Diafragmas horizontais de piso em madeira, confeccionados com chapas de OSB e vigas I, submetido ao carregamento vertical

Altevir Castro dos Santos

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Rua Universitária, 2069, 85814-110, Cascavel, Paraná, Brasil. E-mail: altevir@unioeste.br

RESUMO. Este trabalho aborda construções em madeira sob a ótica de sistemas com estruturas leves; apresenta análise computacional por meio de modelagem pelo método de elementos finitos de diafragmas de piso e vigas I, submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos. O objetivo geral é avaliar a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais, construídos em Sistemas Leves de Madeira, quando submetidos a ações verticais. As análises foram realizadas por meio do programa computacional SAP2000 e foram avaliadas as influências dos seguintes parâmetros: espaçamento entre vigas que constituem os elementos de ossatura do diafragma horizontal e o espaçamento entre pregos de fixação do contrapiso, composto por chapas de OSB – *Oriented Strand Board*. Ao final do trabalho, comparam-se os resultados obtidos a partir das análises numérica e teórica, e são apresentadas algumas conclusões.

Palavras-chave: viga-I, estruturas em madeira, diafragmas de madeira, método de elementos finitos, piso em OSB.

ABSTRACT. Wood light-frame floor diaphragms, made with OSB panels and I-joists, subjected to vertical loads. Wood light-frame floor diaphragms, made with OSB panels and I-joists, subjected to vertical loads. This work is focused on lightweight wood-frame constructions, and presents a finite element modeling of floor diaphragms and wood I-joists subjected to four-point bending. It presents the results of experimental tests on wood I-joists subjected to vertical loads. The main goal of this research is to evaluate the resistance and rigidity of wood light-frame floor diaphragms, when subjected to monotonic vertical forces acting in the plane of the floor. The analyses were performed using the SAP2000 computer program and tested with diferent constructive arrangements, and the influence of the following variables were examined: distance between wood I-joists, and distance between nails around the perimeter of the OSB boards. Finally, a comparison between analytical and numerical results is performed.

Key words: I-joists, timber structure, wood diaphragm, finite element model, OSB diaphragm.

Introdução

Os diafragmas horizontais, em estruturas leves de madeira, têm como principal composição estrutural os múltiplos elementos de viga em paralelo. Desde o início do século passado, piso de tábua corrida tem sido usado nos EUA para distribuir as cargas verticais sobre as vigas da ossatura, mas, durante os últimos 40 anos, as chapas de madeira reconstituídas têm substituído o piso de tábuas quase que completamente. Cintrafor (1998) avalia que, em 1995, o mercado de painéis estruturais nos Estados Unidos da América estava distribuído em: 45,5% de OSB (*Oriented Strand Board*), 44% de madeira compensada nacional e 10,5% madeira compensada ocidental, destacando-se que, desde 1980 o OSB vem apresentando custos menores do que a madeira compensada por espessura equivalente.

Nesse país, diafragmas horizontais de piso, em madeira, foram projetados por muito tempo, considerando os elementos de viga da ossatura agindo independentemente, com propriedades semelhantes a vigas isoladas. Esta concepção assume que as chapas empregadas como contrapiso apresentam somente a função de transferir cargas para as vigas isoladas, sem considerar sua contribuição para o acréscimo da resistência e rigidez final da estrutura como um todo.

Essa suposição desconsiderava os fatores de interação entre os materiais, que são capazes de afetar a rigidez e deformação da estrutura final de piso; fato aceitável para a época, uma vez que os procedimentos de cálculo não dispunham de modelos mais modernos de projeto, capazes de

considerar o emprego de novos materiais e métodos construtivos. Porém, estudos posteriores revelaram que tais fatores trazem ganhos ao desempenho.

Segundo Sherwood e Moody (1989), a *National Association of Home Builders* observou 13% de aumento na rigidez de diafragmas de piso, com o emprego de contrapiso de chapas compensadas pregadas e aumento de 38%, quando utilizado contrapiso de chapas de madeira compensada, com ligação pregada e colada aos elementos da ossatura. Williston e Abner (1962) *apud* Sherwood e Moody (1989), observaram que a flecha real e a calculada para diafragmas de piso são, em média, 40% menores por causa dos efeitos proporcionados pela interação das chapas de contrapiso com elementos que compõem a estrutura do diafragma de piso. Pesquisas desta natureza têm demonstrando que a ação combinada dos elementos de piso pode proporcionar aumentos significativos ao desempenho do diafragma de piso.

