

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PASSARELA ESTAIADA COM TABULEIRO DE PLACAS CURVAS DE MADEIRA LAMINADA PROTENDIDA

Everaldo Pletz

Professor do Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Londrina
Campus Universitário s/n, CEP 86055-900, Londrina, PR, Brasil, e-mail: pletz@uel.br

Francisco Antonio Rocco Lahr

Carlito Calil Jr.

Antonio Alves Dias

Professores do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo,
Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil,
e-mail: frocco@sc.usp.br; calil@sc.usp.br; dias@sc.usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta a análise experimental da primeira passarela brasileira estaiada, de madeira laminada protendida transversalmente, cujo tabuleiro é formado por placas em forma de setor de coroa circular, apoiadas apenas ao longo dos bordos retos, que, para simplificação de linguagem, aqui serão chamadas apenas de placas curvas. Estas placas de madeira de *Pinus taeda* constituem os módulos construtivos da passarela. Elas foram ensaiadas com a aplicação de cargas concentradas e uniformemente distribuídas. A detectada heterogeneidade da placa é atribuída às imperfeições geométricas e à variabilidade das propriedades mecânicas entre lâminas e dentro de cada lâmina da placa. O processo de aplicação de curvatura, a evolução da perda de curvatura e os ensaios da passarela são descritos. Os resultados da análise experimental são apresentados. A perda de curvatura é pequena e ficou demonstrado o sucesso da aplicação dessa tecnologia a placas curvas e a passarelas compostas por estas placas.

Palavras-chave: tabuleiro em placas curvas, tabuleiro em madeira laminada colada, passarela estaiada, análise experimental.

Introdução

A protensão transversal das placas de madeira laminada surgiu no Canadá, nos meados dos anos 70, como uma técnica de reparo das placas retangulares de madeira laminada pregada. Mais recentemente, novos formatos de placas de madeira laminada protendida surgiram, como, por exemplo, as placas curvas de madeira laminada. Este trabalho apresenta o estudo experimental dessas placas e da passarela estaiada executada pela primeira vez no Brasil com essa tecnologia, usando madeira de *Pinus taeda*, conforme Pletz (2003).

Materiais

A madeira utilizada para o tabuleiro e seus acessórios é de *Pinus taeda*, tratada por impregnação em autoclave

com CCA. Foram usadas lâminas de aproximadamente 5,20 m de comprimento, e seção transversal nominal medindo 5 cm × 20 cm. A madeira usada para a torre e para as duas primeiras lâminas laterais dos módulos do tabuleiro é de *Eucalyptus citriodora*. A torre é constituída por um poste com 13 m de comprimento, 55 cm de diâmetro na base e 45 cm no topo, tratado por impregnação em autoclave com CCA. Para os estais e para a protensão do tabuleiro foram usadas barras de aço com diâmetro de 15 mm, peso específico de 78 kN/m³, de alta resistência da Dywidag (ST 85-105). As barras de sustentação da torre são do mesmo aço, com 32 mm de diâmetro. As conexões e as placas de distribuição para as barras protendidas são de aço SAE 1020. Todos os elementos de aço são galvanizados.

Análise Experimental

As lâminas de madeira usadas na fabricação dos módulos foram caracterizadas a partir dos ensaios de flexão estática. As placas dos módulos da passarela foram ensaiadas à flexão, após levantamento minucioso das características geométricas das lâminas, pois a variabilidade das suas dimensões, além do desalinhamento longitudinal, faz com que os módulos não sejam perfeitamente planos nem prismáticos. As placas foram biapoiadas e receberam a aplicação de carregamento na seção transversal central, carga concentrada no centro e nos bordos da mesma, bem como carregamento uniformemente distribuído ao longo dessa seção. Procurou-se determinar a rigidez dessas placas, tendo-se como ponto de partida as características individuais de suas lâminas componentes.

