

## ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE VIGAS COLADAS DE MADEIRA COM DIFERENTES SEÇÕES TRANSVERSAIS

## COMPARATIVE ANALYSIS OF GLUED-LAMINATED TIMBER BEAMS PERFORMANCE WITH DIFFERENT CROSS SECTIONS

Ming C. Hsu <sup>(1)</sup>, Matheus I. Brandão <sup>(2)</sup>, Alfredo Petrauski <sup>(3)</sup>, Sandra M. F. C. Petrauski <sup>(4)</sup>, Igor Castoldi <sup>(5)</sup> (A)

(1) Acadêmico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil

(2) Acadêmico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil

(3) Dr., Prof., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil

(4) Dr.<sup>a</sup>, Prof.<sup>a</sup>, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil

(5) Acadêmico, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil

Endereço de contato: icastoldi@hotmail.com; (A) Apresentador

**Código de identificação: T4-26**

### Resumo

Este trabalho apresenta o comportamento mecânico de três séries de vigas coladas com madeira de *Pinus sp.* e adesivo estrutural resorcinol-formaldeído. Foram confeccionadas e testadas doze vigas, sendo quatro para cada série. Duas séries com seção transversal tipo I e a terceira, de seção retangular, com base 6 cm e altura 12 cm, como referência. As vigas foram executadas com tábuas comerciais de 2,5 cm de espessura. Na primeira série de vigas I, trabalhou-se com a mesma área de seção transversal (72,0 cm<sup>2</sup>) e momento de inércia cerca de 4,5 vezes maior que a inércia da referência. Na segunda série, a área foi diminuída em aproximadamente 22%, porém com inércia da ordem de 1,9 vezes maior em relação à referência. Previamente à execução, a madeira foi selecionada pela densidade e por ensaio de flexão não destrutivo. Assim, destinaram-se lâminas de qualidade similar para todas as séries. Conduziram-se os ensaios individualmente em laje de reação com dois cilindros hidráulicos, dispostos simetricamente para aplicação das forças e, portanto, com trecho sob flexão pura. As cargas médias de ruptura foram 36,08 kN; 28,64 kN; e 27,55 kN, respectivamente, para as vigas I de maior inércia, menor inércia e retangulares. A maior carga de ruptura (52,81 kN) foi em uma viga I de maior inércia com madeira de melhor qualidade. As vigas I de maior e menor inércia foram, respectivamente, cerca de 2,6 e 1,5 vezes mais rígidas que as retangulares. Ainda, as vigas I, foram muito mais sensíveis à qualidade da madeira utilizada.

**Palavras chave:** madeira laminada colada; vigas; seção transversal; resistência; rigidez

### Abstract

*This paper presents the mechanical behavior of three series of glued-laminated timber beams with Pinus sp. wood and structural resorcinol-formaldehyde adhesive. Twelve beams were made and tested, four for each series. Two series with I-type cross-section and a third one, of rectangular section, with 6 cm width and 12 cm height, for reference. The beams were made with 2.5 cm thick commercial boards. In the first series of I-beams, the reference cross section area (72.0 cm<sup>2</sup>) was used, but with a moment of inertia about 4.5 times greater than the reference. In the second series, the area was decreased by approximately 22%, but with inertia of 1.9 times greater than the reference. Prior to the execution, the wood was selected by density and by non-destructive bending tests. Thereby, sheets of similar quality were used for all series. The tests were conducted individually on a concrete flexural device with two hydraulic cylinders, arranged symmetrically for the forces application and, therefore, under pure bending. The average maximum loads were 36.08 kN; 28.64 kN; and 27.55 kN, respectively, for the I-beams of greater inertia, lesser inertia and rectangular. The highest rupture load obtained (52.81 kN) was in a I-beam of greater inertia with better-quality wood. The I-beams of greater and lesser inertia were, respectively, about 2.6 and 1.5 times more rigid than the rectangular ones. In addition, the I-beams were much more sensitive to the quality of the wood used.*

