

Sistema estrutural de piso em madeira composto de chapas de OSB e vigas I

Structural system of wood floor made with OSB panels and I-joists

Altevir Castro dos Santos
Carlos Alberto Szücs

Resumo

O objetivo geral é avaliar a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais, construídos em Sistemas Leves de Madeira, quando submetidos ao carregamento monotônico em seu plano. Foram ensaiados protótipos em escala real (2,50 m × 5,00 m) com diferentes arranjos construtivos compostos de madeira e chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) produzidas no Brasil. Avaliaram-se a influência de dispositivos enrijecedores entre vigas – que constituem a ossatura do diafragma horizontal –, a rigidez das ligações e o efeito do espaçamento entre pregos na rigidez do conjunto. Dos ensaios realizados conclui-se que o emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento do número de pregos de fixação no perímetro das chapas, acréscimo este responsável pelo aumento da resistência e da rigidez dos diafragmas.

Palavras-chave: Estruturas em madeira. Diafragmas de madeira. Sistema plataforma. Edificações em madeira. Piso em OSB.

Abstract

The main goal of this research work is to evaluate the strength and stiffness of wood light-frame floor diaphragms, when submitted to monotonic lateral forces acting on the plane of the floor. Real scale prototypes (2.50 m × 5.00 m) were tested, using different constructive arrangements, and the influence of the following variables were examined: blocked vs. unblocked diaphragms, stiffness of the nailed joints between I-joists and sheathing; and distance between nails along the perimeter of the OSB boards. The tests indicated that the blocked floor diaphragms demands nailing the whole perimeter of the boards, thus increasing its strength and stiffness.

Keywords: *Timber structure. Wood diaphragm. Platform frame. Wood frame construction. OSB diaphragm.*

Altevir Castro dos Santos
Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas
Universidade Estadual do Oeste
do Paraná
Rua Universitário, 2069,
Campus Cascavel
Cascavel - PR - Brasil
CEP 85819-110
Tel.: (45) 3220-3258
E-mail: altevir@unioeste.br

Carlos Alberto Szücs
Departamento de
Engenharia Civil, Centro
Tecnológico
Universidade Federal de Santa
Catarina
Campus Trindade
Caixa Postal 476
Florianópolis - SC - Brasil
CEP 88040-900
Tel.: (48) 3721-9546
E-mail: caszucs@gmail.com

Recebido em 18/06/09
Aceito em 07/08/09

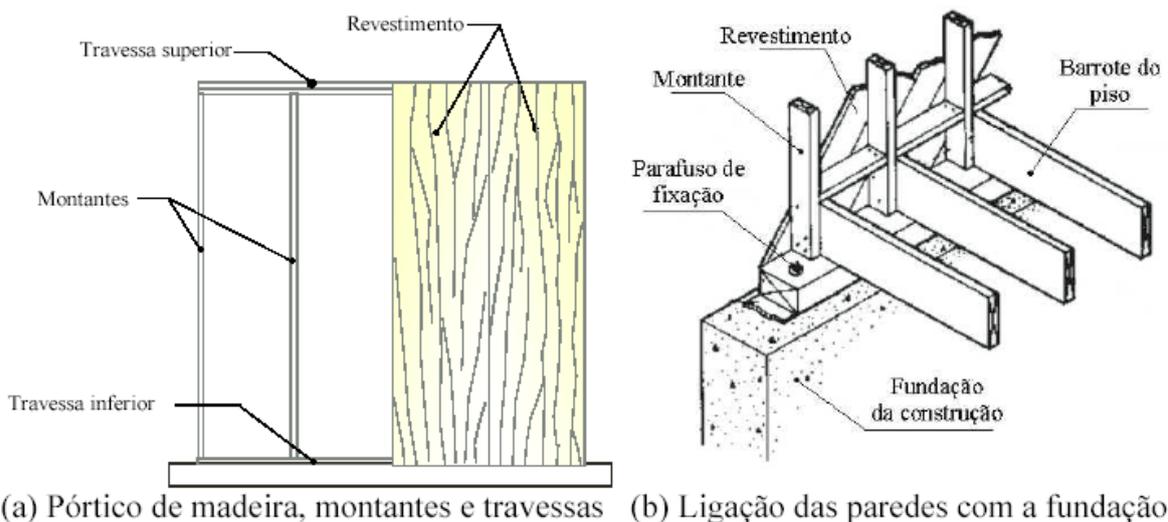
Introdução

A madeira é o material que requer menor aporte energético e um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil. Oferece vantagens consideráveis, entre as quais, para uso estrutural, destacam-se: baixo custo da mão de obra decorrente da rapidez de execução; elevada resistência mecânica em relação ao peso reduzido; boa resistência ao fogo; considerável capacidade para suportar sobrecargas de curta duração, como, por exemplo, da ação do vento; e custo reduzido, levando-se em conta o longo período de utilização do material.

No Brasil, a casa de madeira sempre esteve associada ao uso de técnicas ultrapassadas que remontam ao princípio de nossa colonização, um produto destinado às classes sociais de menor poder aquisitivo ou como segunda moradia (do tipo casas de praia e/ou campo) para a população de nível econômico mais elevado. Isso se deve, de modo geral, a um desconhecimento generalizado das características da madeira e ao atraso tecnológico das indústrias do setor, que acabam por desvalorizar o material e por enquadrá-lo como edificação de pouco conforto e durabilidade. Essa realidade tem levado os consumidores a preferir, mesmo os de menores níveis econômicos, casas de alvenaria. Em países como Japão, Estados Unidos, Canadá e do norte da Europa, a casa de madeira supera o conceito de edificação não perene, pois se alcançou um alto grau de desenvolvimento tecnológico desse tipo de edificação, que não deixa