Depois de concluída a montagem da passarela, foi realizada uma série de ensaios da mesma. Ela foi submetida a carregamentos, enchendo-se de água piscinas de material plástico dispostas ao longo de seu comprimento, distribuídas conforme a situação desejada de carregamento. Procurou-se determinar os deslocamentos sofridos pelo tabuleiro, topo da torre e blocos de fundação, os esforços nos estais e nos cabos de sustentação do mastro, as forças de protensão de um módulo do tabuleiro, assim como as reações de apoio.

Resultados e Discussões

Ensaio das lâminas

Foram ensaiadas 33 lâminas de *Pinus taeda*, dispostas em duas posições, segundo a maior e a menor inércia, conforme prescreve a norma Projeto de Estruturas de Madeira – NBR 7190-97 (ABNT, 1996). A Figura 1 apresenta a variabilidade do Módulo de Elasticidade ao longo da seção transversal central, segundo as duas direções, cujas diferenças devem ser atribuídas principalmente ao efeito diferenciado da presença de nós segundo as duas direções. Deve-se registrar que a heterogeneidade da madeira e a variabilidade da geometria de lâmina para lâmina e

ao longo do próprio comprimento também contribuíram para construir essas diferenças.

Variabilidade dimensional das placas do tabuleiro

O desbitolamento das lâminas e o fato de não serem prismáticas são os dois fatores responsáveis pelas irregularidades das superfícies das placas de madeira laminada protendida. A Figura 2 ilustra o problema. Pode-se constatar que o momento de inércia varia de seção para seção e que em uma dada seção transversal há também a variabilidade da contribuição de cada lâmina para o seu momento de inércia.

Frisa-se que há variação da posição da linha neutra de seção para seção, e isso faz com que o conjunto de linhas neutras não consiga formar uma superfície plana, embora esse fato tenha proporções pequenas, a ponto de poder ser desprezado.

Ensaio à flexão das placas do tabuleiro

Foram ensaiadas à flexão quatro placas do tabuleiro, aplicando-se forças uniformemente distribuídas ao longo de toda a seção transversal central. As placas correspondentes aos módulos 2, 3, 4 e 5 possuem 2 m de largura e vãos, respectivamente, de 391 cm, 338 cm, 290 cm e 338 cm. A espessura nominal dessas placas foi de 20 cm. Estas placas, na forma de setor de coroa circular, possuíam apenas apoios simples ao longo dos bordos retos, enquanto os bordos curvos permaneceram livres. O momento de inércia de cada placa foi calculado levando-se em conta a irregularidade superficial.

A Figura 4 e a Tabela 1 apresentam parte dos resultados obtidos. A média dos valores do MOE de todas as lâminas da Placa 1, segundo a maior inércia, foi de 575 kN/cm², valor praticamente idêntico ao MOE da Placa 1 em sua seção central, 589 kN/cm². Esses resultados demonstram que o sistema construtivo permite que o Módulo de Elasticidade dessa placa possa ser avaliado pela média dos valores dos MOE das lâminas componentes.

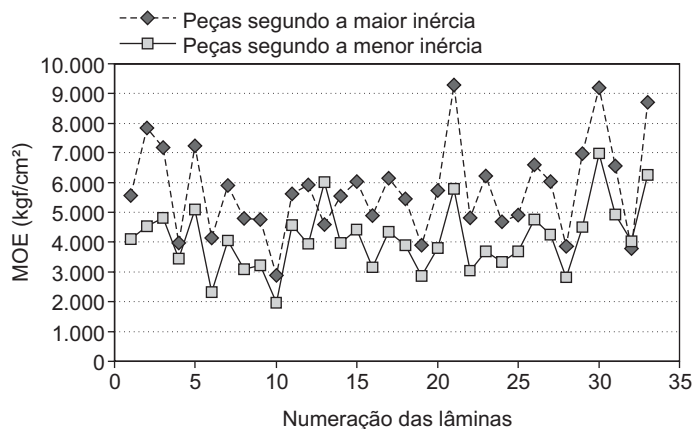


Figura 1 Variabilidade do módulo de elasticidade das lâminas de *Pinus taeda*.