No entanto, Polensek *et al.* (1972) *apud* Sherwood e Moody (1989), testaram 44 diafragmas de piso, observando aumento de rigidez na ordem de 15 a 104%, e ressaltam que a grande variabilidade de valores observados segue a variabilidade natural dos elementos de madeira. Assumir que todo elemento de viga da ossatura apresenta propriedades iguais é ignorar a variabilidade natural da madeira como material de construção. Assim, a propriedade das chapas de contrapiso em minimizar as diferenças entre deflexões das vigas da ossatura, quando submetidas a cargas uniformes e à habilidade em distribuir cargas (quando as vigas estão sujeitas a cargas concentradas ou apresentam grande variação de propriedades mecânicas) é atualmente uma importante consideração para avaliação do desempenho de diafragmas de piso composto por vigas pré-fabricadas de madeira.

Ações verticais

As Normas e Códigos Norte-americanos para piso, geralmente, declaram limites de deslocamento vertical como exigências de desempenho e não são explícitas quanto ao tempo de duração da carga aplicada. Um limite de flecha vertical estática de 1/360 do vão é usado na maioria de casos, porém 1/240 do vão é permitido pelo *Basic Building Code* (BOCA), quando não exista nenhum teto de gesso na parte inferior do piso.

No Brasil, a Norma para Projeto de Estruturas de Madeira, NBR-7190/97 (ABNT, 1997), preconiza que, nas estruturas sobre as quais o público em geral pode caminhar, devem ser evitadas vibrações que tragam desconforto aos usuários. No caso particular de pisos sobre os quais as pessoas andem regularmente, como os de residências e escritórios, a menor freqüência natural de vibração dos elementos da estrutura do piso não deve ser inferior a 8 Hz. Para as construções correntes, admite-se que esta condição fique satisfeita se a aplicação do carregamento correspondente à combinação de curta duração não provocar flecha imediata superior a 15 mm.

As principais teorias que diferem da concepção de vigas isoladas para dimensionamento de diafragmas horizontais de piso em sistemas leves de madeira são:

(1) ação composta – considera que vigas da ossatura de piso não agem só como uma viga simples, transmitindo as cargas impostas. A ação combinada das chapas de contrapiso com os elementos da ossatura é similar ao da composição de uma viga T. A chapa de contrapiso vinculada aos elementos da ossatura age como a mesa da viga T, e o elemento de ossatura, como alma. Porém, esta viga composta não pode ser analisada pelas simples equações que definem as propriedades da maioria das seções compostas, porque a conexão das chapas de contrapiso com os elementos de vigas da ossatura é realizada por meio de ligações semi-rígidas, existindo um plano de deslize entre os dois elementos. Também a presença de aberturas das chapas de fechamento do piso rompe a continuidade da mesa, dificultando a análise;

(2) redistribuição de esforços – as chapas de contrapiso executam uma segunda função importante, redistribuindo a carga entre os elementos de viga que compõem a ossatura do diafragma. Este comportamento é observado porque às chapas de contrapiso agem como uma viga larga e muito fina, disposta continuamente sob vários elementos de viga da ossatura, resultando na redução das diferentes flechas individuais destas vigas, que é decorrente da variabilidade de suas propriedades mecânicas. Assim sendo, as chapas de contrapiso propiciam maior enrijecimento na direção perpendicular ao elemento de viga, maior redistribuição de esforços e menor variação na deflexão das vigas de ossatura.

Ação composta

A rigidez e a resistência axial da mesa (chapas de contrapiso) dependem da interação das ações e rigidez de seus componentes: da interação rigidez-deslize e da presença ou ausência de aberturas da mesa na direção do vão das vigas da ossatura. Se as chapas de contrapiso forem coladas (ligação rígida) aos elementos da ossatura e não houver nenhuma abertura, o comportamento

está completamente composto e suas propriedades poderão ser calculadas como uma viga T por uma análise simples da seção equivalente.

Se não houver nenhuma conexão entre chapas de contrapiso e vigas da ossatura, a ação dos dois elementos é analisada como membros independentes quando carregadas. A contribuição das chapas de contrapiso, normalmente, será desprezível em comparação aos elementos de viga da ossatura.