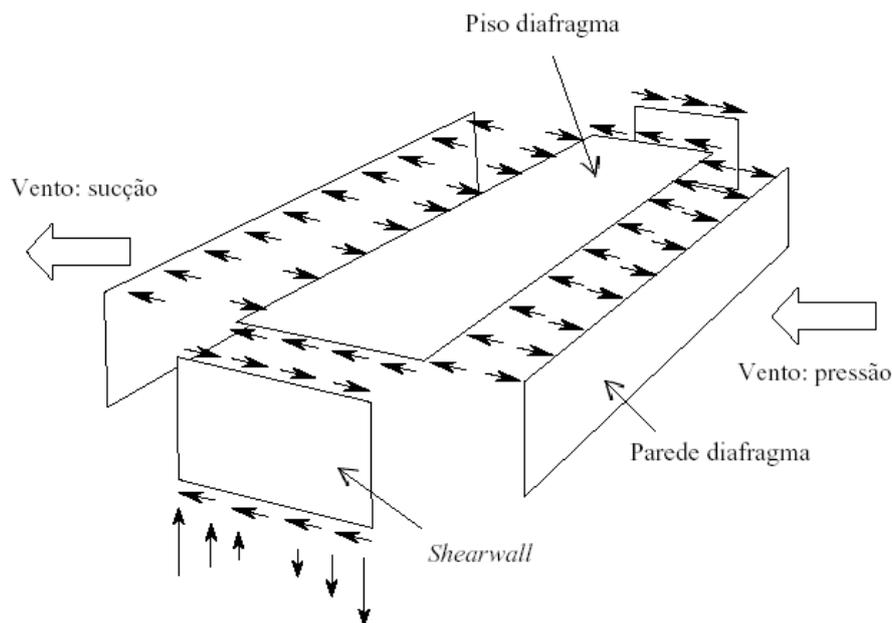
nada a desejar em relação às casas de alvenaria tradicionais.

Nesses países, o sistema construtivo com estruturas leves de madeira é bastante difundido. Essa técnica utiliza basicamente painéis estruturados com montantes de madeira de pequenas dimensões na seção transversal, geralmente pouco espaçados, formando um quadro sobre o qual é colocado um fechamento de chapas de madeira reconstituída e/ou gesso cartonado, apresentando considerável economia de tempo, além da praticidade na execução e na manutenção das instalações elétricas e hidráulicas. O sistema é formado basicamente por painéis estruturados de paredes e de piso. As paredes portantes, conforme ilustrado na Figura 1, são confeccionadas a partir de montantes verticais que possuem, geralmente, uma seção transversal de 38 mm de espessura e profundidade determinada pela espessura do isolamento térmico, na maioria das vezes de 140 mm. As paredes internas não necessitam desse tipo de isolamento e, por isso, sua profundidade é usualmente de 90 mm. Os montantes suportam as solicitações verticais dos pisos e cobertura e são responsáveis pela rigidez transversal dos painéis estruturados. As chapas de madeira colocadas como fechamentos são fixadas aos montantes com pregos espaçados adequadamente, de modo a prevenir a flambagem desses elementos estruturais (EINSFELD; PACHECO, 2000).



Fonte: Veloso e Martinez (2002)

Figura 1 - Constituição Básica da Parede Estrutural (*Shearwall*)



Fonte: Einsfeld e Pacheco (2000)

Figura 2 - Ação do vento nos painéis estruturados

Chapas de revestimento em madeira recomposta servem, também, para compor a estruturação do painel, que se comporta como um diafragma de parede com significativa rigidez em seu plano. A chapa de revestimento interno das paredes externas bem como a das duas faces das paredes internas podem ser realizadas com o emprego de placas de gesso. Embora as placas de gesso não sejam consideradas portantes, elas possuem rigidez suficiente para contribuir no travamento dos componentes estruturais. A principal utilização desse material é para proteção contra incêndio, além de permitir que se obtenha um acabamento de melhor qualidade nas superfícies internas.

Esse sistema é bastante estável e rígido, pois resiste de modo extremamente eficiente à ação de eventuais solicitações horizontais, como o efeito do vento. A pressão devida ao vento atua nas superfícies de fechamento da edificação e é distribuída para os montantes correspondentes nos painéis estruturados. As reações horizontais necessárias para equilibrar os montantes transformam-se em forças aplicadas nos diafragmas horizontais que formam o piso. As reações requeridas para equilibrar o piso correspondem às solicitações aplicadas nas paredes formadas por painéis estruturados (*shearwalls*), orientadas num plano paralelo à direção do vento. Essas solicitações são levadas às fundações através desses diafragmas verticais, colocados nos vários níveis da edificação,

conforme esquema representativo mostrado na Figura 2.

O presente trabalho teve como propósito principal a inserção, na realidade brasileira, da técnica construtiva de diafragmas de pisos confeccionados em sistemas leves de madeira, por se tratar de um elemento estrutural de fundamental importância para a estabilidade da edificação. Apresenta subsídios para o projeto e execução de diafragmas de piso com emprego de madeira nacional, oriunda do manejo racional de florestas cultivadas, com conectores metálicos do tipo prego, aplicados com ferramenta pneumática. Assim, o objetivo geral foi avaliar a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais quando submetidos ao carregamento monotônico em seu plano.

Considerando a necessidade atual de redução do déficit habitacional brasileiro e o enorme potencial de geração de emprego do setor da construção civil, este trabalho tem, também, o propósito de estudar o potencial de construção de edificações com Sistema Leve de Madeira. Entre as vantagens apresentadas por esse processo construtivo, destaca-se o emprego racional de madeira gerada a partir de florestas plantadas, com enormes benefícios ecológicos e econômicos, além de ser um material orgânico biodegradável proveniente de recurso natural renovável. Outras vantagens desse processo em comparação ao nosso sistema convencional são: industrialização e padronização no processo

construtivo; rapidez de execução; racionalização da mão de obra nas etapas de montagem; menor necessidade de espaço para instalação do canteiro de obras; redução de peso da estrutura e conseqüente economia para as fundações; eliminação de algumas etapas da construção convencional; facilidade de manutenção; e pouco desperdício de material.

Embora esse sistema seja bastante conhecido e empregado em outros países, observa-se que seu dimensionamento está amparado por ensaios em laboratórios, com avaliação e padronização de acordo com o material empregado, uma vez que as características de espécies de madeiras e diferentes tipos de pregos, assim como as técnicas de execução e o grau de industrialização, podem diferenciar em muito o resultado final. Em países como os Estados Unidos o dimensionamento é realizado com o auxílio de tabelas, desenvolvidas a partir da padronização dos elementos construtivos que estão disponíveis no mercado local. Dessa forma, grande parte da literatura disponível sobre o assunto não permite referenciar o projeto desse sistema construtivo para a realidade brasileira. O postulante observará, também, que a literatura internacional apresenta muito poucos trabalhos publicados sobre diafragmas de pisos no sistema plataforma e, em âmbito nacional, poderá verificar que este é o primeiro.