**Keywords:** glued-laminated timber; beams; cross section; bending strength; bending rigidity

## 1. INTRODUÇÃO

Em um contexto atual, o emprego da madeira como elemento estrutural na construção civil ainda é pouco difundido no Brasil. Isto se deve à uma série de razões. Após o fim da disponibilidade de espécies de uso consagrado e a consequente elevação de custos, houve um considerável descrédito em relação às espécies aptas ao reflorestamento. Isto é compreensível em parte, haja vista, por exemplo, a necessidade de maior rigor técnico no planejamento, plantio, corte, secagem e processamento do gênero *Eucalyptus sp.* Acrescenta-se a esta realidade uma perda significativa por falta de continuidade na formação de profissionais conhecedores das técnicas do adequado uso e processamento do material. Também, nos ambientes de formação de engenheiros a carga horária destinada ao material, via de regra, é inferior àquela dispensada ao aço e concreto. Embora o esforço de muitas empresas, instituições, profissionais e pesquisadores viabilizarem momentos tais como o EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, ainda há muito que ser conquistado e reconquistado no sentido de devolver a madeira seu lugar no rol de material estrutural viável e ecologicamente correto.

Já em outros países, como Estados Unidos e Japão, tal material tem seu uso disseminado, pois as suas vantagens e técnicas corretas de projeto e execução são bastante difundidas. Além disso, a madeira é um material renovável e, de forma oposta ao cimento e aço que geram altos níveis de poluentes na sua produção, a madeira armazena carbono no seu crescimento, tendo-se grande contribuição no sentido do desenvolvimento sustentável.

A tradicional madeira serrada apresenta hoje nítidas limitações quanto às dimensões disponíveis devido aos processos de extração, transporte e a presença de defeitos característicos do próprio material [1]. A tecnologia da madeira laminada colada (MLC), relativamente nova no Brasil, permite a execução de peças estruturais que podem superar o desempenho mecânico das metodologias convencionais e possibilitam vão superiores aos admissíveis com peças maciças.

Além disso, essa tecnologia permite a seleção de madeira de melhor qualidade para aplicação em regiões mais solicitadas da estrutura, destinando materiais de qualidade inferior em regiões em que as tensões exigidas são menores. Assim sendo, são obtidas peças com propriedades superiores à madeira maciça, com economia de material.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar comparativamente o desempenho de vigas coladas de madeira de *Pinus sp.* com resina resorcinol-formaldeídica de duas seções transversais tipo I, supostamente vantajosas em relação a uma seção retangular de referência. Foram mensurados e avaliados dados de carga de ruptura e flechas das vigas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As vigas de madeira são feitas em diversas tipologias: vigas de madeira roliça, vigas de madeira serrada, vigas de madeira laminada colada, vigas compostas de peças maciças por entarugamento [2].

As vigas compostas são formadas pela união de peças de madeira com dimensões comerciais [3]. Tais vigas apresentam vasta aplicação como material estrutural e admitem inúmeras formas de composição, sendo a MLC de grande destaque para confecção de peças justapostas com seção T, I ou caixão [4].

As vigas de seção I são peças estruturais otimizadas em relação à quantidade de madeira utilizada na sua fabricação, quando comparada a peças de seção maciça. Por trabalharem basicamente à flexão, as tensões normais atuam nas extremidades e, portanto, a seção transversal I aperfeiçoa o uso de material, tornando estas tão resistentes quanto às vigas maciças, apresentando um peso e uso de matéria prima inferior [5].

As vigas de seção I apresentam diversas vantagens, dentre elas a rapidez na montagem, solução econômica, utilização de peças de dimensões reduzidas e a possibilidade de serem feitas aberturas

na alma para passagem de tubulações [6]. No entanto, no Brasil, as vigas I ainda não são largamente utilizadas na indústria devido à falta de normalização específica, falta de informações tecnológicas e falta de tradição no uso de compostos de madeira para fins estruturais [7].

