

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES**

---

Neste trabalho, foram realizados estudos teórico e experimental das pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido, com o objetivo principal de avaliar seu comportamento estrutural frente a carregamentos concentrados, bem como avaliar os principais métodos de cálculo.

Para tanto, inicialmente foi conduzida revisão bibliográfica sobre as principais características do sistema, baseada em trabalhos realizados no Brasil e em outros países sobre o assunto.

Em seguida foi elaborado o programa OTB para o cálculo estrutural de pontes com tabuleiro em placa. O programa faz uso da transformação de placa ortotrópica equivalente e, utiliza a solução por séries para resolver a equação de placas ortotrópicas.

Após os estudos teóricos iniciais, foi desenvolvida a parte experimental do trabalho, com a realização de ensaios de laboratório em modelos de tabuleiros multicelulares reduzidos em escala 1:3. Dois tabuleiros com as mesmas dimensões externas e diferentes quantidade de nervuras, foram montados, instrumentados e ensaiados com carregamentos distribuídos e concentrados, simulando dois eixos do veículo-tipo de norma.

Várias simulações numéricas em Elementos Finitos foram conduzidas, a fim de encontrar o modelo que melhor descreve-se o comportamento estrutural do tabuleiro multicelular.

Utilizando a técnica dos Algoritmos Genéticos, implementado no Programa OTB, os parâmetros elásticos do Modelo numérico em Elementos Finitos, foram calibrados com os resultados experimentais.

E por fim, foi realizada comparação teórica dos métodos de dimensionamento estudados. Para tanto, os dois tabuleiros estudados em escala 1:3 foram submetidos ao carregamento estático da Classe 45 conforme especificações da Norma Brasileira de Ações em Pontes (NBR 7188, 1984), e os resultados de flecha, tensão normal e de cisalhamento, foram comparados.

Os estudos sobre pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido, realizados neste trabalho, indicam a viabilidade da utilização deste sistema para pontes com vãos de 12 a 25 m.

O grande destaque do sistema é a sua elevada rigidez à flexão longitudinal e à torção, proporcionada pela geometria da seção transversal, que resulta na utilização mais racional dos materiais. Outra característica do sistema é a baixa rigidez à flexão transversal, ocasionada pela ausência de elementos enrijecedores transversais (transversinas).

De forma geral, o uso do sistema com tabuleiro multicelular protendido resulta em maior economia de madeira se comparado com o sistema tradicional em Madeira Laminada Colada, composto por vigas e tabuleiro.

Da revisão bibliográfica pode-se concluir que o sistema protendido com tabuleiro multicelular se comporta de forma monolítica desde que não haja deslizamentos entre os elementos das mesas e almas. Para tanto, a tensão mínima de protensão deve ser assegurada. Os pesquisadores Norte-Americanos recomendam a tensão mínima de 350 kPa, enquanto que os pesquisadores Australianos recomendam uma tensão de 500 kPa, para tabuleiros com espécies de Coníferas, e 700 kPa para Dicotiledôneas. Os resultados obtidos da análise experimental, indicam que o nível de 350 kPa é suficiente para garantir o monolitismo do tabuleiro.

O nível de protensão inicial deve ser no mínimo 2,5 vezes maior que o nível de protensão mínimo, ou seja, 875 kPa, devido à perda de protensão total esperada ao longo da vida útil de no máximo 60%.

O nível de protensão afeta o comportamento estrutural dos tabuleiros multicelulares protendidos. Entretanto, devido às nervuras (elementos de rigidez) este efeito é pouco significativo. Os ensaios realizados demonstraram que variações do nível de protensão da ordem de 100% implicam em uma variação da rigidez da estrutura de no máximo 4,8%.

Em função da distância entre as linhas de protensão superior e inferior, a força das barras de protensão é sujeita a variações devido aos carregamentos. Os ensaios demonstraram que a posição de carregamento que produz a maior variação de força nas barras é o central. De forma geral, a força nas barras da linha inferior de protensão tende a aumentar com a aplicação dos carregamentos, com exceção quando esses se posicionam nas bordas. Para as barras da linha superior de protensão, obviamente, o efeito é contrário, ou seja, a força de protensão tende a diminuir, com exceção para os carregamentos de borda.

Outro fato importante é a redução das variações da força de protensão nas barras para maiores níveis de protensão. Isto ocorre devido à maior rigidez transversal para maior nível de protensão, ocasionando valores menores das deformações que produzem esse efeito.