Portanto, há necessidade de estudos teóricos e experimentais para evidenciar tais condicionantes, uma vez que os atuais parâmetros empregados nas edificações em madeira no Brasil não apresentam uma relação direta com a técnica construtiva em questão. Busca-se com este trabalho trazer subsídios técnico-científicos e divulgar o assunto mediante um levantamento bibliográfico sobre a metodologia empregada para projeto e execução dessas edificações, além de apresentar os resultados experimentais e o modelo numérico desenvolvido nesta pesquisa.

Materiais e programa experimental

Ensaio 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 4.840 MPa, e

o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) é de 1.820 MPa.

As propriedades mecânicas do *Pinus* foram obtidas por meio de ensaios seguindo as prescrições da NBR 7190 (ABNT, 1997), Projeto de Estrutura de Madeira. Obteve-se para o módulo de elasticidade longitudinal (E) o valor 11.130 MPa. Para o módulo de elasticidade transversal (G) considerou-se o valor 795 MPa, obtido da relação $G : E \approx 1 : 14$, adotada por Bodig e Jayne (1992).

A relação entre força e deslocamento das ligações entre chapas de OSB e peças de *Pinus* realizadas com pregos anelados da série pneumática 2,7×70 ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) é apresentada por Santos *et al.* (2004).

Ensaio das Vigas

A confecção das Vigas-I com 2,5 m de comprimento foi realizada de forma artesanal, empregando-se mesas em madeira de *Pinus sp.* e alma em OSB (*Oriented Strand Board*), conforme ilustrado na Figura 3, segundo a metodologia e ensaios apresentados por Santos (2007).

Confecção dos protótipos de diafragmas horizontais de piso

A Figura 4 mostra uma vista dos protótipos de diafragma cuja confecção seguiu a seguinte metodologia: confecção de dois banzos com seção de 9 cm de espessura por 8 cm de altura e 500 cm de comprimento; fixação das cantoneiras metálicas nos banzos com pré-marcação da disposição das vigas-I; distribuição e fixação das vigas-I nos banzos; fixação dos enrijecedores, quando empregados, nas vigas-I; e fixação das chapas de OSB nas vigas-I.

Na Figura 5 pode ser observada a produção dos protótipos com emprego dos elementos enrijecedores de *Pinus sp.*, de seção de 5 cm × 7 cm, entre as vigas-I. Tais elementos possibilitam a fixação de pregos entre vãos, nas extremidades das chapas de OSB, utilizadas como fechamento de piso.



Figura 3 - Confeção das vigas-I empregadas como elementos de ossatura



Figura 4 - Vista geral da parte inferior de diafragmas com enrijecedor



Figura 5 - Fixação dos elementos enrijecedores nas vigas-I

Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso

Trabalhos coordenados por California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE), em desenvolvimento pelo Prof. Dr. J. Daniel Dolan e W. Samuel Easterling (2001) para avaliação do desempenho de diafragmas horizontais em madeira, utilizam como referência a norma ASTM E-455 (ASTM, 1998), “*Standard Method for Static Load Testing of Framed Floor and Roof Diaphragm Constructions for Buildings*”.

Considerando que diafragmas são painéis estruturais projetados para transmitir esforços cortantes atuantes em seu plano, os propósitos do método são:

- (a) avaliar a capacidade estrutural do diafragma horizontal sob simulação de carregamento estático; e
- (b) determinar valores representativos da rigidez do diafragma e suas conexões para emprego em uma construção real.

O propósito geral da norma de ensaio é avaliar a magnitude dos esforços cortantes que podem ser suportados pela alma de um diafragma de piso, mediante testes que simularão uma construção em escala real. O método de ensaio esboça procedimentos básicos para a prova de carga estática de construções, com utilização de diafragmas do tipo viga simples ou diafragma em

balanço. Apresenta, ainda, relação de dimensões para ensaios e a organização de detalhes construtivos, bem como procedimentos de carregamento, instrumentação e métodos de avaliação.

Dado o padrão de chapas de madeira reconstituída atualmente encontrado no mercado, a norma em questão especifica uma dimensão mínima de 2,4 m (8 pés) para largura e/ou comprimento do diafragma, para que ele possa conter sistemas de ligação que reproduzam parâmetros reais. No mínimo, dois espécimes deverão ser ensaiados quando existe a necessidade de se determinarem valores representativos de uma construção real. Se o plano do diafragma é assimétrico, o segundo teste será feito com a orientação de espécime invertida com relação à aplicação de força, usada no primeiro espécime. Se os resultados diferirem mais que 10% do valor mais baixo, um terceiro espécime será testado, sendo orientado da mesma maneira que o menos resistente entre os dois testes anteriores. Um valor médio é computado entre dois valores mais baixos dos três corpos de provas ensaiados. O número de ensaio deverá ser incrementado segundo a mesma metodologia, quando está sendo feita uma série de testes para simular uma gama de variáveis.

Variáveis envolvidas na confecção dos protótipos

As variáveis avaliadas nos protótipos são apresentadas na Tabela 1, e os parâmetros fixos, na Tabela 2.

Para a etapa experimental foram confeccionados doze protótipos em escala real (2,50 m × 5,00 m) com diferentes configurações, conforme mostra a Tabela 3.

Para análise dos resultados de ensaios, a configuração 1 representa protótipos confeccionados sem o emprego de dispositivos enrijecedores, e as configurações 2 e 3 são, respectivamente, protótipos confeccionados com emprego de dispositivos enrijecedores vinculados e não vinculados às chapas de fechamento com pregos.

