

Técnicas de reabilitação na estrutura de madeira da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil

Rehabilitation techniques in the Piracicaba Suspended Footbridge timber structure, Brazil

Leandro Dussarrat Brito
Carlito Calil Junior

Resumo

Em pontes e passarelas de madeira as zonas com potencial de risco de biodeterioração geralmente ocorrem nas interfaces viga-tabuleiro e em certas regiões de ligações, onde ficam suscetíveis à retenção de umidade. Desde 2011, durante as inspeções realizadas *in loco* foram avaliadas sistêmicas propostas metodológicas de inspeção e técnicas de reabilitação de elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* da Passarela Pênsil de Piracicaba. Diante dos resultados das avaliações detectou-se a necessidade iminente de reabilitar certos elementos estruturais de madeira parcialmente biodeteriorados, onde foram estudadas tais propostas. Para validação do trabalho foram realizados ensaios em laboratório de elementos retirados da estrutura e em peças de *Eucalyptus citriodora* propostas para a técnica de reabilitação com cobrejuntas justapostas. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram satisfatórios, validando-se a adequação da metodologia das técnicas de reabilitação propostas. Por fim, as fotos demonstram as principais técnicas empregadas na reabilitação dos elementos estruturais de madeira da passarela.

Abstract

In timber bridges and footbridges, the most critical zones with the potential biodeterioration risk generally occur in the beam-deck interfaces and in certain connection regions where are susceptible to moisture retention in the wood. Since 2011, methodological inspection proposals and rehabilitation techniques for structural elements of *Eucalyptus citriodora* of the Piracicaba Suspension Footbridge have been evaluated systematically during in situ inspections. In view of the evaluations results, there was detected the necessity to rehabilitate some partially biodeteriorated timber structural members, where such proposals were studied. To validate the work, laboratory tests were carried out on members removed from the structure and on *Eucalyptus citriodora* pieces proposed for the rehabilitation technique with juxtaposed scabbing. The experimental results were satisfactory, validating the adequacy of the methodology of the rehabilitation techniques proposed. Finally, the photos demonstrate the main techniques used in the rehabilitation of the structural elements of the footbridge.

Palavras-chave: Engenharia / Projeto / Reabilitação / Estruturas / Madeira

Keywords: Engineering / Design / Rehabilitation / Structures / Timber

Leandro Dussarrat Brito

Post-Doctoral Researcher Structural Engineering
University of São Paulo
São Carlos School of Engineering
Brazil
dussarrat@sc.usp.br
leandro.3dr@dr.com

Carlito Calil Junior

PhD. Full Professor
Department of Structural Engineering
Laboratory of Wood and Wood Structures
University of São Paulo
São Carlos School of Engineering
Brazil
calil@sc.usp.br

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BRITO, Leandro [et al.] – Técnicas de reabilitação na estrutura de madeira da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 7. ISSN 2183-8488. (julho 2018) 87-100.

1 Introdução

De acordo com CÓIAS (2011), a atenção especial voltada aos profissionais, Engenheiros e Arquitetos, na preocupação em conservar e/ou recuperar estruturas existentes para mantê-las em uso adequadamente é uma grande tendência mundial na questão da sustentabilidade. Com esta atitude é possível reduzir a geração de resíduos e o consumo de materiais, que certamente geraria durante o processo construtivo de uma nova estrutura no local da existente.

No entanto, num cenário atual em diversos estados do Brasil ainda tem sido comum constatar a ausência de políticas públicas em manutenções periódicas preventivas e/ou corretivas de pontes e passarelas, principalmente quando se trata de estruturas de madeira, que naturalmente requerem maior atenção.

Para a mudança desse quadro, torna-se fundamental realizar estudos sistematizados para a elaboração de metodologias de inspeções periódicas, e manutenções preventivas e/ou corretivas, a fim de avaliar e propor técnicas de reabilitação para essas estruturas (Dussarrat Brito, 2014). Para propor soluções adequadas em manutenções preventivas e/ou corretivas em reabilitação de estruturas, nas inspeções periódicas tem sido utilizada uma série de técnicas não destrutivas (NDT), a fim de identificar as manifestações patológicas presentes em elementos estruturais de madeira. Estas técnicas podem ater-se não somente à identificação de reparos de defeitos como também em manutenções preventivas periódicas, a fim de incrementar correções para prevenir problemas e reduzir futuras manifestações patológicas. Pois, negligenciando-se ou tornando-se uma manutenção irregular, predispõe-se a estrutura de madeira ao desenvolvimento de biodeterioração ou desgaste dos elementos que implicarão a necessidade de reparos ou recuperações imediatas.

Durante inspeções realizadas *in loco*, se tem notado que em pontes e passarelas de madeira as zonas com potencial de risco de biodeterioração geralmente ocorrem nas interfaces viga-tabuleiro e em certas regiões de ligações, onde ficam suscetíveis à retenção de umidade. Quando se trata de durabilidade das estruturas, diante das avaliações realizadas *in loco* é cada vez mais perceptível a real necessidade de se realizar frequentes inspeções periódicas e manutenções preventivas a fim de prolongar a vida útil das estruturas de madeira.

Durante as inspeções detalhadas realizadas *in loco* desde 2011, para avaliações de propostas de metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação de elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil, foram detectados certos níveis de biodeteriorações em vigas transversinas superiores (TS) nas zonas de fixação das peças dos tabuleiros, em nós de ligações das treliças (TR1 e TR2), em extremidades de vigas transversinas inferiores (TI), em extremidades inferiores de montantes (M) e de diagonais (D) e em extremidades inferiores de elementos de contraventamento (C). Diante dos resultados das avaliações detectou-se a iminente necessidade de reabilitar certos elementos estruturais de madeira parcialmente biodeteriorados, onde foram estudadas tais propostas. Além dos trabalhos de inspeções, realizados *in loco*, para validação do trabalho também foram realizados ensaios em laboratório de elementos retirados da estrutura e em peças de *Eucalyptus citriodora* propostas para as técnicas de reabilitação, principalmente com cobrejuntas justapostas.

1.1 Objetivo

O objetivo principal desse trabalho é apresentar a metodologia e as principais técnicas utilizadas na reabilitação dos elementos estruturais de madeira da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil.

