

Comportamento teórico e experimental de vigas de madeira em perfil I:
efeito do tipo de alma na resistência, rigidez e deslocamento verticalTheoretical and experimental behavior of wood I-beams:
effects of web type on strength, stiffness and deflectionAirton Mauro de Lára Santos¹, Cláudio Henrique
Soares Del Menezzi² e Geraldo Bortolotto Junior³

Resumo

Os produtos engenheirados de madeira (PEM) são produzidos a partir da junção de mais de um composto de madeira, utilizando a melhor propriedade de cada um dos elementos, dando qualidade e eficiência às estruturas. As vigas em I pré-fabricadas de madeira combinam painéis estruturais, madeira serrada e compostos estruturais de madeira e são consideradas a segunda geração dos PEM. Substituem a utilização de grandes volumes de madeira serrada em aplicações de assoalho e telhado de edifícios residenciais e comerciais. O objetivo do presente trabalho foi aprofundar o conhecimento sobre vigas em I fazendo a análise teórica e experimental, bem como avaliando o efeito do tipo de alma nas propriedades das vigas. Foram produzidos dois tipos de vigas em I com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL): com alma de compensado e com alma de painel de partículas orientadas (OSB). Os valores teóricos do módulo de elasticidade (E), momento fletor (M) e deslocamento vertical (δ) foram comparados com os valores experimentais. Avaliou-se também o efeito do tipo de alma sobre as propriedades de flexão das vigas. Observou-se que as vigas com alma de compensado apresentam valores experimentais de E_M e M equivalentes a 69% e 44,5% dos valores teóricos, respectivamente. Por outro lado, para as vigas com alma de OSB esses valores foram de 95,1% e 62,7%. Para as vigas com compensado a flecha teórica foi equivalente a apenas 56% daquela observada experimentalmente, enquanto que para as vigas com alma de OSB foi possível estimar até 92% da flecha experimental. Foi observada diferença estatisticamente significativa entre as propriedades de flexão das vigas com a alma de compensado ($E_M=10115$ N/mm² e $f_M=17,4$ N/mm²) e OSB ($E_M=14923$ N/mm² e $f_M=28,7$ N/mm²). Conclui-se que as vigas com alma de OSB apresentaram um desempenho superior às vigas com alma de compensado, o que está de acordo com a literatura consultada.

Palavras-chave: Produtos engenheirados de madeira, Vigas em I de madeira, Painéis de lâminas paralelas, Painéis de partículas orientadas, Compensado

Abstract

Engineered wood products (EWP) are made from junction of several kinds of wood composites. They employ the better property of each one to manufacture a product that has enhanced properties. Wood I-beams combine structural composite panel with solid wood, and can be considered the most modern kind of EWP. They may replace the solid wood in roof and floor of residential or commercial buildings. This paper aimed at studying the theoretical and experimental behavior and also the effect of the web type on flexural properties of I-beams. Two kinds of I-beams were produced: OSB webbed and plywood webbed ones. Theoretical values of modulus of elasticity (E_M), bending moment (M) and deflection (δ) were compared to experimental ones. The effect of web type on the flexural properties was also investigated. For plywood webbed I-beams, the theoretical values of E_M and M were around 69% and 44.5% of those obtained experimentally. On the other hand, for OSB webbed I-beam, these values were 95.1% and 62.7%, respectively. Theoretical deflection was around 56% for plywood webbed I-beam, whereas for OSB webbed it was around 92%. OSB webbed I-beams presented flexural properties ($E_M=14923$ e $f_M=28.7$ N/mm²) statically higher than beam webbed with plywood ($E_M=10115$ e $f_M=17.4$ N/mm²). Finally, it can be concluded that OSB webbed I-beams presented better performance than plywood webbed I-beams. These findings agree with those found in the literature.

Keywords: Engineered wood products, Wood I-beams, Laminated veneer lumber, Oriented strandboard, Plywood

¹Mestre em Ciências Florestais pelo Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília – E-mail: airtonmauro@unb.br

²Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília - Caixa Postal 04357 - Brasília, DF - 70919-970 - E-mail: cmenezzi@unb.br

³Professor Livre-Docente do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - E-mail: gbortoll@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

As vigas em I são classificadas como produtos engenheirados de madeira (PEM), cuja utilização é bastante difundida nos EUA, Canadá e Japão. São empregadas, principalmente, em pisos e forros de construções em madeira. São produzidas a partir da união entre painéis estruturais na alma (OSB ou compensado) e madeira sólida ou mesmo outro painel estrutural nas bordas. É um produto relativamente novo quando comparado com os demais PEM, mas está se tornando o preferido com relação à qualidade e por causa de questões ambientais (WILLIAMSON, 2002). Sua concepção construtiva leva em consideração que os esforços em uma viga ocorrem em maior magnitude nas bordas - conhecidas também como flanges ou mesas - sendo necessário mais material nessa região, além de possuir grande altura, conferindo-lhe maior inércia e rigidez em torno do eixo estrutural em que é solicitada. São construídas para fornecer rigidez, flexibilidade, resistência ao momento fletor e ao cisalhamento, sendo que as bordas resistem ao momento fletor e a alma ao esforço cisalhante (USDA, 1999).

Segundo WILLIAMSON (2002) vigas em I podem ser fabricadas de duas formas distintas: em tamanhos fixos ou em linhas contínuas. Na primeira forma, o material usado no flange é o LVL, o qual é fornecido em tamanhos que variam de 18,3 a 19,9 m. Esse material é então usinado para produzir um sulco, por onde é feita a junção com a alma. Em outro setor, o painel (OSB ou compensado) é desdobrado para produzir as peças destinadas para alma da viga em I. Em seguida, é aplicado o adesivo em ambas as partes, que são então unidas, prensadas e são movidas para uma estação de cura do adesivo, que pode ser feita por rádio-frequência, micro-ondas ou mesmo à temperatura ambiente.

Pelo método contínuo, o material mais frequentemente utilizado no flange é a madeira sólida. Antes de sua utilização, a madeira é classificada mecanicamente, e em seguida é necessário fazer a junção de topo (*finger-joint*), para permitir a produção de peças de maior comprimento por meio da colagem. Após isso, os flanges são juntados e colados à alma, similarmente ao citado acima, entretanto sem a necessidade de pré-usinagem, uma vez que a junção é feita diferentemente. Nesse processo tem-se a produção de vigas contínuas, de grande comprimento, e que ao final podem ser cortadas no tamanho desejado.