Parâmetros Variáveis	Especificação
(1) Espaçamento entre pregos	100 mm 205 mm 410 mm
(2) Configuração do diagrama	Sem enrijecedores Com enrijecedores Com enrijecedores despregados

Tabela 1 - Parâmetros variáveis para ensaio dos diafragmas horizontais de piso

Parâmetros Variáveis	Especificações
Altura da viga-I	200 mm
Seção das mesas da viga-I	2×(78 mm × 60 mm)
Espessura da alma da viga-I	18 mm
Espaçamento entre eixos das vigas-I	615 mm
Tipo de chapa de fechamento	OSB Home (Masisa) 0,84 × 2,50 m
Espessura da chapa de fechamento	18 mm
Disposição das chapas de fechamento	2 inteiras + (1/2+ inteira+ 1/2) + 2 inteiras
Tipo de prego	2,7 × 70 anelado (pneumático)
Afastamento do prego-borda OSB	20 mm
Dimensões do protótipo	2,50 m × 5,00 m

Tabela 2 - Parâmetros fixos para ensaio dos diafragmas horizontais de piso

Espaçamentos entre pregos	Número de protótipos ensaiados		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
100 mm	-	dois	-
205 mm	Três	três	Dois
410 mm	-	dois	-

Tabela 3 - Número de protótipos ensaiados de acordo com os parâmetros investigados

Instrumentação utilizada no ensaio dos protótipos

Os ensaios experimentais dos diafragmas horizontais foram realizados com o auxílio da laje de reação do Laboratório de Experimentação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, constituído de estruturas metálicas construídas com a forma triangular e dotadas de dispositivos rotativos com ajuste de altura para a contenção dos diafragmas durante os ensaios, conforme mostram as Figuras 6 e 7.

Os dispositivos rotativos mostrados na Figura 7, além de permitir o deslocamento horizontal dos protótipos, também são responsáveis pela contenção vertical deles, uma vez que existe a possibilidade desse deslocamento durante o carregamento. As laterais dos diafragmas necessitaram de guias metálicas para sustentação do protótipo sobre os apoios rotativos, conforme

se observa na Figura 7, permitindo seu deslizamento e realizando sua contenção horizontal. Essas guias metálicas são dotadas de elos de corrente que permitem a articulação e o ajuste às células de carga dos apoios, como mostra a Figura 8.

Observa-se na Figura 8 a disposição das células de carga, utilizadas para leitura das reações de apoio nas extremidades do diafragma e da aplicação da carga central. Para o monitoramento e a aquisição dos valores de deformação e carregamento, empregou-se o sistema “spider 8”, da HBM, conforme exibe a Figura 9.

O monitoramento dos deslocamentos relativos das chapas de fechamento e da flecha máxima do diafragma foi realizado com emprego de transdutores de deslocamento, como apresentado na Figura 10.



Figura 6 - Estrutura de contenção dos diafragmas horizontais de piso



Figura 7 - Dispositivos rotativos da estrutura de contenção



Figura 8 - Disposição das células de carga nos diafragmas horizontais de piso



Figura 9 - Sistema de aquisição de dados empregado no ensaio dos protótipos



Figura 10 - Disposição dos transdutores de deslocamento nos protótipos

Modelo numérico

O programa computacional SAP-2000 v.8 foi empregado para desenvolver o modelo numérico através do método dos elementos finitos com formulação não linear. Os banzos, elementos enrijecedores e vigas foram discretizados por elementos de barra; os painéis, por elementos de placas do tipo “membrane”; e os pregos das

ligações, por elementos de molas com propriedades elásticas multilineares. A condição de contorno empregada restringiu os deslocamentos verticais do diafragma e os deslocamentos horizontais da cabeceira das vigas de extremidade, conforme a configuração da realização dos ensaios. Duas dimensões de malha foram empregadas para permitir a disposição correta dos pregos (100 mm e 205 mm). Quando

da necessidade de utilizar elementos enrijecedores, sua ligação com as barras foi considerada articulada. Ilustrações dos modelos numéricos com elementos enrijecedores e com malhas de 100 mm e 205 mm são representadas nas Figuras 11 e 12 respectivamente.

Resultados e discussões

Ensaio monotônico dos diafragmas horizontais de piso

Os protótipos foram ensaiados à flexão, com aplicação de carga no centro do vão, em conformidade com a Norma ASTM E-455 (ASTM, 1998), conforme descrição apresentada na Seção 2.4.

Inicialmente foi aplicada uma carga prévia de 5.000 N por aproximadamente 1 min, aguardando-se 5 min após a retirada da carga para ajuste dos mecanismos. Após esse período, o ensaio foi conduzido com monitoramento dos

deslocamentos e da taxa de aplicação de carga (3.000 N/min). Incrementos de carga e descarga a cada 5.000 N foram aplicados até o limite de 30.000 N. Após esse valor, apenas um carregamento foi realizado com manutenção da taxa de aplicação de carga até o limite de resistência do protótipo.

Os valores obtidos nos ensaios estão apresentados nas Figuras 13 e 14, cujos resultados são referentes aos protótipos construídos de acordo com a configuração 1, ou seja, sem o emprego de dispositivos enrijecedores, e os resultados referentes aos ensaios dos protótipos construídos, com as configurações 2 e 3, ou seja, com emprego de dispositivos enrijecedores vinculados e não vinculados às chapas de fechamento por meio de pregos respectivamente.