1.2 Justificativa

É fundamental realizar inspeções periódicas preventivas em estruturas de pontes e passarelas, para identificar e avaliar indícios de possíveis manifestações patológicas, e indicar as possíveis soluções em manutenções preventivas de conservação e/ou recuperação, a fim de assegurar os requisitos de durabilidade para prolongamento da vida útil e garantia na segurança destas estruturas diante das condições de uso, pois mantê-las adequadamente é uma questão real em sustentabilidade.

2 Metodologia

Para o desenvolvimento metodológico no estudo de viabilidade do emprego de técnicas de reabilitação de elementos estruturais de madeira da Passarela Pênsil de Piracicaba, os trabalhos foram divididos em duas etapas, tendo como ponto de partida na primeira etapa as inspeções realizadas *in loco*, para as avaliações com técnicas não destrutivas (NDT), com ênfase em técnicas de inspeção visual, com auxílio de ferramentas tradicionais de carpintaria e com uso do Resistograph® IML-RESI-F500-S.

Na segunda etapa foram elaboradas e avaliadas as propostas originais de técnicas de reabilitação, onde se empenhou maior ênfase nesta fase dos trabalhos. Para validação das técnicas também foram realizados ensaios experimentais no LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira).

3 Breve histórico e descrição da estrutura original

Esse item além de resgatar um breve histórico tem como objetivo principal expor uma descrição geral sobre o sistema de estrutura de madeira original da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil.

Em 1993 Calil Junior, Rocco Lahr, e Dias apresentaram os principais aspectos do projeto e da construção da estrutura de madeira desta, que foi projetada com treliças e vigas principais em *Eucalyptus citriodora*, e posteriormente em 1998 os autores descreveram que essa seria a maior passarela pênsil de madeira do Hemisfério Sul [(Calil Jr. *et al.*, 1993); (Calil Jr. *et al.*, 1998)].

Inaugurada em 15 de dezembro de 1992, esta estrutura localizada no Rio Piracicaba ficou denominada pelo meio técnico/científico como sendo a Passarela Pênsil de Piracicaba, e se consagrou um importante monumento tecnológico para área de engenharia de estruturas de madeira e ponto turístico na cidade de Piracicaba, estado de São Paulo, Brasil. Para melhor identificação de sua localização, esta estrutura situa-se aproximadamente nas coordenadas GPS 22°43'05,82"S; 47°39'16,63"W, 475 m de altitude (Dussarrat Brito, 2014).

3.1 Características e descrições geométricas da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba

O projeto original do sistema "Pênsil" desta passarela é composto por quatro torres de sustentação metálicas do aparelho suspensor, com pilares de seção transversal caixão e contraventamento treliçado. A suspensão é composta por quatro cabos de aço Filler 19 x 25, pré-esticados, sendo utilizado um par de cabos para cada viga de rigidez treliçada. A relação entre o vão e a flecha central foi de 6,25, e a relação entre o vão e a altura das vigas de rigidez treliçadas foi de 50. Os cabos formam na zona de ancoragem um ângulo de aproximadamente 33° (graus) com a horizontal, igual à sua máxima inclinação no trecho parabólico (Figura 1a). Os pendurais de aço 1020, com diâmetros de 1", possuem esticadores ajustáveis manualmente, ligados aos cabos por placas metálicas parafusadas e às vigas de rigidez junto aos nós inferiores da treliça (Calil Jr. *et al.*, 1993).

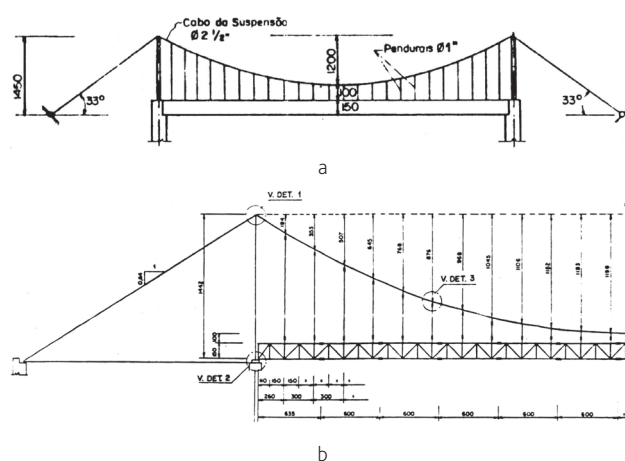


Figura 1 Geometria do projeto da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba: a) vista lateral geral; b) dimensões gerais do projeto original (Fonte: Calil Junior; Rocco Lahr; Dias, 1993)

As duas vigas de rigidez longitudinais (TR1 e TR2) são compostas por sistema treliçado com peças múltiplas de seção transversal retangular 6 cm x 12 cm de *Eucalyptus citriodora* (Figura 2a), conectadas através de barras rosçadas, arruelas e porcas galvanizadas. A rigidez transversal é realizada pelo sistema de contraventamento com peças inclinadas, também de *Eucalyptus citriodora*, aliado ao sistema de justaposição de peças de madeira fixadas em duas camadas de tábuas cruzadas que constituem o tabuleiro da passarela.

Assim, o sistema do tabuleiro é composto por duas camadas de tábuas cruzadas perpendicularmente, formando um ângulo de 45° com o eixo longitudinal da estrutura. Conforme Calil Junior *et al.* (1993), as tábuas originais eram de *Eucalyptus tereticornis* com 2,5 cm x 20 cm, pregadas sobre as vigas transversinas superiores (TS) e sobre as vigas de rigidez treliçadas (TR1 e TR2) (Figura 3).