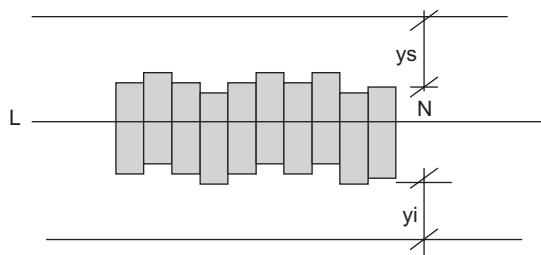


Figura 2 Corte esquemático da seção transversal das placas.

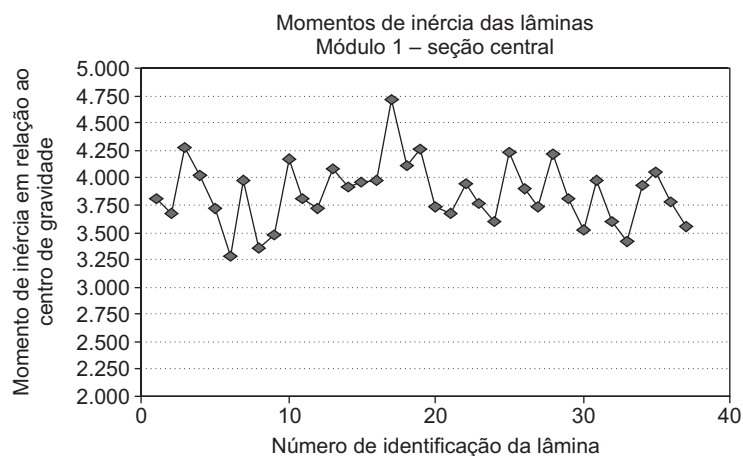


Figura 3 Variabilidade do módulo de elasticidade das lâminas de *Pinus taeda* ao longo da seção transversal central do primeiro módulo.

Tabela 1 Módulo de elasticidade da madeira de *Pinus taeda* das placas do tabuleiro.

Placa	Rigidez (daN/cm)	Momento de inércia (cm ⁴)	Vão (cm)	L/h	Fator F	Módulo de elasticidade (kN/cm ²)
1	6429	135800	391	19,5	1,003	589
2	11262	136500	338	17	1,02	667
3	14492	129000	290	14,5	1,04	569
4	12538	134200	338	17	1,02	754

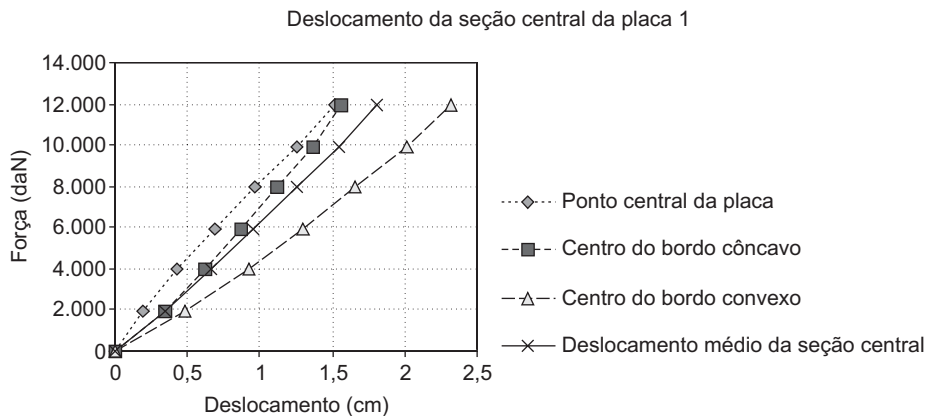


Figura 4 Gráficos dos deslocamentos da seção transversal central da placa 1.