Complementarmente, destaca-se que as uniões adesivadas são consideradas rígidas por não proporcionarem deslizamento relativo entre as peças componentes, e desta forma, é permitido a utilização do momento de inércia integral da seção transversal pela atual norma brasileira de estruturas de madeira (ABNT NBR 7190:1997), não sendo necessário aplicar o coeficiente de redução preconizado para seções compostas pregadas ou parafusadas [8].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todo o experimento foi conduzido nos laboratórios do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel. A madeira utilizada foi o *Pinus sp.* adquirido na forma de tábuas com seção transversal aproximada de 2,5 x 28 cm e comprimento de 3 m. Na confecção das vigas, utilizou-se o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS 216 M, com o pó endurecedor FM-60m.

Previamente à confecção das vigas, as tábuas do lote de madeira foram selecionadas e as peças que continham defeitos graves como rachaduras, fendilhamentos, gretas, etc. foram excluídas da pesquisa. Os defeitos do tipo nós foram aceitos nas peças, desde que não representassem influência negativa no desempenho das mesmas. Não foi realizado mapeamento dos mesmos nas 144 tábuas utilizadas para a etapa experimental, porém, os nós que ativamente impactaram o desempenho das vigas foram citados e analisados na seção de resultados para cada viga ensaiada.

A Figura 1 apresenta, da esquerda para a direita, as vigas compostas I de maior inércia, I de menor inércia e retangular utilizadas.

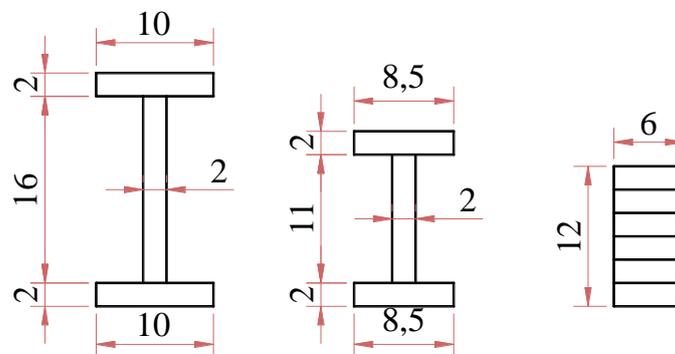


Figura 1: Seções transversais

As principais propriedades geométricas das seções estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Áreas de seção transversal e momentos de inércia das soluções estudadas

Seção	Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>XG</sub> (cm <sup>4</sup> )
I maior	72,00	3.936,00
I menor	56,00	1.670,00
Retangular	72,00	864,00

Foram confeccionadas quatro vigas para cada uma das três seções transversais apresentadas, totalizando doze vigas. A seção I maior foi adotada no sentido da maximização do momento de inércia com a mesma área da referência, enquanto a seção I menor foi adotada no sentido da minimização da área transversal e conseqüente economia de material.

As tábuas de madeira utilizadas na confecção das vigas foram selecionadas e caracterizadas quanto à densidade aparente e ao módulo de elasticidade por meio de ensaio não-destrutivo à flexão. Tábuas de módulos de elasticidade semelhantes foram utilizadas para compor as vigas em cada seção transversal. Deste modo, minimizou-se o favorecimento de partes da seção de cada uma das vigas, além dos grupos de seções transversais entre si.

Todas as lâminas de *Pinus sp.* foram processadas para obtenção de superfícies limpas e planas nas dimensões finais planejadas.

A colagem das peças foi realizada sob temperaturas ambiente entre 20 °C e 28 °C e com consumo de adesivo de 300,00 g/m<sup>2</sup> na proporção 5:1 (resina:catalizador). Todas as vigas foram prensadas pelo período mínimo de 24 horas após a aplicação do adesivo. O ensaio mecânico foi realizado após 7 dias de cura das vigas.