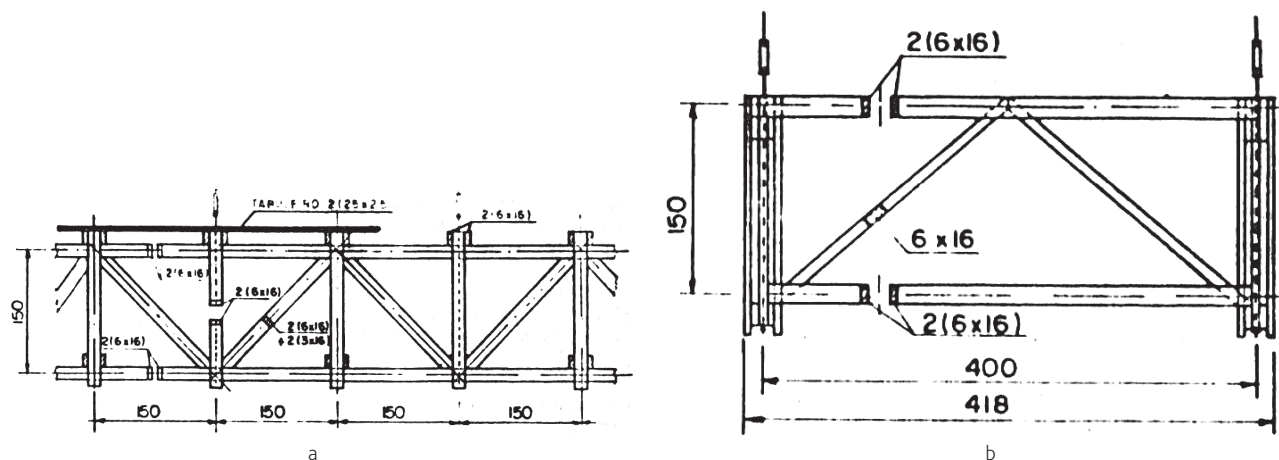


Figura 2 Elementos estruturais de madeira do projeto da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba: a) viga de rigidez treliçada ($TR1 = TR2$); b) contraventamento transversal das vigas de rigidez (Fonte: Calil Junior; Rocco Lahr; Dias, 1993)

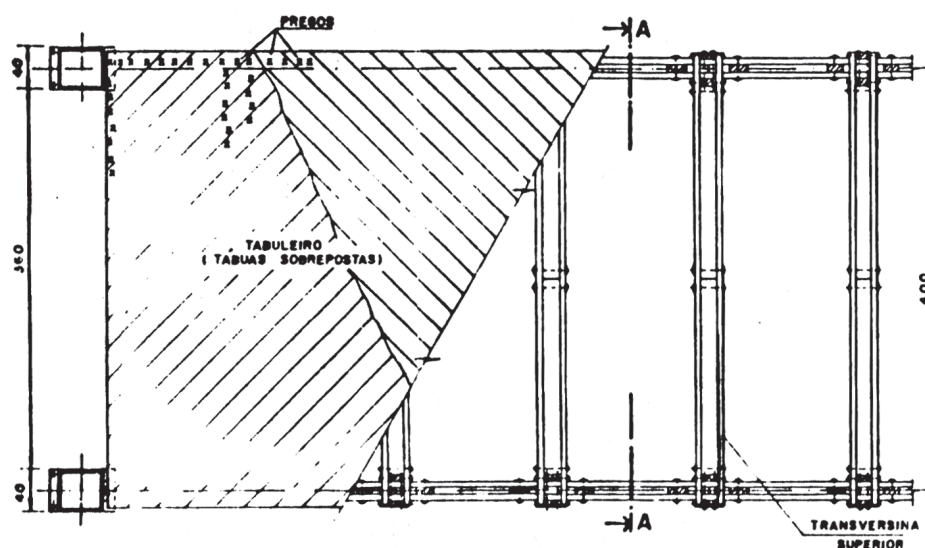


Figura 3 Detalhes do tabuleiro contraventado do projeto da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba: vista em planta (Fonte: Calil Junior *et al.* 1993)

3.2 Envoltórias dos esforços nos elementos principais

De acordo com Calil Junior *et al.* (1993), no projeto original com a ação permanente determinada para o cálculo de aproximadamente 165 daN/m^2 e a ação variável adotada para pedestres de 300 daN/m^2 , admitindo todo o carregamento sendo suportado pelo aparelho suspensor, com a atuação conjunta das ações permanente e variável, foram obtidos os seguintes esforços referentes a um dos lados da suspensão (constituído por dois cabos):

- empuxo máximo nos cabos: $55\,000 \text{ daN}$

- tração máxima nos cabos: $65\,000 \text{ daN}$
- compressão máxima em cada torre: $70\,000 \text{ daN}$
- tração máxima nos pendurais: 2800 daN

Para a determinação dos esforços nas vigas de rigidez treliçadas foi utilizada a teoria elástica Gravina (1946) *apud* Calil Junior *et al.* (1993). As envoltórias dos momentos fletores e esforços cortantes máximos são apresentados respectivamente nas Figuras 4a e 4b. Os momentos máximos ocorrem aproximadamente na seção transversal situada a um quarto do vão e o cortante máximo nos apoios.