Perda de curvatura

O encurvamento das placas é realizado através de uma força horizontal aplicada no meio do bordo côncavo, com as placas biapoiciadas horizontalmente nas extremidades de seus bordos convexos. Após a aplicação desta força é realizada a protensão das barras de aço de alta resistência introduzidas ao longo de furos radiais espaçados, localizados nos seus planos médios. Com a perda de protensão ao longo do tempo, ocorre gradativa, porém, pequena, perda de curvatura decorrente da paulatina degradação do atrito na direção tangencial entre as lâminas, responsável pela solidarização. Essa perda ao longo do tempo não é uniforme por causa das variações climáticas. Os resultados obtidos demonstram que, após seis meses de fabricação, há perda de protensão apreciável, em torno de 60%, e que permanece praticamente estabilizada até completar 21 meses. Por outro lado, essa perda foi reduzida para cerca de 20% no caso da placa que sofreu reprotensão após cinco meses. Quanto à curvatura das placas que não foram reprotendidas, observou-se que os seus ângulos de curvatura diminuíram cerca de 50% do valor inicial. A redução da curvatura da placa que sofreu reprotensão foi de aproximadamente 25%. Não obstante o esboço de uma curva relacionando a perda de curvatura com a perda de protensão, apresentado na Figura 5, mais estudos precisam ser realizados para que se possa definir essa relação. Esses resultados são particulares às condições em que essas placas foram fabricadas.

Os seguintes fatores determinam a curvatura das placas: A) a resistência das barras de protensão ao cisalhamento nas interfaces das lâminas. Basta introduzir essas barras nos furos das lâminas para garantir pequena curvatura, de cerca de um grau. B) A ocorrência da

deformação lenta, em virtude do caráter permanente das forças atuantes para a manutenção da curvatura dessas placas, faz com que uma parcela da curvatura se mantenha mesmo com a retirada dos outros fatores que a ocasionam, cerca de quatro graus. C) A relação entre o raio de curvatura da placa e a espessura das lâminas. Galaz (1979) propõe que esta seja superior a 200. D) A frequência das juntas de topo. Segundo Ritter (1992), elas diminuem a rigidez do conjunto e, portanto, devem contribuir para a perda de curvatura, embora não se tenha executado nenhuma placa com lâminas emendadas.

A Tabela 2 apresenta dados relativos ao processo de aplicação da força de encurvamento dos módulos da passarela, que é menor para os módulos feitos com as lâminas provenientes da desmontagem das placas curvas de 21 meses de idade e maior para as placas 5 e 7 fabricadas com lâminas novas. Observa-se que a retração transversal provocada pela protensão foi da ordem de 1,5% nos módulos novos 5 e 7 e da ordem de 0,5% nos demais.

Lembrando que o valor médio do módulo de elasticidade das lâminas vale aproximadamente 4.600 MPa e que o momento de inércia teórico do conjunto de lâminas apenas justapostas vale 7.900 cm⁴. Verifica-se que o produto desses dois valores é bem menor do que os resultados apresentados na tabela, pois a protensão introduziu um ganho de rigidez nesse sentido, e que o módulo de elasticidade longitudinal da madeira correspondente a cada placa, para esse mesmo sentido, varia de módulo para módulo.

Observou-se que a perda de curvatura da passarela foi de aproximadamente 10% nos seus primeiros cinco meses, valor bem menor do que o observado nas placas isoladas. Isso deve ser atribuído à presença dos perfis de interligação dos módulos.

A média de perda de protensão transversal no módulo instrumentado foi de aproximadamente 22% nos primeiros cinco meses. Inicialmente, o tabuleiro se movimentou com a retirada do escoramento e se acomodou nos apoios em suas extremidades, quanto a deformações e tensões. Depois sofreu pequena perda de curvatura, capaz de levar a extremidade apoiada sobre o bloco de concreto armado a se movimentar na direção radial, 2 cm, para a aplicação do carregamento uniformemente distribuído sobre a passarela toda, de 1 kN/m² e 1,2 cm para o carregamento de 2,3 kN/m². Na direção tangencial observaram-se movimentos no sentido da passarela para o bloco de apoio, de 1,5 cm e 0,3 cm, respectivamente. Uma vez