O estudo capaz de avaliar a condição intermediária desses dois extremos é o caso prático mais interessante e de maior complexidade matemática. Quando são utilizadas ligações mecânicas por meio de pregos e/ou parafusos, para fixação das chapas de contrapiso na ossatura, existe certo grau de deslizamento entre a interface piso-ossatura. A rigidez desta ligação é definida em função da densidade de pregos e/ou parafusos, e do diagrama tensão/deformação do respectivo elemento de ligação (prego ou parafuso). Embora a relação entre carga/deslocamento não seja linear para a maioria dos elementos mecânicos de ligação, a maioria das análises assume uma relação linear.

Estudos realizados por Santos (2005) demonstraram que o desempenho das ligações pregadas entre madeira maciça e chapas de madeira reconstituída é um parâmetro fundamental na modelagem de diafragmas de piso em sistemas leves em madeira. O comportamento estrutural dos diafragmas de piso está diretamente relacionado ao desempenho individual de cada ligação pregada, que trabalha essencialmente à solicitação lateral. Nesta situação, a ligação apresenta comportamento não-linear, o que determina comportamento igualmente não-linear do diafragma como um todo.

Redistribuição de esforços

As chapas de contrapiso, dispostas na direção perpendicular ao vão do piso, agem como uma fina viga contínua que atravessa, apoiando-se sobre os elementos da ossatura. Isto tem sido suficiente para dobrar a eficiência das vigas da ossatura na transmissão de esforços de carregamento para os apoios (Sherwood e Moody, 1989).

As chapas de contrapiso, disposto na direção perpendicular ao vão do piso, também têm um efeito importante no desempenho global do diafragma de piso, uma vez que as propriedades mecânicas dos elementos da ossatura variam com a variabilidade natural da madeira. Se as vigas da ossatura (ou vigas T compostas) agissem independentemente umas das outras, consideráveis diferenças aconteceriam nas deflexões individuais dos membros. Na realidade, as chapas de contrapiso agem como um elemento de distribuição que dirige porções mais altas da carga total para as vigas mais rígidas (e normalmente mais resistentes) e uma menor parte para as mais fracas. Este fenômeno tende o cálculo das vigas para um valor médio de resistência, reduzindo-se os desvios e resultando em menor variabilidade. Esta redistribuição de carga também é benéfica à resistência final do diafragma de piso, porque a viga mais fraca e, freqüentemente, a menos rígida dirige a carga para os elementos mais rígidos de sua proximidade.

A ação composta e a redistribuição de esforços acontecem simultaneamente porque dependem do mesmo elemento estrutural que são as chapas de contrapiso. Assim, o objetivo duplo do incremento da rigidez, por ação composta e redução da variabilidade por redistribuição de esforços, conduz a demandas contraditórias. Projetistas terão que levar isso em conta, especificando materiais e considerando novas práticas de construção.

Atualmente, conforme serão demonstradas, neste trabalho, análises mais sofisticadas são providas por meio de modelos computacionais que consideram o efeito da ação composta e redistribuição de esforços e demais interações de todos os elementos constituintes da estrutura que compõem a ossatura do piso, quando sujeitos a carregamentos verticais e horizontais.

Material e métodos

Ensaios preliminares

As propriedades mecânicas do OSB, utilizadas neste trabalho, foram obtidas por meio de ensaios, realizados por Dias *et al.* (2004). O módulo de elasticidade na direção vertical é de 4840 MPa, e o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) é de 1820 MPa.

As propriedades mecânicas do Pinus foram obtidas por meio de ensaios descritos no Anexo B, da NBR-7190/1997 – Projeto de Estrutura de Madeira. O módulo de elasticidade longitudinal (E) é de 12600 MPa, e adotou-se a relação E:G $\approx$ 14:1 (Bodig e Jayne, 1992), para o módulo de elasticidade transversal (G) de aproximadamente 900 MPa.

O comportamento da rigidez e resistência das ligações realizadas com pregos anelados da série pneumática 2,7 x 70 (ϕ = 2,7 mm; L = 70 mm), utilizados nos modelos computacionais, é apresentado por Santos *et al*. (2004).

Ensaio das vigas

A confecção das vigas-I, com 2,5 ms de comprimento, foi realizada de forma artesanal, empregando-se mesas, em madeira de *Pinus sp.,* e alma em OSB – *Oriented Strand Board*, com seções demonstradas na Figura 1, conforme metodologia apresentada por Santos (2005).

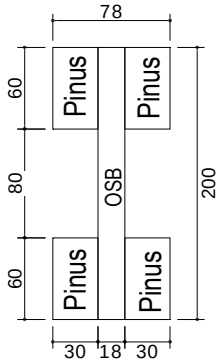

Figura 1. Seção transversal das vigas-I (dimensões em mm).