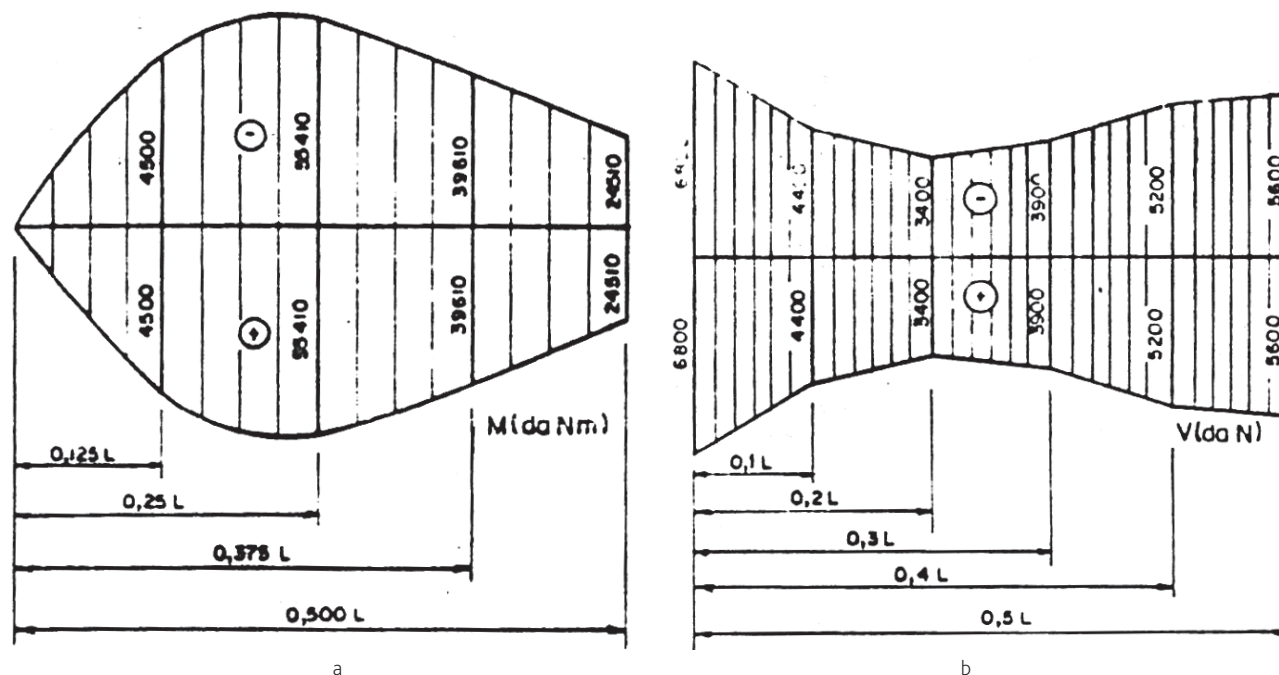


Figura 4 Envolvórias dos esforços na viga de rigidez do projeto da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba: a) momento fletor (M); b) cortante (V) (Fonte: Calil Junior; Rocco Lahr; Dias, 1993)

4 Metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação

4.1 Trabalhos com pesquisas em campo: visitas técnicas *in loco*

Com intuito de restaurar a Passarela Pênsil de Piracicaba a Prefeitura Municipal de Piracicaba-SP, Brasil, solicitou uma avaliação da estrutura, a fim de identificar e avaliar as manifestações patológicas presentes e indicar procedimentos de manutenção e técnicas de reabilitação adequada para a restauração da mesma (Calil Junior *et al.*, 2011). Na primeira visita técnica realizada em 12 de dezembro de 2011, iniciaram-se os levantamentos das dimensões *in loco*, e as inspeções com auxílio de técnicas não destrutivas (NDT) e registros de centenas de fotos digitais de alta resolução, para avaliação das manifestações patológicas nos elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* e nas tábuas de *Eucalyptus tereticornis* que compunham o sistema do tabuleiro [(Dussarrat Brito & Calil Junior, 2012); (Dussarrat Brito & Calil Junior 2013)a]. Na primeira fase de levantamento da inspeção, a fim de propor uma metodologia facilitadora e precisa para a identificação dos elementos estruturais de madeira durante as inspeções periódicas em visitas técnicas posteriores, citado

inicialmente em Calil Junior *et al.* (2011), Dussarrat Brito (2014) elaborou esquemas de desenhos com suas respectivas siglas e nomenclaturas (Figuras 5 e 6), conforme verificações das dimensões conferidas *in loco*.

Em geral, os pontos mais críticos em pontes de madeira, com potencial de risco de biodeterioração, ocorrem nas interfaces viga-tabuleiro e em pontos de ligações, onde são suscetíveis à retenção de umidade na madeira [(Calil Junior *et al.* 2006); (Calil Junior & Dussarrat Brito, 2010); (Brito, 2014); (Dussarrat Brito & Calil Junior, 2015); (Dussarrat Brito & Calil Junior, 2017)]. O risco a biodeterioração fica ainda mais iminente quando as tábuas do tabuleiro são fixadas com pregos ou parafusos que penetram na região superior da seção das vigas transversinas e longarinas. Durante as inspeções visuais detalhadas de Nível 2, realizadas *in loco* nas avaliações para reabilitação de elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora*, foram detectados elevados níveis de biodeteriorações nas vigas transversinas superiores TS com características visuais de ataque por fungos apodrecedores, mais precisamente, nessas tais zonas de fixação das peças dos tabuleiros, sendo ainda mais expressivos nos elementos estruturais no denominado Módulo m13 desta estrutura (Dussarrat Brito, 2014), conforme pode ser observado nas fotos digitais apresentadas na Figura 7.

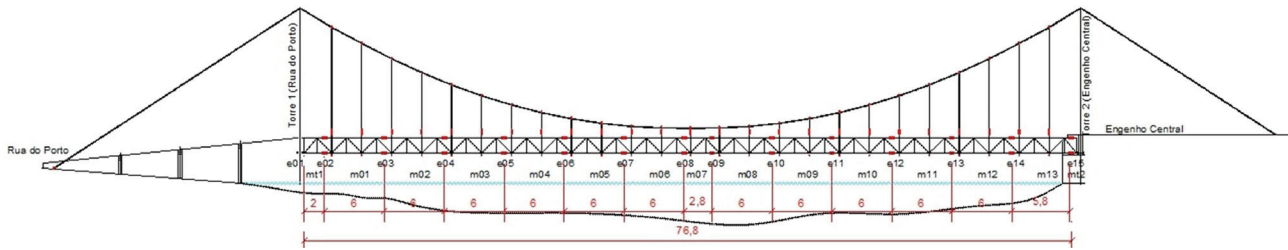
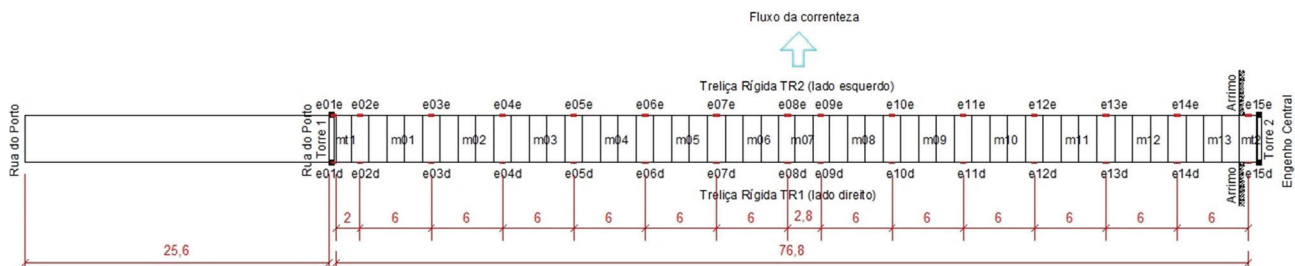


Figura 5 Esquema unifilar em elevação da passarela pênsil: numeração dos módulos [mXX] e posição das numerações das ligações das emendas [eXX] dos módulos (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)



Legenda:

- [mt1] módulo na torre 1
- [mt2] módulo na torre 2
- [mXX] numeração dos módulos
- [eXX] numeração das ligações de emendas entre os módulos
- [eXXe] numeração das ligações de emendas entre os módulos da TR2
- [eXXd] numeração das ligações de emendas entre os módulos da TR1