que os deslocamentos observados para o carregamento maior são menores do que os provocados pelo carregamento menor, pode-se atribuir esses deslocamentos também a outros fatores que não o carregamento, como acomodação do sistema, não linearidades de contato, variações de temperatura e de umidade e ação de ventos. Retirados esses carregamentos, a passarela ocupava a posição relativa ao bloco de apoio, dada pelas variáveis identificadas na Figura 7 e indicadas na Tabela 3. O acompanhamento do tabuleiro nos seus primeiros 140 dias tem revelado a ocorrência de pequenos deslocamentos de sua extremidade, correspondentes a uma perda muito pequena de curvatura do tabuleiro.

Tabela 2 Dados do processo de aplicação de curvatura nas placas do tabuleiro.

Placa	Força (kN)	Flecha original (cm)	Flecha final (cm)	Largura inicial (cm)	Largura final (cm)	Varição flecha (cm)	Varição largura	E.I _{real} (kN.cm ²)
1	50	4	10	200,5	199,6	6	0,45%	21701389
2	80	4,3	9,8	196	195	5,5	0,51%	37878788
3	57	4,6	10	199,5	198,4	5,4	0,55%	27488426
5	136	1	7,8	199	196	6,8	1,51%	52083333
6	32	6	11,4	197	196	5,4	0,51%	15432099
7	99	2,5	11,2	203,5	200,5	8,7	1,47%	29633621
Média	76	4	10	199	198	6	0,71%	31277557

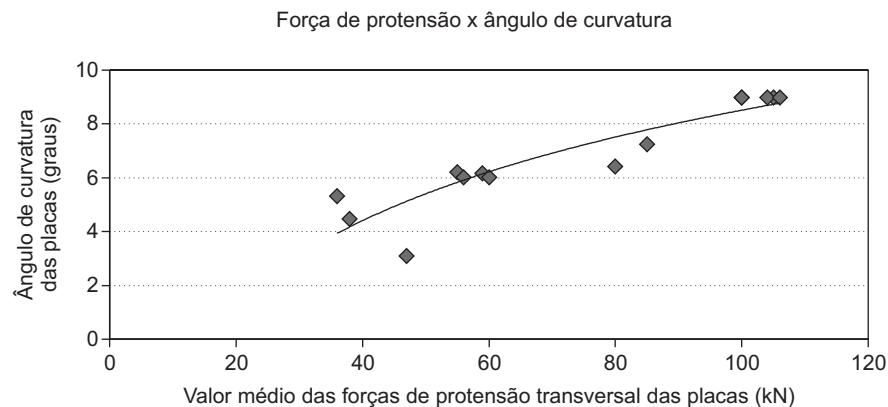


Figura 5 Relação entre a força de protensão e o ângulo de curvatura.

O tabuleiro apresenta diversos mecanismos de manutenção da curvatura, o atrito nos apoios, a presença do sistema de conexão dos módulos que funciona como um engastamento das placas para flexão das placas no plano horizontal, a utilização de lâminas que possuem curvatura residual proveniente da deformação lenta e a ação contrária dos esforços de compressão que atuam no tabuleiro (que varia em função do carregamento). Como medida de uma eventual restauração da curvatura original, há os recursos de reprotensão do tabuleiro e da aplicação de um esforço horizontal na extremidade do tabuleiro.