A maior variação encontrada em todos os ensaios foi de 25%. Este acréscimo de força nas barras, gerado pelos carregamentos concentrados, deve ser considerado no cálculo do diâmetro das barras. Sugere-se que as barras sejam dimensionadas para uma força que produza o nível de protensão inicial de 875 kPa, acrescida de 25%.

A avaliação experimental do comportamento dos tabuleiros estudados, permitiu concluir também que a redução do número de vigas ocasiona uma grande redução na rigidez à flexão longitudinal, principalmente devido ao efeito “Shear Lag”. Entretanto, a quantidade de vigas não altera significativamente a rigidez à flexão transversal e à torção do tabuleiro.

Os resultados obtidos experimentalmente para as deformações e tensões normais nos modelos reduzidos mostraram uma boa concordância com os resultados obtidos com o modelo em elementos finitos, ressaltando a eficácia deste modelo de cálculo.

Quanto à calibração dos parâmetros elásticos que regem o comportamento estrutural do sistema, pode-se concluir que a técnica dos Algoritmos Genéticos simples empregada neste estudo foi eficaz. Para os tabuleiros ensaiados, a relação entre os parâmetros elásticos, que produz melhor aproximação entre os resultados teóricos e experimentais foi  $E_y = 1,1\%$  de  $E_x$  e  $G_{xy} = 3,4\%$  de  $E_x$ , para o primeiro tabuleiro com 16 nervuras e,  $E_y = 1,1\%$  de  $E_x$  e  $G_{xy} = 3,5\%$  de  $E_x$ , para o segundo tabuleiro com 12 nervuras.

As pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido são pontes tipicamente ortotrópicas e como tal, exigem modelos analíticos e/ou numéricos sofisticados para estimar seu comportamento estrutural sob carregamentos de projeto. Dentre os vários modelos de cálculo se destacam o Modelo de Viga equivalente, Modelo de Placa Ortotrópica Equivalente e Modelo em Elementos Finitos.

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. O método de Viga Equivalente também pode ser empregado, mas apresenta a dificuldade de uma correta definição do Fator de Distribuição de Carga para todas as configurações possíveis de tabuleiros multicelulares protendidos. 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.

O Programa OTB demonstrou ser uma ferramenta útil, de fácil utilização e com interface amigável, para o cálculo de deslocamentos e esforços em pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido.

O programa também permite o cálculo de outros quatro sistemas estruturais (Tabuleiro Misto Madeira-concreto, Tabuleiro Protendido de Seção Simples, Tabuleiro Protendido formada por vigas de seção T e Tabuleiro Protendido Treliçado). Para todos os sistemas é utilizada a mesma teoria de transformação dos tabuleiros em Placas Ortotrópicas Equivalentes.

Algumas recomendações para o projeto de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido são apresentadas a seguir. Essas recomendações são resultado dos conhecimentos adquiridos durante as análises teóricas e experimentais realizadas neste trabalho, além de informações obtidas da revisão bibliográfica.

- A relação  $L/H$  (vão/altura da viga) se situa entre 15 a 20.
- A espessura mínima admitida das mesas é de 15 cm.
- A espessura mínima admitida das vigas de MLC é de 12 cm.
- O espaçamento máximo entre as vigas igual a 80 cm para mesas com espessura de 20 cm..
- Efetuar uma seqüência de três reprotensões com o nível inicial, uma após 2 dias, outra após 5 dias e a última após 8 semanas. Com este procedimento espera-se que a perda de protensão total não ultrapasse 10%.
- O nível de protensão inicial, deve ser no mínimo de 875 kPa e no máximo de 1200 kPa. É assumido o limite mínimo de 350 kPa para que a ponte continue em serviço. Abaixo deste limite o método de dimensionamento proposto não é mais válido, pois podem ocorrer deslizamentos entre as lâminas gerando deformações permanentes no sistema. A ponte deverá ser reprotendida caso o limite inferior de 350 kPa seja atingido.

- A superfície das madeiras não deve ser aplainada ou lixada. Sugere-se que as peças de madeira tenham acabamento simplesmente serrado, proporcionando uma superfície com maior rugosidade, gerando maior atrito entre as peças.
- Sugere-se o sistema de protensão com barras de aço de alta resistência tipo Dywidag, mas outros sistemas também podem ser utilizados desde que atendidas as necessidades, como por exemplo, praticidade na reprotensão.
- Sugere-se o uso de camada asfáltica sobre a pista de rolamento da ponte com a função de impermeabilização e proteção do tabuleiro contra a abrasão.