Figura 6 Esquema unifilar em planta da passarela pênsil: posição das vigas de rigidez treliçadas, numeração dos módulos [mXX] e numeração das ligações das emendas [eXX] dos módulos (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)



a



b

Figura 7 Biodeteriorações com características visuais de fungos apodrecedores, na região superior da seção das vigas transversinas superiores (TS) do módulo m13, em regiões de fixação das tábuas do tabuleiro. Foto: Dussarrat Brito (Inspeção *in loco* em 09/08/2013)

4.2 Ensaios experimentais e avaliações realizados no LaMEM

Diante da necessidade de reabilitar diversos elementos estruturais de madeira da Passarela Pênsil de Piracicaba, foram estudadas as propostas de técnicas de reabilitação das peças biodeterioradas. Como se tratava de peças estruturais de madeira com dimensões reais, os trabalhos experimentais para validação das propostas de técnicas de reabilitação das peças de madeira com cobrejuntas justapostas de *Eucalyptus citriodora* foram realizados com ensaios no pórtico do LaMEM, em função do esquema de distribuição de cargas da ASTM D 198-08 *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes* (Figura 8). Para a determinação de valores de MOE os cálculos foram realizados pela equação da Teoria Clássica da Resistência dos Materiais (Equação 1):

$$E = \frac{23 \cdot P \cdot a^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad (1)$$

onde:

E Módulo de elasticidade

P Carga concentrada total aplicada

a Representa 1/3 do vão livre (L)

f Flecha

I Momento de inércia da seção na posição do eixo em análise

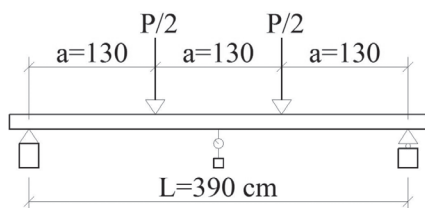


Figura 8 Esquema estático para ensaios de flexão de peças estruturais reais (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)

Como metodologia, os trabalhos experimentais foram realizados nas seguintes etapas:

- avaliações visuais e experimentais de 8 vigas transversinas superiores (TS1; TS2; TS3; TS4; TS5; TS6; TS7; TS8) de *Eucalyptus citriodora* originais da Passarela Pênsil de Piracicaba, parcialmente biodeterioradas na região superior (zona de compressão de vigas);
- estimativas dos valores do MOE e do MOR na avaliação de 6 peças diagonais de contraventamento (D1; D2; D3; D4; D5; D6) de *Eucalyptus citriodora*, superficialmente biodeterioradas, originais da Passarela Pênsil de Piracicaba, e correlações com o valor médio da densidade de madeira de *Eucalyptus citriodora* da Tabela E1 da ABNT NBR 7190:1997;
- caracterização de tábuas estruturais de madeira de *Eucalyptus citriodora* para avaliação da proposta da técnica de reabilitação na utilização como *cobrejuntas justapostas*.

Para aplicações nos estudos originais das propostas de técnicas de reabilitação dos elementos estruturais de madeira, as verificações foram baseadas pelas informações históricas, assim como os detalhes do projeto estrutural original da passarela apresentados em Calil Jr. et al. (1993).

Diante das características visuais de biodeterioração por fungos apodrecedores, detectadas nas Transversinas Superiores (TS) observadas *in loco*, foram submetidas para o LaMEM 8 peças estruturais originais da passarela, onde foram realizados os ensaios experimentais de flexão estática pelo esquema de distribuição de cargas da ASTM D 198-08, para avaliações no comportamento real destas vigas transversinas superiores (TS1; TS2; TS3; TS4; TS5; TS6; TS7; TS8), parcialmente biodeterioradas na região superior (zona de compressão de vigas), ainda sem o emprego de técnicas de reabilitação, e avaliação dos *Modos de Ruptura* nas transversinas TS5; TS6; TS7; TS8. As dimensões medianas efetivas das vigas transversinas (TS) originais eram aproximadamente de 5,5 cm de largura por 15 cm de altura, e 430 cm de comprimento. No entanto, conforme já comentado, estas vigas apresentavam alto nível de biodeterioração, principalmente na região superior, logo acima da linha neutra, tendo-se como origem nas regiões pontuais onde eram fixadas as peças do tabuleiro, cujas regiões são propensas as infiltrações, retenção de água e concentração de umidade. A título de exemplificação, os *Modos de Ruptura* nas transversinas biodeterioradas TS7 e TS8 estão apresentados de maneira pormenorizada na Figura 9, onde, em tese, foram notáveis as separações longitudinais, paralelas às fibras da região de madeira sã da região biodeteriorada. Além disto, destaca-se ainda que as rupturas nas TS5; TS6; TS7 biodeterioradas ocorreram com *Modo de Ruptura Brusca (Frágil)*, sem aviso inicial na viga, demonstrando-se a título de exemplificação a forma da ruptura na TS7 ilustrada nas fotos das Figuras 9a e 9b. No entanto, a arte de avaliar peças de madeira biodeterioradas não é tarefa fácil. Em função de as dimensões das peças estruturais originais altamente biodeterioradas apresentarem grandes variações nas alturas "h" ao longo das seções transversais, inclusive com cavidades em formas irregulares internamente às peças, além de fendas longitudinais expressivas, e cavidades, é impraticável determinar o valor exato tanto do MOE quanto do MOR. Para isso, foi imprescindível analisar graficamente os resultados experimentais pela relação Força x Flecha, conforme indicado na Figura 10.

No nível de carregamento equivalente a relação L/300, correspondente à flecha aproximada de 13 mm no estudo, obteve-se a coerência como resultado correlacionado ao nível de biodeterioração nessas peças, conforme foi estimado pela *Técnica de Inspeção Visual Detalhada*, com mapeamento de imagens digitais assistidas via computador e validada também graficamente pela análise com o uso do Resistograph®, apresentado em Dussarrat Brito & Calil Junior (2013b) e publicado em Dussarrat Brito (2014). Por essa razão, a escolha das nomenclaturas das 8 vigas transversinas de madeira retiradas do módulo m13 da Passarela foi definida propositalmente em ordem crescente (TS1; TS2; TS3; TS4; TS5; TS6; TS7; TS8), em função do nível de biodeterioração das peças previamente avaliadas visualmente e qualitativamente. A Figura 10 demonstra os diagramas com os resultados do comportamento das vigas TS1, TS2, TS3 e TS4 parcialmente biodeterioradas na região superior, ainda *sem o emprego de técnica de reabilitação*, válido para os ensaios estáticos de flexão.