Ensaio da passarela

A importância dos ensaios de campo é fundamental para a aferição dos modelos matemáticos (Wipe *et al.*, 1999). Primeiramente, a passarela foi carregada ao longo de toda a sua extensão em cinco etapas: 1 kN/m², 1,7 kN/m², 2,3 kN/m², 2,8 kN/m² e 3,3 kN/m². Esse carregamento de 3,3 kN/m² corresponde à situação das piscinas plásticas cheias de água, usadas no ensaio. Posteriormente, ela foi carregada apenas nos dois tramos mais próximos de cada extremidade e finalmente apenas nos três tramos centrais. Buscou-se maximizar a flexocompressão do tabuleiro em um carregamento e noutro buscou-se observar a rigidez à torção. Em ambos os casos foram aplicados carregamentos de 2,3 kN/m². As leituras dos esforços no estal 9 foram perdidas após acidente com piscinas vazias que voaram sob a ação de ventos durante uma tempestade. A numeração par dos estais corresponde ao lado convexo e a numeração ímpar, ao lado côncavo. O estal de sustentação do mastro disposto mais próximo da direção radial corresponde ao número 18, enquanto o outro cabo, ao número 17. São dois os apoios junto ao prédio do SET-LaMEM, na horizontal e direção tangencial da passarela, um posicionado no seu lado convexo, que corresponde ao número 16, e outro disposto no lado côncavo, que corresponde ao número

15. O apoio junto ao prédio do SET-LaMEM na horizontal e na direção transversal à passarela, junto ao lado côncavo, corresponde ao número 13.

Os deslocamentos da passarela ao longo de seus dois bordos, em pontos de leitura identificados pela sua distância ao prédio do SET-LaMEM, para ensaio com carregamento uniformemente distribuído de 1,7 kN/m², ao longo de toda a passarela, estão apresentados na Figura 8. Ao contrário das placas curvas que possuem o bordo convexo mais deformável quando biapoiadas sobre apoios rígidos, o tabuleiro da passarela não apresenta essa mesma relação de deformabilidade entre os bordos curvos. Seus apoios, que não são rígidos, a geometria de distribuição do estaiamento e a torção presente no tabuleiro são as causas desse comportamento. Constata-se que as seções transversais correspondentes às posições 5 m e 25 m (correspondem aos perfis metálicos de ligação de módulos) apresentam diferenças mínimas de deslocamentos entre os pontos correspondentes aos dois bordos, contrariamente às seções transversais de apoio, vizinhas. Isso, por sua vez, implica dizer que os módulos 1, 2, 5 e 6 apresentam pequena torção. Na Tabela 4 fica evidenciada a linearidade da resposta estrutural. A Tabela 5 apresenta os esforços solicitantes internos dos estais e as reações de apoio para essas duas situações de carregamento, juntamente com os resultados do ensaio da passarela totalmente carregada. Esses resultados dos ensaios são apresentados juntamente com os resultados da simulação numérica realizada com o pacote de análise estrutural ANSYS 54. Não foram realizadas leituras de deslocamentos para esses dois casos. Constata-se que o bordo côncavo é mais rígido do que o convexo, que para o os extremos carregados os módulos centrais praticamente não sofrem torção e que para os módulos centrais carregados o tabuleiro apresenta torção menos pronunciada nos centrais e maior nos extremos. Esses resultados são compatíveis com os modelos teóricos de placas curvas.

Tabela 3 Valores dos deslocamentos relativos da extremidade da passarela (cm).

	5/7/2002	24/9/2002	24/11/2002
a	54,5	53	51,5
b	90	91	92
c	95	93	94
d	102	103	103

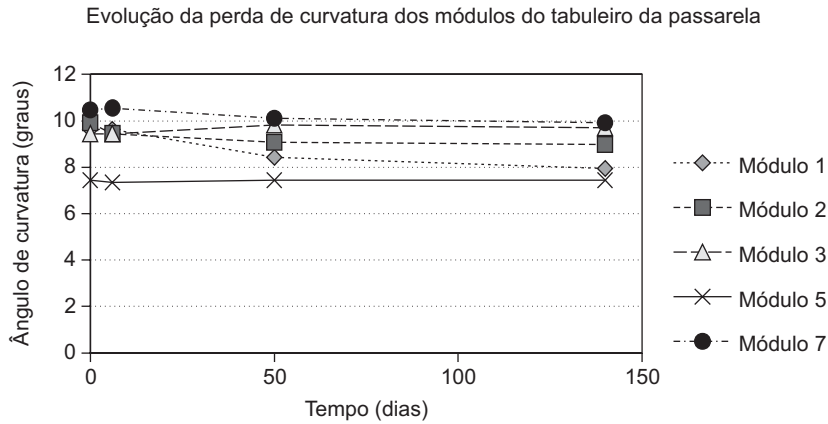


Figura 6 Perda de curvatura dos módulos do tabuleiro.