Para a seção I de maior inércia, devido à grande altura da alma, foram utilizados enrijecedores perpendiculares ao eixo da viga, com espaçamento máximo de duas vezes a altura total da viga, conforme preconizado por norma [8].

As vigas, com 2 m de extensão, foram testadas biapoiadas nos extremos, em laje de reação de concreto, com dois pontos de aplicação de cargas concentradas e simétricas a 30 cm do centro das vigas. A geometria do ensaio permitiu a obtenção de um trecho sob flexão pura no centro do vão.

Para obtenção de dados, além dos carregamentos indicados pelas células de leitura das forças aplicadas pelos cilindros hidráulicos, foi instalado um relógio comparador, com resolução de centésimos de milímetros, para acompanhamento das flechas na região central do vão.

Para não haver comprometimento do equipamento de medição das flechas, este foi removido quando a ruptura estava eminente. As cargas foram aplicadas de forma crescente até a ruptura das vigas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade aparente média do lote de madeira de *Pinus sp.* utilizada foi de 0,630 g/cm<sup>3</sup> com desvio padrão de 0,087 g/cm<sup>3</sup>.

A Tabela 2 apresenta as características médias das vigas quanto ao módulo de elasticidade das tábuas que a compuseram. Como indicado, os exemplares nominados com números menores foram confeccionados com lâminas de maior rigidez e maior qualidade.

Tabela 2: Características médias das vigas

Viga	$E_{I\text{ maior}}$ (MPa)	$E_{I\text{ menor}}$ (MPa)	$E_{\text{Retangular}}$ (MPa)
1	13.225,41	13.150,4	17.257,04
2	11.429,54	11.420,9	11.030,12
3	9.461,40	9.448,02	8.508,19
4	5.649,52	5.747,67	5.837,25

### 4.1. Resistência

Seguindo os critérios da ABNT NBR 7190:1997, foram calculadas as cargas máximas de projeto e as cargas teóricas de ruptura para as seções transversais ensaiadas [8]. Os valores teóricos foram comparados aos valores reais de ruptura obtidos durante os testes para cada viga, conforme apresentado na Tabela 3.

As vigas I de maior inércia apresentaram resistência média cerca de 31% superior às vigas retangulares de referência. As vigas I de menor inércia apresentaram resistência média apenas 4% superior às vigas retangulares, porém, com seção transversal que economiza 22% de material.

Todas as seções transversais estudadas apresentaram resistência 4 vezes superior à carga máxima de projeto, em média.

Tabela 3: Cargas experimentais de ruptura, máximas de projeto e teóricas de ruptura

Viga	Carga real de ruptura (kN)	Carga máxima de projeto (kN)	Carga teórica de ruptura (kN)	
I maior	1	52,81		
	2	20,97		
	3	38,30	8,85	38,71
	4	32,22		
Média	36,08			
I menor	1	33,98		
	2	29,00		
	3	32,08	6,50	25,44
	4	19,49		
Média	28,64			
Retangular	1	37,70		
	2	32,69		
	3	28,35	4,39	16,46
	4	11,44		
Média	27,55			

A maior carga de ruptura geral observada foi em uma seção I de maior inércia com madeira de maior módulo de elasticidade e melhor qualidade. Apesar de sua ruína ter se dado à tração na mesa inferior, a ruptura teve início na compressão, por esmagamento do respectivo bordo. O esmagamento ocorreu sob a região de aplicação de carga, onde também se encontrava um nó, que pode ter facilitado o início da ruptura. A Figura 2 apresenta a viga rompida.



Figura 2: Viga I de maior inércia e melhor qualidade da madeira

A viga I de maior inércia número 2 apresentou um valor de resistência extremamente baixa dentre sua série, tal situação não era analiticamente esperada, haja vista que esta era a viga de segunda melhor qualidade do grupo, de acordo com a caracterização realizada pelo ensaio de flexão. Sua ruína ocorreu por tração na mesa inferior. A ruptura teve início em um nó de grandes

dimensões localizado entre o apoio e o ponto de aplicação de carga mais próximo. O nó promoveu descontinuidade das fibras por toda sua seção, o que pode explicar o baixo desempenho desta viga.

