal and transverse bending, as illustrated in Figs. 2b and 2c. The third form of behaviour is torsion, as indicated in Fig. 2d. The fourth form, which characterizes cellular structures, is transverse cell distortion, as indicated in Fig. 2e.

There are several approach forms for the multicellular bridge designs. The simplest method is called Equivalent Beam Method. In this method, the orthotropic decks are essentially designed as a beam with predetermined distribution width. Another design method is the Equivalent Orthotropic Plate Method, which considers the multicellular deck as an equivalent orthotropic plate. The last one is the Finite Element Method, in which the deck is notionally cut up into a number of small elements which are connected by discrete joints called nodes.

3. Numerical comparison

A comparison among the three design methods is accomplished in two scale models under static load according to Brazilian Code (NBR 7188, 1984).

Table 1 shows the characteristics of the two timber decks evaluated.

The standard vehicle was located on the left edge of the decks for bending stress analysis. For the shear stress, the vehicle was located on the left edge distanced $2h$ from the support (Figs. 6 and 7).

Figures 8 and 9 show the transverse deflection across the bridge within midspan and Table 2 shows the maximum values of displacement, bending stress and shear stress.

4. Conclusions

The comparison among the design methods showed that the Orthotropic Equivalent Plate Method and Finite Element Method can be successfully used to predict the structural behavior of the multicellular prestressed timber bridges.

The located disturbance caused by the effect of the cellular distortion has little influence in the global behavior.

The Equivalent Beam Method depends on the correct Load Factor value. The Load Factor used in the WVU method didn't present a good agreement with the simulation results.