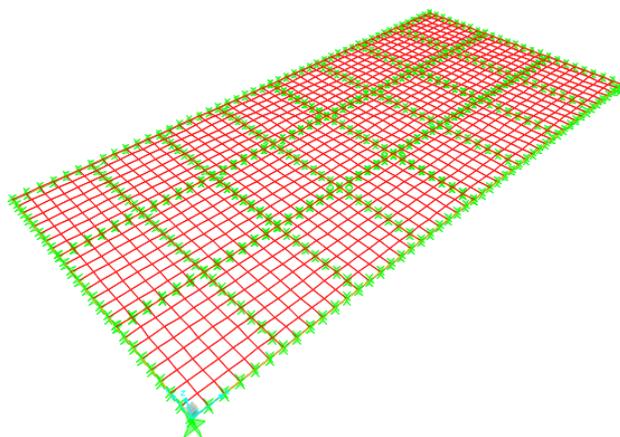


Figura 11 - Modelo numérico desenvolvido com malha de 100 mm

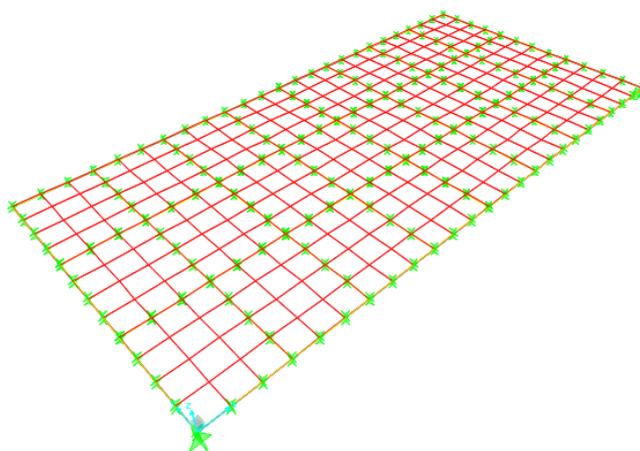


Figura 12 - Modelo numérico desenvolvido com malha de 205 mm

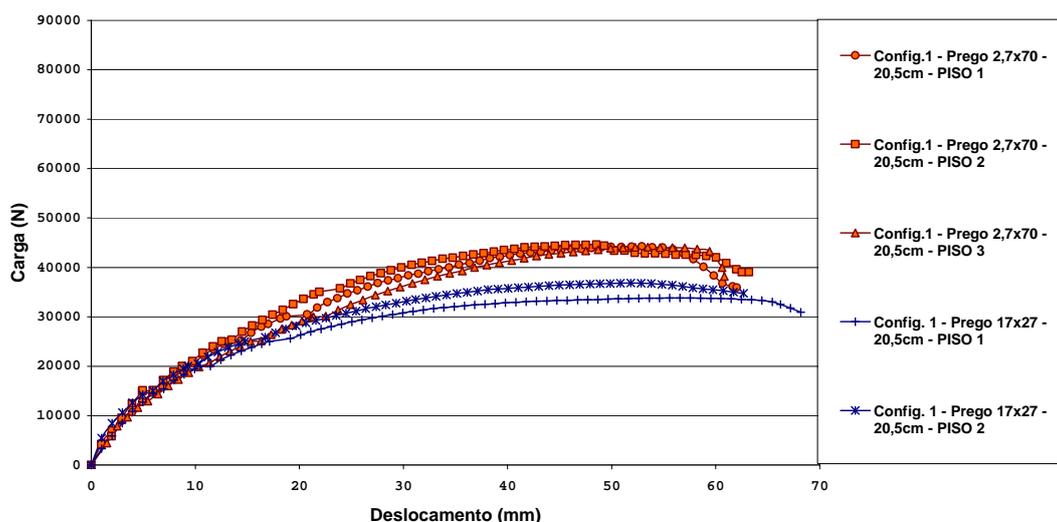


Figura 13 - Resultados dos protótipos com configuração 1 aos ensaios à flexão

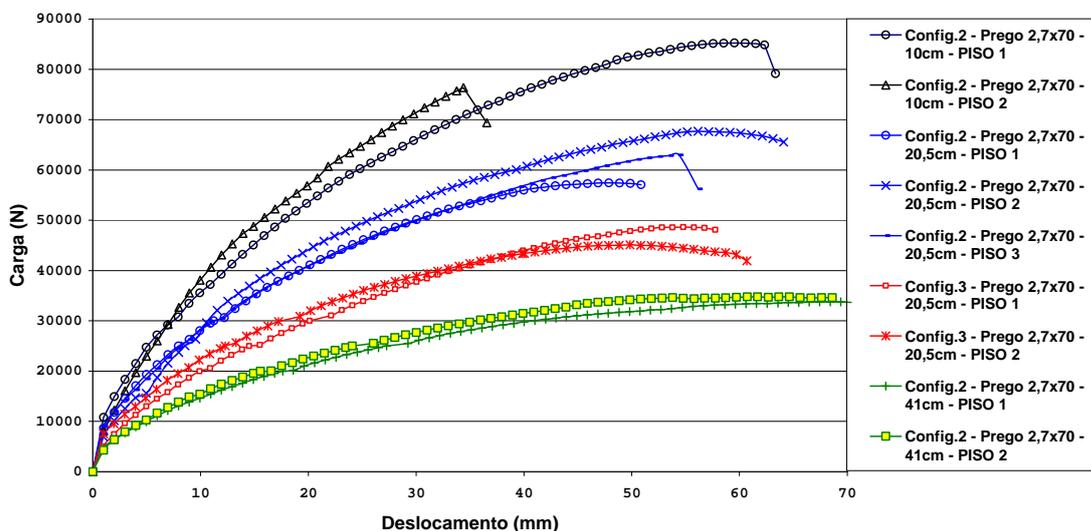


Figura 14 - Resultados dos protótipos com configurações 2 e 3 aos ensaios à flexão

Observa-se na Figura 13 que, até o limite de 20.000 N, o emprego de pregos lisos 17×27 ($\Phi = 3,0$ mm; $L = 62,10$ mm), em vez de pregos anelados 2,7×70 ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) não acarretou grandes alterações na rigidez dos protótipos. Entretanto, conforme ilustrado na Figura 15, observa-se que pregos lisos sofrem arrancamento na fase final dos ensaios, fato não observado quando do emprego de pregos anelados.

Não obstante, a Figura 14 mostra que a resistência e a rigidez dos diafragmas estão diretamente relacionadas ao número de pregos empregados na fixação das chapas de fechamento. Observa-se, também, que os protótipos construídos com a configuração 3

apresentaram desempenho muito similar ao dos protótipos construídos com a configuração 1 para o mesmo tipo de prego, quando confrontadas as Figuras 13 e 14.

As Figuras 16 e 17 permitem ilustrar os deslocamentos relativos entre as chapas de fechamento, observado ao término dos ensaios realizados.

A finalização dos ensaios ocorreu devido ao escoamento das ligações e conseqüente perda da capacidade de resistência dos protótipos, não sendo observada nenhuma ruptura dos elementos de ossatura, conforme pode ser observado nas Figuras 16 e 17.



Figura 15 - Arrancamento dos pregos lisos, observado ao término do ensaio de flexão



Figura 16 - Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão



Figura 17 - Deslocamentos das chapas de fechamento observado ao término do ensaio de flexão

Modelo numérico

No modelo computacional, para caracterizar a rigidez e a resistência das ligações pregadas dos diafragmas horizontais de piso, é adotado um comportamento multilinear para caracterização dos elementos de molas. As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores utilizados para os dois tipos de pregos aplicados na confecção dos protótipos.

As comparações entre os resultados numéricos estimados e os valores experimentais são apresentadas a seguir, sob a forma gráfica, para as diferentes configurações e densidades de prego. Na Figura 18, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 1 e emprego de pregos 17×27 ($\Phi = 3,0$ mm; $L = 62,10$ mm) espaçados a cada 20,5 m.

Na Figura 19, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 1 e emprego de pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 20 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) espaçados a cada 41 cm.

Na Figura 21 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 3 e emprego de pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 22 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da

configuração 2 e emprego de pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) espaçados a cada 20,5 cm.