A capacidade de resistência e os módulos de elasticidade das vigas-I foram determinados experimentalmente por meio de ensaios à flexão, com arranjo a quatro pontos, apoios espaçados de 210 cm, e aplicadores de carga posicionados a 70 cm dos apoios, conforme ilustrado na Figura 2.

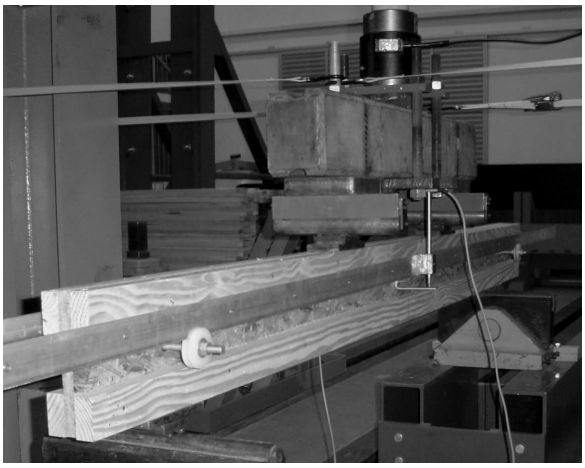

Figura 2. Arranjo experimental dos ensaios a quatro pontos.

Análise teórica das vigas

A avaliação teórica desse tipo de viga-I é apresentada por Lima *et al.* (2004), que emprega metodologia proposta por La Rovere (1998). A metodologia substitui a seção transversal, composta por materiais heterogêneos, em uma seção equivalente de material homogêneo. Assim, a flecha teórica das vigas pode ser determinada pelo princípio dos Trabalhos Virtuais considerando os efeitos do momento fletor e dos esforços cortantes por meio da seguinte formulação:

$$\delta = \delta_F + \delta_C = \int_L \frac{M\overline{M}}{EI_H} ds + \int_L \eta \frac{Q\overline{Q}}{GA_H} ds \qquad (1)$$

em que:

I_H = inércia da seção homogeneizada;
A_H = área da seção homogeneizada.

Modelo numérico

O programa computacional SAP2000-Nonlinear foi empregado para desenvolver o modelo numérico por meio do método dos elementos finitos, com formulação não-linear. Os barrotes de Pinus sp., que correspondem às mesas das vigas, foram discretizados por elementos sólidos; a alma das vigas e o painel em OSB, por elementos de placas tipo "shell" e os pregos das ligações por elementos de molas com propriedades elásticas multilineares. A condição de contorno empregada restringiu os deslocamentos horizontais da cabeceira das vigas, os modelos ajustaram pregos espaçados de 105 e 210 mm e vigas espaçadas de 40 e 60 cm.

Para análise das vigas isoladas, empregou-se o modelo ilustrado na Figura 3 e para análise do comportamento dos pisos, empregaram-se modelos semelhantes ao ilustrado na Figura 4.

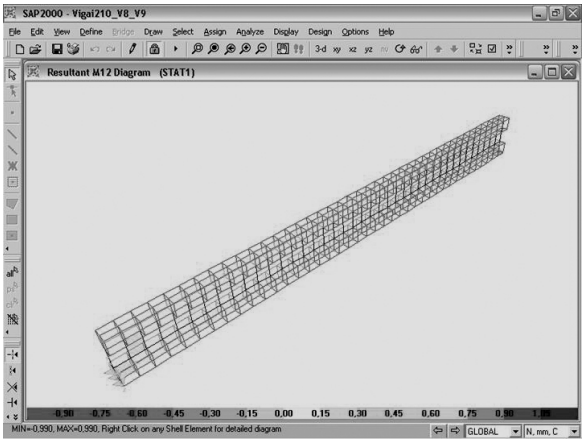

Figura 3. Discretização do modelo empregado para análise de vigas isoladas.

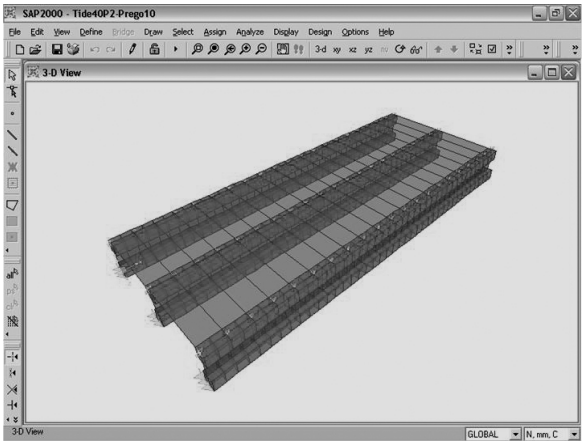

Figura 4. Discretização do modelo com pregos espaçados de 105 mm e vigas de 40 cm.

Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios experimentais das vigas-I foram utilizados para avaliar o modelo numérico desenvolvido por meio do programa computacional SAP2000-Nonlinear. A Tabela 1 apresenta os valores experimentais de carga máxima de ruptura ($F_{máx)}$ e flechas máximas ($\delta_{exp.}$) no meio do vão para as vigas ensaiadas e a flecha teórica ($\delta_{Teórico}$), obtida por meio da equação (1).

Tabela 1. Comparativo entre valores experimentais e teóricos das vigas-I.

Viga	$F_{máx}$ (KN)	$\delta_{exp.}$ (mm)	$\delta_{Teórico}$ (mm)
1	53,63	14,75	18,94
2	45,83	16,18	16,19
3	64,74	22,85	22,86
4	49,88	19,95	17,62
5	49,16	15,62	17,36
6	51,32	15,63	18,12
7	68,53	22,48	24,20
8	61,80	19,94	21,83
9	45,32	18,69	16,01
10	50,61	16,40	17,87
11	58,91	20,50	20,81
12	49,32	18,05	17,42
Média	54,09	18,42	19,10
D.Padrão	7,60	2,75	2,68
C.V. (%)	14,04	14,95	14,04

Observa-se, na Tabela 1, diferentes deflexões individuais dos elementos de viga; a dispersão dos resultados pode ser explicada pela variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais empregados para sua confecção. Variações entre valores experimentais e teóricos são observadas pelo mesmo motivo.

O valor do deslocamento máximo, calculado pelo modelo computacional ilustrado na Figura 3, e desenvolvido para descrever o comportamento das vigas-I isoladas, é igual a 20,81 mm, quando empregadas características mecânicas descritas anteriormente, por meio de ensaios preliminares e, valor médio da carga de ruptura, apresentado na Tabela 1.

A análise das vigas empregadas, como elementos de ossatura dos diafragmas de piso, foi realizada por meio do modelo computacional ilustrado na Figura 4 e seus resultados são apresentados na Figura 5. Observa-se que a flecha máxima no meio do vão é influenciada pela densidade de pregos e o espaçamento entre vigas. Nesta Figura, a espessura das chapas de OSB, empregadas como contrapiso, é mantida constante e igual a 18 mm. Embora reconhecidas, as influências de diferentes espessuras não foram consideradas por causa do vão proposto para análise neste trabalho.

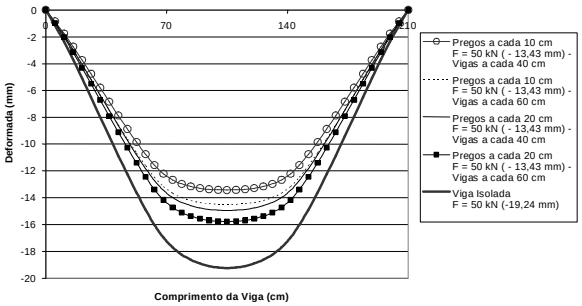

Figura 5. Influência da densidade de pregos e espaçamento das vigas na deformada.

Observa-se, na Figura 5, para um carregamento de 50 kN, que o emprego de vigas espaçadas de 40 cm e ligadas ao contrapiso a cada 10,5 cm por meio de pregos, apresentou valores de flechas centrais 30% inferiores aos valores se calculadas como vigas isoladas. Para a mesma densidade de pregos, esta diferença reduz-se para 24,6%, quando as vigas são espaçadas de 60 cm.

Observa-se também, na Figura 5, para um carregamento de 50 kN, que o emprego de vigas espaçadas de 40 cm e ligadas ao contrapiso a cada 21 cm por meio de pregos, apresentou valores de flechas centrais 22,3% inferiores aos valores se calculadas como vigas isoladas. Para a mesma densidade de pregos, esta diferença reduz-se para 18%, quando as vigas são espaçadas de 60 cm.

A análise das vigas adjacentes à viga que recebe o carregamento, ilustrado na Figura 4, também foi calculada por meio do modelo computacional, e seus resultados são apresentados na Figura 6.