Os estudos sobre a produção e dimensionamento de vigas em I no Brasil são relativamente recentes podendo-se destacar Silva *et al.* (2008), Pedrosa *et al.* (2005), Lima *et al.* (2004), Pedrosa (2003), Stamato e Calil Jr. (2000), Szücs e Prada (2000) e Santana e Mascia (1998). Esses trabalhos abordaram questões relativas às normas atualmente empregadas no dimensionamento visando obter critérios brasileiros (STAMATO e CALIL JR., 2000), bem como questões relativas ao estudo do comportamento teórico e experimental de vigas em I (SILVA *et al.*, 2008; SANTANA e MASCIA, 1998).

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi analisar a possibilidade de estimar as propriedades de resistência e rigidez da viga em I, a partir da determinação das propriedades de cada um dos elementos que a compõem, e analisar a influência do tipo de alma na resistência e rigidez dessas vigas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Produção das vigas em I

Foram produzidas 10 vigas em I utilizando-se OSB e compensado na alma, LVL nos flanges e o adesivo estrutural resorcinol-formaldeído Cascophen RS. Dessas 10 vigas em I, cinco foram produzidas com o flange de LVL e alma de compensado e cinco com o flange de LVL e a alma de OSB. Para a montagem das vigas foram adquiridos dois painéis comerciais, sendo um de OSB multiuso tipo exportação de *Pinus sp.* (2440 mm x 1220 mm x 9,5 mm) e o outro de compensado naval (resina fenol-formaldeído, FF) de cinco lâminas de *Pinus sp.* (2500 mm x 1600 mm x 10 mm). Os painéis foram desdobrados paralelamente ao seu eixo resistente nas dimensões de 150 mm de altura e 1760 mm de comprimento. Os flanges foram produzidos a partir da junção de painéis de LVL (*Pinus hesiyya*, resina FF), nas dimensões de 1760 mm x 40 mm x 40 mm, produzidos no Laboratório de Laminação do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. Detalhes sobre a produção, processamento e junção dos painéis LVL para produção dos flanges podem ser obtidos em Santos (2008) e Santos *et al.* (2008). A resina Cascophen RS, resorcinol-formaldeído, foi utilizada para fazer a junção entre a alma e o flange, a uma gramatura de 350 g/m² (Figura 1).

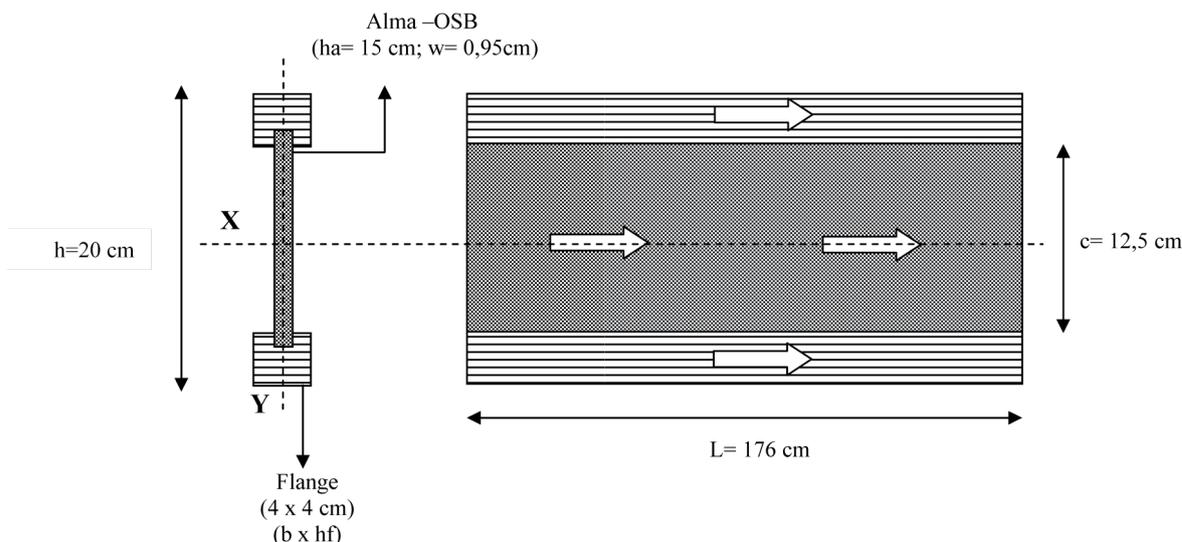


Figura 1. Eixos estruturais (X, Y), dimensões dos componentes e da viga em I (setas indicam o sentido paralelo às fibras e do OSB).

Figure 1. Structural axes (X, Y), components dimensions and of the I-joist (arrows indicate the direction parallel to the grain and of OSB).

Propriedades de resistência e rigidez dos materiais

A caracterização mecânica do compensado e do OSB foi feita por meio de ensaios de flexão estática segundo a norma ASTM D1037 (1999) onde foram determinados o módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_M). Foram cortados 12 corpos-de-prova (CP) nos sentidos paralelo e perpendicular de ambos os painéis de madeira, totalizando assim 48 CPs. O E_M dos flanges colados em bisel 1:4 (relação entre altura e o comprimento do bisel) foi obtido não-destrutivamente empregando-se os procedimentos da norma ASTM D 198 (1999). Nesse ensaio a flecha do flange foi medida em intervalos de carga de 300 N até atingir 1500 N, e o valor médio foi utilizado para a determinação do E_M .