Figura 9 Ensaios estáticos de flexão de vigas transversinas parcialmente biodeterioradas na região superior de compressão. Destaca-se que foram notáveis à separação longitudinal, paralela às fibras da região de madeira sã da região da madeira biodeteriorada: a) modo de ruptura brusca (sem aviso) na TS7 (visão detalhada em b); c) modo de ruptura por cisalhamento na TS8 (visão detalhada em d). Fotos: Dussarrat Brito (2014)

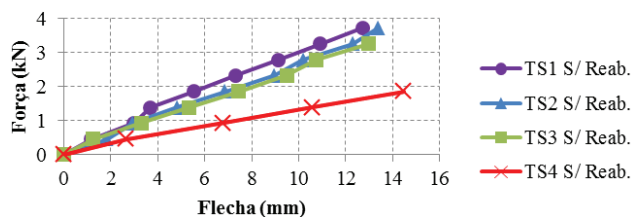


Figura 10 Resultados experimentais dos ensaios estáticos de flexão: comportamento das vigas transversinas de madeira parcialmente biodeterioradas na região superior, ainda sem o emprego de técnica de reabilitação, válido para os ensaios de flexão estática (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)

Para avaliação do comportamento e estimativas do MOE e do MOR foram realizados ensaios estáticos de flexão também em 6 peças de diagonais de contraventamento (D1, D2, D3, D4, D5, D6), de *Eucalyptus citriodora* superficialmente biodeterioradas, originais da estrutura da passarela. Os modos de ruptura dessas peças ensaiadas à flexão estão demonstrados de maneira pormenorizada nas fotos ilustradas na Figura 11.

Nos ensaios experimentais de flexão estática em peças estruturais de madeira de *Eucalyptus citriodora* da estrutura da passarela, para a determinação dos valores estimados do MOE e do MOR foi respeitada a relação $L/300$, que para o L de 180 cm corresponde a aproximadamente 0,6 cm, para a determinação do valor limite permissível para a deformação elástica máxima de cada viga. A

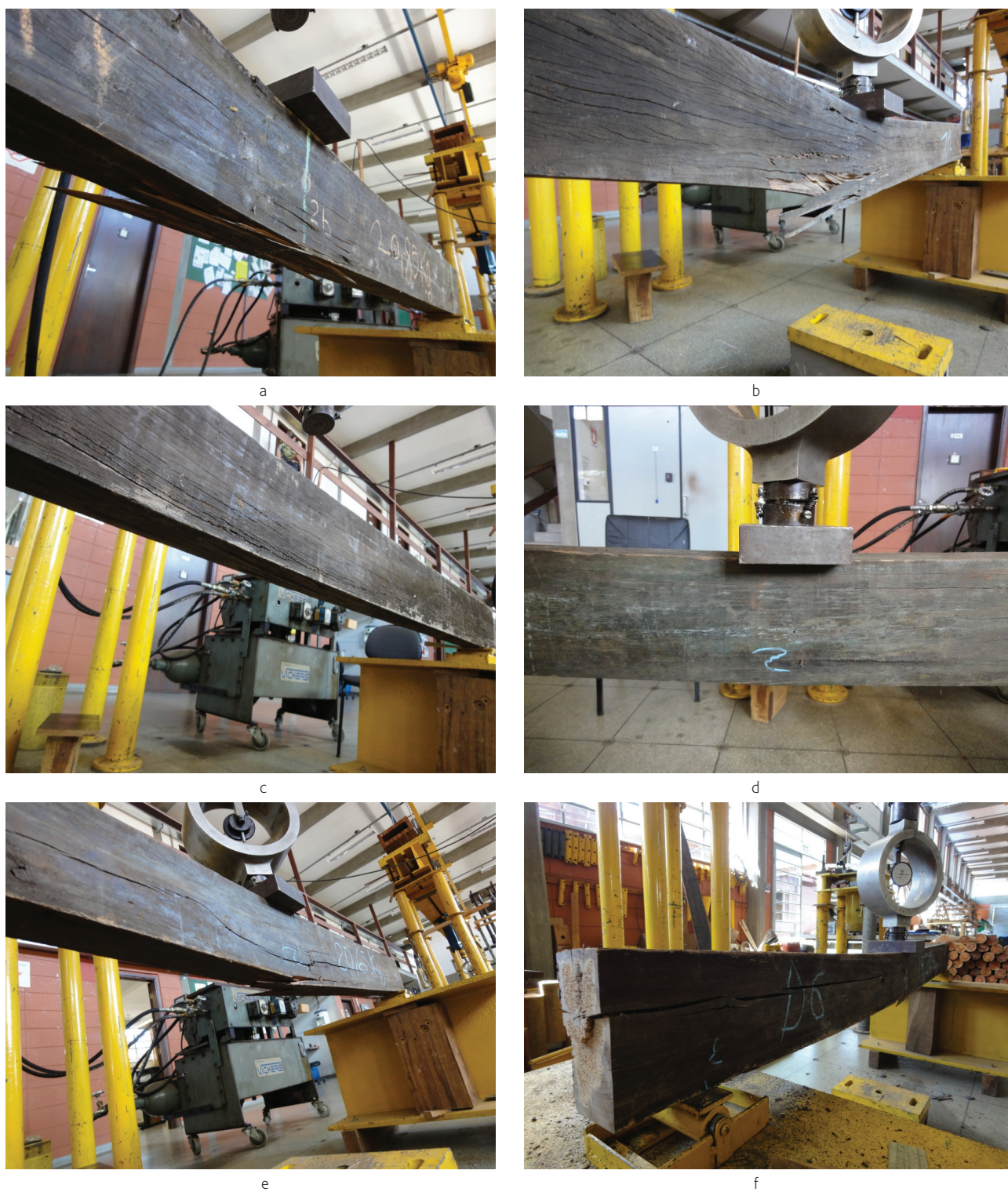


Figura 11 Resultado dos ensaios experimentais indicando-se os modos de ruptura nas peças estruturais ensaiadas à flexão: a) D1; b) D2; c) D3; d) D4; e) D5; f) D6. Fotos: Dussarrat Brito (2014)

Figura 12 demonstra os diagramas com os resultados experimentais do comportamento dessas peças estruturais da passarela, válidos para os ensaios estáticos de flexão.