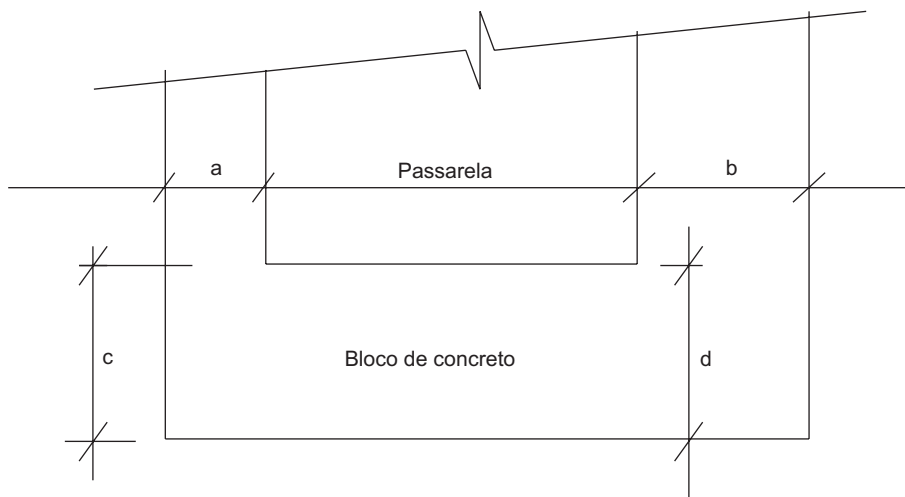


Figura 7 Desenho esquemático do apoio da passarela.

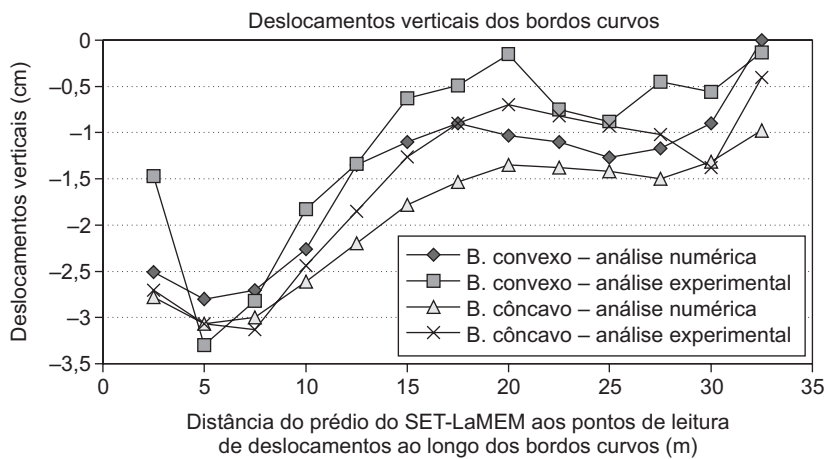


Figura 8 Deslocamentos do tabuleiro da passarela para carregamento uniformemente distribuído de 1,7 kN/m².

Tabela 4 Esforços nos estais e reações de apoio para carregamento uniformemente distribuído ao longo de toda a passarela (daN).