Avaliação teórica e experimental das vigas em I

O modelo teórico para se avaliar a rigidez à flexão (EI_{teo}) e o momento fletor (M_{teo}) teóricos das vigas em I foi baseado no modelo geral proposto por Dansoh *et al.* (2004), segundo as equações 1 e 3, enquanto que o módulo de elasticidade teórico (E_{Mteo}) foi baseado na equação 2. Para se estimar a flecha teórica (δ_{teo}) foi utilizada a equação 4 (ASTM D198, 1999), que considera apenas a contribuição do esforço de momento fletor na flecha da viga.

$$EI_{teo} = \sum_{i=1}^3 [(E_{Mi} * I_i) + (E_{Mi} * A_i * a^2)] \quad (1)$$

$$E_{Mteo} = EI_{teo} / I_{XX} \quad (2)$$

$$M_{teo} = (EI_{teo} * f_{Me}) / (E_{Mfi} * y) \quad (3)$$

$$\delta_{teo} = (P * L * a^2) / (48 * EI_{teo}) \quad (4)$$

Onde:

EI_{teo} = rigidez a flexão teórica, N.mm²;

E_{Mi} = módulo de elasticidade da peça simples N/mm²;

E_{Mfi} = módulo de elasticidade do flange inferior da viga, N/mm²;

I_i = momento de inércia da peça simples, mm⁴;

a_i = distância do centro de gravidade da peça simples ao centro de gravidade da peça composta, mm;

A_i = área da peça simples, mm²;

I_{XX} = momento de inércia da viga composta, mm⁴;

f_{Me} = módulo de ruptura das emendas biseladas (1:4) segundo Santos *et al.* (2008), N/mm²;

L = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

y = distância da linha neutra em relação as bordas da viga, mm;

δ_{teo} = flecha teórica, mm;

P = carga aplicada, N;

a = distância entre o ponto de aplicação das cargas e o apoio da viga, mm.

Na avaliação experimental das vigas em I foi realizado o ensaio de flexão estática de quatro pontos segundo procedimentos das normas ASTM D198 (1999) e ASTM D5055 (2005) até a ruptura da viga, no qual se obteve o E_{Mexp} e f_{Mexp} e a δ_{exp} (Figura 2). A δ_{exp} foi medida no terço central da viga, sujeito apenas ao esforço de momento fletor, e foi obtida diretamente pela leitura do relógio comparador com precisão de 0,01 mm

(Marca MAHR Mod. MILLILAST 1082). A velocidade de ensaio foi ajustada para um tempo médio de ensaio de 10 minutos, conforme estabelece a norma utilizada no ensaio. A relação entre a altura (h) da viga e a distância de aplicação da carga e o apoio da viga (a) foi de 1:2,7.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades dos materiais da viga em I

A Tabela 1 apresenta as dimensões e propriedades geométricas das vigas em I as quais foram utilizadas na determinação das propriedades mecânicas das vigas em I com flange de LVL e almas de compensado e OSB. As propriedades de flexão nos sentidos paralelo e perpendicular do OSB e do compensado, bem como as propriedades do LVL, são apresentadas na Tabela 2.

Pela análise da Tabela 2, observa-se que o OSB apresentou propriedades de flexão superior ao compensado em ambos os eixos avaliados. Esse resultado não era esperado, uma vez, que embora o OSB possa substituir o compensado em algumas aplicações estruturais, suas propriedades mecânicas são usualmente inferiores. Bortoletto

Jr. e Garcia (2004) avaliaram compensados de 15, 18 e 30 mm que tinham 7, 11 e 13 camadas, respectivamente. Concluiu-se que o compensado e o OSB de 15 e 18 mm não apresentaram diferenças estatisticamente significativas para o MOE paralelo. Entretanto, diferenças significativas com média superior para os compensados ocorreram em todos os casos para o MOR e MOE perpendicular; já na direção paralela, somente ocorreu diferença significativa para o MOR.

Comportamento teórico e experimental

A Tabela 3 apresenta os valores teóricos e experimentais do E_M e M para as 10 vigas em I. Observa-se que para as vigas em I com alma de compensado o valor experimental médio do E_M foi equivalente a 69% daquele previsto pelos modelos teóricos, enquanto que essa diferença foi maior ainda para o momento fletor (44%). Por outro lado, para as vigas com alma de OSB o E_M experimental aproximou-se bastante do E_{Mteo} (95%), enquanto que o M_{exp} foi equivalente a 63% do M_{teo} . A carga média de ruptura teórica era de 32000 N, entretanto, as vigas romperam com carga entre 12000 N e 22000 N.

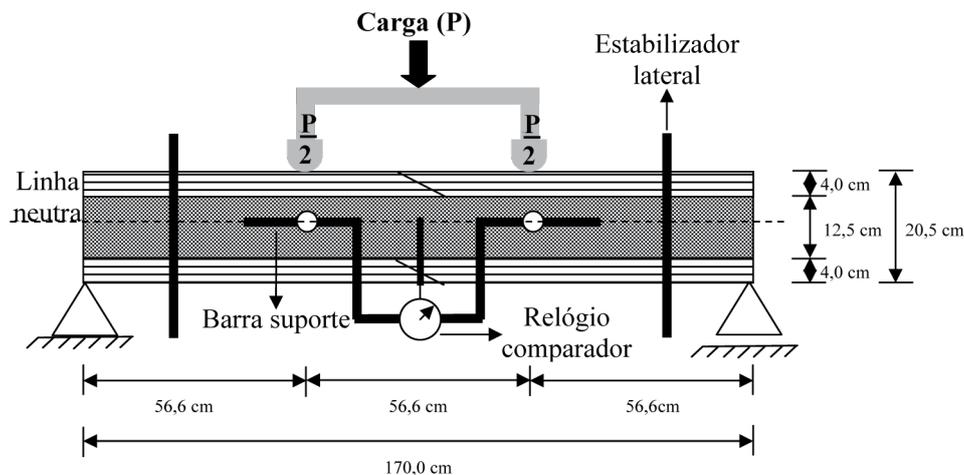


Figura 2. Ensaio de flexão estática de 4 pontos.
Figure 2. Four-point static bending testing.