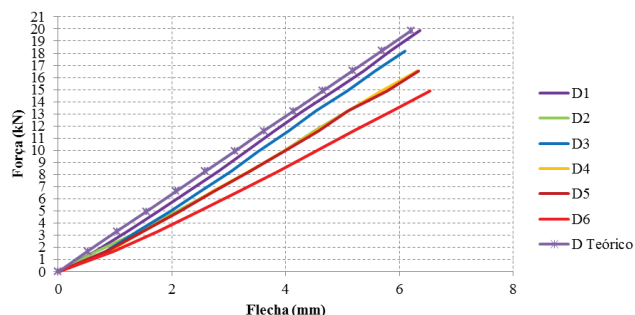


Figura 12 Resultados dos ensaios experimentais de flexão estática: comportamento das peças de diagonais de contraventamento (D1, D2, D3, D4, D5, D6) de *Eucalyptus citriodora*, superficialmente biodeterioradas, avaliadas para estimativa dos valores do MOE e do MOR, das peças originais da estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)

Por fim, destaca-se que a metodologia proposta consistiu na aplicação de técnicas de reabilitações com cobrejuntas justapostas com peças estruturais comerciais de dimensões 3 cm x 15 cm de *Eucalyptus citriodora*, fixadas paralelamente aos elementos estruturais que foram previamente identificados com manifestações patológicas durante as inspeções. Para a caracterização do MOE das peças a serem utilizadas como cobrejuntas justapostas (CJ), foram realizados ensaios estáticos de flexão não destrutivos (END) em 12 peças estruturais novas de *Eucalyptus citriodora*, tratadas com CCA sob vácuo-pressão em autoclave, com dimensões médias aproximadas de 3 cm de espessura, 15 cm de altura e 438 cm de comprimento, compatibilizando-as com o comprimento das transversinas. A foto na Figura 13a ilustra a metodologia não destrutiva (END), dos ensaios experimentais estáticos de flexão de viga de madeira, em tamanho estrutural real, conforme a distribuição de cargas da ASTM D 198-08, para caracterização das peças de cobrejuntas de *Eucalyptus citriodora*.

Vale destacar que na realização dos ensaios experimentais, para a determinação dos valores de MOE, foi respeitada à relação L/300, admitindo-se como padronização do L em 390 cm, no intuito de determinação do valor limite permissível para a deformação elástica máxima de cada viga, que corresponde a aproximadamente 1,3 cm. Assim, na Figura 13b estão demonstrados graficamente os resultados experimentais do comportamento dessas peças, na relação Força x Flecha para caracterização das cobrejuntas novas de madeira de *Eucalyptus citriodora*.

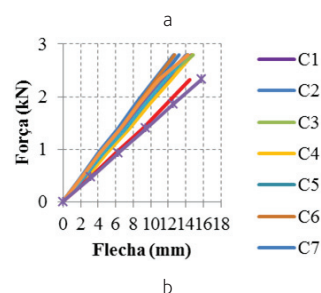


Figura 13 Caracterização das peças novas de madeira de *Eucalyptus citriodora* para utilização como cobrejuntas justapostas, na técnica de reabilitação proposta: a) visão geral do esquema dos ensaios experimentais não destrutivos na hipótese de flexão estática. Foto: Dussarrat Brito; b) diagrama relação Força x Flecha: comportamento das peças de madeira de *Eucalyptus citriodora*, caracterizadas para utilização na técnica de reabilitação como cobrejuntas justapostas, validadas pelos resultados dos ensaios experimentais de flexão estática (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)

4.3 Metodologia e técnicas de reabilitação de elementos estruturais de madeira

Diante dos resultados experimentais realizados e da metodologia proposta, a título de ilustração nas Figuras 14 a 16 são demonstradas em tese as principais soluções empregadas em técnicas de reabilitação de elementos estruturais da Passarela Pênsil de Piracicaba, na restauração global de toda estrutura, realizada com sucesso entre agosto de 2013 e junho de 2014.



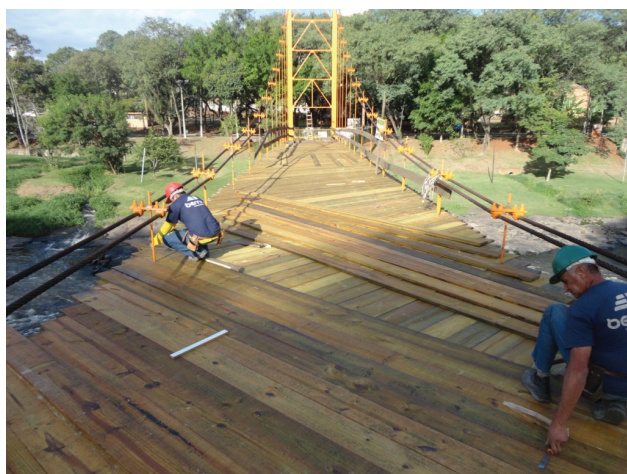
Figura 14 Técnicas de reabilitação de elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* da Passarela Pênsil de Piracicaba para os casos com biodeteriorações menos intensas em peças de montantes (M), vigas transversinas inferiores (TI), Banzo Inferior (BI), Banzo Superior (BS) foi utilizada a técnica de reabilitação com fixação de cobrejuntas justapostas, com peças novas de 3 cm x 16 cm, de *Eucalyptus citriodora* tratado com CCA (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)



Figura 15 Técnicas de reabilitação de elementos estruturais de *Eucalyptus citriodora* da Passarela Pênsil de Piracicaba para os casos severos, com alto nível de biodeterioração em peças de vigas transversinas superiores (TS), diagonais de contraventamento (C) e montantes (M): optou-se pela técnica de substituição por peças novas de 6 cm x 16 cm, de *Eucalyptus citriodora* tratado com CCA, com propriedades físicas semelhantes a recomendadas no projeto estrutural, a fim de preservar as características originais na intervenção (Fonte: Dussarrat Brito, 2014)