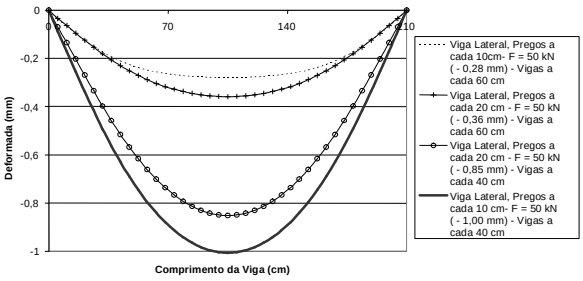

Figura 6. Influência da densidade de pregos e espaçamento das vigas na deformada das vigas adjacentes à viga que recebe o carregamento.

Comparando-se as flechas no meio do vão das vigas adjacentes ao carregamento, (Figura 6), com os valores ilustrados na Figura 5 para as vigas centrais que recebem o carregamento, pode-se verificar que: para um carregamento de 50 kN, a flecha no meio do vão das vigas adjacentes representou 7,4% dos valores das flechas observadas para as vigas centrais, quando empregadas vigas espaçadas de 40 cm e

ligadas ao contrapiso a cada 10,5 cm por meio de pregos. Para o mesmo espaçamento entre vigas, esta diferença reduz-se para 5,7% quando as vigas são ligadas ao contrapiso a cada 21 cm por meio de pregos. Para o carregamento em estudo e vigas espaçadas de 60 cm, a flecha no meio do vão das vigas adjacentes representou 2,3% dos valores das flechas observadas para as vigas centrais, quando empregadas ligações ao contrapiso a cada 10,5 cm por meio de pregos. Para o mesmo espaçamento entre vigas, esta diferença reduz-se para 1,9%, quando as vigas são ligadas ao contrapiso a cada 21 cm por meio de pregos.

Conclusão

Análises de vigas que compõem os elementos de ossatura dos diafragmas horizontais de piso são influenciadas, entre outros fatores, pelo espaçamento entre as vigas e a densidade de ligações pregadas, utilizadas para fixação das chapas de contrapiso. O dimensionamento destes elementos, supondo agirem independentemente, com propriedades semelhantes a vigas isoladas, desconsidera os efeitos das interações de todos os elementos constituintes do sistema estrutural de piso, capaz de conferir maior resistência e rigidez à estrutura como um todo.

As análises desenvolvidas nesse trabalho demonstraram que a flecha real e a calculada para as vigas individuais, que compõem o diafragma de piso, apresentam reduções que variam de 18 a 30%, quando comparadas com valores calculados para vigas isoladas. A maior diferença corresponde ao emprego de vigas espaçadas de 40 cm, com pregos fixados a cada 10,5 cm; esta diferença é reduzida até 18% com emprego de vigas espaçadas de 60 cm e pregos fixados a cada 21 cm.

O emprego de análise numérica, por meio do Método de Elementos Finitos conduz a resultados mais precisos para o dimensionamento deste tipo de estrutura, e seu emprego poderá representar maior economia e confiabilidade na execução de edificações em sistema leve em madeira.

Referências

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Norma NBR-7190*: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites.* Malabar: Krieger, 1992.

CINTRAFOR-Center for International Trade in Forest Products. *Cintrafor News,* v. 13, n. 1, [S.l.: s.n.], 1998. Disponível em: <*http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/nltr/nltr0698.htm#WT/EWP*>. Acesso em: 11 nov. 2002.

DIAS, G.L. *et al.* Determinação de propriedades mecânicas do OSB. *In*: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p. 51.

LA LOVERE, H.L. Aplicações do método de homogeneização da seção a vigas de madeira laminada colada. *In*: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: EdUFSC, 1998. v. 1, p. 391-400.

LIMA, A.L. *et al.* Análise de vigas I em madeira com mesa em pinus e alma em OSB. *In*: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p. 394.

SANTOS, A.C. *et al.* Avaliação experimental das ligações pregadas entre chapas de OSB e madeira de *pinus* quanto à solicitação lateral. *In*: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: EdUFMT, 2004. p. 103.

SANTOS, A.C. *Pisos em sistema leve de madeira sob ação de carregamento monotônico em seu plano*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SHERWOOD, G.E.; MOODY, R.C. *Light-frame wall and floor systems*: analysis and performance. [S.l.: s.n.]. 1989. Disponível em: <*http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr59.pdf*>. Acesso em: 10 jun. 2002.

Received on April 17, 2006.
Accepted on June 11, 2007.