Tabela 1. Dimensões e propriedades geométricas das vigas em I.
Table 1. Dimensions and geometrical properties of I-beam.

| Vigas ^a | Dimensões (mm) ^b | | | | | | I (mm ⁴) | EI (N*mm ²) |
|--------------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|----------------------|-------------------------|
| | w | b | hf | c | h | L | | |
| 1 | 10,6 | 40,1 | 39,4 | 122,9 | 202,6 | 1700 | 2,21E+07 | 3,06E+11 |
| 2 | 10,4 | 40,2 | 36,6 | 122,0 | 196,1 | 1700 | 1,98E+07 | 2,81E+11 |
| 3 | 10,5 | 40,2 | 38,6 | 123,9 | 201,4 | 1700 | 2,17E+07 | 3,18E+11 |
| 4 | 10,4 | 40,5 | 38,7 | 123,4 | 200,7 | 1700 | 2,16E+07 | 3,26E+11 |
| 5 | 10,4 | 40,2 | 39,2 | 123,4 | 201,6 | 1700 | 2,19E+07 | 3,42E+11 |
| 6 | 9,6 | 40,2 | 37,3 | 124,4 | 199,2 | 1700 | 2,07E+07 | 3,02E+11 |
| 7 | 9,7 | 40,6 | 38,0 | 125,0 | 201,0 | 1700 | 2,16E+07 | 3,27E+11 |
| 8 | 9,6 | 40,5 | 38,1 | 124,3 | 201,4 | 1700 | 2,09E+07 | 3,33E+11 |
| 9 | 9,5 | 40,3 | 39,0 | 124,7 | 203,7 | 1700 | 2,23E+07 | 3,59E+11 |
| 10 | 9,5 | 40,5 | 37,2 | 125,7 | 199,7 | 1700 | 2,09E+07 | 3,51E+11 |

a: 1 a 5, vigas com alma de compensado;
6-10, vigas com alma de OSB; b: dimensões conforme Figura 1.

Tabela 2. Propriedades de flexão dos painéis OSB, compensado e LVL.**Table 2.** Flexural properties of OSB, plywood and LVL.

| Painel | E_M (N/mm ²) | | f_M (N/mm ²) | |
|------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| | Paralelo | Perpendicular | Paralelo | Perpendicular |
| Compensado | 3471 (349,31) ^a | 3385 (220,5) | 34,1 (1,6) | 24,2 (3,2) |
| OSB | 5466 (665,4) | 1643 (249,9) | 35,8 (5,5) | 14,1 (3,0) |
| LVL | 16784 (893,1) | | 40,1 ^b (4,8) | |

^a: desvio padrão; ^b: módulo de ruptura do LVL com emenda biselada 1:4, segundo Santos *et al.* (2008)

Tabela 3. Valores teóricos e experimentais de E_M e M das vigas em I.**Table 3.** Theoretical and experimental E_M and M values of the I-beam.

| Vigas | Módulo de Elasticidade (N/mm ²) | | | Momento Fletor (N.mm) | | |
|-------|---|------------|-------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| | E_{Mteo} | E_{Mexp} | E_{Mteo}/E_{Mexp} (%) | M_{teo} | M_{exp} | M_{teo}/M_{exp} (%) |
| 1 | 13820 | 10366 | 75,0 | 9467852 | 3534667 | 37,3 |
| 2 | 14223 | 10516 | 73,9 | 8501848 | 4564267 | 53,7 |
| 3 | 14684 | 10070 | 68,6 | 9212779 | 4059733 | 44,1 |
| 4 | 15097 | 10112 | 67,0 | 9334909 | 3493600 | 37,4 |
| 5 | 15657 | 9511 | 60,7 | 9337389 | 4693333 | 50,3 |
| Média | 14696 | 10115 | 69,0 | 9170955 | 4069120 | 44,5 |
| 6 | 14578 | 15050 | 103,2 | 8858478 | 5555733 | 62,7 |
| 7 | 15162 | 12640 | 83,4 | 9202813 | 5984000 | 65,0 |
| 8 | 15898 | 13052 | 82,1 | 9174597 | 6206933 | 67,6 |
| 9 | 16087 | 17804 | 110,7 | 9258007 | 6479733 | 70,0 |
| 10 | 16757 | 16070 | 95,9 | 8941887 | 6382933 | 71,4 |
| Média | 15696 | 14923 | 95,1 | 8858478 | 5555733 | 62,7 |

^a: 1 a 5, vigas com alma de compensado; 6-10, vigas com alma de OSB.

Segundo a norma ASTM D5055, as rupturas observadas nas vigas caracterizam-se como típicas de vigas de pequeno vão tais como: ruptura da alma na região do apoio (*WC-web crushing*) e ruptura por flambagem da alma (*WB-web buckling*). Nas vigas com alma de compensado ocorreu também a ruptura na porção central e por flambagem da alma. Este último tipo de ruptura pode ocorrer em peças esbeltas capazes de transpor grandes vãos. As vigas em I por se tratarem de peças esbeltas, podem sofrer flambagens. Devido ao aumento dos vãos nas vigas em I e crescente possibilidade de flambagem, Hindman *et al.* (2005) levantaram questionamentos sobre a estabilidade lateral das vigas em I e a necessidade de se prever tais esforços. Jahromi *et al.* (2006) investigaram a resistência à flexão, à compressão e ao cisalhamento de nove tipos de vigas em seção I com flanges de madeira sólida ou LVL (*P. radiata*) e alma de compensado. Observaram que a carga de ruptura em flexão variou de 35200 N (viga em I simples) até 90800 N (viga em I caixão, com três almas). Salientam que nas vigas em I simples, as rupturas iniciaram-se no flange para em seguida ocorrer a flambagem da alma.

Silva *et al.* (2008) estudaram as propriedades de vigas em I produzidas com flanges emendados de madeira de *Pinus* sp e alma de OSB. De acordo com os cálculos teóricos, as vigas deve-

riam romper com uma carga aproximada de $\cong 14000$ N, mas a ruptura variou entre $\cong 7900$ N e $\cong 16400$ N. Os autores explicam que as rupturas ocorreram principalmente pelo cisalhamento na superfície de colagem entre o flange e o painel OSB. Nesse sentido, estudos sobre a compatibilidade da colagem entre a alma e o flange são necessários.

As Figuras 3 e 4 apresentam as flechas teóricas e experimentais para as vigas com alma de compensado e OSB, respectivamente. Observa-se que para as vigas com alma de compensado há uma maior diferença entre os valores teóricos e experimentais, em comparação àquelas feitas com alma de OSB. Em média, os valores teóricos da flecha da viga com compensado foram equivalentes a 54% do valor experimental, enquanto que para a viga com alma de OSB foi de 92%.