Pensando-se em durabilidade no prolongamento de vida útil da estrutura, como solução em reabilitação do sistema de tabuleiro da passarela, definiu-se pela substituição de todas às peças biodeterioradas de *Eucalyptus tereticornis*, pela troca por novas peças pinus com espessura de 4 cm, classificadas dentro da classe de resistência C30 da ABNT NBR 7190:1997 (em vigor), justapostas em duas camadas cruzadas em "X", totalizando-se numa espessura aproximada do tabuleiro em 8 cm, vinculadas através da fixação de parafusos autoatarraxantes nas ligações junto às transversinas

superiores (TS) e às peças dos banzos superiores em ambas as treliças principais do sistema, conforme especificações recomendadas no projeto de reabilitação realizado no LaMEM. Vale destacar que este sistema de tabuleiro constituído por duas camadas de tábuas cruzadas contraventadas em "X", tem a função principal de garantir a eficiência da rigidez global do conjunto no sistema de contraventamento lateral da estrutura de madeira original da Passarela Pênsil de Piracicaba.



a



b

Figura 16 Técnicas de reabilitação do tabuleiro da Passarela Pênsil de Piracicaba: substituição de todas as peças *Eucalyptus tereticornis* biodeterioradas, por peças classificadas pinus C30 com espessura de 4 cm em duas camadas totalizando 8 cm de espessura, com sistema cruzado em X (Fonte: Dussarrat Brito, 2014).

5 Considerações finais

Quanto aos trabalhos e pesquisas realizadas em campo, conclui-se que em inspeções para avaliações de elementos estruturais de madeira, a metodologia da técnica de inspeção visual detalhada, realizada por inspetores especialistas na área de estruturas de madeira, tem-se demonstrado muito eficiente para a detecção de anomalias visíveis, a fim de diagnosticar manifestações patológicas, para se estimar o dano na madeira causado por agentes abióticos, como fendas, rachas, flechas; e por agentes bióticos, como brocas, cupins e fungos apodrecedores da madeira. Esta metodologia quando bem aplicada e associada ao mínimo de equipamentos manuais, como utilização de ferramentas pontiagudas para testes de puncionamento, testes de picoteamento e martelo para testes à percussão, além das sondagens qualitativas internas na madeira com o uso do Resistograph®, pode contribuir significativamente na eficiência das avaliações realizadas *in loco*.

Diante dos estudos realizados em trabalhos no laboratório LaMEM, os resultados experimentais das peças de madeira submetidas a ensaios estáticos de flexão pura, conforme a distribuição de cargas da ASTM D 198-08, se demonstraram satisfatórios na avaliação de peças de madeira de *Eucalyptus citriodora*, indicadas nas propostas de técnicas de reabilitações para as intervenções na restauração da Passarela Pênsil de Piracicaba, Brasil.

Diante do contexto, este foi um dos trabalhos de fundamental importância em pesquisas e estudos sistêmicos sobre metodologia de inspeção e técnicas reabilitação em estruturas de madeira de grande porte, realizados entre dezembro de 2011 e junho de 2014, junto ao Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

Agradecimentos

À Comissão de Pesquisa (CPq) no programa de Pós-Doutoramento no Departamento de Engenharia de Estruturas e no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, e ao CNPq pela bolsa de Doutorado e pelo apoio financeiro para realização dos trabalhos experimentais e das pesquisas de levantamento em campo, realizados na época.

Referências

- [1] Cóias, V. – "Qualificação dos profissionais e das empresas para a qualidade na reabilitação de estruturas de madeira". CIMAD 11 – 1.º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal (2011).
- [2] Dussarrat Brito, L. – *Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação*. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.
- [3] Calil Junior, C.; Rocco Lahr, F.; Dias, A. A. – "Passarela pênsil com vigas principais de madeira". In: *IEREMEM*, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.
- [4] Calil Junior, C.; Dias, A. A.; Rocco Lahr, F. A. – "A Maior Passarela Pênsil de Madeira do Hemisfério Sul". *Revista Técnica*. Editora PINI/ apoio IPT. São Paulo, Brasil, 1998.
- [5] Calil Junior, C.; Dussarrat Brito, L.; Calil Neto, C.; Icimoto, F.; Pigozzo, J. C. – *Relatório Técnico: Vistoria na Estrutura da Passarela Pênsil de Piracicaba pela Técnica de Inspeção Visual*. USP/EESC/SET/LaMEM. São Carlos, SP, Brasil, 2011.

- [6] Dussarrat Brito, L.; Calil Junior, C. – "Evaluation by visual inspection technique of the "Pedestrian Suspension Bridge at Piracicaba", Brazil". In: *ICDS12 International Conference Durable Structures: From Construction to rehabilitation*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Lisboa, 2012.
- [7] Dussarrat Brito, L.; Calil Junior, C. – "Manifestações patológicas em função da ausência de manutenções preventivas na estrutura de madeira da "Passarela Pênsil de Piracicaba", Brasil". In: *IX International Congress on Pathology and Recovery Structures*. João Pessoa, 2013a.
- [8] Calil Junior, C. et al. – *Manual de projeto e construção de pontes de madeira*. ISBN: 85-98156-19-1. Suprema, São Carlos, Brasil, 2006. Free download academic e-book: <<http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/livros/361-manual-de-projeto-e-construcao-de-pontes-de-madeira>>.
- [9] Calil Junior, C.; Dussarrat Brito, L. – *Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento*. ISBN: 978-85-8023-000-0. Departamento de Engenharia de Estruturas, Editora EESC/USP. São Carlos, Brasil, 2010 Free download academic e-book: <<http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/livros/371-manual-de-projeto-e-construcao-de-estruturas-com-pecas-rolicas-de-madeira-de-reflorestamento>>.
- [10] Dussarrat Brito, L.; Calil Junior, C. – Chapter: "Inspection and Rehabilitation of Timber Structural Elements". In: Calil Junior, C. et al. *Manual of Design and Construction of Timber Bridges*, p. 117-131. 1ed. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
- [11] ASTM D 198-08 – Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Pennsylvania, United States, 2008.
- [12] ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- [13] ABNT/CB-02 revisão ABNT NBR 7190 novembro: 2013 – Projetos de estruturas de madeira.
- [14] Dussarrat Brito, L.; Calil Junior, C. – "Uso do Resistograph® IML-RESI-F500-S em inspeções NDT para avaliações internas de elementos estruturais de madeira". In: *IX CINPAR*. João Pessoa, 2013b.
- [15] Dussarrat Brito, L.; Calil Junior, C. – "Methodology and rehabilitation techniques timber structural members of the "Piracicaba suspension footbridge". In: CLEM+CIMAD 2017, *II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madeira e II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madeira en la Construcción*. Junín, Buenos Aires, Argentina, 2017.