Como esperado, a maior e menor carga observada na seção I de menor inércia ocorreu na viga de melhor e pior qualidade, respectivamente. Para a maior carga, a ruptura da viga ocorreu por tração no bordo inferior próximo a um nó, a qual se propagou para a alma. Para a menor carga, a ruptura teve início em pequenos nós presentes na porção inferior da alma, propagando-se até a mesa superior, onde a ruptura se deu sob um ponto de aplicação de carga, com presença de um nó de pequenas dimensões.

A menor carga de ruptura geral ocorreu na viga retangular de referência com madeira de qualidade inferior. A ruptura foi iniciada na tração, onde a fissuração percorreu as tábuas com maior presença de defeitos. Apesar de a lâmina superior comprimida apresentar um nó de grandes dimensões, este não pareceu ter influenciado na resistência.

As vigas I de maior inércia foram as únicas a apresentarem valor médio de ruptura significativamente inferior à carga teórica calculada pela norma brasileira, destacando que os defeitos das tábuas utilizadas pareceram influenciar mais ativamente a resistência de seções transversais mais esbeltas.

#### 4.2. Rigidez

O limite de flecha admissível foi calculado em 1 cm para a condição menos rigorosa da norma brasileira e em 0,57 cm para a condição mais rigorosa [8]. A flecha teórica foi calculada para cada seção transversal nas condições ensaiadas em laboratório [9].

As vigas I maior, I menor e retangular atingiram, em média, o limite de flecha mais rigoroso após carregamentos de 9,8 kN, 5,4 kN e 3,7 kN, respectivamente. Para a condição menos rigorosa de flecha, os carregamentos médios foram 17,2 kN, 9,5 kN e 6,5 kN, respectivamente, cargas acima das dimensionadas em projeto.

A Figura 3 apresenta o gráfico de carga x deformação das vigas ensaiadas I de menor inércia, juntamente com a flecha teórica calculada e carga máxima de projeto.