Newlin e Trayer (1956), utilizando o mesmo modelo teórico para se estimar a flecha, encontraram valores teóricos inferiores aos valores experimentais. No mesmo trabalho, utilizam um modelo teórico que considera o módulo de elasticidade transversal da alma (E_C), e também encontram na maioria dos seus resultados valores teóricos inferiores aos experimentais. No presente trabalho, o valor de E_C não foi considerado, uma vez que o deslocamento vertical foi medido no trecho sujeito apenas ao esforço de momento fletor. Entretanto, a diferença entre a flecha teórica e

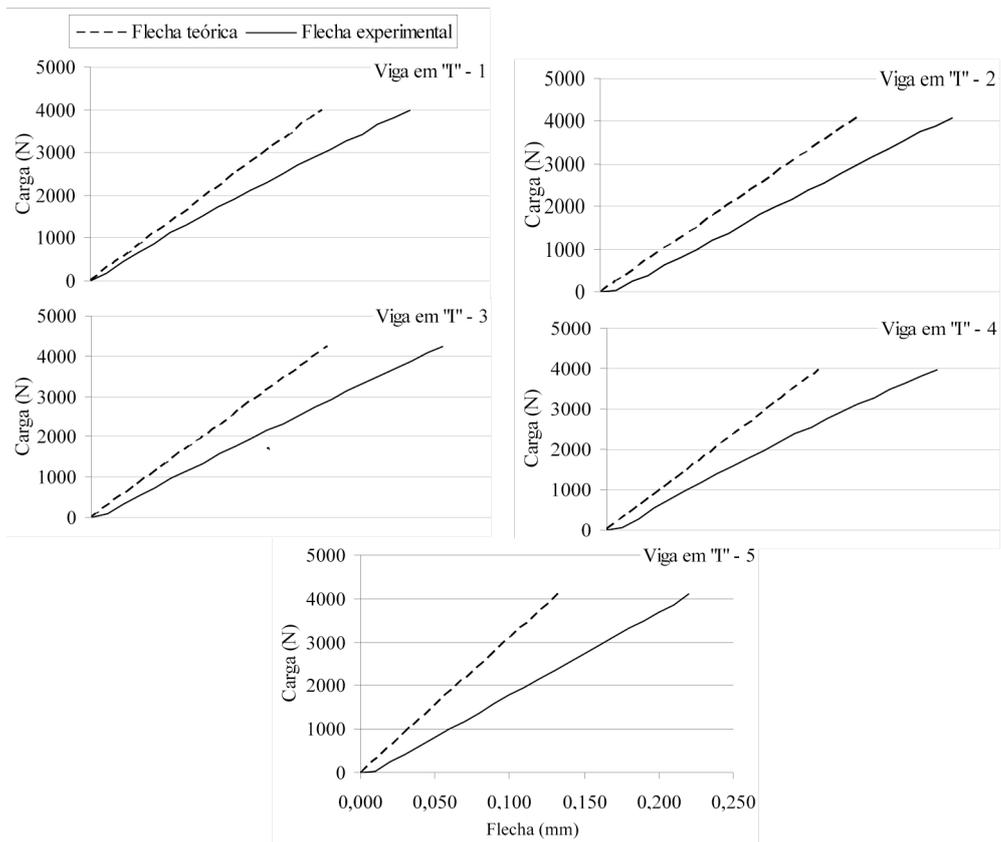


Figura 3. Valores teóricos e experimentais da flechas das vigas em I, com alma de compensado e o flange de LVL.
Figure 3. Theoretical and experimental values of deflection of the I-beam, with plywood web and a LVL flange.

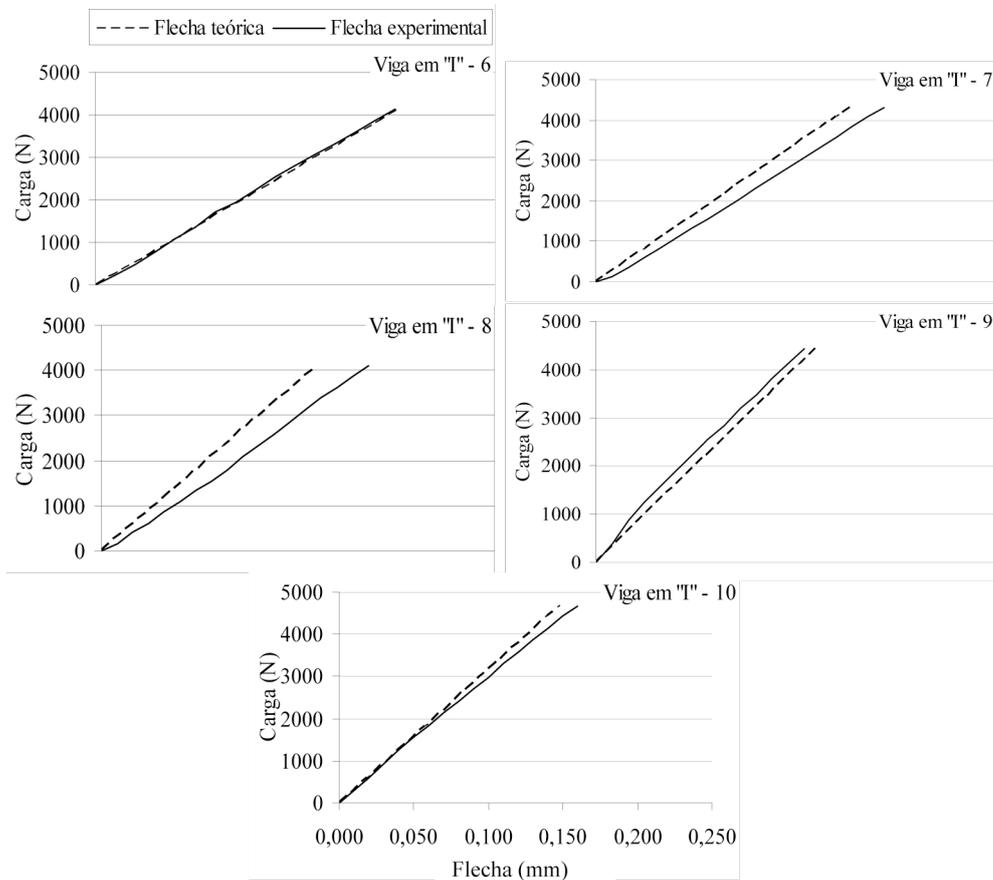


Figura 4. Valores teóricos e experimentais das flechas das vigas em I, com alma de OSB e o flange de LVL.
Figure 4. Theoretical and experimental deflection values of the I-beam with web to OSB and flange of LVL.