		Sobrecarga kN/m ²								
		0	1	1,7	2,3	2,8	3,3	2,8	2,3	0
E S T A I S	1	0	433	588	822	1061	1166	787	568	-50
	2	0	302	750	1015	1234	1525	878	603	-40
	3	0	914	1401	1770	1919	2275	1782	1439	-40
	4	0	1102	1603	2004	2142	2435	1988	1603	-50
	5	0	679	999	1230	1598	1889	1452	1103	-50
	6	0	797	1130	1386	1609	1816	1283	1092	-80
	7	0	700	1002	1107	1243	1505	1152	859	-150
	8	0	781	1016	1210	1411	1618	1151	857	-80
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	1036	1204	1791	2160	2983	2427	1924	5
	11	0	237	444	755	1007	1250	819	592	-5
	12	0	641	868	1182	1323	1483	1082	842	10
A P O I O	13	0	-29	-67	-79	-79	-75	-67	-57	-5
	15	0	-73	-147	-220	-284	-315	-355	-367	-5
	16	0	-83	-184	-221	-331	-419	-248	-165	5
	17	0	4411	7421	9523	10141	11972	8740	6019	50
	18	0	2772	4732	5985	7224	8635	5488	4620	60

Tabela 5 Variação dos esforços nos estais e reações de apoio.

		Sobrecarga kN/m ²					
		2,3 kNm ² nos 3 tramos centrais		2,3 kNm ² nos 4 tramos extremos		2,3 kNm ² na passarela toda	
		ANSYS	Exp.	ANSYS	Exp.	ANSYS	Exp.
E S T A I S	1	-293	-278	1206	1080	913	822
	2	-261	-245	1278	1280	1018	1015
	3	635	685	1125	1055	1760	1770
	4	676	701	1140	1275	1816	2004
	5	1333	1480	33	85	1366	1230
	6	1308	1395	24	75	1332	1386
	7	1251	1100	-175	-133	1076	1107
	8	1132	1050	-44	-75	1088	1210
	9	551	0	965	0	1516	0
	10	656	580	1207	1125	1863	1791
	11	-5	0	795	805	790	755
	12	136	115	1186	1055	1322	1182
A P O I O	13	-123	-100	88	25	-48	-79
	15	251	220	-636	-400	-205	-220
	16	-182	-150	-113	-50	-278	-221
	17	4024	3970	5338	4950	8809	9523
	18	2958	2850	3252	3650	6003	5985

Conclusões

Após realização do projeto, construção, experimentação e respectiva análise dos resultados da passarela estaiada usando madeira laminada protendida, a primeira do gênero a ser construída no Brasil, podem ser relacionadas as seguintes conclusões:

1. O momento de inércia efetivo é maior do que aquele calculado com as dimensões nominais das lâminas da placa.
2. O Módulo de Elasticidade Longitudinal da placa apresenta valor igual ao valor médio das lâminas componentes das placas.
3. A protensão radial confere às placas um ganho de rigidez para carregamentos que atuem na direção radial e estejam contidos nos seus planos médios. Ela viabilizou a manutenção da curvatura aplicada. Sua perda de protensão influenciou na perda de curvatura.
4. A perda de curvatura é pequena ao longo do tempo.
5. Ficou evidenciada a viabilidade técnica da construção de passarelas estaiadas usando tabuleiros de madeira laminada protendida, no Brasil.
6. A curvatura da passarela depende de vários fatores: força de protensão, espessura das lâminas, raio de curvatura da placa, tipo de madeira, dos apoios e do sistema de ligação dos módulos. Por isso, a perda da protensão não se traduz na mesma proporção em perda da curvatura da placa.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES e à FAPESP pelo apoio financeiro, que tornou possível a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190*: Projeto de estruturas em madeira: procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
- GALAZ, V. A. P. *Manual de madeira laminada*. Chile: Departamento de Construcciones em Madera/Instituto Forestal, 1979.
- PLETZ, E. *Passarela estaiada com tabuleiro de madeira laminada protendida em módulos curvos*. 2003. 164f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- RITTER, M. A. Design of longitudinal stress-laminated deck superstructures. In: _____. *Timber bridges – design, construction, inspection, and maintenance*. Madison: Engineering Staff, 1992. Cap. 9, p. 9.1-9.59. (USDA-FS-FPL, EM-7700-8).
- WIPF, T. J.; RITTER, M. A.; WOOD, D. L. Dynamic evaluation and testing of timber highway bridges. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 1999, Rotorua. *Proceedings...* Rotorua: Forest Research Institute, mar. 1999. p. 333-340.