Na Figura 23 são apresentados os resultados numéricos e experimentais para protótipos confeccionados com as características da configuração 2 e emprego de pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm) espaçados a cada 10 cm.

Observa-se nas Figuras 18 a 23 que o modelo numérico “SAP CURVA INFERIOR”, que emprega o diagrama representativo do limite inferior dos ensaios experimentais das ligações, é o que apresenta uma melhor descrição dos resultados, quando comparado com os valores obtidos mediante ensaios experimentais dos protótipos. Possivelmente, o dispositivo de ensaio utilizado para a caracterização das ligações possa ter causado alguma influência nesses resultados.

Os valores obtidos com ensaios para a caracterização do diagrama representativo do limite superior dos ensaios da ligação dos pregos $2,7 \times 70$ ($\Phi = 2,7$ mm; $L = 70$ mm), embora representem os maiores valores de resistência, são superados pelos valores médios de rigidez. Esse fato é observado nas Figuras 19 a 23, em que o acréscimo do número de pregos promove redução das solicitações individuais deles, trabalhando-se mais na fase inicial do diagrama, conduzindo paulatinamente à superação do diagrama representativo do limite superior pelo diagrama representativo dos valores médios.

Na Figura 23 observa-se a discrepância entre os valores numéricos e os experimentais. Esse fato possivelmente ocorreu devido à ligação das vigas-I aos banzos, uma vez que o modelo numérico às considera rígida e experimentalmente. Observou-se que tais ligações apresentam um deslocamento adicional que não foi contemplado pelo modelo numérico.

17x27 ($\phi = 3,0$ mm; L = 62,10 mm)						
N°	Curva Inferior		Curva Média		Curva Superior	
	Desl. (mm)	Carga (N)	Desl. (mm)	Carga (N)	Desl. (mm)	Carga (N)
1	-20,13	-578,14	-20,09	-746,18	-20,02	-855,93
2	-10,20	-891,70	-15,09	-873,94	-12,04	-1028,49
3	-6,06	-1224,77	-10,15	-1017,24	-8,07	-1232,27
4	-4,07	-1123,93	-6,01	-1236,26	-4,02	-1497,27
5	-2,00	-989,78	-2,04	-1143,82	-2,00	-1420,44
6	-0,54	-846,02	0,53	-978,14	-0,57	-1098,42
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,54	846,02	0,53	978,14	0,57	1098,42
9	2,00	989,78	2,04	1143,82	2,00	1420,44
10	4,07	1123,93	6,01	1236,26	4,02	1497,27
11	6,06	1224,77	10,15	1017,24	8,07	1232,27
12	10,20	891,70	15,09	873,94	12,04	1028,49
13	20,13	578,14	20,09	746,18	20,02	855,93

Tabela 4 - Valores para caracterização das ligações, com pregos 17x27, sob a forma de diagrama multilinear

2,7x70 ($\phi = 2,7$ mm; L = 70 mm)						
N°	Curva Inferior		Curva Média		Curva Superior	
	Desl. (mm)	Carga (N)	Desl. (mm)	Carga (N)	Desl. (mm)	Carga (N)
1	-20,25	-709,21	-20,10	-804,39	-20,09	-1367,02
2	-12,06	-1155,13	-11,04	-1398,46	-17,01	-1624,22
3	-7,01	-1527,22	-6,03	-1722,52	-10,06	-2339,39
4	-4,03	-1385,02	-3,03	-1558,43	-4,04	-1730,46
5	-1,01	-958,83	-1,02	-1180,04	-1,03	-1039,29
6	-0,05	-202,66	-0,05	-470,44	-0,06	-286,61
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,05	2,2,66	0,05	470,44	0,06	286,61
9	1,00	958,83	1,02	1180,04	1,03	1039,29
10	4,03	1385,02	3,03	1558,43	4,04	1730,46
11	7,01	1527,22	6,03	1722,52	10,06	2339,39
12	12,06	1155,13	11,04	1398,46	17,01	1624,22
13	20,25	709,21	20,10	804,39	20,09	1367,02

Tabela 5 - Valores para caracterização das ligações, com pregos 2,7x70, sob a forma de diagrama multilinear

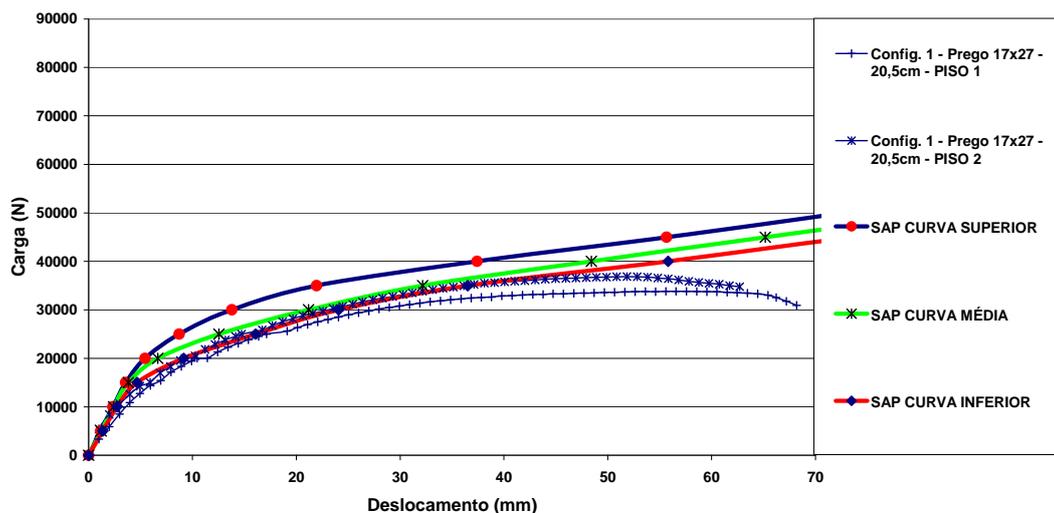


Figura 18 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 17×27 espaçados a cada 20,5 cm