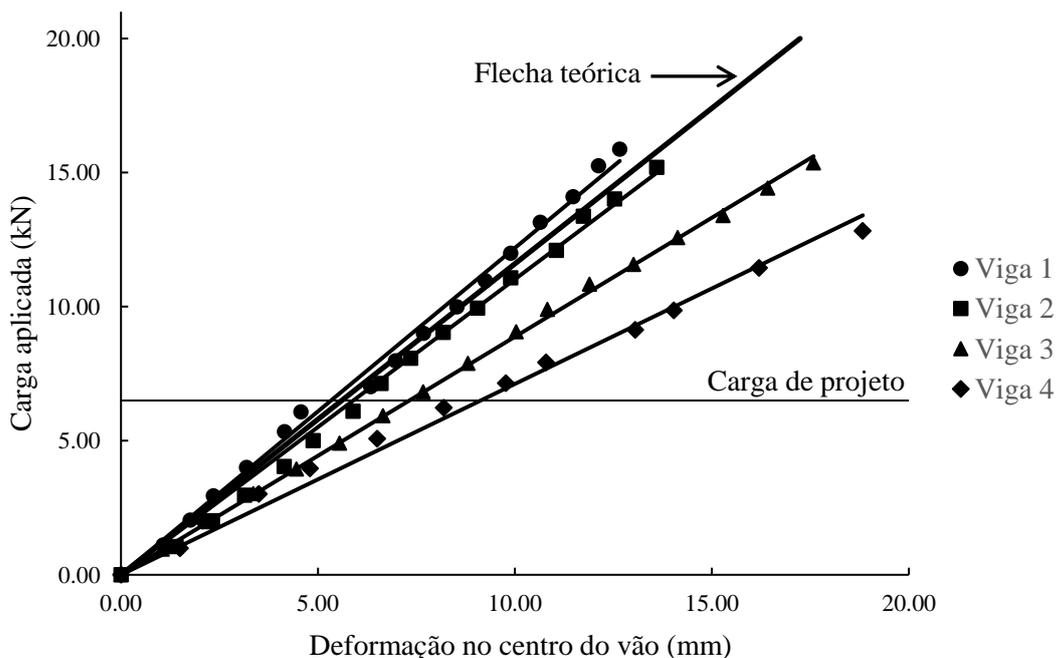


Figura 3: Rigidez das vigas I de menor inércia ensaiadas

Conforme apresentado na Figura 3, para a viga I menor, o comportamento à rigidez foi positivamente influenciado pela pré-seleção da madeira, com as vigas de numerações inferiores apresentando maior rigidez para carregamentos similares. Tal comportamento também foi identificado nas demais seções transversais estudadas. Evidenciou-se, portanto, a importância da seleção mecânica prévia do lote de madeira utilizado no sentido de se obter vigas com desempenhos diferenciados, especialmente para as vigas mais esbeltas.

Em relação às flechas teóricas, as vigas I de maior inércia se apresentaram sempre menos rígidas que a estimativa. Para a viga I menor, conforme apresentado na Figura 3, apenas a viga com melhor qualidade de madeira se apresentou mais rígida que o calculado. Por outro lado, a seção retangular se apresentou, em média, sempre adequada à flecha teórica.

A fim de comparar o comportamento entre as seções estudadas, o gráfico da Figura 4 foi confeccionado com a curva média dos resultados de cada seção transversal, as cargas máximas de projeto e as flechas teóricas calculadas.

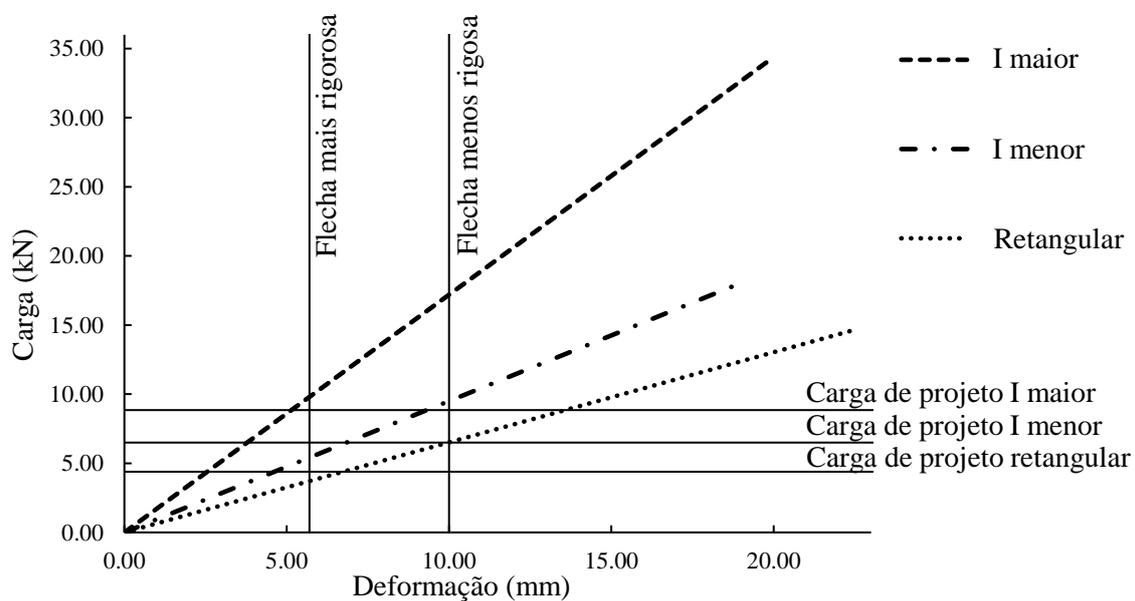


Figura 4: Rigidez média das seções transversais ensaiadas

Verificou-se que a viga I maior apresenta a maior rigidez em relação às demais, conforme esperado, haja vista que possui o maior momento de inércia. A seção I menor apresentou rigidez intermediária e a seção retangular apresentou a menor rigidez.