a experimental encontrada no presente trabalho pode ser considerada adequada quando comparada com aquela observada por GRANDMONT *et al.* (2006). Os autores observaram valores de flecha experimental 11% menores que os valores de flecha teórica. Nesse sentido, em estudos futuros será levado em consideração o valor de EG que permite que a flecha relativa ao cisalhamento (δ_s) seja computada, cuja contribuição pode ser significativa na flecha total de vigas em I (WILLIAMSON, 2002). A flecha total de uma viga é função da elongação e compressão das fibras quando em tensão de flexão, e da flecha oriunda da deformação imposta pela tensão de cisalhamento.

Quando a contribuição do cisalhamento não é computada o valor do módulo de elasticidade determinado no ensaio de flexão é dito aparente. Ademais, negligenciando a deformação devida ao cisalhamento, podem-se introduzir erros de magnitudes consideráveis na determinação de deformação total da viga, especialmente quando se tem vigas relativamente curtas compostas por almas finas, tal como ocorre nas vigas em I (NEWLIN e TRAYER, 1924). Esses autores estudaram a fundo a contribuição do cisalhamento na flecha total de diversos tipos de vigas compostas de madeira: viga em I de madeira sólida, vigas em I dupla com alma de compensado, vigas caixão, entre outras. Eles concluem que por causa da magnitude da distorção pelo cisalhamento torna-se necessário o cálculo das propriedades elásticas de vigas de madeira tendo em conta esse fator. Isso é especialmente importante para vigas em I ou em caixão, cuja distribuição do material que as compõem, é de tal forma que se tenha a máxima resistência à compressão e tração, deixando mínima quantidade de material no plano de máxima tensão de cisalhamento.

As vigas em I são usualmente curtas e esbeltas o que normalmente implica em uma relação L/h quase sempre entre 5 e 12. Nesse sentido é muito importante conhecer o $E_{G'}$, o qual deve ser utilizado para se determinar a flecha do cisalhamento. A determinação dessa propriedade é relativamente complexa para a madeira sólida, mas, no entanto, segundo USDA (1999) e Newlin e Trayer (1924) a relação entre E_M e E_G é de 16:1. Para as vigas em I, é fundamental se conhecer os valores para os painéis que compõem a alma. Pavlekovics *et al.* (2008) encontraram uma relação entre E_M e E_G variando de 44:1 a 92:1 para o MDF, e de 42:1 a 72:1 para aglomerado, dependendo do teor de umidade. Niemz e Sonderegger (2007) obtiveram valores para OSB variando de 46:1 a 73:1. Esses valores foram obtidos em ensaios de cisalhamento no plano da superfície do painel. Por outro lado, ensaios de cisalhamento no plano da espessura do OSB têm revelado uma relação $E_M:E_G$ de 3,9:1 a 6,8:1 (USDA, 1999) 2,6:1 a 3,1:1 (GRANDMONT *et al.* 2006). Esse tipo de ensaio, para a determinação de E_G em painéis OSB, não é usual dada sua complexidade, como pode ser observado nas normas ASTM D2719-89 (1994) e ASTM D3044-94 (2000). Lima *et al.* (2004) analisaram o comportamento teórico da flecha de vigas em I (flange de *Pinus* sp. e alma de OSB) utilizando método de elementos finitos. Os autores computaram a flecha devida ao cisalhamento e observaram que a flecha experimental foi equivalente a 73% da teórica. Nesse estudo eles admitiram uma relação $E_M:E_G$ de 2,6:1. Deve-se salientar que ambos os tipos de cisalhamento ocorrem durante o ensaio de vigas em I, embora apenas aquele ocorrente no plano da espessura é o usualmente computado na flecha devida ao cisalhamento.

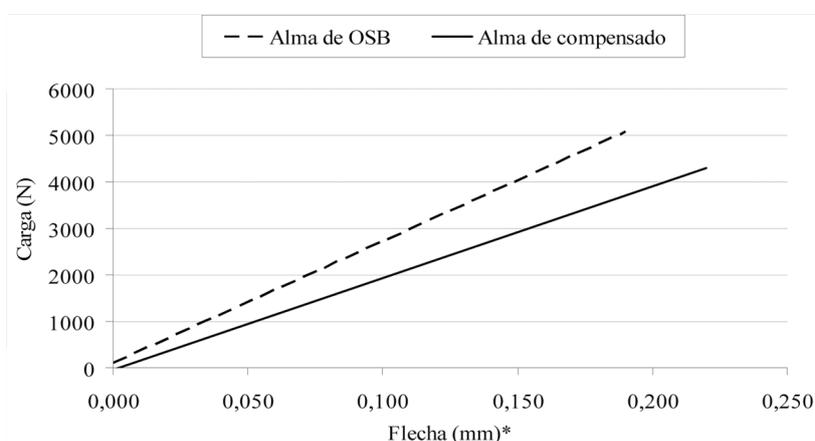


Figura 5. Diferença entre as flechas das vigas em I com alma de compensado e alma de OSB (*Significativo ao nível de 5%)

Figure 5. Difference of deflection of the I-beam with plywood and OSB web (* significant at 5% level).

A Figura 5 apresenta os valores médios de flecha experimental para as vigas quando solicitadas até 4000 N. As vigas com alma de OSB apresentaram um valor médio de deformação de 0,15 mm, inferiores aos observados nas vigas com alma de compensado, que apresentaram valores médios de deformação de 0,21 mm. Desta forma, fica evidente que as vigas com alma de OSB apresentaram-se mais rígidas que as vigas com alma de compensado. Deve-se salientar que essa diferença talvez se deva ao fato de os painéis OSB apresentavam propriedades de flexão (Tabela 2) superiores às do compensado, indicando assim maior resistência ao esforço de momento fletor, e conseqüentemente menor flecha. Uma explicação mais aprofundada é dada adiante.