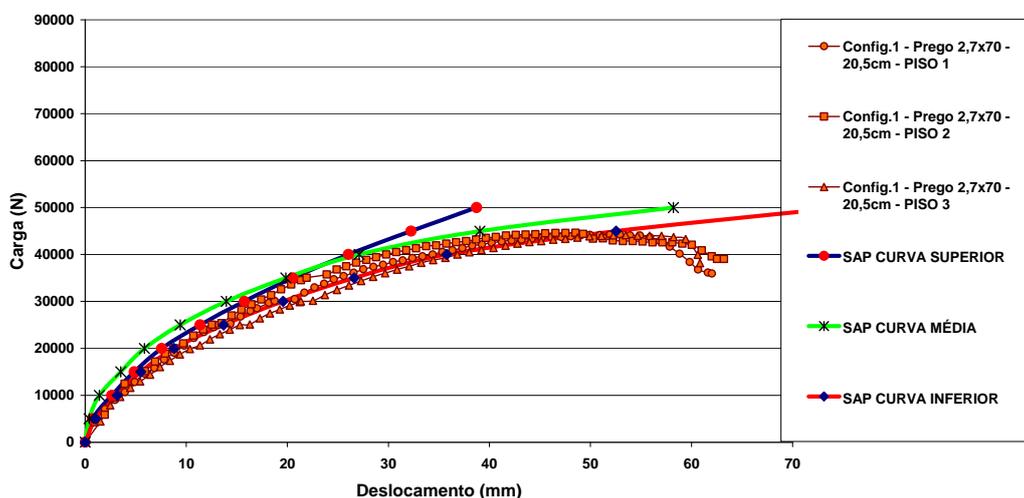


Figura 19 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 1 com pregos 2,7×70 espaçados a cada 20,5 cm

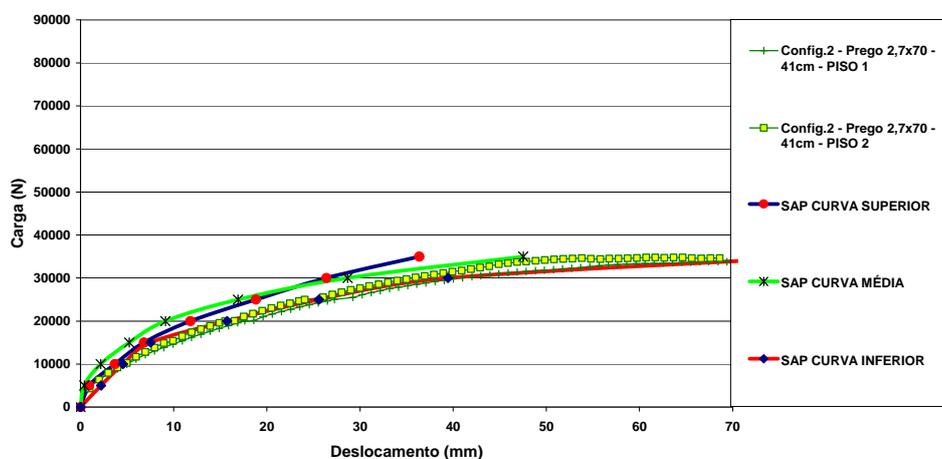


Figura 20 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7×70 espaçados a cada 41 cm

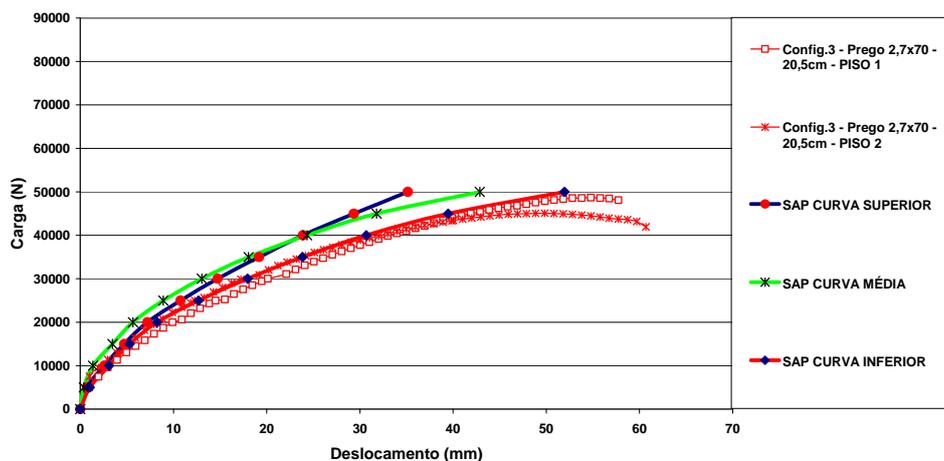


Figura 21 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 3 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm

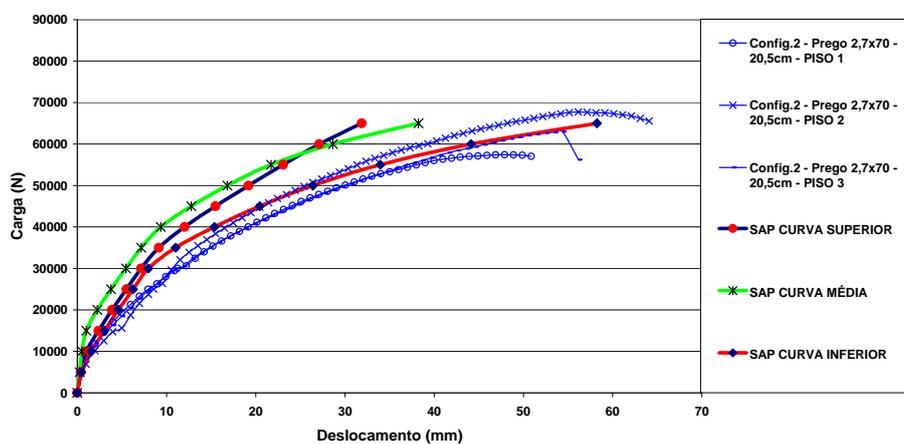


Figura 22 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 20,5 cm

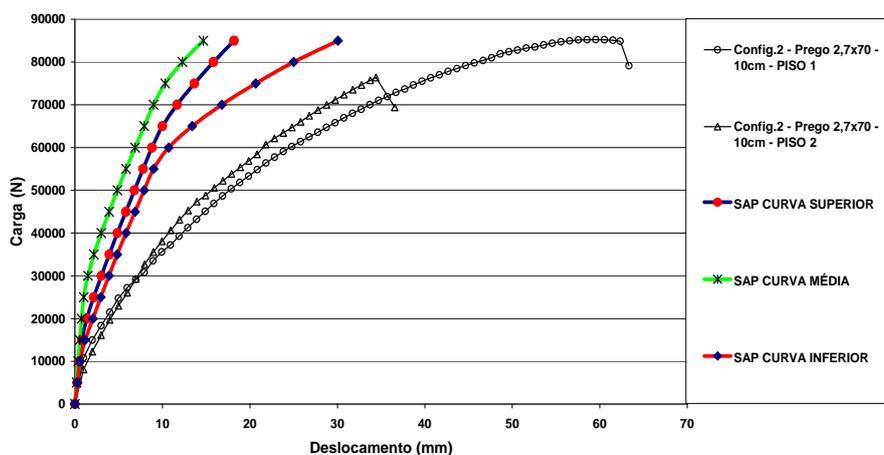


Figura 23 - Resultados numéricos e experimentais para protótipos de configuração 2 com pregos 2,7x70 espaçados a cada 10 cm