Para uma mesma deformação, foi possível identificar também que a seção I de maior inércia se apresentou 2,6 vezes mais rígida que a seção de referência, enquanto para a seção I de menor inércia, a rigidez foi 1,5 vezes superior, com um consumo 22% inferior de madeira.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que as seções de perfil I foram, em geral, mais eficientes que as seções retangulares de referência, conforme esperado analiticamente.

As vigas I de maior inércia, com a mesma área da seção de referência, apresentaram uma maior resistência média para todas as qualidades de madeira. As vigas I de menor inércia, com área de seção transversal menor que a referência, apresentaram resistência média ligeiramente superior às vigas retangulares.

Quanto à rigidez, observou-se que todas as vigas atingiram o limite normalizado de flecha de 1 cm em carregamentos iguais ou superiores à respectiva carga máxima de projeto, além de que vigas com maiores valores de momento de inércia efetivamente conduziram a peças mais rígidas.

Foi identificado que as vigas I, especialmente as mais esbeltas, são seriamente mais sensíveis aos defeitos presentes nas tábuas que a compõem do que vigas retangulares, haja vista que a ruptura de todas as vigas I estudadas iniciou ou foi rapidamente propagada por nós presentes tanto na alma quanto nas mesas. Desta forma, recomenda-se que a confecção de vigas I deve ser realizada em ambientes com controles de qualidade superiores e mão de obra especializada, a fim de garantir a segurança da estrutura final.

Verificou-se também, a importância da caracterização da madeira para confecção de elementos estruturais, uma vez que, em geral, as vigas confeccionadas com madeira de melhor qualidade apresentaram desempenhos superiores, tanto na resistência, quanto na rigidez.

Adicionalmente, o consumo de adesivo para confecção das vigas retangulares de referência foi da ordem de sete vezes superior ao utilizado para confecção das vigas I. Este fato é relevante em procedimentos industriais uma vez que o custo do adesivo concorre em grande parte para o custo final do produto.

Sugere-se, para pesquisas futuras, a reprodução deste trabalho com espaços amostrais mais numerosos, de modo a permitir uma análise estatística das conclusões aqui apresentadas, além da utilização de diferentes espécies de madeira e adesivos.

## REFERÊNCIAS

- [1] AZAMBUJA, M. A. ‘Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas’. 2006. 128 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos-São Paulo.
- [2] PFEIL, W. e PFEIL, M. ‘Estruturas de madeira’. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
- [3] GÓES, J. L. N. e DIAS, A. A. ‘Influência da rigidez da ligação no comportamento de vigas de madeira com seção composta’. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002a, Uberlândia, MG. Anais..., UFU: Faculdade de Engenharia Civil, 2002a.
- [4] GÓES, J. L. N. e DIAS, A. A. ‘Avaliação experimental de vigas de madeira com seção composta’. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002b, Uberlândia, MG. Anais..., UFU: Faculdade de Engenharia Civil, 2002b.
- [5] CARRASCO, E. V. M. e MELO, A. V. ‘Vigas I de madeira laminada colada de eucalipto’. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002, Uberlândia, MG. Anais..., UFU: Faculdade de Engenharia Civil, 2002.
- [6] SILVA, C. C. ‘Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal “I” para uso em fôrmas’. 2010. 97f. Dissertação (mestrado em engenharia de estrutura) – Escola de Engenharia de São Carlo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [7] SANTOS, A. M. L. ‘Avaliação teórica e experimental de vigas em I pré-fabricadas em madeira com flange de painéis de laminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado’. 2008. 79f. Dissertação (mestrado em engenharia florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ‘NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira’. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- [9] POPOV, E. P. ‘Resistência dos Materiais’. 2 ed. Rio de Janeiro: PHB. 1984.