Efeito do tipo de alma nas propriedades das vigas em I

A Figura 6 apresenta os resultados comparativos de E_{Mexp} e f_{Mexp} para ambos os tipos de viga. A análise de variância indicou diferença estatisticamente significativa para os valores das propriedades de flexão das vigas. Assim, as vigas em I produzidas com alma de OSB apresentaram valores de E_{Mexp} e f_{Mexp} estatisticamente superiores aos das vigas com alma de compensado. Entretanto, ambos os valores médios de E_{Mexp} 14923 N/mm² para vigas com OSB e de 10115 N/mm² para as vigas com alma de compensado, estão acima dos limites estabelecidos pela APA (2005), onde se determina valores mínimos de E_M de 9458 N/mm², para vigas em I com flanges de LVL (5,1 cm x 3,8 cm) e alma de OSB (espessura 9,5 mm) com altura de 24,1 cm.

Comparando os valores obtidos por outros autores os valores do presente trabalho estão coerentes. No entanto, os valores de E_M e f_M encontrados por Pedrosa *et al.* (2005) foram respectivamente de 12044 N/mm² e 97,6 N/mm², para vigas em I com flanges de LVL (*P. taeda*) e alma de compensado (*P. taeda*), estão acima dos valores médios experimentais encontrados nesse trabalho, principalmente para f_M . Os autores também encontram um valor de f_M (92,9 N/mm²) muito superior ao valor observado para as vigas com alma de OSB, embora o E_M tenha sido ligeiramente inferior (13616 N/mm²) ao observado nesse trabalho.

A diferença entre as propriedades de flexão dos painéis parece ter interferido diretamente nas propriedades das vigas em I. Adicionalmente, uma explicação provável para essa diferença talvez seja a forma da matéria prima que compõe cada um dos painéis. O compensado usa lâminas, que por sua vez podem durante o ensaio de flexão deslizar entre si mais facilmente que no OSB, uma vez que a transferência dos esforços entre camadas é provida apenas pelo adesivo. No OSB, embora apresente a mesma disposição construtiva, durante a formação do colchão e posterior prensagem, pode ocorrer um entrelaçamento entre as camadas, provendo assim uma resistência adicional àquela já provida pelo adesivo, o que ajudaria a reduzir o deslizamento entre camadas. Nesse sentido, o efeito conjunto entre propriedades de flexão superiores e essa suposta maior resistência ao cisalhamento entre as camadas do OSB, implicaram em vigas em I de OSB mais rígidas e resistentes, que aquelas feitas com alma de compensado.

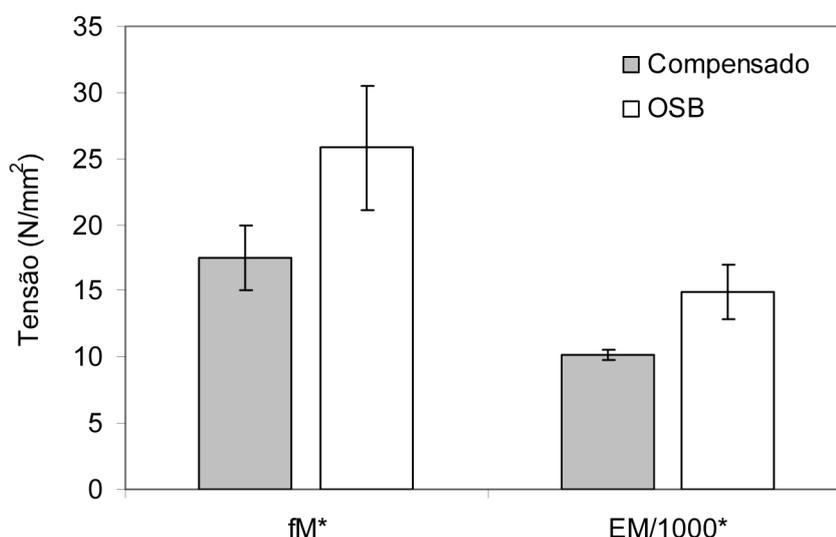


Figura 6. Diferença entre as propriedades das vigas em I com alma de compensado e alma de OSB (*Significativo ao nível de 5%).

Figure 6. Difference between the properties of the I-beam with plywood and OSB web (*Significant at 5% level).

Alguns autores têm estudado o efeito do tipo de alma sobre a resistência e rigidez de vigas em I. De uma forma geral, vigas com almas de OSB têm apresentado propriedades de flexão superiores às aquelas manufaturadas com compensado ou outro tipo de painel. Pedrosa *et al.* (2005) produziram vigas em I com alma de compensado (*P. taeda* e *Eucalyptus dunni*) e flange de LVL com as mesmas espécies. Os resultados apontaram que para as vigas com alma de OSB os valores de E_M (16618 N/mm²) foram superiores aos observados para as vigas com alma de compensado (12425 N/mm²), mas que o f_M não foi influenciado (95,5 N/mm² x 96,9 N/mm²). Jamaludin *et al.* (2005) avaliaram quatro tipos de vigas em I de pequena dimensão produzidas com painéis de madeira: OSB na alma/LVL flange (T1); OSB-madeira sólida (T2); compensado-LVL (T3), e compensado-madeira sólida (T4). Foi identificada diferença estatisticamente significativa para as propriedades de flexão entre T1 e o grupo T2-T3-T4. Para T1 foi obtido f_M de 18 N/mm² enquanto para o outro grupo esse valor variou de 10,9 a 9,8 N/mm².

Lai e Yeh (2002) produziram vigas com quatro tipos de painéis: OSB, MDF, compensado e aglomerado, de três espessuras distintas (9, 12 e 15 mm). De um modo geral as vigas com alma de MDF apresentaram maior carga de ruptura (\cong 18000 N), enquanto que as de OSB apresentaram maior rigidez (\cong 8500 N/mm²). Os autores apontam o bom comportamento das vigas com alma de MDF em comparação com o compensado. O efeito da espessura da alma não pôde ser muito bem identificado. Chen *et al.* (1989) produziram vigas em I com alma de OSB, flakeboard e compensado. As vigas com OSB apresentaram carga de ruptura (33200 N) estatisticamente superior às produzidas com flakeboard (24100 N) e compensado (20900 N). Adicionalmente, apresentaram também maior rigidez, requerendo 12130 N para uma flecha de 25,4 mm, enquanto que para o flakeboard e compensado esse valores foram de 10600 N e 10500 N, respectivamente.