Conclusões

O emprego de madeira nacional oriunda de manejo de florestas plantadas, em particular o *Pinus sp.*, demonstrou ser viável não somente do ponto de vista estrutural mas devido a sua adaptação às diversidades na aplicação construtiva. Considerando que este trabalho foi realizado com emprego de material e equipamentos disponíveis no mercado nacional, de forma artesanal, todas as soluções construtivas aplicadas são de possível aplicação em canteiros de obras.

O emprego estrutural de madeira maciça de *Pinus sp.* requer pré-classificação por apresentar elevada variabilidade de suas propriedades mecânicas e necessitar de seleção de peças isentas de defeitos ou presença de defeitos de baixo risco, quando de sua utilização.

Chapas de madeira de *Pinus sp.* reconstituída mecanicamente, em especial o OSB (*Oriented Strand Board*), demonstraram viabilidade para emprego estrutural por apresentarem características físicas e mecânicas mais homogêneas em comparação com a madeira maciça. Conseqüentemente, é um produto com confiabilidade para aplicação estrutural, apresentando também proteção contra ataques de fungos e insetos.

Confecção de vigas-I, com mesas de madeira de *Pinus sp.* e alma em OSB, conforme descrição apresentada neste trabalho, demonstrou ser uma excelente alternativa estrutural de fácil fabricação, fácil transporte e elevada relação entre resistência e peso próprio.

Ligações pregadas realizadas entre chapas de OSB e barrotes de pinos apresentaram resistência média de 1.750 N para pregos anelados de 2,7×70 ($\Phi = 2,7$ mm; L = 70 mm) e 1.250 N para pregos lisos 17×27 ($\Phi = 3,0$ mm; L = 62,10 mm). O distanciamento de 13 mm da borda é suficiente para que não ocorra rasgamento das chapas nesses níveis de carga em chapas de 18 mm de espessura. Os resultados de ensaios desse tipo de ligação apresentam grande variabilidade, devendo-se analisar possíveis implicações ao utilizar valores de limites superiores e inferiores.

O emprego de critérios da Norma ASTM E-455 (1998), para a realização dos ensaios em protótipos, é adequado quando se deseja conhecer a resistência e a rigidez de diafragmas horizontais solicitados lateralmente para empregar no dimensionamento de obras idênticas. No entanto, por esse critério, é possível determinar somente o Módulo de Elasticidade Aparente ao

Cisalhamento, mas não é possível determinar valores decorrentes das parcelas atribuídas aos esforços de flexão do banzo, cisalhamento da alma e deslizamento das emendas.

Os ensaios dos protótipos permitiram estabelecer comparações entre os modelos numéricos computacionais por meio do Método de Elementos Finitos com formulação não linear, gerados no programa SAP-2000.

Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho, pelo Método de Elementos Finitos com formulação não linear, apresentaram deslocamentos compatíveis com os protótipos ensaiados. No entanto, as estimativas mais precisas foram obtidas com o emprego do diagrama que caracteriza os menores resultados, de resistência e de rigidez, observados em ensaios de ligações. Isso demonstra que o dispositivo de ensaio empregado para a determinação da resistência e da rigidez das ligações, possivelmente, influenciou na elevação da média dos valores obtidos.

Dos ensaios realizados conclui-se que a resistência e a rigidez dos diafragmas estão diretamente relacionadas ao número de pregos empregados na fixação das chapas de fechamento. O emprego de dispositivos enrijecedores permite o aumento do número de pregos de fixação no perímetro das chapas. Esse acréscimo é responsável pelo aumento da resistência e da rigidez, não se comprovando a afirmativa de Falk e Itani (1989), que justificam a maior rigidez de diafragmas com elementos enrijecedores em função da armação adicional conferida por esses elementos.

Entre os parâmetros avaliados observou-se que a rigidez do diafragma é significativamente influenciada pela rigidez das ligações e pela densidade de pregos utilizados na fixação das chapas de fechamento.

Recomenda-se, portanto, o emprego de elementos enrijecedores nos projetos de diafragmas horizontais de pisos solicitados lateralmente. Tais elementos são de fácil execução e possibilitam significativa elevação da capacidade resistente, conferindo maior estabilidade ao conjunto devido ao emprego de um maior número de pregos.

Referências

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-455**: standard method for static load testing of framed floor and roof diaphragm constructions for buildings. 1998.

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

DOLAN, J. Daniel; EASTERLING, W. Samuel. **Task 1.4.2: design methodology for diaphragms**. Richmond, CA: California Universities for Research in Earthquake Engineering, 2001.

Disponível em:

<http://www.curee.org/projects/woodframe_project/element1/task_summaries/task_1_4_2.html>.

Acesso em: 13 ago. 2009.

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.

EINSFELD, R. A.; PACHECO, M. Utilização de Painéis Estruturados em Habitações Residenciais de Madeira. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: LaMEM-EESC-USP, 2000. p. 91.

FALK, R. H.; ITANI, R. Y. Finite Element Modeling of Wood Diaphragms. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 3, p. 543-559, 1989.

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. Diafragmas Horizontais de Piso em Madeira, Confeccionados com Chapas de OSB e Vigas I, Submetidos ao Carregamento Vertical. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 119-124, 2007.

VELOSO, L. A. C. M.; MARTINEZ, M. A. B. Modelos Analíticos para a Avaliação do Comportamento Diafragmas de Paredes de Madeira. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FECIV/UFU, 2002. p. 200.