CONCLUSÃO

- Com os modelos teóricos utilizados foi possível prever com adequada precisão as propriedades de flexão (módulo de elasticidade, momento fletor e flecha) das vigas com alma de OSB; para aquelas com alma de compensado, os resultados não foram muito satisfatórios;
- O tipo de alma influenciou significativamente as propriedades de flexão das vigas em I; vigas

com alma de OSB apresentaram valores superiores às produzidas com alma de compensado, o que está de acordo com o amplamente divulgado na literatura.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio do Edital Universal 2007 (Processo 474737/2007-1); ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF), onde os ensaios mecânicos foram conduzidos; à marcenaria da Universidade de Brasília (UnB) onde as emendas foram produzidas e ao Laboratório de Laminação do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, onde foram produzidos os LVL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA - THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Performance rated I-joist. APA-EWS, 2005. 25p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2719-89 - Standard test methods for structural panels in shear trough-the-thickness. Denver, 1994.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1037-99 - Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. Denver, 1999a.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D198-99 - Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Denver, 1999b.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3044-94 - Standard test methods for shear modulus of wood-based structural panels. Denver, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5055-05 - Standard specification for establishing and monitoring structural capacities of prefabricated wood I-joists. Denver, 2005.

BORTOLETTO JR., G.; GARCIA, J.N. Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados. *Revista Árvore*, Viçosa, v.28, n.4, p.563-570, 2004.

- CHEN, G.-H.; TANG, R.C.; PRICE, E.W. Effect of environmental conditions on the flexural properties of wood composite I-beams and solid lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v.39, n.2, p.17-22, 1989.
- DANSO, A.B.; KOIZUMI, A.; HIRAI, T. Bending strength and stiffness of glued butt-joint glulam. **Forest Products Journal**, Madison, v.54, n.8, p.40-44, 2004.
- GRANDMONT, J.F.; THIVIERGE, C.; CLOUTIER, A.; GENDRON, G. Determination of engineering properties and modelling of wood I-joists. In: WORLD CONFERENCE ON THIMBER ENGINEERING, 9, 2006, Portland. **Proceedings...** Portland: WCTE, 2006. 8p.
- HINDMAN, D.P.; MANBECK, H.B.; JANOWIAK, J.J. Measurement and prediction of lateral torsional buckling loads of composite wood materials: I-joist section. **Forest Products Journal**, Madison, v. 55, n.10, p.43-48, 2005.
- JAHROMI, A.B.; ZHANG, B.; HARTE, A.; WALFORD, B.; BAYNE, K.; TURNER, J. Investigating the structural performance of multi-webs I-beams. **Journal of the Institute of Wood Science**, v.17, n.3, p.148-158. 2006.
- JAMALUDIN, M.A.; NORDIN, K., AHMAD, M. Strength properties of engineered I-joist made from laminated veneer lumber (LVL), solid wood, oriented strand board (OSB), and plywood. **USDA. Forest Service. FPL General Technical Report**, Madison, n.163, p.61-64, 2005.
- LAI, C.Y.; YEH, M.C. Effects of web materials on flexural properties of China fir composite I-beams. **Taiwan Journal of Forest Science**, Taipei, v.17, n.2, p.219-230, 2002.
- LIMA, A.L.; SZUCS, C.A.; LA HOVERE, H.L. Análise de vigas I em madeira com mesa em pinus e alma em OSB. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEM, 2004. (CD Rom).
- NEWLIN, F.A.; TRAYER, G.W. Deflection of beams with special references to shear deformations: the influence of the form of wooden beam on its stiffness and strength-I. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1924. p.355-372.
- NEWLIN, F.A.; TRAYER, G.W. Deflection of beams with special references to shear deformations: the influence of the form of wooden beam on its stiffness and strength-I. Madison: USDA. **Forest Products Laboratory**, 1956. p.1-19.
- NIEMZ, P.; SONDEREGGER, W. Schubmodul sinkt linear mit steigender Holzfeuchte: Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Schubmodul von Spanplatten und OSB. **Holz-Zentralblatt**, Berlin, v.22, n.23, p.1-8, 2007.
- PAVLEKOVICS, A.; NIEMZ, P.; SONDEREGGER, W.; MOLNAR, S. Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften von Spanplatten und MDF. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.66, n.2, p.99-105, 2008.
- PEDROSA, A.L. **Desempenho estrutural de vigas em I constituídas por PLP e compensado de Pinus taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden e OSB de Pinus spp.** 2003. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- PEDROSA, A.L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M. Produção de vigas estruturais em perfil "I" com painéis de madeira reconstituída de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Floresta**, Curitiba, v.35, n.3, p.443-449, 2005.
- SANTANA, C.L.O.; MASCIA, N.T. Abordagem teórica e experimental de vigas de madeira com alma em chapa de compensado. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: EBRAMEM, 1998. CD Rom.
- SANTOS, A.M.L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em I pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado.** 2008. 94p. (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- SANTOS, A.M.L.; DEL MENEZZI, C.H.S.; BORTOLETTO JR., G.; FERRAZ, J.M.; SOUZA, E.; COSTA, M.A. Resistência e rigidez de três tipos de emendas coladas em painéis de lâminas paralelas (LVL). In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 5, 2008, Brasília. **Anais...** Brasília, 2008. p.394-400.

SILVA, C.C.; PLETZ, E.; MOURA, J.D.M. Emendas em vigas de perfil I de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: EBRAMEM, 2008. CD Rom.

STAMATO, G.C.; CALIL JR., C. Dimensionamento de estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 2000. CD Rom.

SZÜCS, C.A.; PRADA, O.J. Pré-fabricação de componentes em madeira: viga composta com seção I. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 2000. CD Rom.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook: wood as engineering material.** Washington, 1999. 473p.

WILLIAMSON, P.E. **APA engineered wood handbook.** New York: McGraw-Hill, 2002. 946p.

Recebido em 06/01/2009

Aceito para publicação em 10/06/2009

